Enrique Angulo Elizari Proceso de fabricación y sistema de medición de sistemas *flexure* para aplicaciones micro-robóticas. jul.-17

Proceso de fabricación y sistema de medición de sistemas flexure para aplicaciones micro-robóticas.

PROYECTO
presentado para optar
al Título de Ingeniería Industrial por

Enrique Angulo Elizari

bajo la supervisión de

Juan Tomás Celigüeta y
Xabier Justo

Donostia-San Sebastián, julio 2017

tecnun
Universidad
de Navarra

tecnun Universidad de Navarra

Proyecto Fin de Grado

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PROCESO DE FABRICACIÓN Y SISTEMA DE MEDICIÓN DE SISTEMAS *FLEXURE* PARA APLICACIONES MICRO-ROBÓTICAS

Enrique Angulo Elizari

San Sebastián, julio de 2017

Pº Manuel Lardizabal, 13. 20018 Donostia-San Sebastián, Gipuzkoa

Tel. 943 219 877 · Fax 943 311 442 · www.tecnun.es

AGRADECIMIENTOS

A pesar de ser las primeras palabras que usted está leyendo, en realidad son las últimas que escribo, y es que cuando algo termina es cuando se valora. Por eso, lo primero que debe leer es: Gracias. No cabe duda de que las primeras palabras de este documento deben ser para aquellas personas que han contribuido en mí de tal forma que me hacen ser quien hoy soy. No sé si son muchas o pocas, pero sí quienes serán por siempre.

La primera mención no puede ser para otras personas que no sean mi familia. Gracias a mis padres y a Edu, quienes siempre han creído en lo que hacía por muy inverosímil o alocado que pareciese. Siempre animando y reforzando para que ninguna oportunidad que la vida me presentaba se me escapase. Da igual cuan locura fuese. Si era bueno, era suficiente motivo para apostarlo todo; aunque eso supusiera no estar cerca de ellos. Son los que, desde pequeño me ayudaron a forjar mi camino y a decidirme qué quería con mi vida, inculcándome unos valores de trabajo, esfuerzo y humildad. Se dice que se predica con el ejemplo, y sin duda en mi casa queda demostrado. Pero conforme uno crece, va viendo que lo que quería de pequeño no es del todo lo suyo y va corrigiendo el rumbo de su vida, hasta llegar a la decisión más importante: "¿Qué estudiaré?" La infancia está llena de inocencia y sueños por cumplir que nunca dejes olvidar. Pero, conforme vas creciendo la vida te va mostrando la realidad. Por eso, a este primer capítulo de mi vida lo llamaré: "Del torero, al ingeniero".

Del torero de aquellos días queda más bien poco, y es que decidí que mi plaza fuera San Sebastián y mi res: la ingeniería. Dejando a mis apoderados ver los toros desde la barrera, sufrir con cada cornada recibida y cantar "olés" a cada pase, decidí tomar la alternativa. En estos momentos, se sabe bien que los nervios son los que abundan, pero todo es más llevadero si tienes a alguien como tú a tu diestra. Los nuevos toreros saltamos al ruedo de Ayete y eso nos cambió por completo. Gracias a todos ellos, sin olvidar a los veteranos que guiaban la lidia. Pero todo torero debe buscar sus propios banderilleros. No costó mucho encontrar a los mejores. Fueron destacando poco a poco y haciéndose hueco en mis faenas. Hablo de Antonio, Íñigo, Fernando, Ricardo, Nacho, Xavier, David, Álvaro, Víctor, Hugo, Toita, Carmen…y un largo etcétera.

Pero todo torero tiene sus mozos de confianza y esos no fallaban. Estos son y serán Juandi y Javi. Las dos Js. Con ellos, simplemente, la conversación nunca acaba. Y esto lo dice todo, porque de las veinticuatro horas del día, veinticinco las pasamos juntos. Cuando abren la puerta grande ellos me llevan en volandas y cuando el toro rasga el traje de luces, los primeros que saltan al ruedo a socorrerme, aun arriesgo de salir malheridos. Juntos toreamos las mejores plazas y hacemos los mejores pases porque ni los miuras nos asustan. A ellos no se les puede decir nada más que: Gracias, muchas gracias. Ya sois de mi familia. Brindemos por todas las faenas que nos quedan por delante.

Y para completar el cartel de la feria, dar las gracias a los directores de proyecto Juan Tomás y Xabi, por las horas dedicadas y la ayuda prestada. A TSR por enseñarme a resurgir de las cenizas y a todas las personas de San Sebastián con las que he colaborado, ya que todos han dejado huella y han ayudado a definir el ingeniero que tras estas palabras se esconde.

De nuevo, GRACIAS a todos y solo falta decir: "Valor, ¡y al toro!".

¡VIVA SAN FERMÍN!

¡GORA SAN FERMÍN!

ÍNDICE

ÍNDICE I

ÍNDICE DE FIGURAS III

ÍNDICE DE TABLAS V

RESUMEN 1

ABSTRACT 3

1. ESTADO DEL ARTE. 5

1.1. LA INSTITUCIÓN. 5

1.2. EL PROYECTO: LOS SISTEMAS FLEXURE. 9

2. ALCANCE Y OBJETIVOS. 17

2.1. ALCANCE. 17

2.2. OBJETIVOS. 18

3. FASES PREDECESORAS. 19

3.1. DISEÑO. 19
3.1.1. Monolithic Cross Pivot. 19
3.1.2. Cross Strip. 20
3.1.3. Notch Hinge. 21
3.1.4. Spring. 22
3.1.5. Bee panel. 23

3.2. SIMULACIÓN. 23
3.2.1. Preparación de la simulación. 24

3.3. RESULTADOS. 28

4. PROCESOS DE FABRICACIÓN. 31

4.1. CENTRO DE MECANIZADO. 32

4.2. RAPID PROTOTYPING. 35
4.2.1. Procesos aditivos. 35
4.2.2. Procesos sustractivos. 41

4.3. ELECTROEROSIÓN. 43

4.4. LITOGRAFÍA. 47
4.4.1. Fotolitografía. 47
4.4.2. Otras litografías. 50

4.5. PROPUESTA. 51

5. SISTEMA DE MEDIDA. 53

5.1. GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS. 53

5.2. PROPUESTA. 57
5.2.1. Monolithic Cross Pivot. 57
5.2.2. Cross Strip. 59
5.2.3. Notch Hinge. 59
5.2.4. Spring. 60
5.2.5. Bee Panel. 61

6. LÍNEAS FUTURAS. 63

7. PRESUPUESTO. 65

8. REFERENCIAS. 69

ANEXO I: PLANOS. 73

ANEXO II: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES. 85

ANEXO III: GLOSARIO. 89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOGOTIPO DE IK 4. RESEARCH ALLIANCE 5
FIGURA 2. LOGOTIPO DE LA EMPRESA CEIT-IK 4. 7
FIGURA 3. EJEMPLOS DE SISTEMAS FLEXIBLES CON 3, 4 Y 5 GRADOS RESTRINGIDOS RESPECTIVAMENTE. 9
FIGURA 4. A) RÓTULA MECÁNICA DE UN AUTOMÓVIL. B) SISTEMA FLEXURE CON 3 GRADOS DE LIBERTAD. 10
FIGURA 5. A) ESQUEMA DE UNA MÁQUINA FOTOLITOGRÁFICA. B) FASES DEL PROCESO DE IMPRESIÓN POR MICRO-CONTACTO. 12
FIGURA 6. ESQUEMA DE ESTRUCTURAS DEL NITINOL DEBIDO AL EFECTO DE MEMORIA DE FORMA 14
FIGURA 7. EJEMPLO DE LAS FASES DE UNA SMA Y SUS ESTRUCTURAS CRISTALIZADAS. 15
FIGURA 8. RENDERIZADO DE MONOLITHIC CROSS PIVOT. 20
FIGURA 9. RENDERIZADO DEL SISTEMA CROSS STRIP. 21
FIGURA 10. RENDERIZADO DE NOTCH HINGE 21
FIGURA 11. RENDERIZADO DEL SISTEMA SPRING. 22
FIGURA 12. RENDERIZADO DE BEE PANEL. 23
FIGURA 13. EJEMPLO DE LA PIEZA BEE PANEL CON LAS RESTRICCIONES DE TIPO MPC. 24
FIGURA 14. IMAGEN DE LAS FUERZAS APLICADAS EN LAS SIMULACIONES. A) FUERZA. B) MOMENTO. 25
FIGURA 15. EJEMPLO DE MALLADO DE LA PIEZA SPRING. 27
FIGURA 16. DETALLE DE LOS MALLADOS DE TIPO HEXAÉDRICO Y TETRAÉDRICO. 27
FIGURA 17. EJEMPLO DE MALLADO DE LA PIEZA MONOLITHIC CROSS PIVOT. 27
FIGURA 18. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA CNC. 33
FIGURA 19. EJEMPLO DE UNA FRESADORA. 34
FIGURA 20. ESQUEMA DE LOS MOVIMIENTOS POSIBLES DE LA BROCA EN UNA FRESADORA 5 EJES. 34
FIGURA 21. ESQUEMA GENERAL DE FDM. 36
FIGURA 22. ESQUEMA GENERAL DE SLA. 36
FIGURA 23. ESQUEMA GENERAL DE POLYJET. 37
FIGURA 24. ESQUEMA DEL PROCESO RFP. 37
FIGURA 25. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO SLS. 39
FIGURA 26. ESQUEMA DEL PROCESO LENS. 39
FIGURA 27. ESQUEMA GENERAL DE 3DP. 40
FIGURA 28. EJEMPLO DE UNA PLANTILLA DE UN PIE FABRICADA CON TECNOLOGÍA 3DP. 40
FIGURA 29. ESQUEMA GENERAL DE LOM. 41
FIGURA 30. ESQUEMA GENERAL DE UC. 42
FIGURA 31. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO WATERJET. 43
FIGURA 32. ELECTROEROSIÓN POR ELECTRODO DE FORMA. 44
FIGURA 33. ELECTROEROSIÓN POR HILO. 45
FIGURA 34. DETALLE DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO. 46
FIGURA 35. ESQUEMA GENERAL DE LA FOTOLITOGRAFÍA. 48

FIGURA 36. OBLEA DE SILICIO FABRICADA MEDIANTE FOTOLITOGRAFÍA. 49
FIGURA 37. EJEMPLOS DE LITOGRAFÍAS BLANDAS. 51
FIGURA 38. ESQUEMA DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA. 54
FIGURA 39. ESQUEMA DEL PUENTE WHEATSTONE. 55
FIGURA 40. EJEMPLO DE LA INSTALACIÓN DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA. 56
FIGURA 41. DETALLE DE LA COLOCACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS EN LA PIEZA MONOLITHIC CROSS PIVOT. 58
FIGURA 42. IMAGEN DE LA GALGA COLOCADA EN LAS PIEZAS. 58
FIGURA 43. PROPUESTA DE GALGADO DE LA PIEZA CROSS STRIP. 59
FIGURA 44. PROPUESTA DE COLOCACIÓN DE GALGAS EN LA PIEZA NOTCH HINGE. 60
FIGURA 45. PROPUESTA DE COLOCACIÓN DE LAS GALGAS EN LA PIEZA SPRING. 61
FIGURA 46. PROPUESTA DE GALGADO DE LA PIEZA BEE PANEL. 61

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALGUNAS SMA 14
TABLA 2. RESUMEN DE MALLADOS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS. 26
TABLA 3. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN NITINOL. 28
TABLA 4. PRESUPUESTO DE INMOVILIZADO. 65
TABLA 5. PRESUPUESTO DE MATERIAL FUNGIBLE. 66
TABLA 6. PRESUPUESTO DE EQUIPAMIENTO. 66
TABLA 7. PRESUPUESTO DE SOFTWARE. 67
TABLA 8. PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA. 67
TABLA 9. RESUMEN DEL PRESUPUESTO. 68

RESUMEN

El documento aquí presentado corresponde a la memoria de un proyecto realizado durante el primer semestre del año 2017 en el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa bajo la dirección de Juan Tomás Celigüeta. El proyecto busca otorgar el título de ingeniero mecánico a Enrique Angulo Elizari, graduado por la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Navarra, TECNUN, en el grado de ingeniería mecánica.

Hoy en día, las aplicaciones tecnológicas buscan la miniaturización de los productos de forma que sean más manejables. Dicha necesidad lleva a la tecnología a crear nuevas maneras de trabajar, dando lugar así a la micro-robótica. Este desarrollo de nuevas tecnologías ha facilitado muchos procesos. A pesar de esto, el reto está en producirlos a un coste económico. Las aplicaciones son variadas, desde el sector de la automoción hasta la biomedicina, donde está siendo imprescindible su desarrollo.

El proyecto se basa en el diseño y validación de unos sistemas flexibles para aplicaciones micro-robóticas, centradas en el mundo clínico. El proyecto consiste en diseñar un sistema de varios grados de libertad que permita realizar movimientos, principalmente giros, del orden micro y nano. Para esto es imprescindible la geometría y los materiales usados. El proyecto tiene tres fases primarias: el análisis de sistemas ya existentes sometidos a esfuerzos comparados con sus modelos matemáticos teóricos, el diseño de nuevos sistemas y su validación por métodos numéricos usando programas de simulación por elementos finitos. En una cuarta fase, se estudiará la posibilidad de medir experimentalmente los resultados obtenidos anteriormente mediante un sistema de galgas extensiométricas. Además, se estudiarán sus técnicas de fabricación.

Este documento desarrolla la cuarta y quinta fase del proyecto que consisten en los procesos de fabricación y el sistema de medida que se va a instalar en las piezas. Se presentan diversas metodologías de fabricación y sobre estas se realiza una propuesta para los sistemas tratados en este proyecto. Con la parte de medición, se va a proponer una instalación para cada uno de los sistemas bajo la misma metodología de galgas extensiométricas.

ABSTRACT

The following document corresponds to the report of a project carried out during the first semester of the year 2017 in the Centre of Studies and Technical Research of Guipúzcoa under the guidance of Juan Tomás Celigüeta. The project seeks to award the title of mechanical engineer to Enrique Angulo Elizari, graduated by the School of Engineers of the University of Navarra, TECNUN, with mechanical engineering bachelor.

Nowadays, the technology seeks the miniaturization of the products in order to make them more portable and more manageable. This necessity urges to the technology to develop new working methods, thus giving rise to micro-robotics. This development has provided advantages to many processes. Besides this, the challenge is to produce them at an economic cost. The applications are multiple, from the automotive uses until biomedicine, where its development is being essential.

The project is based on the design and validation of some flexure systems with micro-robotics applications, focused on medical uses. The project consists on the design a system of several degrees of freedom, which allows to produce movements, mainly rotations, measuring in micro and nano orders. For that is essential the geometry and materials used. The project has three phases: the analysis of some commercial systems submitted to efforts and comparing with their theoretical mathematical models, the design of new systems and their validation with numeric methods using finite elements simulation programs. In a fourth phase, the project will study the availability of measuring, experimentally, with strain gauges the results obtained in the simulations. Moreover, the project will study the fabrication methodologies available for those systems.

In this report the fourth and fifth phases are described. This are the fabrication processes and the measurement system which is going to be installed in the systems. First, some fabrication processes are presented and taking account all of them, one proposal will be done for the systems developed. According to the measurement system, there will be a different proposal for each system but all of them under strain gauges bases.

1.ESTADO DEL ARTE.

1.1. LA INSTITUCIÓN.

La institución de acogida de este proyecto es CEIT-IK4. El centro tecnológico CEIT nace en 1982, fundado por la Universidad de Navarra. Este centro es el segundo más antiguo de la Alianza la cual forma parte: IK4 *Research Alliance*.

La alianza IK4 nace en el año 2005, gracias a la agrupación de nueve centros tecnológicos de Guipúzcoa y Vizcaya, todos ellos manteniendo su independencia en dirección y desarrollo, pero compartiendo un proyecto común: beneficiarse de los conocimientos de todos los centros y colaborando entre sí. Como se puede leer en su página web: la suma de estos nueve centros permite abarcar todo proyecto que se proponga la industria actual, aportando soluciones globales y de gran capacidad tecnológica. A su vez, la independencia de centros, permite que se acerque a las pequeñas y medianas empresas proporcionándoles los servicios necesarios. Este hecho ha posicionado a IK4 en un marco de referencia europeo, siendo un ejemplo a seguir para muchos otros centros europeos de innovación, desarrollo e investigación. [1]

Figura 1. Logotipo de IK 4. Research Alliance

IK4 la componen nueve organizaciones independientes, aportando cada una de ellas a miembros para la dirección de la alianza. Por lo general, coinciden los dirigentes de cada centro con los miembros de la junta directiva de la alianza. Sin embargo, muchos otros trabajadores pertenecen, también, a la junta de gobierno del organismo participando en diversos grupos de trabajo siendo alguno de estos el consejo internacional, el consejo de marketing y comunicación, o el consejo de gestión de personas. En todos ellos, hay miembros de las nueve entidades presentes. A continuación, se presentarán los miembros de la alianza:

- **AZTERLAN**. Centro de investigación con más de 30 años de experiencia en el sector de la metalurgia. Además, colabora estrechamente con la industria metalmecánica desde su centro de Durango (Vizcaya) [2].
- **CIDETEC**. Centro situado en el Parque Tecnológico de Miramón, San Sebastián (Guipúzcoa), centrado en el campo de los materiales (nanomateriales, biomateriales, composites…), de las superficies (cerámicas, metálicas…) y energético (sistemas de almacenamiento). Fue fundada en 1997 gracias a la colaboración de múltiples empresas del sector energético como Iberdrola [3].
- **GAIKER**. Este centro trabaja desde 1985 en el sector de la organización empresarial desarrollando conocimientos e implantándolos en multitud de empresas. Sus campos de innovación son los plásticos y composites, el reciclado y la sostenibilidad del medio ambiente, así como la biotecnología. Su sede se encuentra en Zamudio (Vizcaya) [4].
- **IDEKO**. El centro situado en Elgoibar (Guipúzcoa) desde 1986 trabaja en el sector de la máquina herramienta y en las tecnologías de fabricación y producción industrial. Centra su investigación en mejorar las capacidades de producción y competitividad de aquellas empresas con las que trabaja [5].
- **IKERLAN**. Es el centro más veterano de todos los que forman la alianza. Creado en 1974 en Arrasate-Mondragón (Guipúzcoa) donde hoy sigue su sede principal. Trabaja en líneas de desarrollo de producto y ofreciendo soluciones integrales a todas las empresas hasta en seis campos de la tecnología. Pertenece al grupo empresarial Mondragón [6] .
- **LORTEK**. Centro de investigación enfocado al dominio de la soldadura y de ahí desarrollando principalmente técnicas de unión. Destacan sus tecnologías de láser y sus tratamientos térmicos para superficies. Su fundación se remonta a 2002, convirtiéndolo en uno de los centros más jóvenes de la agrupación y su sede se encuentra en Ordizia (Guipúzcoa) [7].
- **TEKNIKER**. Es un centro tecnológico focalizado en el área de mecatrónica, tecnología de fabricación y micro y nanotecnología. Una parte de su trabajo es el desarrollo de producto tanto para industria como para clientes, solventando problemas de fricción y lubricación. Situada en Eibar (Guipúzcoa) desde 1996 [8].
- **VICOMTECH**. Centro tecnológico fundado en el año 2001 en San Sebastián (Guipúzcoa) con el fin de avanzar en la investigación de tecnologías de computación visual. También desarrolla y vende tecnologías multimedia de interacción visual y comunicaciones. La curiosidad de este centro es que pertenece a la vez a una alianza internacional llamada *Graphics Media* [9].
- **CEIT**. Este centro va a ser desarrollado más detalladamente a continuación. Es un centro de investigación localizado en San Sebastián (Guipúzcoa) con dos sedes integradas en el campus tecnológico de la Universidad de Navarra, organismo fundador del centro en 1982. Acoge diversas áreas de investigación.

Se aprecia que la alianza de estos centros, permite a IK4 abarcar casi todos los campos de la investigación y todos los sectores tecnológicos desde la aeronáutica hasta la biomedicina.

El proyecto aquí presentado se ha realizado en uno de estos centros, concretamente en el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas, CEIT. Este centro dedica sus esfuerzos a proyectos industriales de investigación y desarrollo bajo contratación y acuerdo con una empresa externa, colaborando estrechamente con los departamentos de I+D+I de los clientes. Además, la mayoría de sus trabajadores compaginan su trabajo de investigador con el de docente en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra, siendo uno de los pilares de este centro la formación de ingenieros competentes para su salida al mundo laboral inspirado por los valores del humanismo cristiano [10].

Figura 2. Logotipo de la empresa CEIT-IK 4.

Desde sus orígenes, el centro de investigación ha ido creciendo e incorporando nuevas líneas de investigación. Así es como, en el año 2013, de la mano de la Clínica Universidad de Navarra se crea el departamento de Ingeniería Biomédica.

La dirección del centro está regida por dos órganos principales. La Junta Rectora, presidida por Carlos Bastero de Eleizalde, con el apoyo de otros cuatro miembros del centro, destacando su director Alejo Avello. Por otro lado, se rige por el consejo estratégico, formado por los directores de diversas empresas que colaboran de manera activa con el centro de investigación.

En el año 2015, el Centro de Estudio e Investigaciones Técnicas, acogía a unos 250 trabajadores de manera directa en sus sedes, a lo que se debe sumar los colaboradores en las empresas clientes. De estos 250 trabajadores, 213 son contratados por el centro y el resto, becarios. En ese momento, el número de tesis en desarrollo ascendía hasta 53, de las cuales sólo 25 se terminaron en el curso natural del año [11].

CEIT dispone de seis departamentos principales, cada uno bajo la supervisión de un responsable. Dentro de cada uno de ellos se pueden encontrar diversos sub-departamentos según las ramas de investigación y trabajo que lleven. Estos seis departamentos se van a presentar de manera genérica según lo descrito en la web de cada uno de los departamentos.

Tres de estos departamentos se encuentran en la sede de Miramón. El departamento de Electrónica y Comunicaciones se encarga de seis grandes ramas de la electrónica y de las telecomunicaciones destacando los sistemas de potencia, el diseño de circuitos integrados tanto analógicos como digitales, los procesamientos digitales de señal o los principios matemáticos de la información. Este departamento cuenta con una amplia experiencia en proyectos multidisciplinares, en los cuales se requiere la colaboración de departamentos y empresas exteriores. Otro departamento, muy ligado al anterior, es el de Microelectrónica y Microsistemas. Este equipo trabaja en el diseño y desarrollo de microsistemas integrados en los productos y multifuncionales usados para recoger medidas experimentales y/o para la alerta de fallos en procesos industriales. Además, colabora en el desarrollo de nuevas técnicas de micro/nanoestructuración superficial usando técnicas con láser de frecuencias elevadas. El tercer departamento situado en el parque tecnológico es el de Ingeniería Biomédica. El equipo más joven del centro dedica su investigación en la ingeniería de tejidos, bioinformática, bioMEMS, y biorrobótica y simulación quirúrgica.

El departamento de materiales, uno de los más destacados del centro, centra su trabajo en tres líneas motrices: tratamientos termomecánicos, la mecánica de materiales, y la consolidación de polvos metálicos y cerámicos (pulvimetalurgia). El departamento de Ingeniería Ambiental, está centrada principalmente en la ingeniería hidráulica cubriendo desde el diseño, simulación y control de las tecnologías de tratamientos de aguas, lodos y residuos sólidos. Y, por último, el departamento de Mecánica Aplicada. Este queda dividido en dos secciones. Una de Dinámica experimental y Diseño, supervisada por Jorge Juan Gil, que se encarga del control del ruido y vibraciones y en el diseño mecatrónica para el sector de la automoción, aeronáutica, ferroviaria… La segunda sección es la de Simulaciones, controlada por Diego Borro, y que trabaja en el campo de la realidad aumentada y de los simuladores por elementos finitos entre otras. Esta sección da soluciones a multitud de sectores de la industria. En esta última sección se ubica este proyecto, debido al uso de un *software* de elementos finitos llamado Abaqus.

Cada uno de los seis departamentos del centro trabajan de manera independiente y con un volumen de trabajo diferente. El departamento de materiales es el que más aporta, siendo un 35,82% de la actividad generada, que involucra tesis, publicaciones y congresos en los que se ha participado. Con un 27% del volumen de actividad, se encuentra el equipo de Electrónica y Comunicaciones. En el curso 2015, la sección con menos volumen de trabajo aportado fue el de Ingeniería Ambiental. En total, se publicaron 73 artículos y se participó en 74 congresos de carácter nacional e internacional. A nivel económico, el beneficio neto fue aproximadamente, 580.000 euros, a diferencia del año anterior, donde el centro sufrió pérdidas por valor de casi 200.000 euros. La mayoría de ingresos, y aportaciones que se realizaron al centro, fueron procedentes de las subvenciones europeas y del Gobierno Vasco recibiendo cerca de tres y cuatro millones respectivamente. Sin embargo, las empresas que contrataron servicios I+D+I son la mayor fuente de ingresos, alcanzando los siete millones y medio. La gran parte de los gastos se concentra en la partida de personal y gestión del personal [11].

1.2. EL PROYECTO: LOS SISTEMAS *FLEXURE*.

El proyecto consiste en el análisis, diseño y simulación de varios sistemas flexibles y su posterior comparación entre ellos. La comparativa se hará a nivel de resultados físicos (deformaciones, tensiones y desplazamientos), así como a nivel de materiales, realizando la misma simulación en diversos tipos de materiales y comparando la resistencia y flexibilidad de cada uno de ellos. Posteriormente se desarrollarán los posibles procesos de fabricación y un sistema de medida basado en las galgas extensiométricas.

