



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DEL MECANISMO DE
ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ÁPODO
MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y
SELECCIÓN DE MATERIALES
BIOCOMPATIBLES**

Autor:

Álvaro Campo Arias

Tutores:

M^a Ángeles Pérez Rueda

Dpto. de CMelM, EGI, ICGyF, IM, IPF

José Luis González Sánchez

Dpto. de ISA

Valladolid, septiembre 2021



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DEL MECANISMO DE
ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ÁPODO
MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y
SELECCIÓN DE MATERIALES
BIOCOMPATIBLES**

Autor:

Álvaro Campo Arias

Tutores:

M^a Ángeles Pérez Rueda

Dpto. de CMelM, EGI, ICGyF, IM, IPF

José Luis González Sánchez

Dpto. de ISA

Valladolid, septiembre 2021

Resumen / Abstract

Este trabajo plantea el proceso de diseño de un robot ápedo, modular e hiperredundante de aplicación en el campo de la endoscopia; debe ser capaz de trabajar como un extremo móvil y controlable, que pueda sortear obstáculos para alcanzar las zonas deseadas dentro del cuerpo cuyo acceso presenta dificultades debido al nivel de desarrollo de la tecnología.

Se investigan materiales que puedan miniaturizarse y emplearse con éxito dentro del microrrobot y para su diseño se emplearán herramientas de CAD (del inglés: diseño asistido por ordenador) que ayuden a concretar sus formas y mecanismos.

Palabras clave: Microrrobot, robot, ápedo, modular, endoscopio, cirugía, MEMs.

This paper proposes the process design of an apex, modular and hyper-redundant robot for application in the field of endoscopy. It must work as a mobile and controllable endoscope able to avoid obstacles in order to reach expected areas inside the body where the access is complex due to the current technology development status.

Materials that can be miniaturized and successfully employed within the microrobot and CAD (computer-aided design) tools will be studied and used for its design to help specify its shapes and mechanisms.

Key words: Microrrobot, robot, apex, modular, endoscopy, surgery, MEMs.

Agradecimientos

A mis padres y mi hermana, por haberme dado tanto. Nunca se puede agradecer tantas. Paciencia y tesón.

A María, nunca pude imaginar nada mejor. Mi sol y mis estrellas.

A M^a Ángeles y José Luis, sin su firme guía y paciencia, este trabajo no hubiera sido posible.

Muchas gracias.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	2
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO	3
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	3
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. LA MEDICINA MODERNA Y LAS INTERVENCIONES ASISTIDAS POR ORDENADOR	5
2.1.1. INTERVENCIONES ASISTIDAS POR ORDENADOR	5
2.1.2. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN EN LAS INTERVENCIONES MÉDICAS ASISTIDAS POR ORDENADOR	6
2.2. IRUPCIÓN ROBÓTICA DENTRO DE UN SISTEMA MÉDICO ASISTIDO INTEGRAL	8
2.3. MICRORROBOTS EN LA MEDICINA	13
2.4. ROBOTS HIPERREDUNDANTES	14
3. LÍNEAS DE DISEÑO	19
3.1. PROCESO DE DISEÑO	19
3.2. ESTUDIO DE LOS MODELOS INICIALES	22
3.2.1. MAQUETAS PROTOTIPO	22
3.2.2. MÓDULOS ACTUADOS	23
3.2.3. MÓDULOS CON UNIÓN MECÁNICA	25
3.3. CONSIDERACIONES DE LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO	27
3.3.1. MÓDULOS	27
3.3.2. UNIÓN MODULAR	28
3.3.3. BASE	28
3.3.4. ACTUADORES	28
3.3.5. SISTEMA DE ACTUACIÓN	28
3.3.6. CONTROL	29
4. CARACTERIZACIÓN DEL MECANISMO DE ACTUACIÓN	31
4.1. MICRO ACTUADORES	31
4.2. MATERIALES INTELIGENTES	33
4.3. EAP (ELECTRO-ACTIVE-POLYMER)	35
4.3.1. EAP ACTIVADOS POR CAMPOS	36
4.3.2. EAP IÓNICOS	38
4.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL IPMC COMO ACTUADOR	41
4.4.1. PROPIEDADES	41
4.4.2. CARACTERIZACIÓN DE DISEÑO	46
5. INTEGRACIÓN DEL DISEÑO	49