Si bien el proyecto trata de un sistema flexible o sistema *flexure* como se le denominará en ciertos momentos a lo largo del proyecto, se debe definir qué es. Para empezar, se debe mencionar que es un componente fundamental en la microrobótica actual, puesto que sustituye a las articulaciones tradicionales, aportando múltiples ventajas y realizando el mismo trabajo. [12] [13]

Un sistema *flexure* es un elemento, o un conjunto de elementos flexibles, por tanto, sujetos a deformarse y a soportar momentos flectores. Tienen la característica de que trabajan muy bien en el grado de libertad deseado, mientras que están restringidos para el resto de grados de libertad. Dicha propiedad viene definida por el diseño que se haya realizado. Esta es la propiedad más importante de estos sistemas: su funcionalidad en tan sólo el desplazamiento o rotación deseada. Es cierto que, en ocasiones, pueden no restringirse todos los grados y generarse un sistema multigrado. Se pueden apreciar en la Figura 3, varios ejemplos de sistemas flexibles multigrado (los dos primeros) y un tercer sistema de tan solo un grado de libertad.

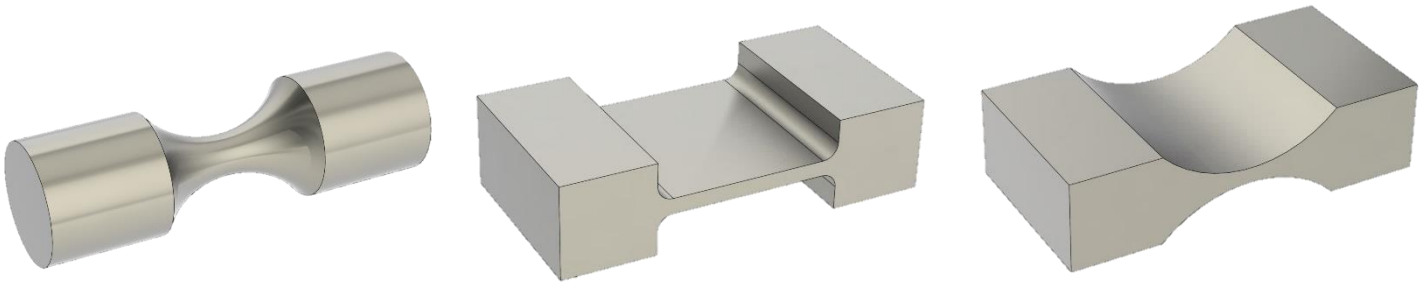


Figura 3. Ejemplos de sistemas flexibles con 3, 4 y 5 grados restringidos respectivamente.

Según el libro "*Microrobotics: Methods and Applications"* del doctor en ingeniería de materiales, Yves Bellouard (*École polytechnique fédérale de Lausanne)*[14] [15] se definen los sistemas flexibles como uniones o articulaciones monolíticas, libres de fricción, o ensambladas entre cuerpos solidos presentando una rigidez menor en el eje de deformación. Esto es debido al material utilizado, puesto que para este tipo de sistemas es común usar materiales con propiedades flexibles, como el silicio, o aleaciones con memoria de forma como puede ser el nitinol (Ni-Ti) u otras aleaciones de cobre y aluminio que se definirán más adelante. No cabe duda, de que el principal objetivo de estos sistemas es sustituir a las articulaciones tradicionales y a los sistemas ensamblados por piezas únicas que realicen las mismas funciones.

Por ejemplo, se podría sustituir una rótula mecánica como las utilizadas en las suspensiones de los automóviles, por un sistema flexible que permita las tres rotaciones y restringa los desplazamientos en las tres direcciones. En la Figura 4 se pueden apreciar dos imágenes, la primera de ellas corresponde a la rótula de un automóvil, y la segunda a un sistema *flexure* con la capacidad de realizar las mismas funciones. Es cierto que, para ello, el sistema debe aguantar las fuerzas aplicadas y las deformaciones sufridas.

Figura 4. a) Rótula mecánica de un automóvil. b) Sistema flexure con 3 grados de libertad.

Los sistemas flexibles, no están muy implantados todavía en el campo de la micro-robótica. Hoy en día, el objetivo es miniaturizar todos los productos. De ahí nace la micro y nanoingeniería. Estas nuevas tecnologías se centran en desarrollar nuevas formas de fabricación de piezas diminutas, o como en ese caso, desarrollar sustitutos de los elementos existentes para que, con un proceso de fabricación sencillo, y evitando el ensamblado de piezas (con lo que se reduce y/o elimina el efecto de la fricción) se puedan realizar las mismas funciones. Por tanto, algunas de las ventajas de dichos sistemas son:

- La reducción de efectos de fricción debido al diseño y también al material. Cabe recordar que la fricción nunca va a poder ser eliminada al completo, pero si llevada a su mínima expresión. Una consecuencia de reducir la fricción es la precisión, pues esta puede controlarse mejor.
- El hecho de poder fabricar una sola pieza, en lugar de varias separadas y ensamblarlas (hecho que en dimensiones muy pequeñas se incrementa la dificultad exponencialmente). El único límite que se tiene al fabricar este tipo de piezas es el límite del proceso de fabricación, ya sea por la máquina (generalmente CNC) o por las propiedades del material ya que este puede romper o sufrir daños.
- Su límite de resistencia viene dado por su módulo de elasticidad, también llamado Módulo de *Young*. Va relacionado con la energía que absorben estos sistemas y la que expulsan al volver a su forma original, la cual es mayor debido a que no hay tantas perdidas en fricción. Además, un módulo de *Young* superior, suele implicar un mejor trabajo a fatiga, lo cual es beneficioso para estos sistemas, ya que van a estar sometidos a ciclos de aplicación de fuerza constantemente.
- Otra ventaja es que se puede controlar mejor el rango de movimiento, e incluso, si se desea tener un rango mayor, se pueden unir varias piezas, haciendo un sistema de un mismo grado de libertad, por ejemplo, pero con un mayor rango de movimiento. [16]

Se ha mencionado previamente que la principal aplicación de estos sistemas *flexure* se encuentran en la micro-robótica. Este es un concepto aparentemente nuevo, pero los sistemas *flexure*, que en el fondo de basan en la matriz de rigidez del diseño, es algo que

se ha usado desde hace muchos años. Todo comienza, previsiblemente, con el péndulo de Huygens', [17] un artificio matemático desarrollado en el s. XVII para medir el tiempo de manera precisa. Las propiedades elásticas de los materiales, se siguen utilizando durante los s. XVIII y XIX en diversos aparatos ópticos, pero es en el siglo XX cuando toman mayor relevancia. A principios de siglo servían para producir instrumentos de una gran precisión, pero en los últimos años, ha vuelto a coger importancia gracias al desarrollo de la microtecnología, ya que estas propiedades son muy útiles a la hora de minimizar un mecanismo. El concepto de micro-robótica aparece a finales del siglo pasado, de la mano de los microcontroladores y la posterior aparición de los sensores o sistemas mecánicos en miniatura de silicio (MEMS). Con el desarrollo de internet y, sobretodo, con el desarrollo del WI-FI, la micro-robótica ha evolucionado a pasos agigantados. Hoy en día, sirve no sólo para sistemas de comunicación sino también para la biomedicina. [18] [19]

En biomedicina, la micro-robótica ha permitido desarrollar técnicas de cirugía poco invasivas como micro-cámaras para poder introducir en el cuerpo humano y evitar grandes cicatrices. También, caben destacar las pastillas inteligentes, las cuales son biodegradables y, en consecuencia, innocuas para el organismo. Por otro lado, la investigación médica también se ha visto mejorada con estas nuevas tecnologías, facilitando los estudios de biología celular. Sin embargo, no solo la medicina se ve afectada, sino que la ciencia de materiales tiene por delante muchos retos con el desarrollo e investigación de las propiedades elásticas de los materiales. [12]

Una complejidad de estos sistemas es su fabricación, pues puede que esté limitada por las máquinas o procesos disponibles hoy día. La micro-fabricación se refiere a las técnicas de fabricación en miniatura, litografías, con el fin de producir circuitos electrónicos integrados, y/o sistemas microelectromecánicos (MEMS).[20]

La litografía se presenta como una combinación de tecnologías de fabricación aditiva y destructiva, organizada por capas (generalmente del orden de micras de grosor) y utilizando diversos tipos de materiales: desde metales hasta polímeros. Principalmente, hay dos tipos de técnicas litográficas. La primera es la fotolitografía, una de las técnicas más comunes en los procesos de micro-fabricación. El proceso consiste en una vez añadida sobre la base de fabricación una capa del grosor deseado (generalmente del orden de la micra y el nano) del material seleccionado se cubre con una segunda capa fotoresistente para proteger el material de las radiaciones ultravioleta. Una vez preparada la capa, se expone a la luz. Para darle la forma deseada, se usan unos filtros opacos con la forma que se quiere fabricar, de forma que la luz solo pasa por esa figura. Los filtros suelen ser de cuarzo, con cromo para conseguir la opacidad buscada. La luz a la que se expone es una luz ultravioleta, que tiene longitudes de onda más cortas permitiendo alcanzar una mayor resolución. Una vez reacciona la fotoresina y queda sellada la forma deseada, se utiliza ácido nítrico para eliminar los restos de la resina. Una vez eliminado el sobrante, se puede repetir el proceso con una capa superior. Cabe mencionar, que este tipo de producción sirve para MEMS, circuitos y aparatos micro-electrónicos, así como para aparatos ópticos de tamaño microscópico. Como inconveniente destaca el alto coste de producción utilizando esta técnica. Esto es debido a los múltiples requerimientos que se necesitan. Véase la luz de la habitación, el coste de producción de las máscaras (filtros de forma) o la alta precisión de la máquina. [20]

Por otro lado, hay otros tipos de litografía las cuales se consideran blandas. Estas técnicas son: la impresión micro-contacto, y el modelaje con polímeros orgánicos. La impresión micro-contacto (µCP) usa estampados con relieve sobre superficies planas y curvas generando los patrones deseados y generando capas que en inglés se denominan SAMs (*self-assembled monolayers)* con un grosor variable entre uno y tres nanómetros. Esta técnica tiene varias fases. [21] La primera de ella es preparar la plantilla que se va a reproducir y que, por lo general, se realiza con técnicas fotolitográficas. Este *template* tiene el dibujo opuesto al sello que se ha de reproducir. Para ello hay que cubrir la plantilla con un líquido de silicona (podrían también usarse otros materiales). Al curarse y solidificarse se consigue la forma buscada. Una vez preparado, se aplica el sello y se pone en contacto con el substrato en el que se va a producir la capa. Este contacto hace que se ordenen las cadenas de carbono del tiol (compuesto orgánico que contiene el grupo funcional formado por un átomo de azufre y otro de hidrogeno) creando una capa hidrofóbica de tipo SAM. El modelaje con polímeros orgánicos utiliza fórmulas muy parecidas a las ya presentadas para la impresión micro-contacto, y por tanto solo se va a destacar el micro-modelaje por capilares.[22]

En la siguiente figura (Figura 5) se puede apreciar un esquema de las dos técnicas de micro-fabricación más novedosas. En la primera se aprecia un esquema de funcionamiento de la máquina en el que se puede ver a grandes rasgos el funcionamiento de esta técnica. En la segunda se ven las fases de la impresión por micro-contacto.

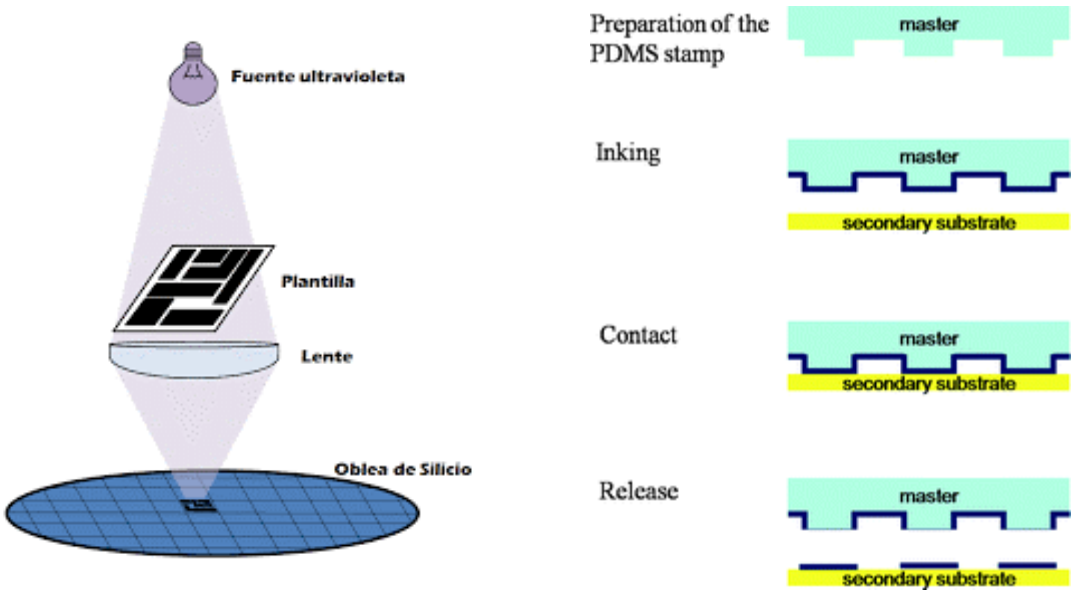


Figura 5. a) Esquema de una máquina fotolitográfica. b) Fases del proceso de impresión por micro-contacto.

Además de estas dos técnicas más modernas, se pueden utilizar las tecnologías de *Rapid Prototyping*, como la impresión 3D, procesos de extrusión como FDM (*Fused Deposition Modelling)*, métodos ultrasónicos como UCP (*Ultrasonic Consolidation Process*) o procesos de síntesis de pellets mediante láser. Estos son sólo algunos ejemplos, aunque puede haber muchas variantes más. [23] [24] [25]

Para la fabricación de estos sistemas se suelen usar materiales con propiedades elásticas muy buenas, y aleaciones con memoria de forma. El material, como material puro, más usado es el silicio, debido a sus buenas propiedades mecánicas elásticas. Sin embargo, hoy en día se están desarrollando nuevos materiales que pueden cumplir con mejores resultados las mismas funciones que el silicio. Son las aleaciones con memoria de forma, también llamadas SMA debido a sus siglas en inglés *Shape Memory Alloy*. Estas aleaciones tienen la capacidad de volver a su posición, forma o estado original tras haber sufrido un proceso térmico reversible y/o sufrir la aplicación de una fuerza instantánea o cíclica. [26]

Las aleaciones con memoria de forma aparecen bajo el nombre de aleaciones inteligentes en 1932 cuando Arne Ölander al descubrir que hay metales que tras sufrir un proceso térmico recuperan su forma original. Ya en 1941, Vernon da el nombre a estas aleaciones con el que hoy día se conocen. Estas empiezan a ser internacionalmente reconocidas a partir de 1962, año en el que el estadounidense William Bruehler y el asiático Frederick Wang descubren el efecto de memoria de forma, una característica propia de este tipo de aleaciones. Concretamente, esto último se descubre con una aleación de Níquel y Titanio, la cual se pasará a denominar Nitinol hasta el día de hoy. Esta es una de las más comercializadas. [27]

Como se ha visto, estas aleaciones tienen poco más de 80 años de vida, y en esos años se ha ido afinando su definición y propiedades, hasta lo que se puede definir como un tipo de material con memoria de forma que tiene la habilidad de memorizar, y alcanzar su posición original tras estar sometida a estímulos generalmente térmicos. [27]

Hay bastantes aleaciones que presentan este efecto tan característico. Las más desarrolladas y que se aplican en mayor número de aplicaciones industriales son el nitinol y las aleaciones de cobre, concretamente aquellas de cobre, aluminio y zinc (Cu-Al-Zn), y las de cobre, aluminio y níquel (Cu-Al-Ni).

El nitinol (Ni-Ti), que por lo general lleva un tercer elemento en muy bajo porcentaje, tiene la característica de que es el que más memoria de deformación tiene, llegando al 8%, además de una buena resistencia a la corrosión y propiedades de fatiga muy buenas permitiendo aplicarle un gran número de cargas cíclicas. Por otro lado, las aleaciones de cobre presentan una menor memoria de deformación, alcanzando el 5% y siendo estas también menos dúctiles y menos estables térmicamente (tiene un menor rango de temperaturas entre la austenita y martensita). [26] [28]

Las dos características de estas aleaciones son: el efecto de memoria de forma que ya se ha mencionado, y, por otro lado, la pseudoelasticidad o superelasticidad. El efecto memoria se basa en las formas de cristalización de las aleaciones que son tres principalmente: austenita, martensita y martensita deformada. Cuando el objeto está frío, en forma martensítica, y se deforma, esta es plástica. Una vez que se calienta la pieza por encima de su temperatura de transformación se obtiene una estructura de austenita con la forma original del producto, es decir, de antes de deformarlo. Al volver a enfriarlo, se puede observar como la estructura recupera su estructura martensítica, mientras que su forma exterior sigue siendo la misma, la original. En la siguiente figura, Figura 6, se pueden apreciar los cambios estructurales que sufren estas piezas. Se comprueban los efectos de calentamiento y enfriamiento. En el estado austenítico de la aleación es cuando aparece la característica de la pseudoelasticidad. Esta propiedad permite deformar la estructura

austenítica como consecuencia de la aplicación de una carga, la cual una vez se deja de aplicar la estructura retoma su forma austenítica original. No se necesita ningún proceso térmico. La ventaja radica en el módulo elástico puesto que en dicha configuración es mucho mayor y por tanto la plasticidad muy difícil de conseguir. Por ejemplo, y como se verá en la Tabla 1, el módulo elástico en el caso del nitinol puede multiplicarse hasta por seis al cambiar de estructura. Es importante también controlar las temperaturas de transformación, puesto que afectan considerablemente a los efectos de la reestructuración. Sin embargo, en este proyecto no se tiene en cuenta esto debido a que sólo se trabaja a una temperatura ambiente de 300K (28ºC) y en esa temperatura se debe considerar estructura martensítica por normal general, aunque en este proyecto se verá qué excepción se aplica para conseguir los objetivos propuestos. [29] [30]

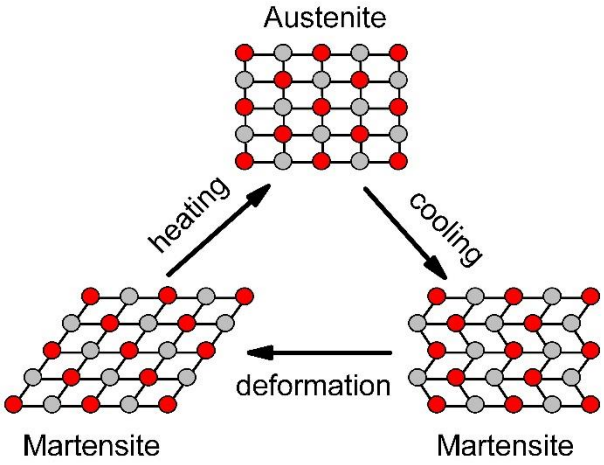


Figura 6. Esquema de estructuras del Nitinol debido al efecto de memoria de forma

	Nitinol (Ni-Ti)	Cu-Al-Zn	Cu-Al-Ni
Temperatura fusión (ºC)	1300	950-1020	1000-1050
Densidad (gr/cm^3)	6.45	7.64	7.12
Conductividad Térmica (W/cm por ºC)	18	120	30-43
Módulo de Young (GPa)	83 (austenita)	72 (fase beta)	85 (fase beta)
	16-48 (martensita)	70 (martensita)	80(martensita)
Límite Elástico (MPa)	195-690 (austenita)	350(fase beta)	400(fase beta)
	70-140 (martensita)	80 (martensita)	130 (martensita)
Tensión de rotura (MPa)	895	600	500-800

Tabla 1. Propiedades mecánicas de algunas SMA

En la Figura 7 se puede ver un ejemplo concreto de cómo varían las estructuras cristalizadas de una SMA. También, se puede apreciar si este cambio de fase es reversible o no. Todo ello medido en función de las temperaturas de transformación características, las tensiones y deformaciones generadas. En verde, se ve el efecto de la pseudoelasticidad y en cada una de las estructuras se puede ver un ejemplo cilíndrico. El original está sin deformar y se puede ver en qué estados se presenta el cilindro curvado y en cuales en el estado inicial. [27]

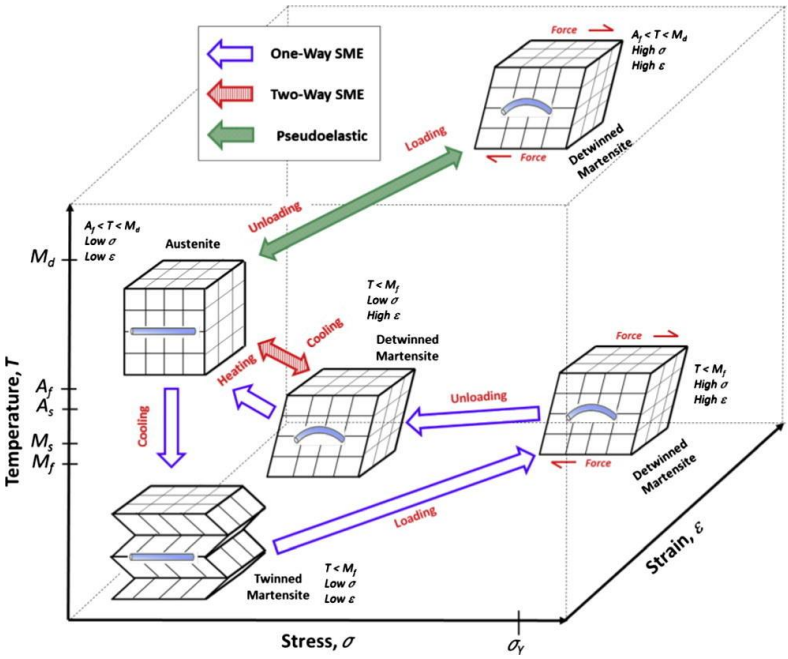


Figura 7. Ejemplo de las fases de una SMA y sus estructuras cristalizadas.

Se debe mencionar, que todo lo explicado para SMA se debe a una fabricación martensítica, y en el que se busca utilizar el efecto de memoria de forma. Sin embargo, este proyecto busca utilizar la propiedad de la pseudoelasticidad. Para esto, la fabricación se realizará en base a una estructura austenítica a temperatura ambiente obteniendo esta propiedad directamente y sin necesidad de utilizar un proceso térmico. Dependiendo de su composición y estructura, el nitinol presenta unas temperaturas de transformación diferentes, variando entre los -15ºC hasta los +80ºC, lo que significa que las propiedades se pueden optimizar para cada aplicación y en este caso, se utilizará la pseudoelasticidad a una temperatura de 300K en una estructura austenítica. Las grandes ventajas de usar esta estructura son su gran biocompatibilidad, sus propiedades de elasticidad y su alta resistencia al pandeo (por esto mismo se obviará que no se produce dicho fenómeno). [31]

Las aplicaciones en las que se pueden encontrar estos compuestos son muy variadas. Desde la automoción en aplicaciones de sensores y actuadores hasta el mundo de la medicina donde se pueden encontrar aleaciones de este tipo en los *brackets* de los ortodoncistas o en los catéteres usados en cirugía. Sin olvidarse de las aplicaciones aeroespaciales, donde se encuentran ciertas piezas de las turbinas hechas de estos materiales, y también en el mundo de la robótica y la micro-robótica.

2.ALCANCE Y OBJETIVOS.

2.1. ALCANCE.

El proyecto consiste en el estudio, simulación y comparación de varios sistemas flexibles. Su principal objetivo radica en conocer la funcionalidad de estos sistemas en aplicaciones micro-robóticas para el mundo de la biomedicina. Para ello se estudiarán las deformaciones ante la aplicación de una carga estándar de unos 10 kg aproximadamente, se analizarán las tensiones y sus puntos de máxima y mínima tensión, así como las rotaciones respecto de su centro.

El proyecto se puede dividir en varias partes según el proceso que se va a seguir. Lo primero que se debe hacer es analizar el sistema *flexure* y cómo trabajan sus modelos matemáticos. Para ello, el proyecto se basa en el álgebra lineal. Se debe entender su definición, funcionamiento y sus leyes matemáticas.

Una vez se conozca el funcionamiento de estos sistemas, se procederá al diseño. Los primeros diseños a analizar serán ya existentes, y su función será la de verificar que los modelos matemáticos son correctos y que la simulación aporta la misma solución a la teóricamente esperada. Para esto se procederá a la creación del diseño con un *software CAD/CAM*. Una vez realizados los diseños, se realizarán los cálculos matemáticos de manera manual o con herramientas de computación. De esta forma, una vez simulados los diferentes ejemplos creados y con los resultados de la simulación en mano, se puedan comparar dichos valores y verificar que las simulaciones son válidas.

Si esto es correcto, y las simulaciones arrojan los resultados esperados, se procederá a la segunda fase del proyecto. Esta segunda fase contiene la parte de innovación del proyecto. Consiste en el diseño de unos nuevos sistemas flexibles basándose en los conocimientos adquiridos en los anteriores modelos. Se realizarán tres modelos ya existentes y funcionales y a partir de ellos se diseñarán dos nuevos modelos. Estos dos modelos, una vez simulados, no se podrá verificar los resultados, pero si los anteriores han sido correctos, y se les aplica el mismo tipo de simulación, los nuevos resultados deberían darse por verídicos.

Conocidos los comportamientos de cada uno de los sistemas, se podrá hacer una comparativa de cuales son mejores y peores para ciertas funciones. Además de esto, se podrá comparar entre diversos materiales para ver las diferencias entre fabricar en un material u otro, sin tener en cuenta las dificultades tanto técnicas como económicas que puedan suponer.

Este proyecto refleja esta última parte. Tomando como base el proyecto "*Diseño, simulación y validación por elementos finitos de sistemas flexure para aplicaciones micro-robóticas*", se van a definir y exponer diferentes procesos de fabricación útiles para estos sistemas. Se expondrán los procesos más novedosos de fabricación en miniatura aportando las características de estos y analizando cual puede ser más beneficiosa para cada uno de los modelos tratados.

Además, se expondrá, en una siguiente fase del proyecto, como se pueden instalar sistemas de medida en estas piezas para controlar las verdaderas deformaciones y verdaderos comportamientos de estos sistemas. Esto se va a trabajar a nivel teórico y no experimental, por lo que no se utilizarán ninguna técnica de fabricación, debido a falta de recursos materiales y económicos. En consecuencia, tampoco se podrá implantar el sistema diseñado de galgas para la toma de medidas reales.

2.2. OBJETIVOS.

En el apartado de objetivos se van a presentar los diferentes objetivos para este proyecto. Van ligados a cada una de las fases del proyecto, siendo a su vez una guía a seguir para el desarrollo del proyecto. A continuación, se exponen los objetivos que se presentan para este proyecto:

- Estudio y comprensión de los sistemas flexibles: Definición, propiedades, fabricación, aplicaciones y materiales.
- Análisis y comprensión de lo presentado en el proyecto base "*Diseño, simulación y validación por elementos finitos de sistemas flexure para aplicaciones micro-robóticas".* Se deben interpretar tanto las simulaciones como los resultados presentados.
- Desarrollo teórico de nuevas tecnologías de fabricación de piezas micro-escaladas.
- Desarrollo de un sistema de medición mediante galgas extensiométricas para la medición de las micro-deformaciones sufridas por las piezas.

3.FASES PREDECESORAS.

En este capítulo se van a presentar de manera resumida las fases previas que se han ejecutado de este proyecto. Cabe recordar que un proyecto de desarrollo de una pieza desde su fase original hasta su comercialización es muy largo y requiere de muchas fases. Hasta el momento, se han realizado las primeras fases de diseño y simulación y ahora se va a estudiar el proceso de fabricación y la fase de medición. Faltaría por último la comercialización que no será tratada.

Este punto recoge las primeras fases ya desarrolladas. Para empezar, se expondrán los cinco modelos que se han realizado, posteriormente se explicará la simulación a la que han sido sometidos y por último se expondrán de manera breve los resultados obtenidos tras la comparativa de todas las simulaciones.

3.1. DISEÑO.

Este apartado recoge los cinco diseños realizados mediante el *software CAD/CAM*. Se van a presentar uno a uno de manera individualmente. Los tres primeros son diseños comerciales los cuales poseen modelos matemáticos ya establecidos, o, por lo menos, se conocen formas de calcularlos teóricamente. Los dos últimos diseños son de invención propia por lo que sus resultados no podrán ser contrastados con nada, simplemente se observará que sucede con ellos. Decir además que, estos dos diseños tienen varios grados de libertad, mientras que los primeros tan solo poseen un grado. A continuación, se presentan los modelos de manera resumida.

En la presente sección se verán imágenes renderizadas de cada una de las piezas. Sin embargo, para conocer sus dimensiones, se debe acudir al Anexo I, donde están todos los planos de las piezas diseñadas correctamente acotadas.

3.1.1. Monolithic Cross Pivot.

Este primer diseño, es un diseño comercial comúnmente denominado *Cartwheel hinge* lo que en castellano se puede traducir como bisagra de tipo rueda. Basándose en el nombre, se puede deducir que al igual que una bisagra, este sistema tiene tan sólo un grado de libertad. Consiste en el ensamblaje de cuatro vigas perpendiculares, que pueden ser fabricadas también de una sola pieza. El extremo de estas cuatro vigas converge en un mismo punto, mientras que los otros extremos, de dos en dos, se unen a soportes horizontales, sobre los que se aplicarán las cargas. Según el sistema de fabricación, utilizando un sistema de impresión por capas, se pueden hacer las cuatro vigas de una sola pieza generando una cruz flexible.

El *Monolithic cross pivot* se puede encontrar en diversas aplicaciones. Por ejemplo, se puede encontrar como amplificador de fuerzas aplicadas. Otro ejemplo es el denominado *Butterfly pivot* usado en el sector aeroespacial.

En la Figura 8, se puede ver una imagen renderizada del sistema diseñado para este proyecto. Como se puede apreciar es un sistema más sencillo y donde el elemento giratorio son las propias vigas. Dicho *render* ha sido realizado con el propio *software* con el que se ha realizado el diseño.

Figura 8. Renderizado de Monolithic Cross Pivot.

3.1.2. Cross Strip.

Este segundo modelo es muy parecido al presentado anteriormente. La diferencia radica en que el *Cross strip* no tiene cuatro vigas sino dos y además estas no se cortan en ningún momento. Cada una de las dos vigas va en una dirección perpendicular a la otra, pero en espacios paralelos, de forma que sólo coinciden en un punto. Dicho punto es el llamado centro de rotación. Tiene, al igual que el anterior modelo, dos bases que unen los extremos de los perfiles flexibles como base para soportar las fuerzas aplicadas. Por consiguiente, se puede comprobar que tan solo dispone de un grado de libertad.

En la Figura 9 se ve el renderizado de este diseño, realizado con *software CAD*. Las aplicaciones de este tipo de sistemas son muy similares a las del anterior modelo.

Figura 9. Renderizado del sistema Cross Strip.

3.1.3. Notch Hinge.

Este sistema es el tercero comercial que se va a presentar. También es de un solo grado de libertad y su caracterítica principal es que esta formado por una sola pieza. Mientras que los anteriores podian ser de una pieza o no, este siempre va a serlo. La flexibilidad se consigue jugando con el cambio de sección, pues en su parte central se produce un cambio de grosor en la sección considerable, y llevado a su mínimo espesor consigue ser flexible en su máxima expresión (siempre teniendo en cuenta las propiedades de material). Por lo general es de forma rectangular al que se le quitan dos semicircunferencias, una por cada lado en la zona central, consiguiendo esta zona más estrecha que proporcionará la flexibilidad buscada. En la siguiente figura, Figura 10, se puede ver el renderizado del diseño realizado para este proyecto, siendo su estructura una de las más sencillas. Este diseño debe guardar las proporciones entre las tres dimensiones principales del rectangulo base, para que las propiedades que se van a estudiar en los siguientes apartados se puedan verificar de manera más sencilla.

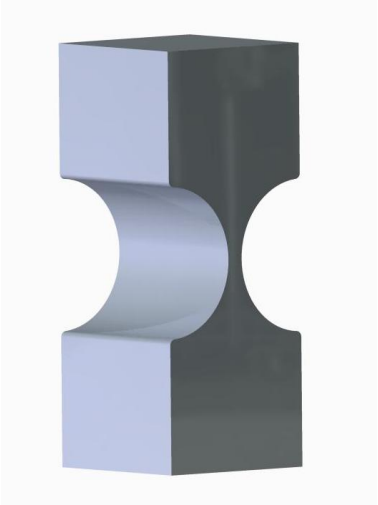


Figura 10. Renderizado de Notch Hinge

3.1.4. Spring.

Este es el primero de los diseños no comerciales. El nombre le viene dado por su parecido con un muelle, aunque no tiene nada que ver con ello. Es una estructura cilindrica hueca, de espesor pequeño, y con ranuras en su superficie lateral. Estas ranuras se distribuyen uniformemente por toda su altura, y presenta en cada una de estas alturas dos ranuras opuestas de aproximadamente 175 grados cada una. El resto de grados hasta completar los 360, son los pilares que unen cada anillo, pues el cilindro parece cortado en anillos y enlazados uno encima del otro. Los diferentes anillos están intercalados con un giro de 90 grados, por lo que nos permite rotar en una dirección más. Este sistema, a pesar de que los anteriores fueran de un solo grado, posee tres grados de libertad. El primero de ellos, permite comprimirlo, pero no estirarlo, en el eje axial. Por otro lado podemos rotar la pieza en cualquiera de sus dos ejes horizontales, debido a esta distribución de las uniones de 'anillos' cada 90 grados y a su estructura cilíndrica. La tercera rotación, correspondiente a la torsión no esta permitida. Con esto se alcanzan los tres grados de libertad. El quinto y sexto grado, son los desplazamientos relativos al plano de la altura del 'anillo', pero estas no son posibles debido a las uniones con otros 'anillos'. Por tanto se pasa de un sistema de un solo grado de libertad a uno con mútiples grados.

Figura 11. Renderizado del sistema Spring.

3.1.5. Bee panel.

Este último diseño, el *Bee panel*, se llama así por su parecido con la estructura base hexagonal similar a la de un panel de abeja. Además, está pensado para que en cada uno de sus seis lados se pueda ensamblar otro sistema similar que forme una malla adquieriendo así la forma de un panel de abeja. Tiene cuatro grados de libertad al igual que el *Spring*. Los tres primeros grados son las rotaciones en cualquiera de sus ejes. El cuarto grado es el desplazamiento en eje axial, permitiendo comprimir la pieza. El hexágono superior e inferior están unidos por medio de cuatro barras, las cuales nos van a dar el movimiento buscado. Esta barras estan cruzandose en el espacio sin contacto entre sí. Por tanto cada una trabja de manera individual. La forma de esta pieza aporta una gran estabilidad a la pieza, debido a que cuatro de los seis vertices de la base están sujetos.

Figura 12. Renderizado de Bee Panel.

3.2. SIMULACIÓN.

Este apartado expone basándose en el proyecto base la simulación realizada para estos sistemas. Para dicha simulación se ha utilzado el *software* Abaqus, un programa que utiliza el método de los elementos finitos para resolver los problemas planteados, los cuales pueden ser de diversa índole. El sistema básico de estos programas es dividir la pieza a analizar en pequeñas porciones casi puntuales y analizar cada una de ellas de manera independiente, de forma que los resultados se presentan para cada punto pudiendo ver los diferentes efectos que se producen ante un mismo impulso a lo largo de la pieza.

Básicamente, hay tres pasos a realizar en estos programas: pre-procesamiento, simulación (que sólo depende del programa) y el post-procesamiento. En este apartado se explica en pre-procesamiento y en el siguiente se desarrollarán las conclusiones del post-procesamiento.

3.2.1. Preparación de la simulación.

El proyecto ha simulado los efectos de una fuerza aplicada en una superficie de la pieza con el objetivo de estudiar cual es el efecto en el centro de rotación de la pieza.

El primer paso es dibujar la geometría a simular. En este caso, puesto que la geometría ha sido diseñada con un *software* CAD, se importará esta y se introducirán los dos puntos necesarios para la aplicación de fuerzas. A uno de los puntos se le llama 'centro de rotación' (se encuentra en el centro geométrico de la pieza). Al otro se le denomina 'punto de superficie', que es donde se aplicará la fuerza tangencial a la superficie. Una vez tenemos las tres partes integrantes del modelo, se realiza el ensamblaje. De esta forma, los puntos quedan anclados a la pieza. Sin embargo, para que los efectos se aprecien, de forma que al desplazar un punto se desplace toda la pieza en respuesta, se deben enlazar. La forma de enlazarlo es mediante *constraints*. Se ve en la Figura 13, la representación gráfica de estos enlaces. Se realizan dos en cada una de las piezas. El primero es el centro de rotación que se une a la superficie superior. Esto permite que, al darle un momento en el punto, gire la pieza en concordancia. La segunda restricción impuesta es que el punto de la superficie superior se enlace con el centro de rotación, de forma que, al aplicar la fuerza en el punto generado, este punto se mueva y arrastre, traslade los efectos al centro de rotación. Estos enlaces son denominados *MPC* y lo que hacen es denominar a un punto el 'generador' de movimiento mientras que los otros son los nudos esclavos, es decir que actúan en respuesta al anterior punto.

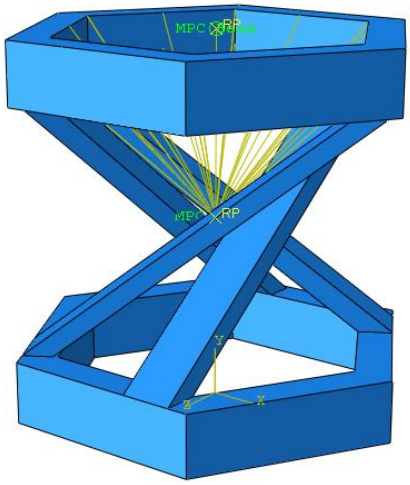


Figura 13. Ejemplo de la pieza Bee Panel con las restricciones de tipo MPC.

Falta una parte esencial para que la pieza quede definida a nivel estructural. Es necesario que se definan las condiciones de contorno (*Boundary Conditions*: BCs). En este caso, como lo que interesa es ver la rotación de la pieza relativamente entre la superficie

superior e inferior, se ha decidido anclar la parte de abajo. De esta forma todos los desplazamientos y rotaciones que se hallen serán relativas a la superficie inferior. Para el anclaje se ha decidido bloquear los desplazamientos en las tres direcciones y así evitar que se muevan ninguno de los puntos. También era posible restringir la rotación, pero era redundante, pues bloqueando los desplazamientos la pieza no se moverá. Con esto se consigue un efecto de empotramiento.

Cuando la pieza está definida en posición, es momento de asignarle el material, para que la simulación adquiera las propiedades de dicho material. Las propiedades que Abaqus permite introducir son muy variadas, sin embargo, este proyecto no necesita usar muchas de ellas, pues todos los estudios se realizan en régimen elástico. De esta forma, solo hace falta introducir la densidad, y los módulos de *Young* y de *Poisson*. Con esto el programa es capaz de simular las condiciones de elasticidad necesarias. Se podría también estudiar el régimen plástico introduciendo los valores de tensiones límites, así como la rotura y la fatiga, pero en este proyecto no se va a llegar a tal punto de incidencia.

Tras el material, es recomendable introducir las fuerzas que se van a aplicar. En este caso se introducirán dos. Cada una de ellas se evaluará en modelos independientes. Un modelo estará sometido a un momento aplicado en el centro de rotación. Por otro lado, el segundo modelo estará sometido a una fuerza aplicada en la superficie superior. Las cargas se introducen por coordenadas, por tanto, se puede elegir la dirección y el sentido de la misma. Para este proyecto, al ser tres de las cinco figuras de tan solo un grado de libertad, se estudiará la rotación sobre dicho eje y por tanto las fuerzas estarán colocadas de forma que se generen los desplazamientos y rotaciones en la dirección no restringida.

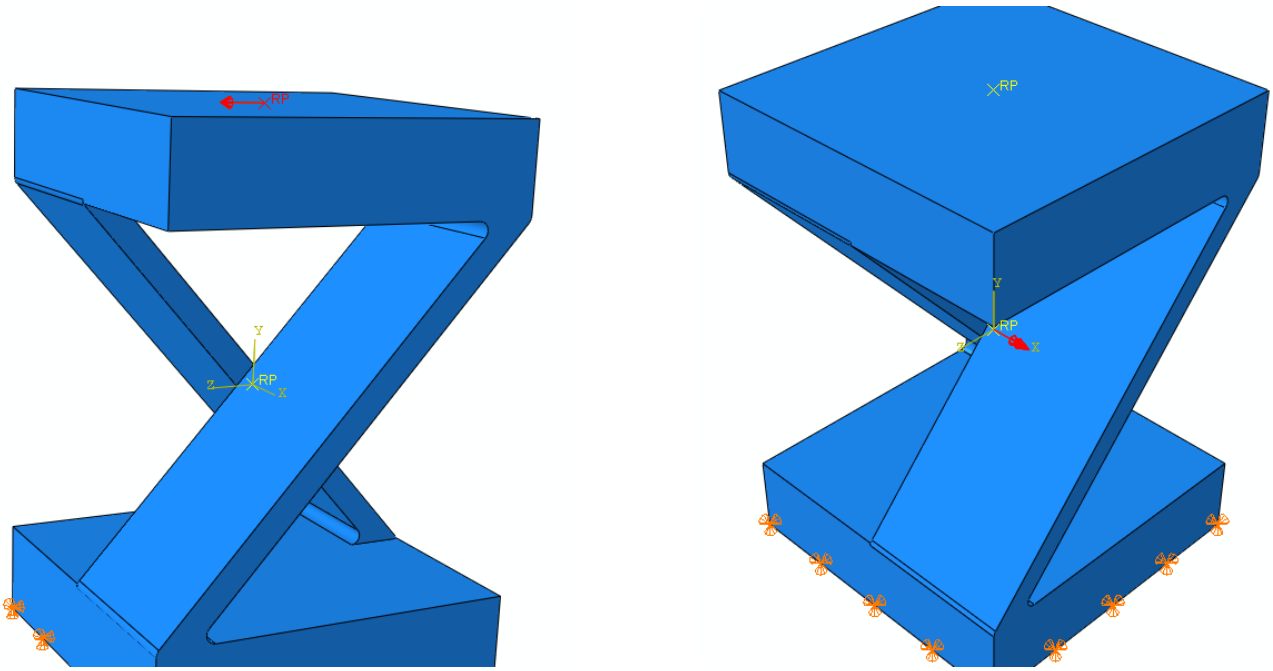


Figura 14. Imagen de las fuerzas aplicadas en las simulaciones. a) Fuerza. b) Momento.

Por último, como se ha dicho, este programa usa un método por elementos finitos. Por tanto, el último paso antes de ejecutar la simulación debe ser crear estos elementos finitos. Para dividir la pieza, debe crearse el mallado. El mallado, comúnmente llamado con su homónimo anglosajón *mesh*, consiste en partir la pieza en pequeños hexaedros o tetraedros. Aquí, es interesante ver la geometría de la figura y las dimensiones totales para elegir el mejor mallado posible. En este caso, las piezas tienen, por lo general, el volumen equivalente a un cubo de entre dos y tres centímetros de lado. Con este tamaño medio de pieza, lo ideal es generar un mallado de entre 0,2 y 0,5 milímetros de tamaño de elemento. Podría ser menor el tamaño, pero el tiempo de ejecución del programa se aumentaría considerablemente, y los resultados, aunque evalúa más puntos, no serían mucho más refinados. Por tanto, se puede considerar aceptable este tamaño de los elementos. En la siguiente Tabla 2 se van a presentar las características de cada uno de los cinco mallados. Cada pieza, debe mallarse de la forma que mejor se adapte. Igualmente, el tipo de mallado debe ajustarse lo mejor posible a la geometría. Se presentan dos tipos de mallado: el hexaédrico formado por cubos, y el tetraédrico, compuesto por tetraedros. En la posterior Figura 16 se ven sendos detalles de cada uno de los dos tipos de mallado utilizados. Además, en la Figura 17 y Figura 15, se ven varios ejemplos de cómo quedan algunas piezas tras realizar el mallado. Como se puede ver, debido al diminuto tamaño de los elementos no se aprecian bien las particiones.

	Tipo de malla	Tamaño malla	Número de elementos
MONOLITHIC CROSS PIVOT	Hexaédrica	0,2	419950
CROSS STRIP	Tetraédrica	0,55	195701
NOTCH HINGE	Tetraédrica	0,7	209864
SPRING	Tetraédrica	0,4	355194
BEE PANEL	Tetraédrica	0,3	188887

Tabla 2. Resumen de mallados de los diferentes sistemas.

Figura 15. Ejemplo de mallado de la pieza Spring.

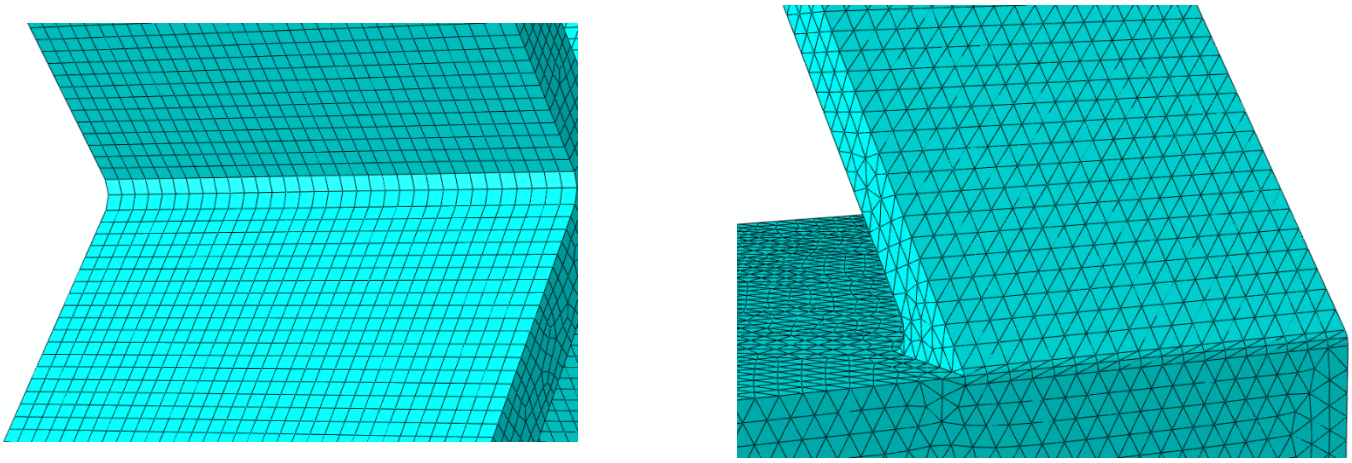


Figura 16. Detalle de los mallados de tipo hexaédrico y tetraédrico.

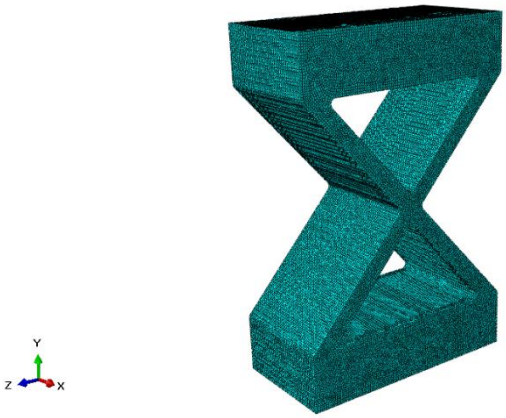


Figura 17. Ejemplo de mallado de la pieza Monolithic

3.3. RESULTADOS.

Este apartado va a presentar de manera breve las conclusiones extraídas tras la realización de todas las simulaciones. Para empezar, se presenta la tabla de resultados aportando los valores máximos de cada uno de los campos analizados y a continuación se justificarán estos resultados. Previamente, cabe destacar que, entre los dos materiales elegidos, destaca el nitinol por sus mejores propiedades a flexión y su característica pseudoelasticidad. El silicio, pese a ser muy utilizado en la actualidad, no es el mejor material con el que se puede trabajar.

	Notch Hinge	*Monolithic Cross Pivot*	*Cross Strip*	*Spring*	*Bee Panel*
Ángulo de giro CR (rad)	0,011	0,02	0,05	1,8	0,125
Desplazamiento CR (mm)	$4,2*10^{-3}$	$3,75*10^{-3}$	$6,8*10^{-3}$	16	0,27
Tensión máx. (MPa)	186	290	176	4058	2431
Deformación máx. (mm)	$2,25*10^{-3}$	$3,62*10^{-3}$	$2,2*10^{-3}$	$48,4 *10^{-3}$	$31,55*10^{-3}$
Desplazamiento máx. (mm)	0,30	0,32	0,92	70,10	1,67

Tabla 3. Resumen de resultados de las simulaciones en nitinol.

Para empezar por un criterio sencillo, se observarán los valores del desplazamiento máximo en milímetros. Se puede ver que el valor más elevado lo presenta el sistema *Spring*, y es que es el que mayor flexibilidad tiene. Hay que fijarse a su vez en las dos primeras filas que nos dan el movimiento del centro de rotación. En ambas se ve que *Spring* es el mejor sistema. Por tanto, parece fácil afirmar que el muelle sería el mejor sistema. Pero no hay que fijarse sólo en eso. Se deben ver las aplicaciones a las que se quiere someter. El muelle tiene la ventaja de que tiene más de un grado de libertad, pero a su vez esto puede ser su arma más letal. Esto significa que, si se requiere de una gran precisión, o de un trabajo muy concreto en una dirección determinada, el muelle podría no ser el mejor ya que se desplazaría y rotaría en varias direcciones de manera inconsciente.

Para aplicaciones determinadas son mejores los tres primeros sistemas, que tienen un solo grado de libertad bien determinado y con un rango considerable. De los tres, por los resultados presentados, se destaca el *Cross Strip*. Este es el que presenta mayor rango de movimiento del centro de rotación y además el que menos tensiones genera. Esto es debido a que presenta menos uniones también, ya que solo hay en la parte superior e inferior. Sin embargo, en la pieza *Monolithic* que tiene una estructura parecida, la unión central de las cuatro vigas hace que la estructura sea más rígida y también que sufra más al deformarse, puesto que necesita deformarse más. La primera pieza, la *Notch Hinge*, tiene una estructura un poco más rígida y no es capaz de doblarse tanto como los otros. No se ha mencionado nada de *Bee Panel*, y es que esta pieza, la cual está diseñada para ser estudiada en este proyecto, ha demostrado ser la más rígida de todas. El hecho de

colocar cuatro vigas cruzadas provoca una estabilidad muy buena y que permite a la estructura mantenerse en equilibrio. Lógicamente, ante una fuerza aplicada muy grande, se puede deformar y la pieza rotaria, pero observando la distribución de tensiones da a pensar que, ante una fuerza de gran tamaño, las uniones pueden no responder y acabar rompiendo o agrietando la pieza. En este sentido, el muelle también presenta puntos de tensión muy grandes y por tanto sujetos a roturas. Pero el punto a favor, es que su simetría permite utilizar el producto por ambos extremos y por cuatro puntos, cargando cada vez sobre un punto de cada uno de los cuatro que hay en cada anillo.