5.1. PLANTEAMIENTOS INICIALES DE DISEÑO	49
5.2. PROCESO ITERATIVO DE DISEÑO	51
5.2.1. CONDICIONES DE CONTORNO PREVIAS	51
5.2.2. DISEÑO PRELIMINAR: PRIMERAS APROXIMACIONES A LA SOLUCIÓN	54
5.2.3. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO	56
5.2.4. SISTEMA DE UNIÓN INTER-MODULAR	59
5.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y LOS SISTEMAS FUNCIONALES	70
5.3.1. MATERIALES ESTRUCTURALES	70
5.3.2. COMPONENTES MÓVILES	71
5.3.3. SUBSISTEMAS FUNCIONALES Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	73
5.4. SOLUCIÓN PROPUESTA DEL NUEVO MICRORROBOT	76
<u>6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</u>	83
6.1. CONCLUSIONES	83
6.2. MEJORAS PROPUESTAS Y FUTUROS DESARROLLOS	83
<u>7. BIBLIOGRAFÍA</u>	85
<u>ANEXO I</u>	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Intervención del endoscopio flexible en la práctica, deformación indeseable del colon. b) Trayectoria del endoscopio flexible ideal, siguiendo el camino natural del colon (Loeve, 2012)	2
Figura 2. Proceso de tratamiento de la información en las intervenciones asistidas por ordenador (Taylor, 2016)	7
Figura 3. Robot industrial "PUMA 560" que fue empleado para introducir una aguja en un cerebro humano mediante guía TAC (Hsien, 2013)	10
Figura 4. Izquierda, sección del fémur practicado manualmente por el cirujano, se aprecian surcos irregulares debido a los dientes de la brocha. Derecha, vaciado similar practicado por el robot sin aristas irregulares.	10
Figura 5. Izquierda, ilustración del robot AESOP con una posición determinada sujetando el laparoscopio. Derecha, esquema de uso de este robot en la operación. Se sujeta a un lateral de la mesa de operaciones y se maneja con el mando y/o pedal (Sackier, 1994)	11
Figura 6. Robot quirúrgico MiroSurge, con sensores de realimentación de fuerza para mejorar su sensibilidad al tacto (Tobergte, 2011)	12
Figura 7. Ejemplo de cápsula endoscópica comercial con cámara Pillcam (Swain, 2003)	14
Figura 8. Brazo robótico OctArm, montado sobre una plataforma móvil TALON de Foster-Miller (McMahan, 2006)	15
Figura 9. Detalle de los músculos neumáticos empleados en el robot OctArm (McMahan, 2006)	15
Figura 10. Diseño de un robot hiperredundante basado en el funcionamiento de una trompa de elefante (Yang, 2005)	16
Figura 11. Detalle del esquema de actuación del robot tipo trompa de elefante (Yang, 2005)	16
Figura 12. Fases de diseño con sucesivas iteraciones y realimentaciones (Sighley, 2019)	20
Figura 13. Izquierda, primer modelo de un robot modular, hiperredundante. Derecha, 3 módulos del prototipo del modelo diseñado (Samuel, 2013).	22
Figura 14. Izquierda, modelo diseñado con herramientas CAD. Centro, posible módulo planteado con placa electrónica. Derecha, 4 módulos del robot prototipo hiperredundante (Madruga, 2015).	23
Figura 15. Diseño en CAD del diseño del posible microrrobot. Cuatro módulos actuados por palancas actuadas (Pedrejón, 2016).	23
Figura 16. Izquierda, planteamiento del actuador flexible anclado al módulo por un lado y tensionado por un cable. Derecha, planteamiento de una palanca rígida actuada por un cable, anclada al módulo por un extremo (Hernando, 2018).	24
Figura 17. Izquierda, modelo en CAD del sistema de actuación planteado. Derecha, prototipo de un módulo finalizado con los hilos de SMA actuando las palancas rígidas.	25
Figura 18. Diseño inicial con rótulas (Cabezas, 2019)	26
Figura 19. Explosionado de las partes que constituyen un módulo y módulo completo. Se pueden observar las ranuras por las que correrá la rótula. Estos dos elementos conforman la unión relativa entre módulos (Hontiyuelo, 2021).	26
Figura 20. Detalle de la secuencia en reposo (izquierda) y actuada (derecha) del funcionamiento de la guía prismática giratoria. Al elevarse los actuadores de giro rojo y verde, de no existir el giro de la pieza morada, se verían retorcidas en su movimiento.	27
Figura 21. Distintos tipos de micro-actuadores. a) Sección de un microtransportador (Sakar, 2015) b.1) Diseño 3D e b.2) imagen de contraste de un micro motor auto-propulsado tipo "bala" (Sitti, 2017) c.1) Perspectiva de un sistema de micro-engranajes y c.2) detalle de las micro cámaras (Leonardo, 2017) d.1) Molde, d.2) modelo y d.3) diseño del resultado del robot nadador (Fischer, 2014)	32
Figura 22. a) Esquema de actuación de un elastómero dieléctrico bajo la aplicación de un voltaje (Gonzalez-Jiménez, 2015) b) Actuador dieléctrico carbono-acrílico con una configuración plana circular en reposo y actuado (Gisby, 2009). c) Actuador lineal mostrando la deformación bajo un voltaje (Bar-Cohen, 2004)	37
Figura 23. Funcionamiento a nivel molecular de una sección del compuesto iónico polímero y metal (IPMC), en estado de reposo (izquierda) y bajo la actuación de una diferencia de potencial eléctrica (derecha) (Nemat-Nasser, 2003)	39
Figura 24. a) Esquema de comportamiento del material IPMC bajo corriente continua. b) Serie de imágenes superpuestas de IPMC, tomadas cada 0.5s al aplicarle una corriente continua de 4V (Ma, 2020)	39