En conclusión, se puede ver que dos de los sistemas son los más útiles y los que más aplicaciones se pueden ver en ellos tanto a nivel micro como macro. Estos dos son el sistema *Cross Strip* y *Spring*. Estos arrojan los mejores resultados tras el análisis y la comparación. Son dos piezas que no se deforman en exceso, para las tensiones generadas en ellos, que implicaría un esfuerzo grande. Es decir, que la pieza puede trabajar en cargas cíclicas sin problemas. En caso del *Spring*, esto es mejor, ya que se puede utilizar por varios lados. Además, centrándose en otros aspectos, a nivel material son quizá los que menos volumen tengan y por tanto su fabricación será más barata. Para las mediciones, también hay que reconocer que la pieza más sencilla de colocar un sistema de galgado es el sistema *Cross Strip*, pudiendo colocarlas a lo largo de las vigas. Por tanto, queda claro que las mejores piezas son estas dos, mientras que *Bee Panel* tiene unos usos muy restringidos debido a su estructura rígida y los otros dos, son parecidos a *Cross Strip*, lo que hace que sean posibles sustitutos si esta falla.

Una vez concluido el resumen del proyecto base, se puede continuar adelante con las fases correspondientes. Por tanto, a continuación, se presentarán las técnicas de fabricación y posteriormente el diseño de un sistema de medida adecuado para este tipo de piezas.

4.PROCESOS DE FABRICACIÓN.

En este cuarto capítulo se van a presentar las diferentes técnicas de fabricación posibles para estos sistemas. Por supuesto, las técnicas más clásicas son viables, pero presentan una dificultad añadida al hablar de tamaños tan diminutos. Si estos sistemas se van a usar a una escala macro, a tamaños relativamente grandes, las técnicas tradicionales como pueden ser el torneado o el fresado, serían perfectas. Sin embargo, la reducción de tamaño implica una complejidad añadida. Por ello, se deben buscar nuevas tecnologías y formas de producir estos sistemas. Los siguientes apartados hablarán de diversas técnicas de fabricación. Se definirán, se explicará cómo funcionan y algunas ventajas y desventajas que puedan tener. Por último, se presentará un apartado en el que se concluya cual es la mejor técnica de fabricación para los sistemas diseñados.

La micro-fabricación consiste en la producción de estructuras miniaturizadas a escalas microscópicas e incluso nanoscópicas. Fundamentalmente, la micro-fabricación se utilizaba para la fabricación de circuitos integrados, pero la tendencia se ha expandido y actualmente también sirve para sistemas electromecánicos (MEMS y NEMS), componentes ópticos, componentes biomédicos o para microsistemas ensamblados.

El origen se encuentra en la industria micro-electrónica, generalmente sensores y circuitos integrados y el material usado por excelencia es el silicio. Además, se usan plásticos y vidrios entre otros materiales metálicos y aleaciones.

Previo a explicar las diferentes técnicas, se deben presentar algunos de los conceptos base de estas tecnologías. Algunos de estos son *doping*, *thin films*, *etching*, *bonding* o *polishing*. El término *doping* se refiere a la técnica de introducir impurezas en los semiconductores con la intención de alterar las propiedades eléctricas. Si el dopado es muy elevado, se puede considerar un semiconductor degenerado que trabaja con propiedades más típicas de materiales conductores. La técnica *etching* es la forma de grabado con la característica particular de que se suele usar un ácido para grabar sobre el metal. En micro-fabricación se utiliza esto para eliminar una fina capa superior (denominada *wafer*) que por lo general sirve para limpiar y poder añadir la siguiente capa. Este proceso se repite entre cada capa. Normalmente la parte que no se quiere eliminar se protege con un material resistente. Esto se puede encontrar en los procesos litográficos. La tecnología *bonding* es principalmente mediante cables o hilos. Estos hilos que pueden ser de aluminio, cobre, plata u oro entre otros y son la forma perfecta de unir diversos circuitos integrados (IC) u otros sistemas conductores. Es la tecnología más adecuada en relación coste-efectividad para unir diferentes piezas. *Polishing*, es el método de pulido de superficies. Generalmente, se usan abrasivos que reducen la rugosidad de la superficie, hecho que elimina las concentraciones de tensiones presentes y hace que la fuerza de la placa y su rigidez, en consecuencia, sea mayor. Por último, falta mencionar el concepto de *thin film* (es español película fina) que se refiere a cada una de las placas o capas que forman parte del proceso de fabricación de estos sistemas, ya que, cabe recordar que la micro-fabricación basada en procesos aditivos usa la metodología de capas como base de su trabajo.

A continuación, se van a exponer diferentes técnicas de fabricación aditiva y destructiva. Empezando por las tradicionales máquinas CNC, le seguirán las técnicas de fabricación de prototipos (*rapid prototyping)* y por último técnicas más específicas y modernas como la litografía, el corte por láser o agua o la electroerosión.

4.1. CENTRO DE MECANIZADO.

Esta es la técnica probablemente más conocida de fabricación y la más simple y convencional. Aunque algunas de las técnicas más modernas, como el corte por láser también usan este principio de CNC. Aquí se desarrollarán principalmente los centros de mecanizado como pueden ser fresadoras y tornos. Primero se va a hablar del concepto CNC que son las siglas de Control Numérico Computarizado, es decir, que el proceso de fabricación se controla desde el ordenador y desde ahí se mandan todas las órdenes a la máquina herramienta.

Estas máquinas disponen de unos servomotores y componentes de accionamiento capaces de desplazar los ejes de la máquina y hacer girar la broca siguiendo la trayectoria deseada y a la velocidad requerida. Se pueden encontrar seis elementos destacados en una máquina CNC. El primero es el dispositivo de entrada que puede ser desde un dispositivo USB con el código a ejecutar, o incluso algunas máquinas son capaces de conectarse a un ordenador externo leyendo el código del propio programa donde se ha escrito. Además, se encuentra la unidad de control para poder ajustar los parámetros que se necesiten previos a la ejecución del programa (esto puede ser el ajuste de ejes: el llamado cero pieza y cero máquina). La máquina herramienta, los sistemas de accionamiento y los dispositivos de realimentación que permiten trabajar a la máquina y, por último, está el monitor para ir revisando todas las acciones ejecutadas por la máquina y en su caso, parar el proceso e incluso retroceder. En la siguiente figura se puede apreciar un esquema general del funcionamiento de este tipo de máquinas, donde se aprecia que, desde el dispositivo de entrada, se lee e interpreta el código (códigos G y M) siendo estos los que activan la máquina y ejecutan las acciones. Además, hay una realimentación para que la maquina conozca en todo momento en que punto está situada la broca. Se representa mediante un diagrama de bloques en la Figura 18.

Estas máquinas CNC suelen llevar asociadas un apellido, el cual suele ser un número. Una máquina tres ejes o una máquina cinco ejes se diferencian en los diferentes movimientos que se permiten realizar con la herramienta. Por lo general los ejes de posicionamiento lineal son X, Y, y Z, mientras que los ejes giratorios son A, B y C. Los desplazamientos entre estos puntos se dan en coordenadas absolutas (respecto al origen de coordenadas) o incrementales (respecto a la posición actual). Además, para completar la automatización del proceso, se implementan otras funciones como el cambio automático de la herramienta (las herramientas están ubicadas con un código cada una, con el cual se puede acceder a ellas), la velocidad y activación del husillo (usado para controlar la velocidad de giro de la broca, por lo general en rpm) y el refrigerante. El refrigerante es primordial para lubricar y enfriar la herramienta ya que, si no, puede quemarse y estropear la máquina. Solo falta por controlar el movimiento de la herramienta. Para esto, se usan los códigos G y M que están normalizados y estandarizados. Las instrucciones G son

ordenes generales que representa los movimientos de la máquina mientras que las instrucciones M (misceláneas) son las referentes al mecanizado de la pieza, es decir, cambios de herramienta, repetición de ciclos, refrigerantes… Además, cada una de estas órdenes pueden llevar adosadas otras que modifiquen ciertas características. Estas, sobretodo aparecen en los ciclos, que son ejecuciones repetitivas. El objetivo de los ciclos es reproducir una secuencia de órdenes de manera consecutiva para realizar la misma acción en diversos puntos de la pieza. Además, con la generación de estos ciclos, se ahorran líneas de código.

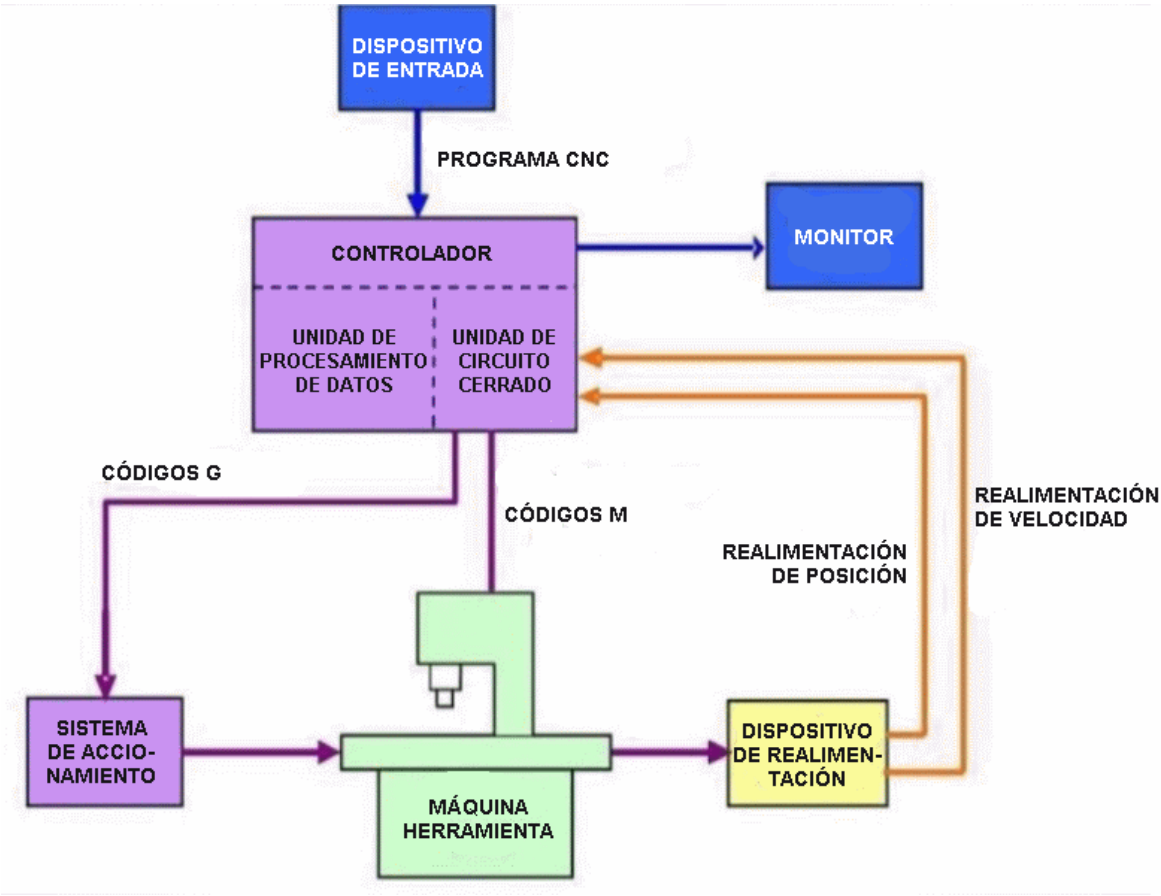


Figura 18. Esquema de funcionamiento de una máquina CNC.

Estos códigos por supuesto, pueden ser generados de forma automática con un programa CAM, ya que reconoce la fisionomía de la pieza y con indicar las herramientas a usar, el programa es capaz de generar el código lo más eficazmente posible.

Las máquinas más convencionales en usar estos sistemas de control numérico son las fresadoras y los tornos. Todas las máquinas que emplean esta tecnología se basan en un proceso destructivo. Es decir, se parte de un bloque del material y se va eliminando el sobrante de dicho material para que se genere la forma deseada. El método de eliminación es el de arranque de viruta. Es decir, la herramienta hace pasadas por capas sobre la superficie de la pieza y se va llevando el material. Las capas suelen ser de tamaño

milimétrico. Los materiales usados son metales como el aluminio o el acero. Se podrían utilizar otros materiales, pero quizá las brocas deberían cambiarse para adaptarse al material. Plásticos y vidrios, son impensables de utilizar en estas máquinas.

A nivel de los sistemas estudiados en este proyecto, los materiales considerados son el silicio y el nitinol. Ambos son metálicos y por tanto se podrían encontrar en estado sólido. De forma que este proceso es una vía aceptable de fabricación. Sin embargo, si se piensa que los sistemas se quieren realizar a tamaño microscópico, con tan solo uno o dos centímetros en su dimensión mayor, se encuentra un problema, ya que las máquinas tienen unas ciertas tolerancias que en una pieza tan pequeña pueden ser fatales para el resultado final. Además, las brocas deberían tener un tamaño muy fino, lo que también eleva el riesgo de que se queme y se estropee. Como resultado, se suelen presentar impurezas en el resultado final que deben ser lijadas. En una pieza de pequeñas dimensiones, esto puede dificultar su correcto funcionamiento. Por tanto, es una tecnología barata pero que puede no dar resultados del todo perfectos, hecho que hace que esta tecnología no se tome como primera opción.

Figura 19. Ejemplo de una fresadora.

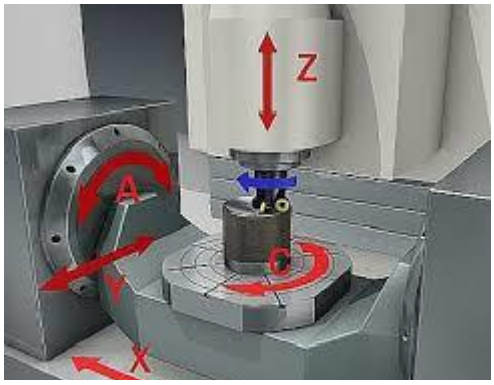


Figura 20. Esquema de los movimientos posibles de la broca en una fresadora 5 ejes.

4.2. RAPID PROTOTYPING.

Este segundo apartado van a presentar variadas técnicas de fabricación aditiva y sustractiva modernas. Se separarán en dos partes y dentro de estas según el estado del sustrato base con el que se fabrique. Los tres estados base de los que se puede partir son sólido, líquido y polvo. En el caso de la base sólida lo más probable es que se vaya eliminando el material sobrante, mientras que en el líquido y polvo el proceso consista en ir curando el material y solidificándolo. A continuación, se expresan todas estas tecnologías con algunos ejemplos gráficos de sus procesos o resultados finales. Todos estos procesos se realizan por capas, es decir que va dando forma a cada una de las capas de la pieza a lo largo de su grosor. Se va trabajando una encima de otra. Según la geometría, se pueden necesitar materiales de soporte que al finalizar la fabricación serán eliminados. Algunos de los procesos que se desarrollaran son en superficies planas, o placas por lo que solo hay una sola capa y se realiza el grabado sobre la misma.

4.2.1. Procesos aditivos.

Estos procesos tienen una característica en común: se basan en la adicción de material para ir formando la pieza deseada. Los materiales principales de estas técnicas son polímeros, pero también se puede fabricar con metales. Algunas de estas técnicas que se van a desarrollar son FDM, SLA, RFP o SLS.

La primera en presentarse es FDM (*Fused Deposition Modelling)*. Su elemento principal se presenta en estado sólido y se basa en el proceso de extrusión del material mientras la boquilla se desplaza por la superficie dando forma a la pieza. El filamento que presenta pasa por unos rodillos que lo funden al calor y de esta forma sale por la boquilla en forma de chorro que se va dejando en la base. La posición de las boquillas es fija por lo que la base se debe ir desplazando después de cada capa hacia debajo de forma que deje hueco a la siguiente. Su principal ventaja es que se pueden usar tantos materiales como boquillas disponga la máquina, así como colores. Su principal problema, por el contrario, es que se tarda mucho en fabricar por ese método. Con respecto a los posibles materiales y dimensiones, esta técnica es viable para las piezas de este proyecto.

Otra técnica, con una base esta vez líquida es la estereolitografía (SLA). Es muy parecida a la que se explicará posteriormente como fotolitografía, con la pequeña diferencia que se usa un láser en lugar de una luz ultravioleta y que el material base se encuentra en un tanque que el láser va curando y solidificando siguiendo un patrón establecido previamente por un ordenador (el movimiento del láser se programa de manera similar al proceso CNC). En la siguiente Figura 22 se puede ver un esquema del proceso SLA con todos los elementos que intervienen en el proceso. Las principales ventajas de esta técnica son la velocidad de trabajo, la exactitud y perfección del acabado final y la variedad de materiales diferentes que se pueden utilizar y sin malgastar apenas material.

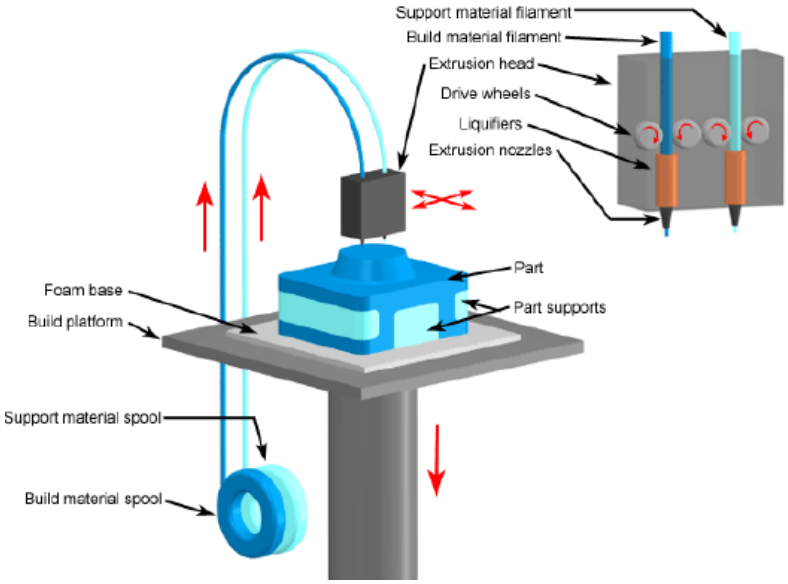


Figura 21. Esquema general de FDM.

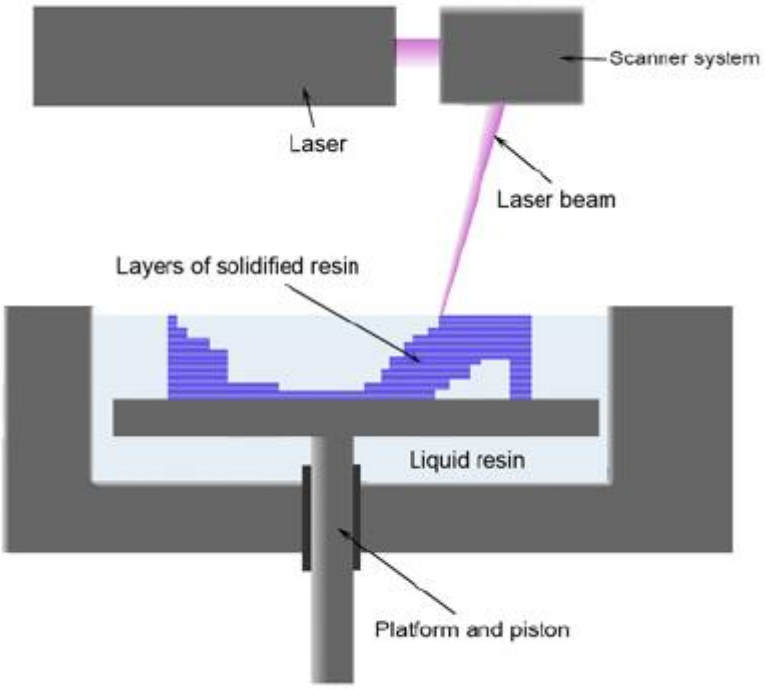


Figura 22. Esquema general de SLA.

La tercera técnica de fabricación aditiva que se presenta es la llamada *polyjet*, que se puede traducir como la técnica del múltiple chorro. Esta trabaja de una manera muy eficaz, obteniendo resultados muy buenos y se basa en curar mediante chorros de rayos ultravioleta las zonas necesarias que formen parte de la pieza. Cabe recordar que cada

capa puede tener una forma diferente y que en ocasiones es necesario curar un segundo material que haga las funciones de soporte y una vez terminada la pieza, se retire y quede la pieza definitiva. Su principal ventaja es que el acabado es óptimo y que las capas ideales suelen ser de unos 16 μm, lo que hace que haya mucha densidad de material. Por el contrario, es un proceso muy lento, alcanzando una velocidad de 6.5 mm/h y el coste puede ser muy elevado. A continuación, se puede ver su esquema general del proceso.

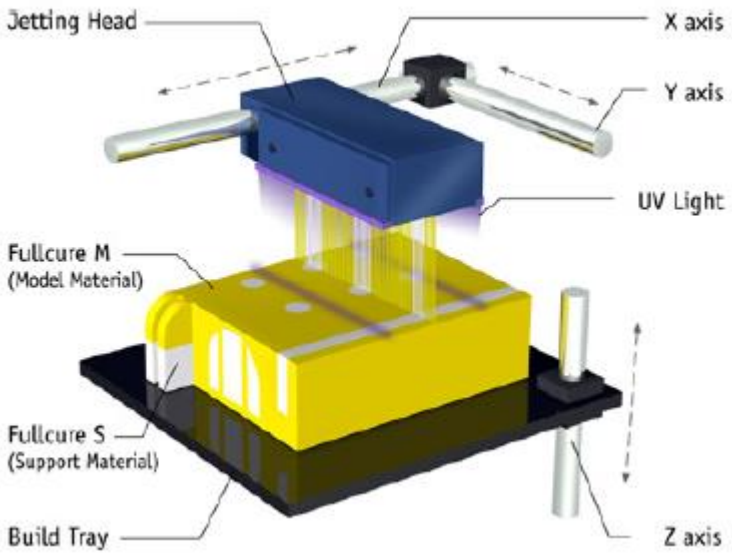


Figura 23. Esquema general de Polyjet.

La siguiente técnica es RFP, que significa *Rapid Freeze Prototyping Process*. Este proceso es el último de los procesos aditivos que tienen como base un líquido. En este caso es el agua. El proceso como su propio nombre indica consiste en congelar, solidificar el agua que se va aportando con el chorro de alimentación. El chorro puede aportar agua

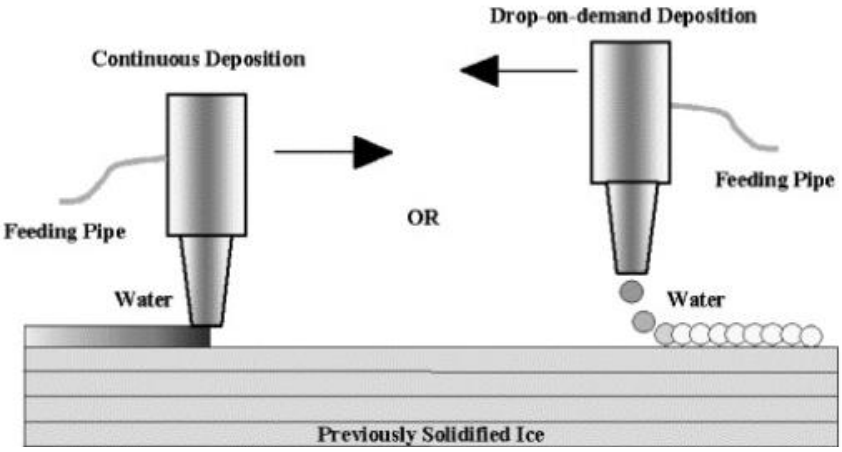


Figura 24. Esquema del proceso RFP.

de manera continua o mediante un sistema de goteo continuado. La boquilla recorre la forma que previamente se ha programado en un ordenador. El mayor inconveniente de este proceso es que se debe realizar con agua o algún material que con un enfriado rápido instantáneamente se solidifique. Con el caso del nitinol y del silicio esta brevedad de solidificación es muy complicada, por lo que esta técnica queda descartada.

A continuación, se presentan tres tecnologías basadas en una base de polvo. Dos de ellas son muy similares entre sí, ya que usan el láser como instrumento de fabricación. Estas dos primeras técnicas con SLS y LENS. SLS, *Selective Laser Sintering* utiliza un proceso de curación del material mediante un rayo láser. El proceso comienza con el esparcimiento de una base de material en polvo sobre un pistón. La capa debe tener el grosor adecuado y una vez está preparada, se conecta el láser y el rayo irá recorriendo la forma correspondiente a esa capa mientras va curando el material. La curación consiste en la solidificación del material y compactación del mismo. Una vez terminado el proceso y tras dejar secar unos instantes, el pistón descenderá y se procederá a esparcir la siguiente capa de material, donde el proceso volverá a comenzar. En la Figura 25 se puede ver un esquema del proceso. Su principal ventaja es la variedad de materiales que admite este proceso y que el material de soporte es el propio polvo de las capas inferiores, por lo que se puede retirar muy fácilmente. Por contra, es un proceso que deja porosidad en el material, por lo que puede producir grietas ante trabajos que suponen muchas repeticiones cíclicas.

El segundo de estos procesos destacados por su uso del láser es el proceso LENS: *Laser Engineered Net Shaping*. El proceso consiste en ir fundiendo el material con el uso del láser e ir vertiendo este fluido por una boquilla. La boquilla seguirá un patrón previamente programado con la forma de la pieza a fabricar. Este proceso permite ajustar muchos parámetros lo que facilita la fabricación de piezas muy complejas. Algunos de estos parámetros son por ejemplo el caudal de polvo que expulsa la boquilla (regulando así la densidad de la pieza), la rugosidad de la superficie o la velocidad de trabajo. Alguna de sus ventajas son su velocidad de fabricación, las buenas propiedades mecánicas que se pueden obtener de las piezas producidas o la posibilidad de utilizar varios materiales en la misma pieza. Su inconveniente principal es que no permite usar material de soporte en la fabricación.

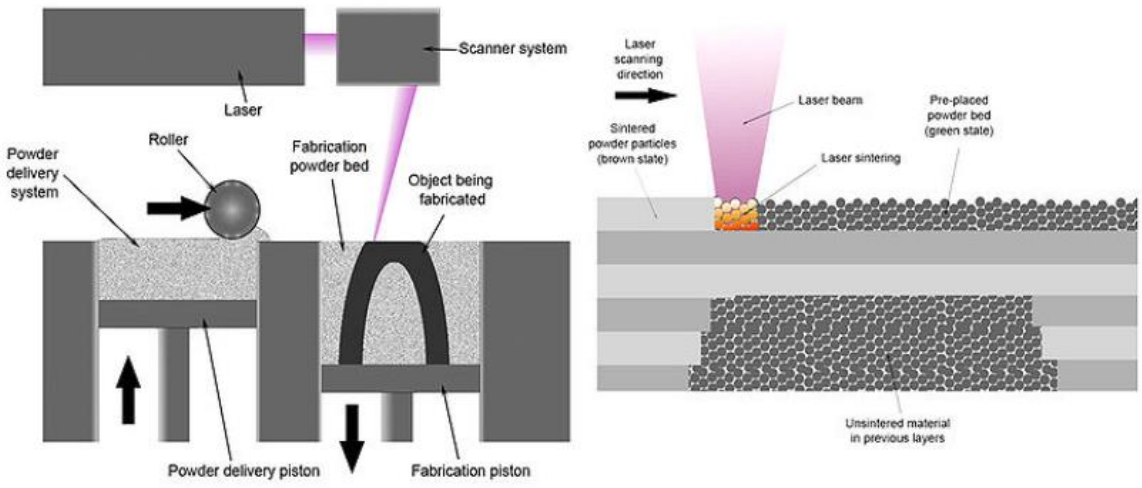


Figura 25. Esquema general del proceso SLS.

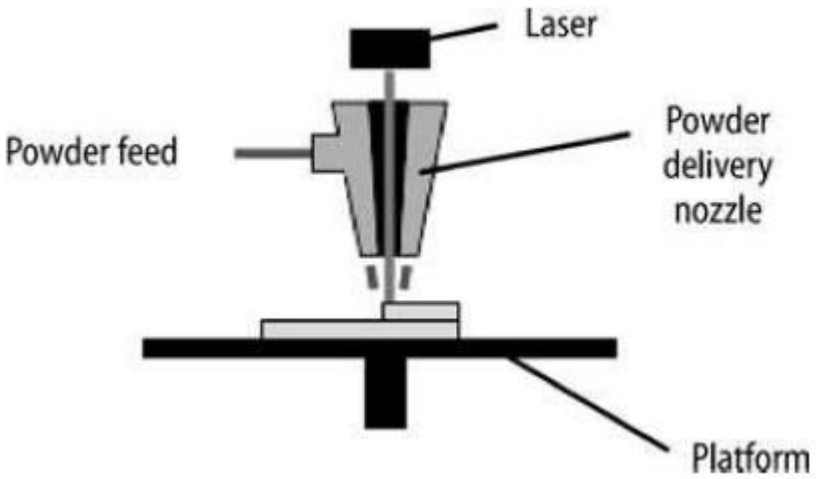


Figura 26. Esquema del proceso LENS.

Falta un proceso aditivo por presentar. Este es, probablemente, el más conocido y utilizado hoy día. Aunque se puede considerar la forma genérica de todos los procesos anteriores, la impresión 3D es un proceso independiente. La impresión 3D tiene como base el polvo. El proceso es similar al utilizado en SLS, con la principal diferencia de que no se usa el láser. Lo primero que se debe hacer es esparcir una capa de polvo sobre una plataforma elevadora. Una vez preparada, una boquilla va uniendo las partículas con un pegamento líquido que hace que el polvo se vaya solidificando. El proceso es

bidimensional, ya que va capa a capa desplazándose por el plano horizontal. Una vez terminada la capa con la forma deseada, se deja secar un poco y la plataforma desciende, dejando hueco a una próxima capa. Esto se repite hasta finalizar la pieza, momento en el que se retira el material sobrante y de soporte. Las ventajas de la impresión tridimensional son múltiples. Por ejemplo, la posibilidad de fabricar en varios colores añadiendo aditivos al material, el bajo coste que supone esta técnica o la poca cantidad de material que se desperdicia, ya que el material sobrante se puede reutilizar en otras piezas. Como desventaja principal es que solo sirve para materiales plásticos y el resultado es una pieza frágil. En la siguiente Figura 27 se puede ver un esquema general del proceso de fabricación por impresión 3D.

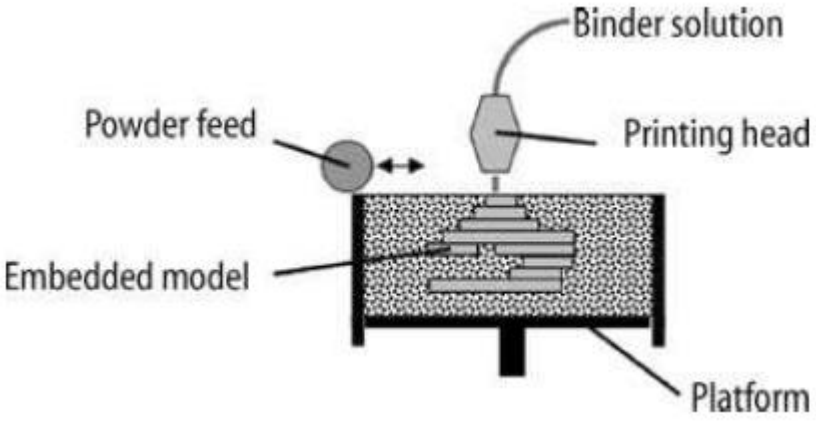


Figura 27. Esquema general de 3DP.

Figura 28. Ejemplo de una plantilla de un pie fabricada con tecnología 3DP.

4.2.2. Procesos sustractivos.

Estos procesos, al contrario que los anteriores, se basan en ir quitando material para ir dando forma a las piezas finales. Se van a presentar brevemente tres tecnologías, siendo una de ellas prolegómeno de lo que vendrá a continuación.

La primera en presentarse es la tecnología LOM, *Laminated Object Manufacturing.* Esta es una técnica muy factible para los sistemas que utiliza el proyecto. La base de fabricación es una plancha metálica. La plancha se coloca sobre una base. Previamente, la plancha ha sido calentada de forma que empieza a ablandarse, pero sin llegar a derretir. Este calor aplicado hace que la plancha se adhiera a la base gracias a una capa de polietileno que hace las veces de pegamento. Una vez situada en posición y con ayuda de una láser se dibuja el contorno de la pieza que corresponde a esa capa. Una vez terminado de dibujar el contorno y, si los hay, los agujeros centrales el resto de la plancha se retira y se vuelve a colocar la siguiente capa donde el proceso se repite. Este proceso permite fabricar en metales por lo que resulta un proceso muy interesante para los sistemas desarrollados. En la siguiente Figura 29 se aprecia un esquema del proceso LOM.

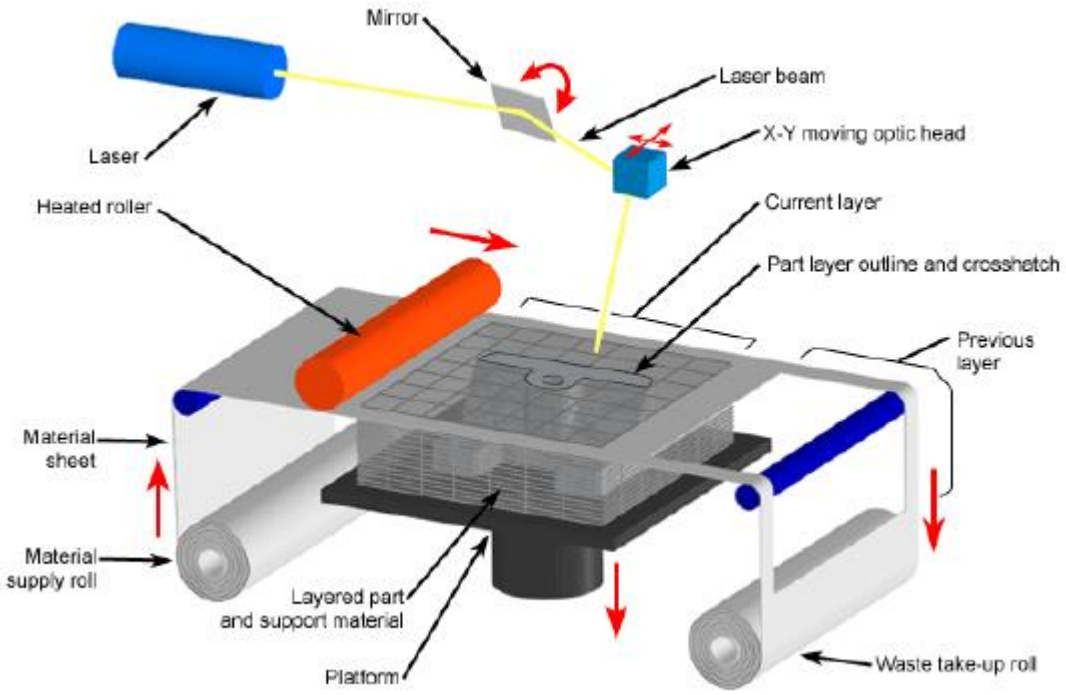


Figura 29. Esquema general de LOM.

Una segunda técnica es UC, *Ultrasonic Consolidation*. Este proceso consiste en ir pegando una capa sobre otra mediante aplicación de presiones. Se utiliza un sonotrodo que aplica fuerzas verticales sobre una placa para que con la presión se una a la placa inferior. Una vez se han pegado las dos capas, en caso de que haya ranuras o material sobrante se somete a un proceso de fresado. Es debido a este fresado por lo que se supone

un proceso substractivo, ya que la adhesión de placas es un proceso aditivo. Su ventaja es la posibilidad de utilizar metales como material de fabricación, y sus complejas geometrías admitidas. Es un proceso rápido y barato. Por el contrario, necesita temperaturas bajas de fusión de los metales y para los metales usados en el proyecto puede ser un hándicap.

Las dos últimas técnicas que se presentan como procesos sustractivos son el corte por láser y por chorro de agua. Del corte por láser no se va a mencionar nada más, ya que es similar al resto de procesos descritos que utilizaban esta técnica. El corte por chorro de agua o *waterjet* es un proceso que consiste en cortar y dar forma a placas de todo tipo de material. Se basa en la gran presión a la que está sometida el agua. Esta sale a unos 4000 bares de presión y por lo general va recorriendo la placa y va abrasando el material de forma que crea una ranura de forma cónica. No es factible para este proyecto ya que no contempla la tercera dimensión. Este es un proceso útil para grabados o cortes en plano. Estas dos últimas técnicas son la antesala a la electroerosión que utiliza una técnica similar gracias a un arco eléctrico.

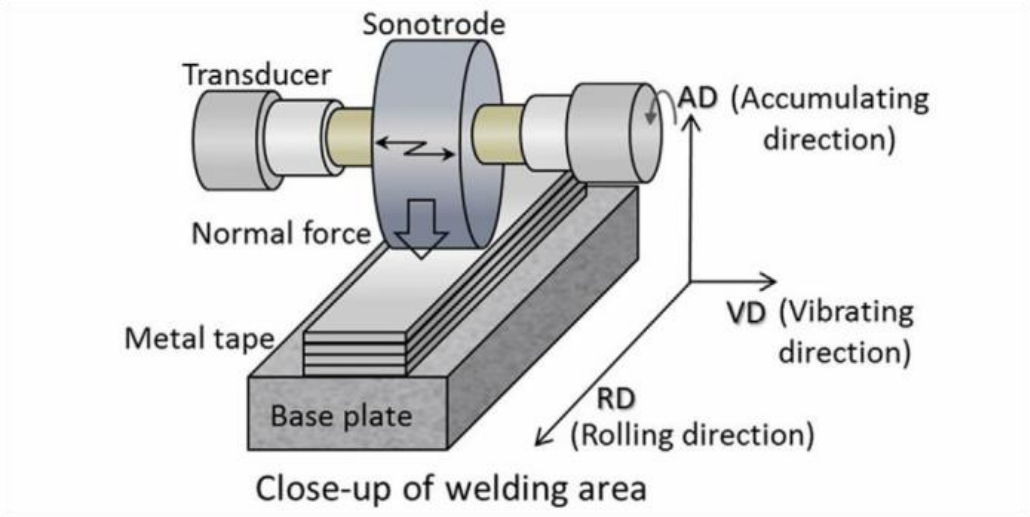


Figura 30. Esquema general de UC.

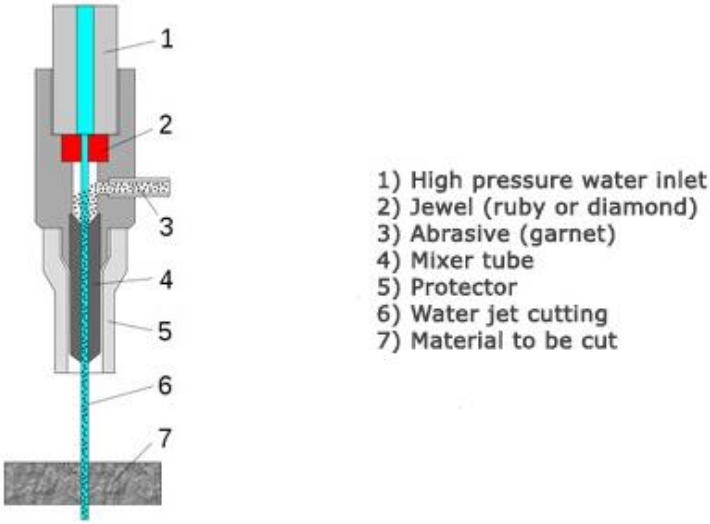


Figura 31. Esquema general del proceso Waterjet.

4.3. ELECTROEROSIÓN.

Esta es otra tecnología que puede utilizar el método CNC, aunque se puede realizar a mano si hace falta teniendo en cuenta que es menos preciso. La electroerosión o mecanizado por descarga eléctrica (EDM) es un proceso de mecanizado mediante el cual se utiliza un hilo de metal para cortar un dibujo anteriormente establecido y diseñado por ordenador en una pieza, generalmente una placa. El hilo siempre atraviesa el grosor de la pieza y es por esto que, si el dibujo a cortar se encuentra en el interior de la misma, previamente debe hacerse un agujero donde introducir el hilo o cable. En caso de que el dibujo pueda comenzar desde un extremo, este se toma como origen del proceso.

Este proceso consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza metálica por lo general y un electrodo. Para que se produzca el arco eléctrico, ambas partes deben ser conductoras, por esto que los materiales usados en este proceso suelen ser metales. La electroerosión tiene dos variantes principales: la que utiliza el electrodo de forma y la electroerosión con hilo.

La electroerosión con electrodo de forma o por penetración es un proceso en el que el electrodo y la pieza se sitúan a una distancia muy pequeña (entre 0,01 y 0,05 mm). En este hueco se encuentra un líquido dieléctrico (aislante), y que por lo general es un aceite. Al aplicarse una diferencia de tensión entre ambos se genera un campo eléctrico provocando el aumento de temperatura y la consecuente evaporación de dicho aceite. Al desaparecer el aislante, aparece el contacto eléctrico en forma de chispa que es la que se encarga de ‘romper’ el material. Este puente eléctrico que se forma, rompe y separa las

partículas del metal dejando al paso del electrodo una ranura que hace que corte el material. Este ciclo se debe repetir hasta cortar el grosor que se desee. Además, la altura entre pieza y electrodo debe ir regulándose constantemente, pues el electrodo se desgasta. El electrodo utilizado, por lo general es de grafito o cobre electrolítico ya que presentan muy buenas propiedades de conductividad. Tiene un diámetro milimétrico y se suelen utilizar diversos electrodos en las diferentes fases del proceso. Para un desbaste primario se utiliza uno más grueso que para los detalles finales y de control de tolerancias. En la siguiente Figura 32, se verá un esquema del proceso de electroerosión por electrodo de forma. La maquinaria que hace este proceso, puede ser una de tipo CNC. Por ejemplo, estas se pueden diferenciar de la fresadora tan solo en que la broca ahora es un electrodo. Pero también es un proceso que se puede hacer manualmente siguiendo las medidas de seguridad preventivas.

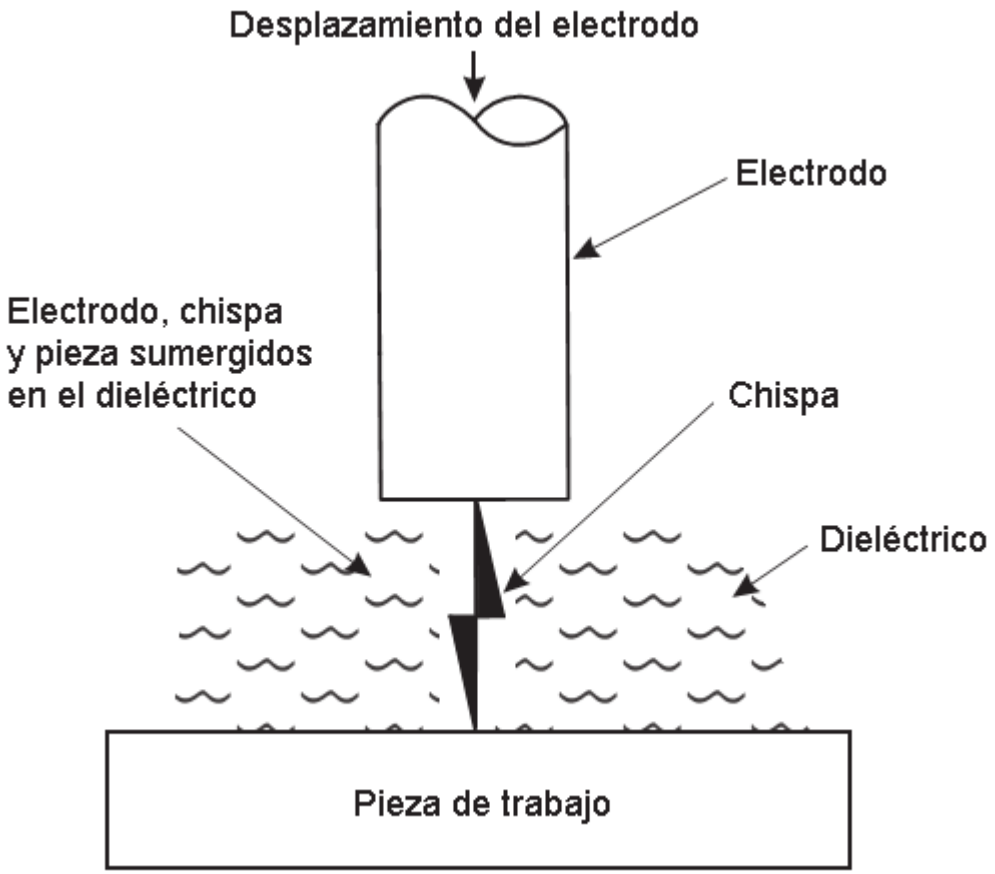


Figura 32. Electroerosión por electrodo de forma.

Por otro lado, se presenta la electroerosión por hilo. La diferencia principal es que en este proceso se utiliza un hilo en lugar de un electrodo. Este hecho hace que el volumen de arranque de material incremente notablemente alcanzando los 350 cm^3/h. El proceso no varía demasiado, ya que se genera una chispa entre la pieza y el hilo al calentar el dieléctrico, pero sí tiene varios parámetros muy importantes a tener en cuenta. Principalmente, para que el corte sea 'limpio' y eficaz, la tensión del hilo es muy importante. También cabe destacar que en este proceso las polaridades son constantes, siendo el hilo

el polo positivo, mientras que en el proceso mediante electrodos de forma la polaridad puede ser reversible. En este proceso, a diferencia del anterior, lo que se desplaza es la pieza, ya que el hilo está sujeto entre dos bobinas que lo enrollan y que son fijas. El hilo que presenta diámetros entre 0.02-0.33 mm suelen ser de aleación de cobre (latón) y zinc. Puede ser inclinado de forma que corte piezas cónicas y otras superficies no verticales. En la Figura 33, se ve un esquema del funcionamiento de este proceso.

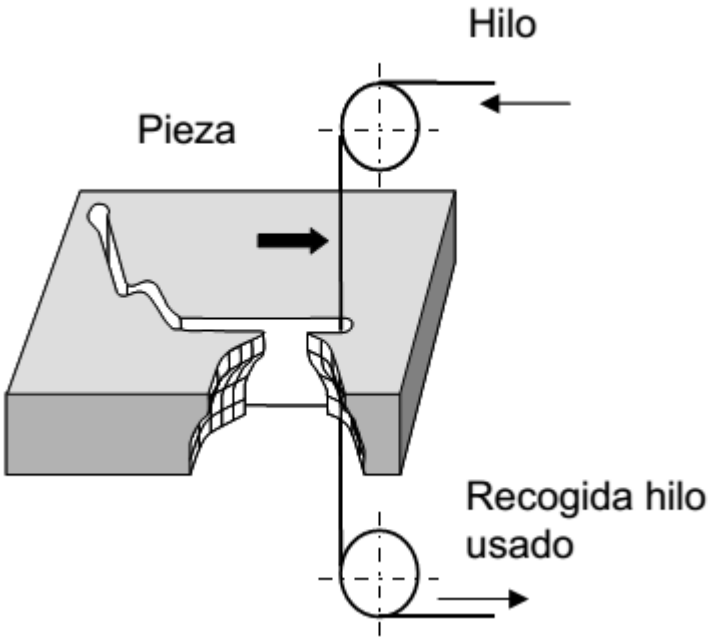


Figura 33. Electroerosión por hilo.

Las principales ventajas que presenta el corte por hilo frente al uso del electrodo de forma es la alta precisión y la complejidad de las formas logradas. Además, permite mecanizar ciertos materiales que han sido tratados térmicamente antes evitando así las deformaciones típicas de estos tratamientos.

A modo general, la electroerosión presenta ciertas ventajas ante otras técnicas como el hecho de no aplicar fuerzas sobre la pieza lo que permite trabajar con materiales frágiles; y al ser un proceso que juega con las temperaturas, cualquier material conductor es válido. Otra ventaja presentada es la oportunidad de trabajar en superficies inclinadas sin necesidad de recolocar la pieza, puesto que el electrodo o hilo se pueden girar y rotar. Un tercer punto a favor es que las tolerancias son mínimas y permite trabajar con mucha exactitud.

Sin embargo, también tiene puntos negativos que se deben tener en cuenta como el desgaste del electrodo, o los restos de material fundido que se quedan en la superficie de la pieza. Otro problema que puede aparecer es el hecho de la rugosidad que deja el paso del electrodo (el hilo en este aspecto deja menos imperfecciones), pero que tiene fácil solución lijando la superficie rugosa. El proceso por penetración es verdad que guarda una relación entre la forma del electrodo y la que se quiere obtener en la pieza, por tanto, esto puede elevar el coste, si el electrodo debe tener la forma de la pieza. En el corte por hilo,

los cortes son rectos u oblicuos, pero, la forma se ha de dibujar por su contorno y repasar su interior en caso de que se quiera hacer hueca.

Por último, hay un tercer tipo de electroerosión, poco utilizada y que consiste en la perforación. Su peculiaridad radica en que el corte es más vertical que transversal, siendo la relación entre diámetro y profundidad de 1 a 30. Su función principal es la de realizar los agujeros iniciales para introducir el hilo o el electrodo para orificios interiores en los otros dos procesos.

Para los diseños de este proyecto, la electroerosión es un proceso bastante factible de utilizar en la mayoría de ellos. Concretamente, para los tres primeros diseños, los comerciales, se puede utilizar esta técnica si se fabrican desde su vista alzada, ya que partiendo de una pieza rectangular se puede obtener la forma definitiva. Sin embargo, para la pieza *Spring* y *Bee Panel*, esto es más complicado debido a la geometría circular en el primer caso y a las vigas cruzadas en múltiples direcciones en el segundo. Por materiales, es viable realizar las piezas en nitinol y en silicio, por lo que ahí no hay inconvenientes. En lo referente a costes, es verdad que la manufactura del electrodo, el hecho de tensar el hilo o el coste del aceite dieléctrico puede ser más caro que el uso de las brocas, pero la posibilidad de trabajar en dimensiones pequeñas y con gran capacidad de adaptación ante complejidades, así como la alta efectividad hacen de este método una tecnología muy interesante para la fabricación de estos sistemas.