Figura 25. a) Esquema de comportamiento del material IPMC bajo corriente alterna. b) Desplazamiento en la punta del material del actuador para señales de entrada cuadradas de 1 a 4 V para una frecuencia de 0.1Hz. En la tabla adjunta, se ve el máximo desplazamiento obtenido para cada voltaje (Ma, 2020)	40
Figura 26. a) Imágenes de la célula de carga que caracteriza la fuerza de actuación del IPMC en corriente continua. b) Fuerzas de bloqueo para el actuador con diferentes voltajes aplicados durante 10s en corriente continua. c) Ensayo de elevación de carga en corriente continua para 4V. El peso es de 5, 10, 15 o 20 veces el del actuador de IPMC. d) Ensayo de elevación de carga del IPMC bajo diferentes corrientes continuas con un objeto superior en masa 5 veces (Ma, 2020)	42
Figura 27. Esquema de un fascículo formado por numerosas fibras musculares (Blausen, 2021)	44
Figura 28. Restricciones en el movimiento de actuadores de IPMC apilados de forma simple, debido las fuerzas tangenciales que se producen	44
Figura 29. Esquema de apilamiento en anchura para láminas de IPMC. Cuentan con una zona de fijación a la zona de accionamiento y el otro extremo se mueve libre pero ligado al resto de láminas con la brida de plástico (Changsheng, 2021)	45
Figura 30. Disposición del experimento para comprobar la fuerza de accionamiento de la disposición en anchura (Changsheng, 2021)	45
Figura 31. Esquema con la posible disposición del sistema de actuación formado por láminas de IPMC	47
Figura 32. Disposición esquemática de los actuadores y su designación (Martínez, 2021)	49
Figura 33. Hipótesis de giro no válida, empleada en varios trabajos previos	52
Figura 34. Traslación en el eje z. Grado de libertad d.	52
Figura 35. Giro respecto del eje x. θ_1 es el grado de libertad que forma el ángulo entre los ejes x de ambos módulos.	52
Figura 36. Giro respecto del eje x'. θ_2 es el ángulo formado los ejes y transformados de ambos módulos y constituye el tercer grado de libertad.	53
Figura 37. Imagen izquierda, movimiento de giro del módulo impedido. Derecha, altura inicial suficiente para el movimiento del módulo superior.	53
Figura 38. Diseño preliminar a) Un único módulo b) Tres módulos apilados en reposo c) Tres módulos apilados totalmente activados, provocando un alargamiento del microrrobot	54
Figura 39. a) Sistema de actuación activado un solo IPMC. b) La diferencia de potencial tiene que ser aplicada a cada una de las caras del material	55
Figura 40. Movimientos indeseados de los módulos una vez actuados en un proceso de giro normal	55
Figura 41. Proceso de optimización del módulo plano. a) Paralelepípedo planar b) Redondeo paso intermedio c) Eliminación total de las esquinas	56
Figura 42. Posible sistema de sujeción de módulos	57
Figura 43. Estados comparativos de equilibrio estático de una lámina larga de IPMC (izquierda) y una lámina corta pero con una elongación pasiva y rígida (derecha) (Kruusmaa, 2008)	58
Figura 44. Prototipo del manipulador en voladizo, con una combinación de láminas de IPMC intercaladas con elongaciones pasivas de plástico (Kruusmaa, 2008)	59
Figura 45. Vista de perfil del modelo simplificado con los elementos principales	60
Figura 46. Apoyo fijo con rótula	60
Figura 47. Dos vistas de la garra de sujeción con los orificios para el sistema de potencia y los contactos eléctricos del sistema de actuación	61
Figura 48. Guía-corredera con los diferentes movimientos que permite	61
Figura 49. Detalle de la guía mecanizada implementada en la base del módulo	62
Figura 50. (Izquierda) Diseño de la guía corredera, con el elemento intermedio tipo rótula-corredera. (Derecha) Detalle del elemento comparado con su referencia topológica (abajo derecha)	63
Figura 51. (Izquierda) Giro simulado de un módulo en una dirección determinada. (Izquierda) Detalle del giro impedido por la configuración de la rótula	63
Figura 52. Par esférico o rótula esférica	64
Figura 53. Detalle del enlace esférico empleado para resolver la unión entre elementos y favorecer los grados de libertad requeridos	64
Figura 54. Elevación vertical de un módulo sobre otro. Todos los actuadores están activos y no hay problemas en el movimiento de las rótulas correderas	65
Figura 55. Simulación de un giro hacia un lado con la nueva rótula	66
Figura 56. Desajuste en las líneas de acción equivalentes a la acción de la corredera	66
Figura 57. Vista en verdadera magnitud del alzado de la guía. Al no haber perpendicularidad, se aprecian interferencias en las rótulas-correderas con la guía y también problemas de desalineamiento	67
Figura 58. Disposición de la guía móvil en reposo (izquierda) y actuada en un giro y cambio de orientación del módulo (derecha) (Hontiyuelo, 2021)	67
Figura 59. Cambios en la rótula-corredera esférica	68
Figura 60. Vistas en verdadera magnitud de las dos guías por los lados del sistema actuado	68