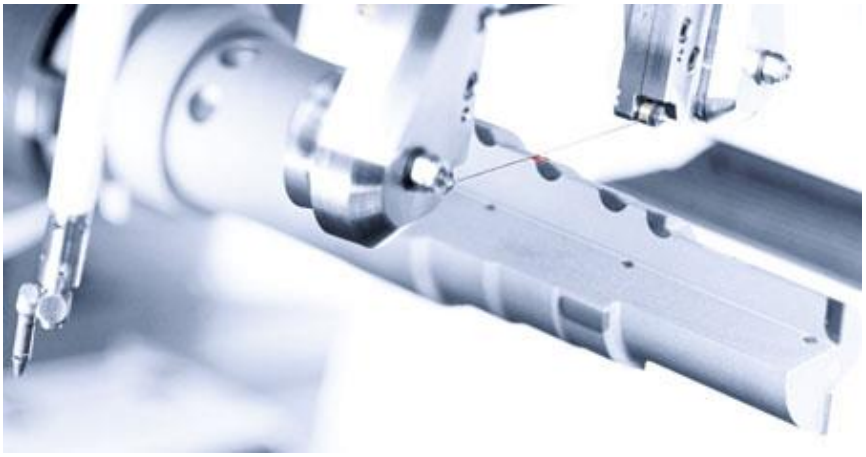


Figura 34. Detalle del proceso de electroerosión por hilo.

4.4. LITOGRAFÍA.

Este último apartado va a exponer la técnica más moderna utilizada en la micro-fabricación. Es la metodología básica de producción de los sistemas electromecánicos, tanto micro como nano. La litografía, aunque modernizada, proviene de una antigua metodología de copia de obras de arte. Creada en el siglo XVII por el alemán Aloys Senefelder se jugaba con la hidrofobia e hidrofilia de diversas sustancias para recrear dibujos sobre piedras, de ahí su nombre (*lithos* en griego es piedra y *graphe* significa dibujo). Hoy día la técnica ha evolucionado y aunque se usa el mismo principio, ya no se realiza sobre piedra.

La litografía actual se basa en ir dibujando capa a capa la pieza que se desea. En cada una de las capas se realiza un proceso litográfico en su más estricto sentido de forma que se dibuja en cada una de esas capas la sección de la pieza correspondiente. También se le denomina fotolitografía ya que es la más utilizada en micro-fabricación. Hay otras técnicas que son las tecnologías litográficas blandas de las que se hablarán más adelante.

Se denominan también litografías de superficie por su característica de ir fabricando en capas de grosor del orden de la micra y el nano. El proceso base está marcado por los siguientes cuatro pasos.

1. Se añade la capa de material del grosor deseado.
2. Se imprime sobre la capa el dibujo o forma que corresponde con dicha altura de la pieza (la técnica de la impresión puede variar).
3. Se deja curar la capa y se elimina el material sobrante.
4. Una vez terminados los tres pasos anteriores, se aplica una nueva capa de material del mismo grosor y el proceso vuelve a empezar.

En ocasiones, se pueden usar dos materiales diferentes: uno es el material de la pieza deseada llamado material estructural y otro es un material degradable que se elimina tras acabar la pieza o la capa de manera sencilla. Este segundo es el llamado material sacrificial.

4.4.1. Fotolitografía.

La fotolitografía es la técnica más utilizada en micro-fabricación moderna. Esta sigue los principios básicos anteriormente explicados, pero con la característica principal de que es la luz, por lo generalmente de frecuencias altas y pequeñas longitudes de onda (luz ultravioleta) la que se encarga de fabricar la pieza. Ya se ha mencionado esta tecnología en el estado del arte, pero se va a explicar el proceso de nuevo detalladamente.

El primer paso fundamental es cubrir la superficie de fabricación con el material que se quiera fabricar y el grosor deseado. Para esto se ha diseñado previamente con un *software* de diseño y se ha calculado debidamente cuantas capas debe tener esta pieza. El material, puede ser todo del mismo tipo o puede haber diversos materiales: algunos, en ocasiones sirven de soporte y luego serán fundidos con calor o incluso eliminados por chorro de agua. Una segunda capa debe ser añadida. En este caso, no es de material sino de unas resinas fotosensibles que hacen que el material al ser sometido a la luz se una y se fije la forma. Se puede considerar el pegamento para el material. Una vez cubierta la base con el material y la resina, se procede a colocar una máscara encima. Esta máscara es de un material foto resistente. Dicho material puede ser cuarzo con un recubrimiento de

cromo que aumenta la opacidad y evita que esas zonas cubiertas sean curadas posteriormente. Esta máscara tiene impresa de manera hueca el patrón de la pieza, de forma que queda al descubierto el material que hay debajo de esos huecos de la placa. Este será el material que se utilizará en la pieza, el resto quedará en desuso. Una vez preparada la pieza, se somete a una luz ultravioleta que curará el material y sellará la forma deseada que está impresa en la máscara. Previamente, se ha podido calentar en un horno para que la resinas empiecen a actuar sellando el sustrato. Para obtener una mejor resolución se usa luz ultravioleta, ya que poseen menores longitud de onda y aportan esta mayor resolución buscada. La exposición se realiza mediante una especie de proyector llamado *stepper*. Tras la exposición a la luz, se introduce la pieza en el horno para que se selle la forma y por último se somete a un proceso de *etching* para limpiar las impurezas de la resina y sellar así la forma definitiva de la máscara en el material.

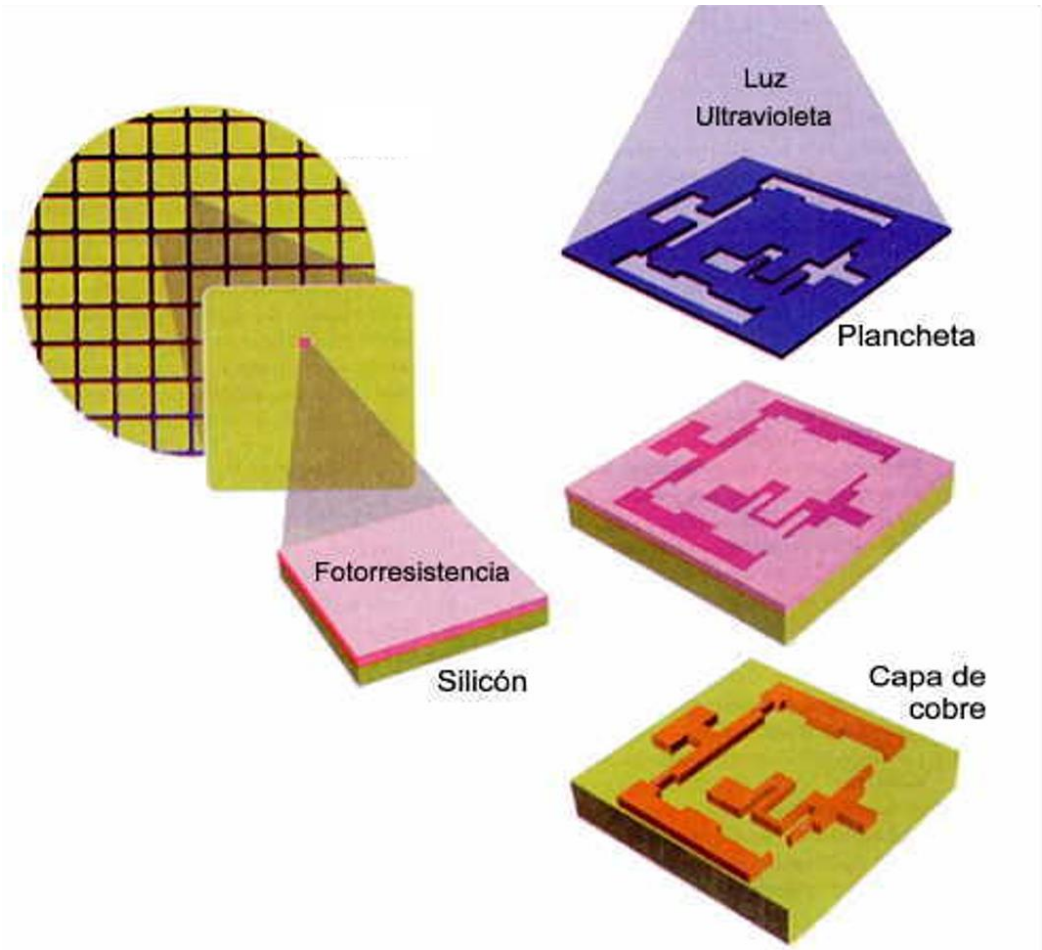


Figura 35. Esquema general de la fotolitografía.

Las condiciones de trabajo de esta técnica son muy especiales, ya que la sala debe estar perfectamente liberada de partículas en suspensión, asimismo se debe evitar la exposición a luces ultravioleta. Esto es necesario para evitar que la resina actúe fuera de tiempo y evitar la contaminación del proceso.

Todo lo mencionado puede ser tanto para micro-litografía como nano-litografía. Hay que destacar que en casos de nano-litografía, con aplicaciones ópticas se debe tener en cuenta el espectro visible y los límites de longitud de onda. Por ello se está desarrollando una mejora de esta tecnología llamada nueva generación. Muy relacionado con esto se puede presentar la litografía de escritura directa por haces de electrones, la cual tiene el mismo proceso desarrollado, pero con la característica de que en vez de un rayo de luz ultravioleta, se utiliza un haz de electrones sobre la máscara imprimiendo la figura deseada sobre la resina.

Para las piezas de este proyecto, el sistema puede ser muy bueno de fabricar, ya que se obtiene un sellado del material óptimo, prácticamente sin fisuras ni poros que podría dañar y afectar al resultado del trabajo de la pieza. Sin embargo, esta técnica está pensada para la fabricación de elementos muy finos, tales como chips o MEMS. Y para fabricar las piezas que se simulan en este proyecto, se necesitaría un numero tal de repeticiones y de capas que el coste se elevaría exponencialmente y se supondría inasumible. Por tanto, para los sistemas es impensable utilizar esta tecnología. Sin embargo, para la fabricación de los sensores que se van a implantar en las piezas, es una tecnología ideal, ya que necesitan ser finos y de pequeño tamaño. Sin duda, las galgas que se colocarían en las piezas diseñadas, deben ser fabricadas por esta técnica.

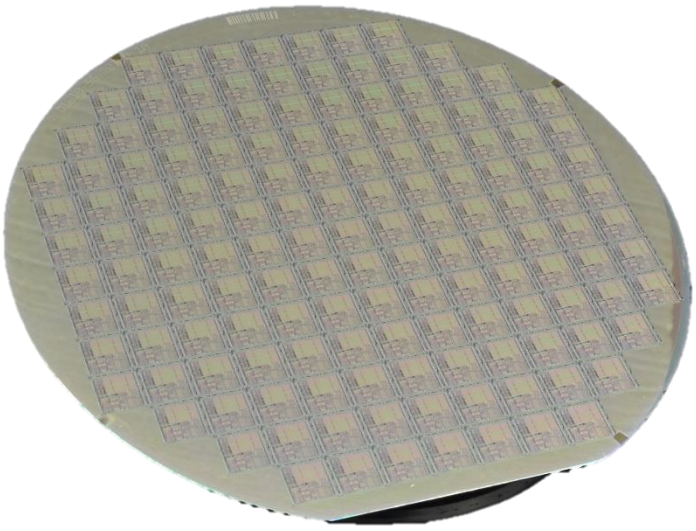


Figura 36. Oblea de silicio fabricada mediante fotolitografía.

4.4.2. Otras litografías.

Además de la fotolitografía se pueden encontrar otras formas de la litografía, no tan conocidas, pero igualmente utilizadas. Son las llamadas litografías blandas. Estas consisten en la impresión de SAMs y en la fabricación por moldes con ciertos polímeros. Algunas de las técnicas aquí incorporadas son la impresión micro-contacto, el micro-modelaje por capilares, los modeles de inyección o el grabado (antes descrita como *etching*). La gran ventaja de estas técnicas es la gran variedad de geometrías y de materiales poliméricos y metálicos que se pueden utilizar.

La impresión micro-contacto, ya analizada en el capítulo primero, usa estampados con relieve sobre superficies planas y curvas generando los patrones deseados y generando capas que en inglés se denominan SAMs con un grosor variable entre uno y tres nanómetros. Esta técnica es muy atractiva en micro-fabricación debido a sus propiedades termodinámicas que hacen que la estructura se regenere ante fallos de la misma. Las piezas realizadas con esta técnica sirven para posteriores grabados y como plantillas de otros procesos. Además, es una técnica más barata que la fotolitografía lo que da muchas ventajas a la hora de utilizar esta técnica.

El proceso de la impresión micro-contacto consiste en varias fases. La primera de ella es preparar la plantilla que se va a reproducir y que, por lo general, se realiza con técnicas fotolitográficas. Este *template* tiene el dibujo opuesto al sello que se ha de reproducir. Para ello hay que cubrir la plantilla con un líquido de silicona (podrían también usarse otros materiales). Al curarse y solidificarse se consigue la forma buscada. Una vez preparado, se aplica el sello y se pone en contacto con el substrato en el que se va a producir la capa. Este contacto hace que se ordenen las cadenas de carbono del tiol creando una capa hidrofóbica de tipo SAM y obteniendo la capa impresa deseada.

Además del menor coste que supone esta técnica, tiene una ventaja notable ante la fotolitografía convencional. Es el hecho de poder fabricar en superficies y figuras curvas. La fotolitografía no permite esto, mientras que la impresión micro-contacto al estar formada por patrones y plantillas se pueden realizar de múltiples geometrías.

Otra técnica es el micro-modelaje por capilares poliméricos. Esta es denominada MIMIC por sus siglas en inglés y tiene como base el uso de un ‘sello’ con la forma definitiva en un material elastómero (PDMS) que da la forma deseada al material de fabricación. Se suele usar un líquido polimérico (generalmente poliuretano o una espuma epoxi) que al entrar en contacto con el ‘sello’ se va pegando a este y se va dando forma a la pieza. Su uso básico es el de fabricar microestructuras interconectadas por estos capilares.

Estos métodos tratan dimensiones demasiado pequeñas para la fabricación de las piezas que este proyecto utiliza. Sin embargo, una técnica similar a estas es factible de usar y además es la que menos tecnología supone, por lo que el coste se abarata notoriamente. Esta tecnología es la de modelaje. Este proceso trabaja en dimensiones mayores a las anteriores. Consiste en replicar un molde ya definido con el material que se quiera fabricar. Simplemente se llena del material en forma de grano y se cura este de forma que solidifique y se obtenga la forma deseada. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de cada una de las tres técnicas descritas como litografías blandas.

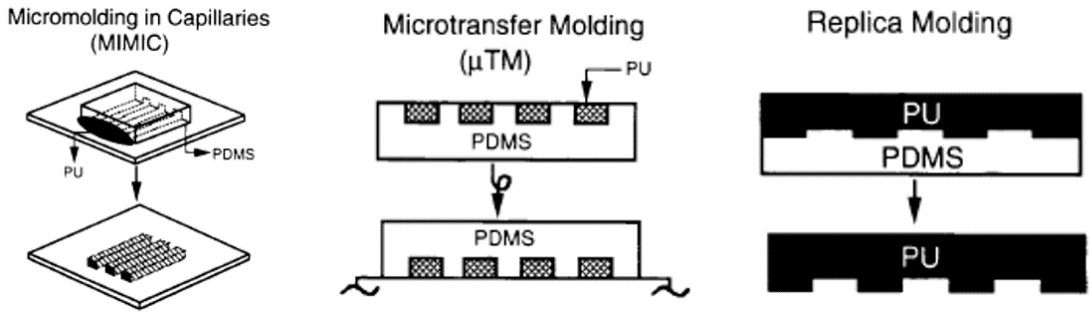


Figura 37. Ejemplos de litografías blandas.

4.5. PROPUESTA.

Una vez se han desarrollado las diferentes metodologías de fabricación, se puede ver cuál es la que más conviene para la fabricación de nuestros sistemas. Atendiendo a la velocidad de fabricación, coste y dificultad del dimensionamiento se puede ver que la mejor tecnología de fabricación es la electroerosión como ya se ha mencionado. Esto para las piezas comerciales. Sin embargo, si se atiende a las dos piezas de nuevo diseño: *Spring* y *Bee Panel* se ve que no es viable fabricarlas por este método. Para ellos, la mejor opción es fabricar con la tecnología LENS. Dicha tecnología es válida para cualquiera de los cinco diseños.

Como un segundo recurso, si no es posible utilizar la electroerosión o la tecnología LENS, se puede fabricar siguiendo la técnica LOM que también permite fabricar en material y el centro de mecanizado, como ya se dijo es una opción válida, aunque el dimensionamiento de la pieza puede suponer un problema.

Por otro lado, no cabe duda que el sistema de medida basado en sensores se va a fabricar siguiendo la tecnología fotolitográfica. Es la mejor forma de fabricar como ya se ha dicho, piezas de muy pequeñas dimensiones y de grosor nanométrico.

5.SISTEMA DE MEDIDA.

Este capítulo va a presentar la segunda parte de este proyecto, que es la quinta fase del proyecto general en el que se está trabajando. Se recuerda que después del análisis, el diseño y la simulación, se ha estudiado la viabilidad de fabricación de los sistemas diseñados. Ahora es momento de analizar el sistema de medida que se va a implantar en estos sistemas para corroborar los datos simulados y los calculados teóricamente.

De forma breve se explicará el sistema de medición elegido y a continuación se expondrá su colocación en los sistemas, desarrollando en qué puntos colocar el sistema y cuál es la mejor forma de hacerlo. El sistema elegido es un sistema de galgas extensiométricas que midan las deformaciones en la dirección que se desee. En los casos en los que la pieza presenta un solo grado de libertad, es lógico que la dirección de medición será esta. En los sistemas que haya diversos grados, se deberá medir la dirección en la que se aplique la fuerza, ya que es la dirección en la que se presenta mayor deformación.

5.1. GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.

El sistema elegido, como ya se ha mencionado es un sistema basado en galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas son unos sensores capaces de medir deformaciones, presiones, cargas, pares aplicados entre otros factores. En este momento, interesa la medición de las deformaciones o micro-deformaciones que sufran los sistemas simulados. Estas galgas se basan en el efecto piezorresistivo, una propiedad de ciertos materiales que permiten cambiar el valor nominal de su resistencia al someterlos a ciertos esfuerzos y al deformarlos en la dirección establecida. De forma resumida, cuando la pieza se deforma lo hace también la galga ya que va adosada a ella. Este esfuerzo que deforma la galga, produce una variación en la resistividad de la galga quedando registrada dicha deformación mediante un impulso eléctrico. Estas deformaciones, se representan con la letra épsilon (ε) de forma adimensional y expresan la variación de longitudes.

El fenómeno físico de estas galgas ya se ha mencionado que es la variación de la resistencia eléctrica. Además de esto depende de la geometría del conductor que se use. En este proyecto las galgas van a trabajar de la siguiente forma: cuando se estire la galga por la deformación a tracción de la pieza, la resistencia eléctrica aumentará debido al cambio de geometría que en este caso estrechará y alargará la galga; por el contrario, ante una compresión la galga se acortara y ensanchará disminuyendo la resistencia eléctrica. Todo esto siempre y cuando no se supere el límite elástico, límite que no se va a superar en este proyecto.

Se van a presentar las características básicas de las galgas. Se basan en la longitud y en la concentración de esfuerzos principalmente.

- Longitud de la galga. Se corresponde a la longitud de grilla, a la zona activa de la galga que por lo general es estrecha y con una alta resistencia eléctrica. Se pueden encontrar longitudes de rejilla desde los 0,2 milímetros hasta los 100 según las aplicaciones que necesiten. En este proyecto, obviamente se utilizarán galgas más próximas a 0,2 milímetros de largo. En la Figura 38 se ve la rejilla central encargada de tomar las medidas de deformaciones.
- La concentración de esfuerzos. Las galgas se deben situar en una zona determinada de la pieza, y concretamente en aquellas que sufren mayores tensiones y deformaciones. Más adelante se podrá comprobar como instalar algunas de estas galgas.
- Para galgas cortas, como es este caso, se debe tener en cuenta el desgaste de la galga, ya que su uso continuado, así como su máxima elongación o su rendimiento se pueden ver afectados.

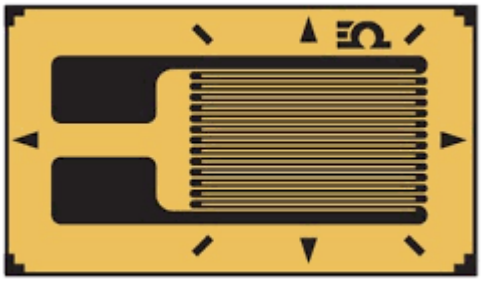


Figura 38. Esquema de una galga extensiométrica.

Las galgas extensiométricas también presentan algunas limitaciones como por ejemplo su deformación límite, ya que, superado un cierto valor de diseño, estas se rompen y dejan de funcionar. Es importante saber que las galgas tan solo miden una dirección de deformación: la dirección en la que se ha diseñado y en la que se ha instalado en el sistema. Si se quieren medir varias direcciones en un mismo punto se deben sobreponer varias galgas de forma que midan todas las direcciones deseadas y recoger los resultados de forma independiente. Además de esto, se debe tener en cuenta que las condiciones ambientales, las vibraciones, o el desgaste pueden afectar notoriamente al funcionamiento de la galga. Esto se acentúa más al disminuir el tamaño de la galga. Pero no todo son inconvenientes, ya que su reducido tamaño, su posibilidad de tomar medidas tanto en estático como en dinámico, o su capacidad de recibir corriente tanto alterna como continua hacen de estos sistemas de medida uno de los más utilizados hoy día en la ingeniería mecánica.

Una vez conocido el funcionamiento de una galga extensiométrica, falta ver qué ocurre con el impulso eléctrico generado. La señal es, en términos generales, una variación de voltaje que utiliza el puente *Wheatstone* como base. El puente *Wheatstone* son cuatro resistencias unidas en un círculo cerrado y una de ellas es la que se mide (cada una de las resistencias puede ser una galga o no). En la Figura 39 se puede apreciar un esquema general del puente *Wheatstone*. Este puede trabajar con diferentes configuraciones (dos o cuatro resistencias) y también en corriente continua y alterna. La señal eléctrica se

consigue mediante el método de deflexión. Este método mide la diferencia de tensión que hay entre ambas ramas o la intensidad que pasa por el brazo central (horizontal). Con esto se produce el impulso eléctrico que irá a través de los cables hasta un conversor analógico digital y que dará un valor a la señal, arrojando así el valor de la deformación.

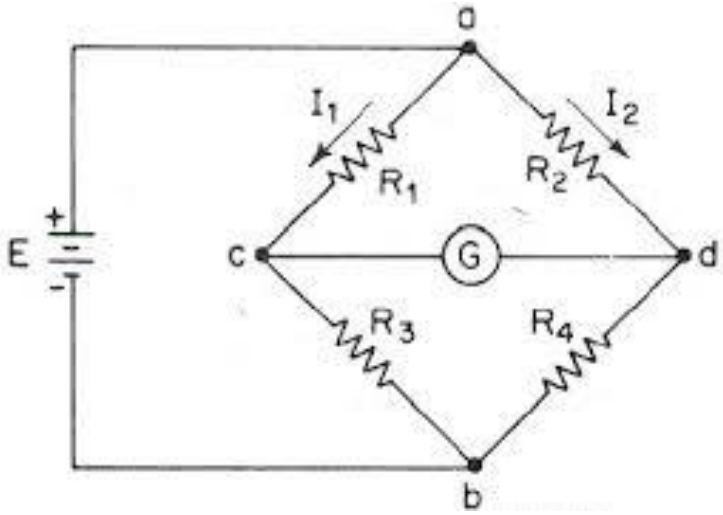


Figura 39. Esquema del puente Wheatstone.

Tras la lectura y la conversión de la señal, se suele utilizar un *software* que registre todos estos impulsos que llegan. Por lo general, los datos son tabulados y graficados a tiempo real para ir viendo la variación de dichos impulsos. Se propone el *software* Labview como recurso para dicho registro de datos. Este *software* te permite programar lo que se quiera visualizar y de la forma que se quiera hacer. Además, permite trabajar con los datos que llegan. También, se puede utilizar MS Excel como recurso.

El principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas es siempre el mismo. Sin embargo, todas las galgas no son iguales, ya que dependen de las aplicaciones y utilidades en las que se requieren. Algunos de los tipos de galgas extensiométricas más comunes son:

- Galgas metálicas. Son las más comunes y están formadas por una plancha metálica muy fina la cual lleva adosada un hilo metálico también muy fino. Los dos extremos del hilo se unen a los transductores o conversores de la señal, ya que estos dos hilos harán que el circuito quede cerrado. La resistencia eléctrica viene dada por la relación entre la resistividad y la longitud respecto al área transversal. El hilo conductor puede ser un hilo fino o una pequeña película metálica cuya única diferencia será la unión de los cables. Estas galgas llevan encima una capa protectora para que el hilo no quede dañado.

- Galgas semiconductoras. Junto a las metálicas son las más utilizadas y la diferencia radica en que en este caso se usa un material semiconductor en lugar del hilo metálico. Estas se pueden realizar de un tamaño menor que las demás, debido a la facilidad de sus materiales a ser moldeados. Además, tiene mayor capacidad de resistencia y su fatiga de vida es más larga presentando una menor histéresis (conserva menos sus propiedades). Principalmente se producen en silicio y germanio.

- Galga por resistencia. Estas galgas son más teóricas que prácticas, puesto que se basan en las mediciones de *Wheatstone* para convertir las resistencias en voltajes absolutos, siempre comprobando que se cumpla la ley de Hooke.