Figura 61. Modificación del agarre de la elongación pasiva	69
Figura 62. Ejemplos de posibles aligeramientos del módulo en caso de necesitar aún menos peso por módulo	69
Figura 63. Ejemplos de impresión combinada a) Modelo de mano humana con dos tipos de materiales para los huesos y la carne. b) Modelo impreso con ensamblajes combinados	71
Figura 53. Detalle del enlace esférico empleado para resolver la unión entre elementos y favorecer los grados de libertad requeridos	72
Figura 64. Vista en planta de las dimensiones de un módulo del microrrobot. Medidas de ejemplo en décimas de milímetro	73
Figura 65. Sección de un endoscopio convencional tubo de inserción y cuerpo de control (Haycock, 2014)	74
Figura 66. Agua a presión en el extremo del endoscopio	75
Figura 67. Ejemplo de cámara endoscópica. Izquierda, concepto de cámara con gran angular. Derecha, imagen obtenida por una cámara EVIS EXERA III, CF-HQ 190L/I (Olympus, 2021)	75
Figura 68. Detalle del módulo con todos los componentes diseñados	77
Figura 69. Configuración de los actuadores para la posición "0". Estado de reposo de los módulos	78
Figura 70. Configuración de los actuadores para la posición "15". Todos los actuadores activados	79
Figura 71. Configuración cualquiera de los actuadores para la posición de giro "3", "6", "9" y "12", solamente dos actuadores adyacentes activados	80
Figura 72. Planteamiento del funcionamiento del microrrobot en un entorno real. a) Microrrobot con un aspecto exterior. b) Misma imagen pero con el interior mostrado y con los conductos interiores de los posibles accesorios	81

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Tabla comparativa de las ventajas entre humanos y los robots</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2. Configuraciones totales de los cuatro actuadores de un módulo.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 3. Conjunto de las únicas configuraciones posibles de los actuadores</i>	<i>50</i>

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La robótica es una herramienta cada vez más útil y próxima a los problemas de los seres humanos y a sus necesidades. Los sistemas informáticos que se emplean hoy en día facilitan el tratamiento de los pacientes y la cura de enfermedades y lesiones. Esto no sería posible sin la eficiencia de estas aplicaciones gracias a los instrumentos, herramientas y software avanzados y precisos. Este es el escenario dónde empieza la robótica médica.

Sin embargo, aún quedan muchos problemas que resolver y la robótica tiene que responder a estas exigencias tecnológicas. Muchos procedimientos como la endoscopia, aún cuenta con procesos lentos, complejos de manejar y con alto riesgo de lesión. Precisan de profesionales con alto grado de experiencia y especializados en cada área quirúrgica. Estos exigentes requerimientos, la mejora de procedimientos, junto con la aplicación cada vez más extendida de cirugías mínimamente invasivas, requieren de una solución robótica para muchos procedimientos.

La precisión, el manejo y el movimiento de los cirujanos y profesionales en este campo, puede ser replicado por los robots modulares e hiperredundantes. Son capaces de realizar movimientos precisos y controlados en entornos de compleja aplicación para los robots convencionales. Los retos a los que se enfrentan este tipo de robots, es la miniaturización de sus componentes, los materiales y sistemas de actuación que pueden emplear, así como el diseño y disposición de los módulos que conforman la totalidad de los microrrobot.

Una vez resueltos los problemas, estos robots serán capaces de desempeñar trayectorias de forma autónoma a un punto objetivo, realizar tareas en su interior como aplicar medicamentos en zonas localizadas o tomar muestras de tejidos.

1.1. Problemática

Endoscopios y sus enfermedades, endoscopia flexible y la imposibilidad de llegar a todos los lados, oportunidad de mejora con las cirugías asistidas por ordenador, nuevos materiales

Desde hace décadas, se emplea el endoscopio flexible en el tracto digestivo humano para numerosos procesos terapéuticos y de diagnóstico. El empleo de la endoscopia ha alcanzado unos grandes estándares de calidad, seguridad, confort y eficiencia. Sin embargo, la flexibilidad de los endoscopios no es siempre la deseada y a menudo hay problemas en su control una vez está dentro del tracto gastrointestinal.

La punta del tubo de inserción puede girar vertical y horizontalmente gracias a los mandos del endoscopio, por medio de cables de Bowden. Estos cables flexibles son capaces de transmitir movimiento mecánico entre dos puntos moviéndose relativamente a su carcasa exterior. También cuentan con movimientos de giro controlados por los mandos del endoscopio.

Pero para ciertas intervenciones, todos estos movimientos resultan incapaces de seguir la forma natural del tracto digestivo, como se puede apreciar en la Figura 1. Si se comparan la situación en la práctica Figura 1 a) con la ideal, Figura 1 b), se observa la dificultad que puede llegar a tener el endoscopio flexible a la hora de seguir el tracto natural del colon.

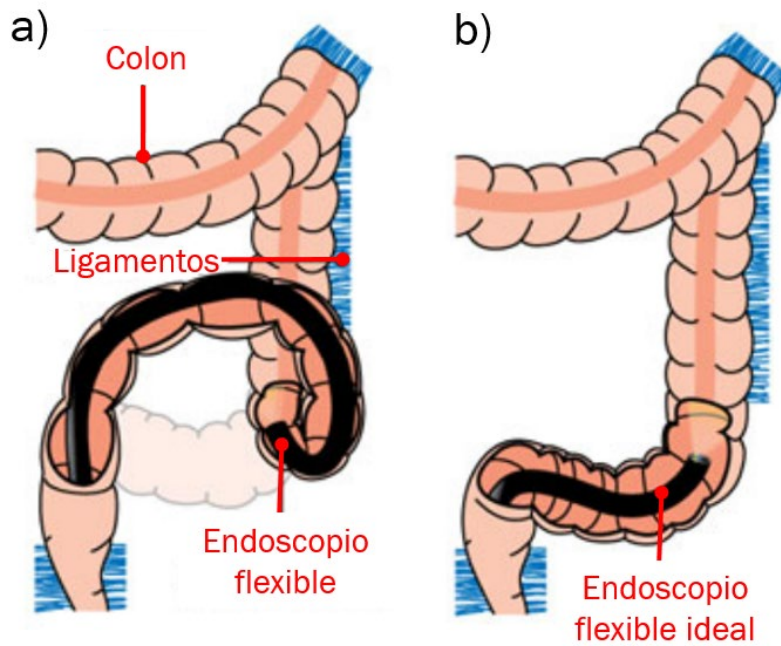


Figura 1. a) Intervención del endoscopio flexible en la práctica, deformación indeseable del colon. b) Trayectoria del endoscopio flexible ideal, siguiendo el camino natural del colon (Loeve, 2012)

Otro de los problemas que se pueden encontrar es la falta de flexibilidad suficiente para poder detectar pólipos o anomalías detrás de los pliegues naturales del colon y del intestino.