Hay más tipos de galgas, pero estos tres son los principales. En el proyecto que se desarrolla en este documento, las galgas a utilizar serán las galgas semiconductoras. Esto es debido a que pueden ser de menor tamaño y a que se pueden fabricar del mismo material que las piezas: en silicio.

Tan solo falta un punto de exponer sobre estas galgas: su colocación. Ya se ha dicho que es importante la dirección de colocación ya que solo trabajan en una dirección. Pero, previamente se deben hacer varios pasos. El primero de ellos es la preparación de la superficie sobre la que se va a adherir la galga. Para esto, se debe lijar a superficie hasta quitar todas las rugosidades. Una vez lijada, se debe limpiar la superficie con acetona, un compuesto químico que elimina las impurezas que puedan quedar en el material y, posteriormente, seleccionar y marcar los puntos donde se va a colocar la galga. Esto es importante para no perder adherencia y no tener interferencias en las mediciones futuras.

Su instalación se debe realizar con sumo cuidado, ya que cualquier modificación de la galga puede afectar a los resultados de manera notoria. Por eso, se recomienda trabajar con pinzas. Una vez perfectamente colocada la galga, se procede a conectar el transductor con los extremos de la misma. Es importante que se protejan bien estas uniones con cinta o siliconas.

Figura 40. Ejemplo de la instalación de una galga extensiométrica.

5.2. PROPUESTA.

En este apartado se va a realizar la propuesta de forma genérica de la mejor forma de instalación de estas galgas en los sistemas diseñados para este proyecto. Una vez analizada la tecnología de las galgas extensiométricas, de los tipos y materiales en los que se puede producir se va a analizar como implantar estas galgas en los sistemas.

Cabe decir a modo de resumen, que las galgas deberían ser semiconductoras tras demostrarse sus mejores características y como ya se mencionó en el capítulo anterior, será fabricadas mediante técnicas fotolitográficas. Por tanto, queda definir la longitud que deberán tener las galgas y su posición en las piezas. Se va a ir analizando cada uno de los cinco sistemas de manera independiente ya que cada una necesita adaptarse de forma diferente. Las posiciones de las galgas van a estar basadas en los puntos de máximas tensiones y deformaciones, que se presentan en el capítulo de resultados del proyecto "*Diseño, simulación y validación por elementos finitos de sistemas flexure para aplicaciones micro-robóticas*".

5.2.1. Monolithic Cross Pivot.

Esta pieza, como se puede ver en el proyecto base, presenta sus mayores deformaciones en la zona central de la pieza. Concretamente en los laterales redondeados que reciben la unión de las cuatro vigas. Por tanto, en esos puntos se deben colocar las galgas. Sabiendo que la longitud de la viga en su dimensión mayor es de unos diez milímetros, se puede instalar una galga de unos dos o tres milímetros de larga. Este tamaño debería ser suficiente para recoger las deformaciones de la zona central de la pieza. En cuanto al número de galgas, lo mejor sería colocar cuatro: dos a cada lado, de forma que unas midan las deformaciones a tracción y otras recojan datos de las compresiones. En la siguiente Figura 41 se puede ver un esquema de la colocación propuesta en este tipo de pieza. La galga queda representada en amarillo y se puede distinguir el hilo metálico pintado de marrón. Se puede apreciar que hay una encima de otra colocadas de manera simétrica. Cada una mide la deformación de una viga, pero en este caso las dos medirán deformaciones a tracción.

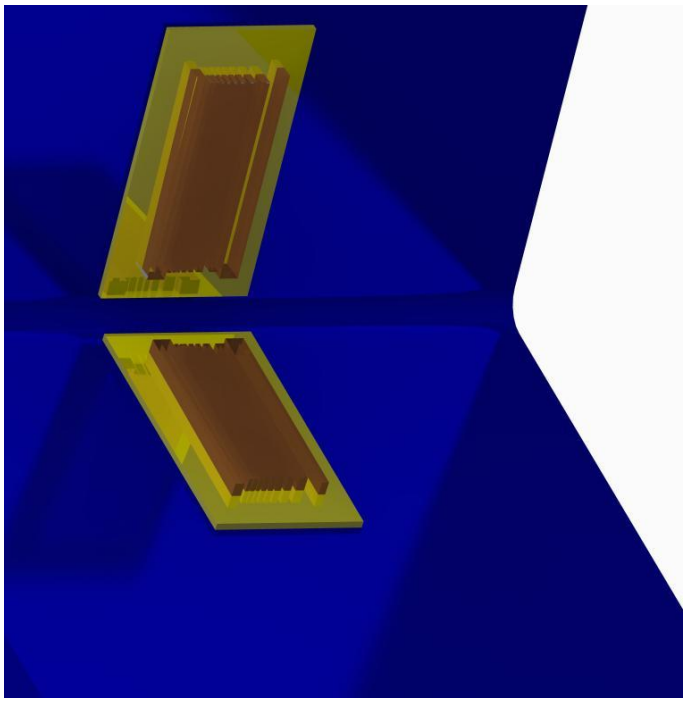


Figura 41. Detalle de la colocación de las galgas extensiométricas en la pieza Monolithic Cross Pivot.

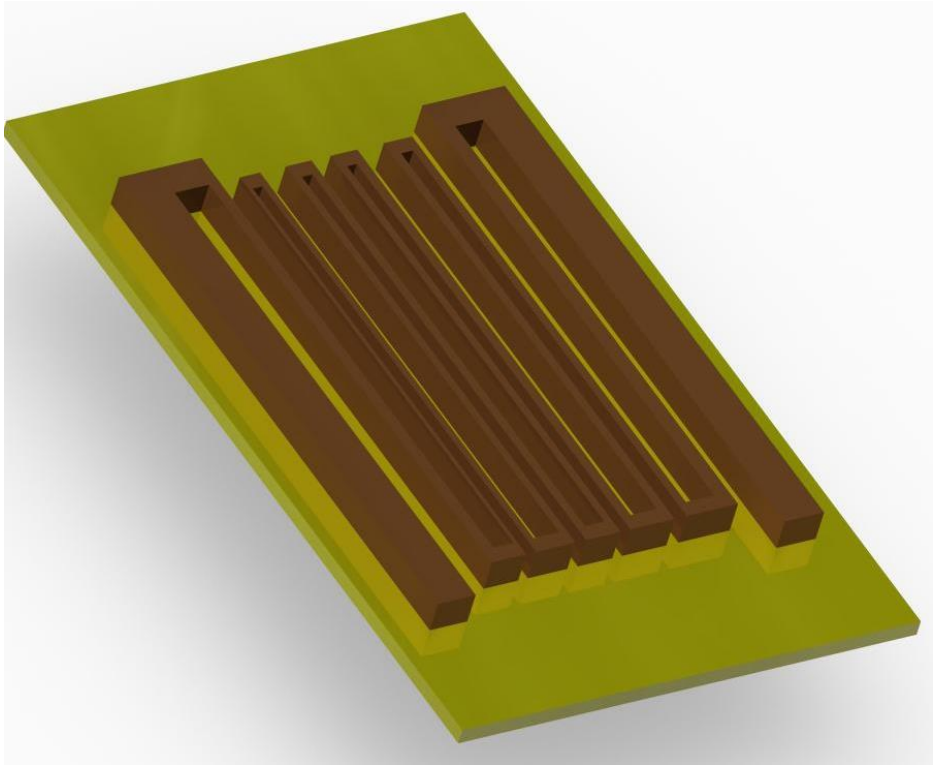


Figura 42. Imagen de la galga colocada en las piezas.

5.2.2. Cross Strip.

Esta segunda pieza, va a presentar también cuatro galgas. En esta ocasión como la pieza tiene dos vigas que no se cortan, pero si se cruzan, se van a colocar las galgas en los puntos donde mayores tensiones hay. En este caso es en los extremos de las vigas, tanto superiores como inferiores. Tal y como se presenta en el plano del Anexo I, se puede afirmar que la pieza gira hacia la izquierda, por lo que todas las galgas estarán situadas en una misma viga. Cualquiera de las dos que se utilice será válida, ya que son simétricas y la actuación es igual. Se colocarán las galgas en los dos extremos de las vigas (superior e inferior) y en ambos lados. Así se medirán las deformaciones por los cuatro extremos de la viga. El tamaño de las galgas podría ser de unos cinco milímetros ya que las vigas tienen entorno a dos centímetros de longitud.

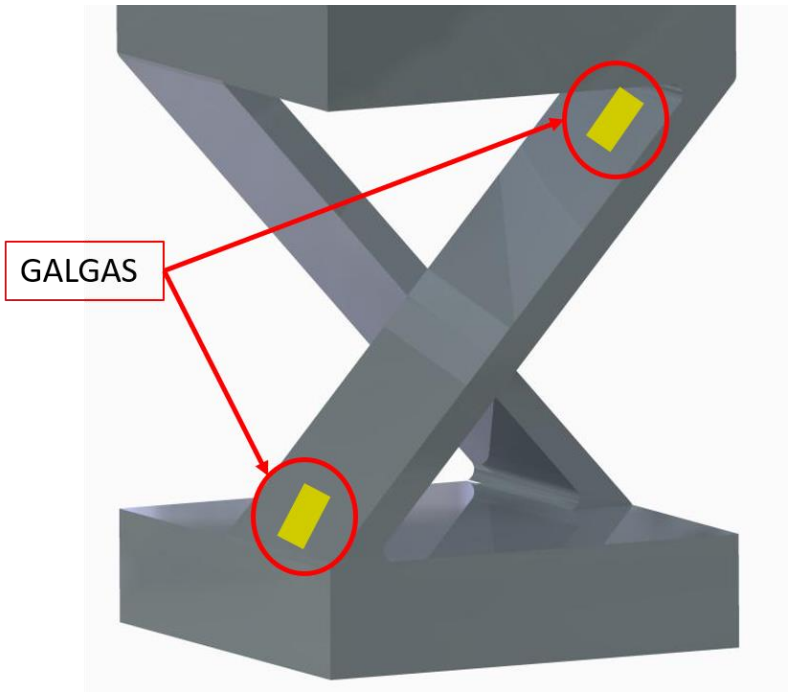


Figura 43. Propuesta de galgado de la pieza Cross Strip.

5.2.3. Notch Hinge.

En caso de *Notch Hinge*, tan solo harán falta dos galgas. Estas se colocarán en las muescas que son los puntos donde se han encontrado las mayores deformaciones de la pieza. Se debe colocar una a cada lado de la pieza, para medir la máxima deformación por un lado y la mínima por otro (teniendo en cuenta que las mínimas deformaciones se hallan en otros puntos, pero que no son de interés).

El problema que puede presentar esta pieza es la adhesión. Esta debe realizarse muy cuidadosamente y debe revisarse continuamente, ya que la colocación de una galga sobre una superficie curva es muy arriesgada y puede provocar la rotura de esta o su medición incorrecta. Probablemente al colocarla en curva, la galga ya se deforme de por

sí, por lo que hay que controlar esa deformación continua y calibrar la galga en función de este efecto.

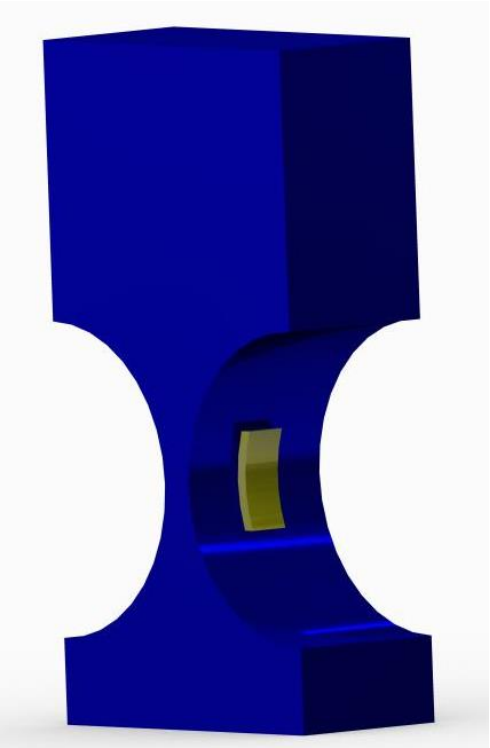


Figura 44. Propuesta de colocación de galgas en la pieza Notch Hinge.

5.2.4. Spring.

Esta pieza no resulta tan fácil como las otras. Hasta ahora, la pieza tenía un solo grado de libertad y por tanto un solo movimiento posible. Sin embargo, ahora se presentan varios grados de libertad, y no solo eso, sino que esta pieza puede ser utilizada en varias posiciones diferentes. Colocar galgas extensiométricas por todo podría ser contraproducente, ya que se tomarían medidas de puntos que no interesan y además estas al estar en curva podrían también romperse. Para tomar las medidas, se colocará la pieza en una determinada posición y se recogerán los registros siempre desde el mismo punto, a pesar de que esta pieza tenia picos de tensiones muy altos que podían ser malos para su funcionamiento. En la Figura 45 se puede apreciar la instalación de la galga extensiométrica. Se debe hacer lo mismo en cada una de las uniones verticales que hay en esa altura. Por tanto, se colocarán dos galgas por unión y un total de cuatro galgas.

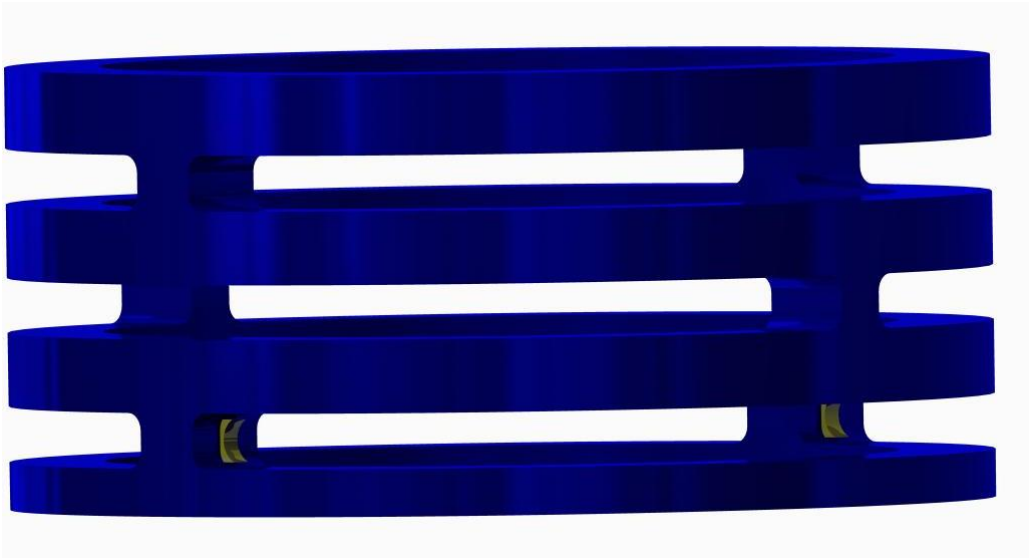


Figura 45. Propuesta de colocación de las galgas en la pieza Spring.

5.2.5. Bee Panel.

En la última pieza la distribución va a ser similar a la pieza *Cross Strip*. Debido a su parecido estructural basado en vigas cruzadas que unen la base superior e inferior las galgas se colocarán en una de estas vigas a ambos lados y tanto en la parte superior como en la inferior. Para poder coger la medida correcta, la pieza deberá ser girada en torno a esta viga, ya que, sino no funcionaría el sistema de medida, ya que se recuerda las galgas solo miden una dirección, la dirección de trabajo. Cada una de las galgas deben tener una longitud de unos tres o cuatro milímetros ya que las vigas tienen una longitud aproximada de trece milímetros.

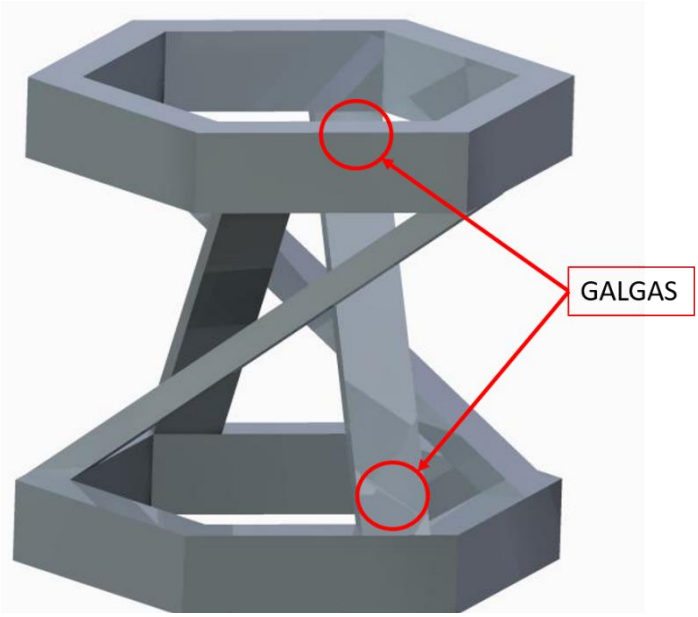


Figura 46. Propuesta de galgado de la pieza Bee Panel.

6. LÍNEAS FUTURAS.

Este proyecto ha sido el inicio de un largo recorrido en el mundo de los sistemas *flexure.* Son unos sistemas muy útiles, con infinidad de aplicaciones pero que todavía están por desarrollar, y comercializar de manera ordinaria. Cada día, su implantación y utilización va mejorando, pero es necesario investigar y conocer más a fondo de qué tratan estos sistemas para poder implantarlos de manera más eficaz y eficiente.

Para empezar, el primer paso que se ha realizado es el diseño, la realización de prototipos se podría llamar. Tan solo se han creado modelos basados en teorías y se ha simulado para un trabajo específico, concreto y en el que se le aplicaba una fuerza concreta en una dirección determinada. Se ha considerado como si estos sistemas fuesen de un solo uso. A futuro, deberían mejorar las simulaciones a realizar. Si ahora se ha realizado la aplicación de una fuerza incremental, pero una sola vez, estaría bien que para futuras simulaciones se realizase este mismo proceso de carga varias veces seguidas y con un proceso de descarga intercalado. Así se crearía una aplicación cíclica de la fuerza y se podrían analizar los efectos de la pieza ante estas repeticiones. Se podría comprobar cómo la pieza a fatiga se va deformando y se va perdiendo la propiedad lineal de elasticidad, pues tras una deformación, aunque sea del orden de micras, la posición a la que retoma no va a ser la misma. No sólo se puede ver la fatiga y estas deformaciones permanentes (que según el material a usar no deberían aparecer). También se puede ver el efecto de la plasticidad, suponiendo una fuerza tal que la deformación alcance la plasticidad. Si además se introduce dicha fuerza a nivel cíclico se puede ver el proceso de plastificación del sistema, es decir que puntos plastifican primero y cómo evoluciona esta. Este hecho de la plasticidad, a nivel micro-robótico no va a ser necesario, pues nunca se van a alcanzar fuerzas de tal magnitud, pero está bien analizar los puntos límites de los sistemas, para buscar nuevas aplicaciones tanto a nivel micro como macro.

Esta es la siguiente línea a futuro de este proyecto: la búsqueda de nuevas aplicaciones. Hoy día existen ciertos sistemas flexibles para unas aplicaciones concretas, pero no se conoce cómo llevar estos sistemas a otras aplicaciones. hay que buscar nuevas utilidades, y no solo en tamaño micro. Por ejemplo, es viable hacer lo que se comentaba en el capítulo uno, de sustituir las rótulas de la suspensión vehicular por este tipo de sistemas. Para esto, las simulaciones deben dejar de fijarse en pequeñas fuerzas y pequeñas deformaciones y centrarse en grandes desplazamientos.

Una tercera vía posible de estudio es el tema de materiales. Este proyecto ha analizado dos materiales: silicio y nitinol. Este segundo, puede ser sustituido por cualquier otra aleación de memoria de forma, pero al fin y al cabo siguen siendo iguales. Para mejorar las propiedades y los resultados de estos sistemas, se debe seguir investigando en otros tipos de materiales. Por ejemplo, se presenta como un sustituto el grafeno. Este material posee unas propiedades de elasticidad y flexibilidad muy interesantes para este tipo de aplicaciones. Además, es muy buen conductor de electricidad y calor, por lo que las aplicaciones podrían ser muchas más. Y como plus, tiene un efecto antibacteriano, lo que

permite utilizarlo en la biomedicina sin causar problemas de infecciones en los pacientes.[39] Quizás, el inconveniente está en el coste de la fabricación en este material. Pero, si el grafeno no convence, se presenta otra alternativa como puede ser el siliceno (un derivado del silicio, ya utilizado en estos sistemas, pero de manera mejorada). El siliceno, formado por átomos de silicio, posee las mismas propiedades que el grafeno, pero en su versión mejorada, lo que lo hace muy atractivo para estas aplicaciones.[40] Estos materiales están revolucionando el mundo de la electrónica tanto a nivel de aplicaciones como de su producción, fabricación.

Y hablando de fabricación, se llega a la cuarta vía de trabajo a futuro. La fabricación de MEMS tiene sus grandes ventajas, como por ejemplo el hecho de la miniaturización de los componentes. Aunque el nombre original hable de silicio, hoy en día se está fabricando en más variantes. Y es que los procesos de fabricación de estos sistemas están todavía por desarrollar. Se suele usar la litografía, pero es un proceso demasiado caro como para rentabilizarlo. Por esto se debe investigar en nuevos procesos de fabricación que abaraten costes de producción y se pueda empezar a fabricar en masa, que así se conseguirá mayor desarrollo de aplicaciones.

Por último, una vez se tiene el sistema, se debe controlar que trabaje correctamente y se consigan los efectos deseados. Para esto, una forma de analizar la actuación es mediante un galgado extensiométrico que correctamente situado en la pieza puede medir las deformaciones, en este caso micro-deformaciones de la pieza y saber el rango de movimiento del sistema. Estas galgas pueden recoger datos analógicos y digitalizarlos de forma que se puedan estudiar los efectos y la eficacia de la pieza en función del objetivo que se tenga. Para esto se debe tener el sistema correcto para la aplicación y debe permitir el rango deseado. Además, el galgado debe tener una resolución muy elevada para poder medir cambios de orden tan pequeño. Se ha realizado una propuesta de instalación para los sistemas desarrollados, pero debe analizarse minuciosamente y ver qué otras opciones hay u otras formas de instalarse.

Estas son las cinco vías de futuro de estos sistemas. Desde luego, acaban de empezar a ser estudiados para aplicaciones de nueva tecnología y por tanto hay mucho trabajo por delante hasta que se puedan encontrar a bajo coste en cualquier aplicación de uso diario.

7.PRESUPUESTO.

En este séptimo capítulo se va a presentar el presupuesto del proyecto. Primeramente, se va a explicar el contenido de este capítulo, explicando qué significan cada una de las tablas que componen el presupuesto. Además, se mencionará el contenido de cada una de las partidas presentadas. Los cálculos de materiales y tiempos son estimados.

A continuación, se detalla el presupuesto correspondiente al desarrollo del proyecto. Se encuentra dividido en varias partidas.

- Inmovilizado material: Se detallan todos componentes fabricados o comprados a terceros que se han utilizado durante la realización del proyecto.
- Material fungible (consumible): Se detallan todos los fungibles consumidos durante la realización del proyecto.
- Equipamiento: Se incluye todo el gasto por uso de máquinas. Para calcular estos gastos se tiene en cuenta el coste medio de amortización y el tiempo de uso de dicho equipamiento durante el proyecto.
- Software: En él, se incluye todo el software utilizado y necesario para el desarrollo del proyecto. Se tiene en cuenta el coste de amortización de las licencias.
- Mano de obra: Esta partida corresponde a los costes necesarios de los recursos humanos involucrados en cada una de las fases del proyecto.

Presupuesto de Inmovilizado.

En esta partida se destacan los componentes fabricados para el proyecto. en este caso, se destaca la fabricación de algunos prototipos de sistemas *flexure*.

Cantidad	Referencia	Descripción	Precio (€)	
			Unitario	Total
2	-	Prototipo de sistema *flexure*	35	70
Total inmovilizado				70

Tabla 4. Presupuesto de inmovilizado.

Presupuesto de material fungible.

Incluye el material de oficina, fotocopias y la impresión del proyecto.

Cantidad	Referencia	Descripción	Precio (€)	
			Unitario	Total
1	-	Material de oficina	15	15
500	-	Folios Din A4	0.01	5
Total fungibles				20

Tabla 5. Presupuesto de material fungible.

Presupuesto de equipamiento.

Se incluye el uso de ordenador y de la máquina para realizar prototipos.

Equipamiento	Cuota adquisición (€)	Tiempo amortización (años)	Cuota amortización mensual (€)	Tiempo de uso (mes)	Amortización (€)
Ordenador	1200	4	25	6	150,00
Máquina CNC	48000	4	1000	1	1000,00
Total equipamiento					1150,00

Tabla 6. Presupuesto de equipamiento.

Presupuesto de *Software*.

Se incluyen todos los programas informáticos utilizados.

Software	Cuota adquisición (€)	Tiempo amortización (años)	Cuota amortización mensual (€)	Tiempo de uso (mes)	Amortización (€)
PTC Creo Parametric	48.000	4	1000	6	6000,00
Abaqus CAE	22.000	2	917	6	5500,00
Matlab	2000	1	167	2	334,00
Windows 10	150	1	12,50	6	75,00
MS Oficce	252	3	7	5	35,00
Team Viewer	579	2	24,10	1	24,10
Total software					11968,10

Tabla 7. Presupuesto de software.

Presupuesto de mano de obra.

Se debe mencionar que, al haber sido realizado en el centro asociado a la escuela de ingenieros, el alumno no ha recibido una nómina y por tanto esta partida es ficticia.

Tarea	Duración (horas)	Precio (€)	
		Unitario	Total
Nómina	450	40,00	18000,00
Total mano obra			18000,00

Tabla 8. Presupuesto de mano de obra.

Resumen del presupuesto.

Se presenta a continuación el presupuesto global del proyecto, el cual asciende a cuarenta y un mil quinientos treinta y siete con noventa y ocho euros.

Partida	Importe (€)	
	Parcial	Acumulado
Inmovilizado	70,00	70,00
Fungibles	20,00	90,00
Equipamiento	1150,00	1240,00
Software	11968,10	13208,10
Mano de obra	18000,00	31208,10
Costes indirectos (10%)		3120,81
Total sin IVA		34328,91
Total con IVA (21%)		41537,98

Tabla 9. Resumen del presupuesto.

El presupuesto total del proyecto asciende a una cantidad de 41.537,98 euros.

8.REFERENCIAS.

[1]. Página Web IK4. http://www.ik4.es/es/alianza_ik4.asp

[2]. Página Web AZTERLAN. http://www.azterlan.es/es/presentacion/historia-estrategia.html

[3]. Página Web CIDETEC. http://www.cidetec.es/cas/presentacion.aspx

[4]. Página Web GAIKER. http://www.gaiker.es/cas/fundacion_gaiker.aspx

[5]. Página Web IDEKO. http://www.ideko.es/es/ik4-ideko/quienes-somos

[6]. Página Web IKERLAN. http://www.ikerlan.es/es/ikerlan/

[7]. Página Web LORTEK. http://www.lortek.es/?content=10;quienes-somos

[8]. Página Web TEKNIKER. http://www.tekniker.es/es/ik4-tekniker

[9]. Página Web VICOMTECH. http://www.vicomtech.org/vicomtech-quienes-somos

[10]. Página Web CEIT. http://ceit.es/es/acerca-de-ceit-ik4/perfil-del-centro

[11]. Informe anual CEIT- 2015. http://ceit.es/images/stories/files/pdf/memoria_anual/Ceit-Memoria-2015.pdf

[12]. Libro de Referencia. Bellouard, Y., 2010. *Microrobotics: Methods and Applications..* Estados Unidos: CRC Press.

[13]. Definición sistema flexible. http://www.engineering-dictionary.org/Flexure

[14]. Referencia a Yves Bellouard. http://cola2015.org/bellouard.php

[15]. Editorial del libro. https://www.crcpress.com/Microrobotics-Methods-and-Applications/Bellouard/p/book/9781420061956

[16]. Artículo de Referencia. J.B.Hopkins, 2013. *Designing hybrid flexure systems and elements using Freedom and Constraint Topologies.* Estados Unidos: Copernicus Publications.

[17]. Péndulo de Huygens. http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Temas/Laboratorio/Galileo_Huygens.pdf

[18]. Referencia a la microrobótica. https://es.wikipedia.org/wiki/Microb%C3%B3tica

[19]. Referencia a MEMS. https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html

[20]. Artículo de referencia. Qin, D. et al., 1998. *Microfabrication, Microstructures and Microsystems.* Estados Unidos: Springer.

[21]. Referencia Impresión microcontacto. https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontact_printing

[22]. Referencia a micromodelaje. http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja960151v

[23]. Libro de Referencia. Nasr, E. A. & Kamrani, A. K., 2010. *Engineering Design and Rapid Prototyping.* Estados Unidos: Springer.

[24]. Libro de Referencia. Raja, V. & Fernandes, K. J., 2008. *Reverse Engineering: An industrial perspective.* Reino Unido: Springer.

[25]. Notas de Referencia. Möller, B., 2016. *Professor's Notes.* Suecia: s.n.

[26]. Libro de Referencia. International, A., 1990. *ASM HANDBOOK.* 2 ed. Estados Unidos: ASM INTERNATIONAL.

[27]. Artículo de Referencia. Jani, J. M., 2013. *A review of shape memory alloy research, applications and opportunities.* Australia: Elsevier.

[28]. Artículo de Referencia. Kłaput, J., 2010. *Studies of selected mechanical properties of nitinol-shape memory alloy.* Polonia: Polish Academy of Science.

[29]. Artículo de Referencia. Naresh, C., 2016. *Shape memory alloys:a state of art review.* India: IOP Publishing.

[30]. Referencia a SMA. http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6863/06Sfl06de14.pdf

[31]. Referencia de nitinol. https://www.euroflex.de/en/materials/nitinol.html

[32]. Artículo de Referencia. Henein, S. et al., 2007. *flexure Pivot for aeroespace mechanisms.* Suiza: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique.

[33]. Artículo de Referencia. Tielen, V., 2012. *Design, characterisation, and application of a monolithic cross pivot micro hinge fabricated using femtosecond laser processing in fused silica.* Holanda: Eindhoven University of Technology.

[34]. Referencia a aleaciones. http://sme.vimaru.edu.vn/sites/sme.vimaru.edu.vn/files/volume_2 properties_and_selection_nonf.pdf

[35]. Referencia a MEF. https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos

[36]. Libro de referencia. Celigüeta, J. T., 1998. *Curso de análisis estructural.* España: EUNSA.

[37]. Referencia de rigidez.

https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_matricial_de_la_rigidez#Barra_recta_tridimensional_de_nudos_r.C3.ADgidos

[38]. Referencia de rigidez. https://es.wikipedia.org/wiki/Rigidez

[39]. Referencia de grafeno. https://www.infografeno.com/propiedades-del-grafeno

[40]. Referencia al siliceno. http://www.mundo-electronico.com/?p=369585

[41]. Referencia de CNC. http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc

[42]. Referencia electroerosión. http://www4.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Electroerosion.pdf

[43]. Referencia electroerosión. http://www.gfms.com/country_ES/es/Products/EDM/wire-cut-edm.html

[44]. Referencia electroerosión. http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/tipos-de-mecanizado-por-electroerosion

[45]. Referencia de galgas extensiométricas. https://riunet.upv.es/handle/10251/7747

[46]. Referencia de galgas extensiométricas. https://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica

[47]. Referencia de galgas extensiométricas. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/tron_p_b/capitulo3.pdf

[48]. Artículo de referencia. Villarroya, M., 2005. *Diseño y fabricación de sistemas micro/nano electromecánicos integrados monolíticamente para aplicaciones de sensores de masa y sensores dbiológicos con palancas como elementos transductores..* España: s.n.

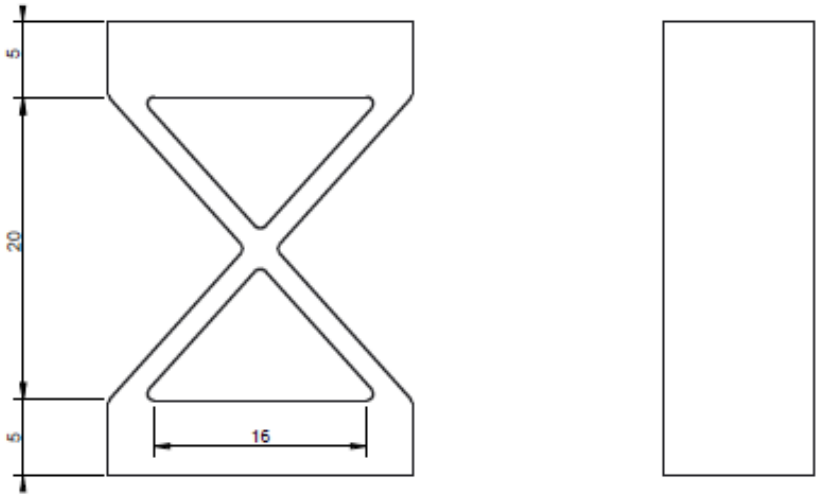
[49]. Referencia de fotolitografía. https://es.wikipedia.org/wiki/Fotolitograf%C3%ADa

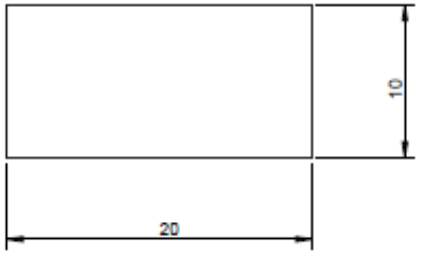
[50]. Referencia de MEMS. https://www.memsnet.org/about/what-is.html

ANEXO I: PLANOS.

En este primer anexo, se van a presentar los planos realizados con el *software* de PTC, Creo Parametric 3.0 de cada una de las piezas diseñadas y presentadas a lo largo del proyecto. El orden de aparición de los planos es el siguiente:

- Plano 1. *Cross pivot*.
- Plano 2. *Cross strip*.
- Plano 3. *Notch hinge.*
- Plano 4. *Spring.*
- Plano 5. *Bee panel.*





1	CROSS-PIVOT	1		cross-pivot.prt
Nº Piezas	Descripción	Marca	Material	Fichero

Método Proyección	Unidad dimens. mm.	Toler. geom. ISO2768-m	Fecha Jun-05-17	Alumnos: Enrique Angulo
Escala 5:2	Estado superficial UNE 1037	Toler. general ISO2768-K / UNE A4	Fecha plantilla Jun-05 2017	

Denominación:

CROSS-PIVOT

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

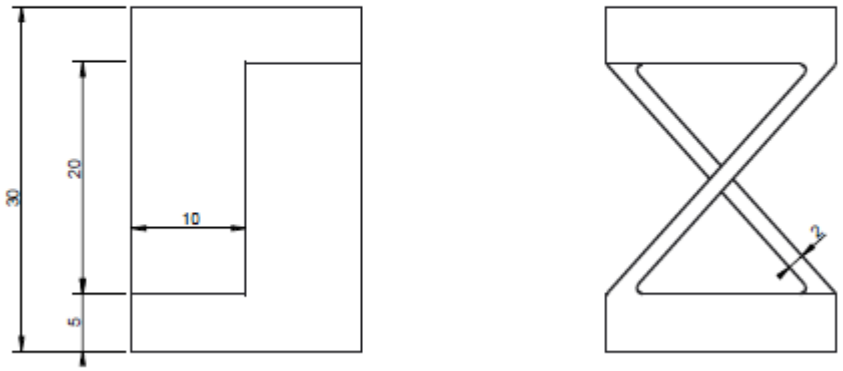
TECNUN SAN SEBASTIAN

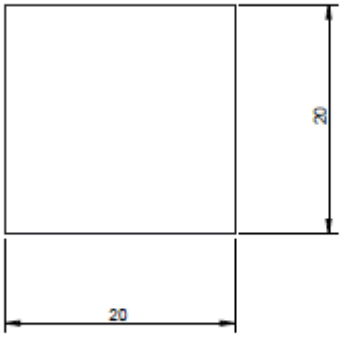
Nº Plano:

Sustituye a:

Sustituido por:

Formato Din A-4 (210x297)





1	CROSS-STRIP	1		cross-strip.prt
Nº Piezas	Descripción	Marca	Material	Fichero

Método Proyección	Unidad dimens. mm.	Toler. geom. ISO2768-m / Toler. general ISO2768-K	Fecha Jun-05-17	Alumnos: Enrique Angulo
Escala 2:1	Estado superficial UNE 1037	UNE A4	Fecha plantilla Jun-05 2017	

Denominación:

CROSS-STRIP

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

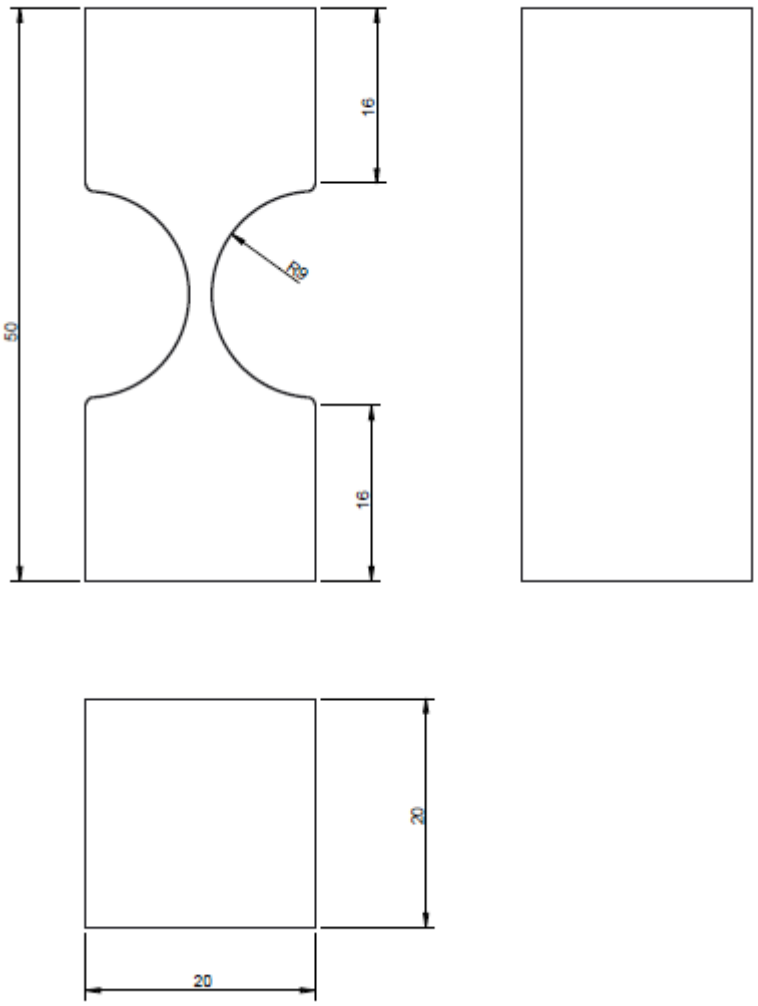
TECNUN SAN SEBASTIAN

Nº Plano:

Sustituye a:

Sustituido por:

Formato Din A-4 (210x297)



1	NOTCH_HINGE		1	NO_MATERIAL	notch_hinge.prt
Nº Piezas	Descripción		Marca	Material	Fichero
Método Proyección:	Unidad dimens. mm.	Tolerancia geom. ISO2768-m / Tolerancia general ISO2768-K	Fecha Jun-05-17	Alumnos: Enrique Angulo	
Escala 2:1	Estado superficial UNE 1037	UNE A4	Fecha plantilla Jun-05 2017		

Denominación:

NOTCH_HINGE

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

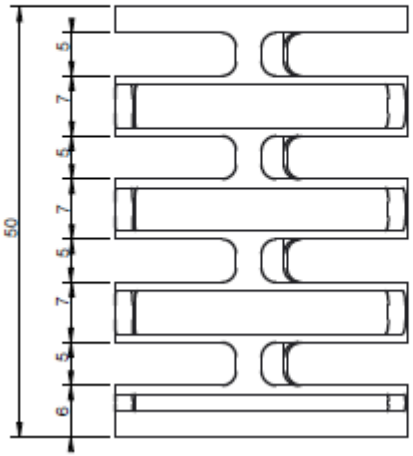
TECNUN SAN SEBASTIAN

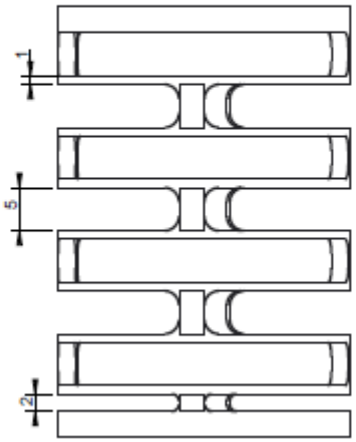
Nº Plano:

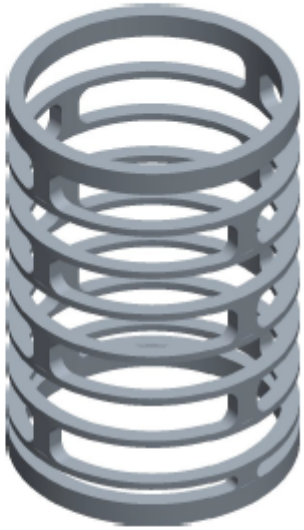
Sustituye a:

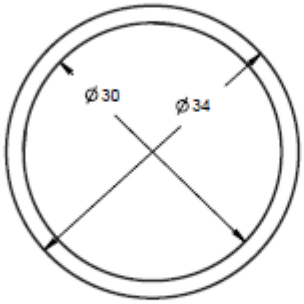
Sustituido por:

Formato Din A-4 (210x297)









1	SPRING	1		spring.prt
Nº Piezas	Descripción	Marca	Material	Fichero

Método Proyección	Unidad dimens.	Toler. geom. ISO2768-m / Toler. general ISO2768-K	Fecha Jun-05-17	Alumnos: Enrique Angulo
Escala 3:2	Estado superficial UNE 1037	UNE A4	Fecha plantilla Jun-05 2017	

Denominación:

SPRING

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

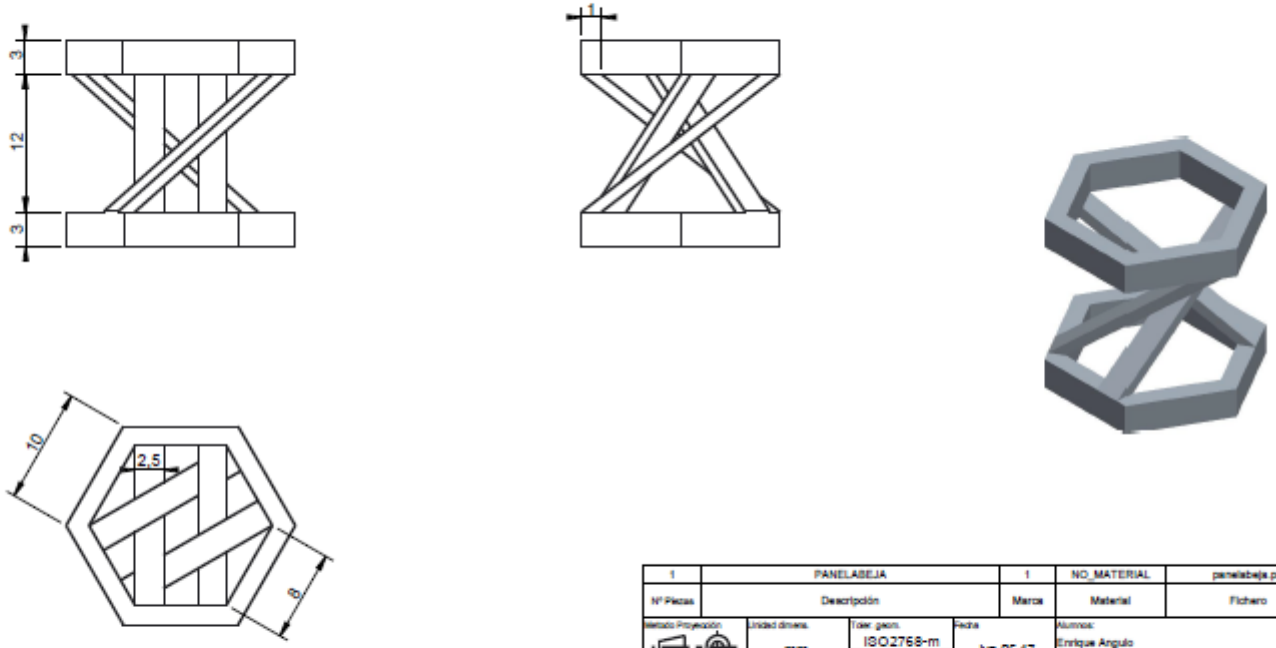
TECNUN SAN SEBASTIAN

Nº Plano:

Sustituye a:

Sustituido por:

Formato Din A-4 (210x297)



1	PANELABEJA	1	NO_MATERIAL	panelabeja.prt
Nº Piezas	Descripción	Marca	Material	Fichero

Método Proyección	Unidad dimens. mm.	Toler. geom. ISO2768-m / Toler. general ISO2768-K	Fecha Jun-05-17	Alumnos: Enrique Angulo
Escala 2:1	Estado superficial UNE 1037	UNE A4	Fecha plantilla Oct-02 2014	

Denominación:

PANELABEJA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS

TECNUN SAN SEBASTIAN

Nº Plano:

Sustituye a:

Sustituido por:

Formato Din A-4 (210x297)

ANEXO II: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

En este anexo se encuentran las propiedades de los materiales que serán usadas en las simulaciones a la hora de darle las propiedades materiales a las piezas. Este proyecto se basa en el silicio y el nitinol como elementos a utilizar. En ocasiones, habrá que ajustar las unidades cambiándolas por otras aplicables al *software*.

TABLA 1.

Propiedades del Silicio (300K)

Propiedad	Valor	Unidad
Cristalografía		
Peso atómico	28.09	
Densidad atómica	4.995×10^{14}	átomos/cm^2
Estructura cristalina	Diamante	
Burgers vector	0.374	
Constante *Lattice*	0.543	N*m
Comportamiento Térmico		
Punto fusión	1412	ºC
Capacidad calorífica	4.78	Cal* g/ mol* ºC
Conductividad térmica	1.56	W/cm*K
Expansión térmica	2.6×10^{-6}	K^{-1}
Comportamiento Mecánico		
Modulo *Young* (dirección <111>)	190	GPa
Ratio *Poisson*	0.27	
Dureza	8.7-13	GPa
Constante elástica		
C_{11}	166	GPa
C_{12}	64	GPa
C_{44}	79.6	GPa
Densidad	2.33	g/cm^3
Tenacidad de fractura		
<111>	0.83-0.95	MPa* m$^{1/2}$
<100>	0.91	MPa* m$^{1/2}$
<110>	0.94	MPa* m$^{1/2}$
Límite elástico	2.8-6.8	GPa
Eléctricas		
Resistividad intrínseca	2.3×10^5	Ω/cm^1
Constante dieléctrica	11.8	
Breakdown field	$\sim 3 \times 10^5$	V/cm^1

TABLA 2.

Propiedades elásticas de materiales elásticos comunes.

Material	Modulo elástico (GPa)	Ratio Poisson	Tensión ultima (típica)
Aluminio	69	0.33	110 MPa
Acero estructural	190-210	0.27	400 MPa
Acero duro	190-210	0.27	760 MPa
Titanio puro	102-104	0.31-0.36	240-550 MPa
Aleaciones titanio	80-114	0.281-0.391	900-1100 MPa
Cobre	110-128	0.34	400 MPa
Cobre- berilio (2%)	125-131	0.285	Hasta 1.5 GPa
Silicio	190 (dirección[111])	0.27	2.8-6.8 GPa
Sílice fundido	72	0.16	150 MPa - 2.5 GPa

TABLA 3.

Aleaciones con memoria de forma.

Propiedades	Unidad	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Punto fusión	ºC	1250	1020	1050
Densidad	Kg/m^3	6450	7900	7150
Calor específico	J/kg/k	490	390	440
Entalpia	J/g	3.2-28	7-9	7-9
Conductividad térmica	W/m	10-18	120	75
Resistividad eléctrica	Ohm/m $x10^6$	0.5-1.1	0.07-0.12	0.10-0.14
Modulo *Young*	GPa	Martensita: 28-41 Austenita: 83	70-100	80-100
Ratio *Poisson*		0.33		
Plateau stress	MPa	400	150-300	150-300
Límite elástico	MPa	Aust: 800-1500 Mart: 800-1500 2000	Aust: 400-800 Mart: 700-800	Aust: 700-1200 Mart: 1000-1200
Deformación máxima	%	Aust: 15-20 Mart: 40-50	10-15	8-10

TABLA 4.

Propiedades típicas de materiales piezoeléctricos comunes.

	Temperatura Curie (ºC)	d_{33} (pC/N)	K_{33} T	Qm
PZT (lead, zirconate, titanate) PZT-5H	190	593	3400	193
PZT-4	365	374	1700	328
Quartz	537	2.3	5	>105

TABLA 5.

Expansión térmica de los materiales más comunes.

Material	Coeficiente de expansión térmica ($x10^{-6}$) a 20ºC
Zerodur	0.15
Quarzo fundido	0.59
Invar	1.3
Silicio	3
Niquel	13
Oro	14
Cobre	17
Aluminio	23

ANEXO III: GLOSARIO.

m	Unidad: metro
mm	Unidad: milímetro
Nm	Unidad: nanómetro
N	Unidad: newton
MPa	Unidad: megapascal
GPa	Unidad: Gigapascal
E	Módulo de elasticidad
G	*Shear modulus*
I	Segundo momento de inercia
J	Módulo de torsión
[K]	Matriz de rigidez
[C]	*Compliance matrix*
[F]	Matriz de fuerzas generalizadas
[D]	Matriz de deformaciones
[T]	Matriz de transformación
CAD	*Computer Aided Design*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CAM	*Computer Aided Manufacturing*
CNC	Control Numérico por Computadora
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
MEMS	*Microelectromechanical System* (sistema micro-electromecánico)
NEMS	*Nanoelectromechanical System* (sistema nano-electromecánico)
SMA	*Shape Memory Alloy* (Aleación con memoria de forma)
FDM	*Fused Deposition Modelling*
µCP	*Micro Contacting Printing* (impresión microcontacto)
SAM	*Self-assembled monolayer*
UCP	*Ultrasonic Consolidation Process*
MEF	Método Elementos Finitos
MPC	*Multi Point Contact*
BC	*Boundary Conditions* (condiciones de contorno)
IC	*Integrated Circuit* (circuitos integrados)
EDM	*Electrical Discharge Machining* (mecanizado por descarga eléctrica)
MIMIC	*Micromolding in capillaries*