Además, las intervenciones necesitan introducir los instrumentos a través de los endoscopios flexibles y es ahí donde surgen los problemas. La falta de flexibilidad, es un problema frecuente a la hora de planear y ejecutar este tipo de operaciones. Las herramientas que puede llevar incorporadas, a veces no resultan suficientes.

La habilidad del endoscopista es clave para solventar la mayoría de problemas. Pero tiene ciertas desventajas como los errores humanos, la falta de disponibilidad de suficientes profesionales así como los tiempos de intervención.

1.2. Justificación del trabajo

Existe un problema en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades del tracto digestivo. La insuficiencia de las herramientas actuales, como la endoscopia flexible, hace que sea necesario incorporar los avances científicos en robótica y materiales para solucionar los problemas actuales.

En el campo endoscópico, la existencia de puntos ciegos, falta de flexibilidad completa, incomodidad en los pacientes, sedación necesaria y poca precisión, hacen necesario una herramienta más completa que reúna las ventajas y pueda eliminar las desventajas existentes.

En la actualidad la endoscopia flexible se emplea en grandes focos de mortandad como en la detección del cáncer colorrectal, que es el tercer tipo más común de cáncer del mundo (Torre, 2012). Este método, a pesar de las insuficiencias de la herramienta, es el que mejor puede tratar la enfermedad, por encima de otros métodos como la detección de sangre oculta en heces, test de ADN en heces, tomografías, resonancias magnéticas, capsulas endoscópicas entre otras. Mejorar la endoscopia flexible supone mejorar las tasas de supervivencia de estos pacientes.

Los nuevos procesos de fabricación aditiva, impresión 3D y la combinación de materiales, hacen posible el desarrollo de microrrobots ápodos e hiperredundantes, que puedan incrementar la flexibilidad y poder alcanzar cotas de forma autónoma. De esta forma, se puede aumentar la fiabilidad y seguridad de los procedimientos, diagnosticando y tratando mejor este tipo de enfermedades.

1.3. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este trabajo es ofrecer un diseño del microrrobot modular e hiperredundante. Se tendrá que diseñar cada módulo y plantear el mecanismo de actuación del microrrobot así como la unión de cada módulo a los demás y los materiales de los que están compuestos.

Este trabajo forma parte de una serie de proyectos y trabajos de fin de máster y de grado de la Universidad de Valladolid. El diseño deberá tener en cuenta las conclusiones obtenidas en los trabajos precedentes y plantear un diseño compatible.

- Estudiar el entorno de trabajo del microrrobot, los robots quirúrgicos convencionales y los sistemas de informáticos que la medicina moderna emplea en gestionar las grandes cantidades de información que maneja.
- Analizar los diseños de los trabajos previos para detectar fortalezas y debilidades de este tipo de microrrobots. Extraer conclusiones de los mismos que ayuden a mejorar el diseño final del microrrobot y plantearlas como condiciones de contorno del diseño.
- Plantear un proceso de diseño iterativo, que pueda ser capaz de tomar las mejores decisiones disponibles y valorar las mismas de acuerdo a los objetivos propuestos. Cuyos resultados sea versátil en cuanto a cambios futuros y se enfoque en solucionar las necesidades previamente planteadas.
- Estudiar los sistemas de actuación disponibles del mercado y elegir uno para la actuación del microrrobot. Tener en cuenta las características del material, el tipo de energía de accionamiento y la funcionalidad que se prevé. Una vez elegido, caracterizar, diseñar y plantear el sistema de accionamiento con el material elegido.
- Plantear el diseño del microrrobot ápedo, modular e hiperredundante. Se tendrá que dar forma a cada uno de los elementos que componen cada módulo y plantear las situaciones de funcionamiento del diseño final.

1.4. Estructura del trabajo

La estructura del trabajo queda definida de la siguiente manera:

- Capítulo 1: En el primer capítulo se introduce brevemente la problemática que surge en determinadas intervenciones médicas y la justificación del proyecto para solucionar, mediante el uso de un microrrobot modular hiperredundante, estos problemas.
- Capítulo 2: En el estudio del arte, se estudia el entorno de trabajo del futuro microrrobot, las sofisticadas herramientas informáticas con las que trabaja los sistemas médicos modernos, así como los robots quirúrgicos y su evolución en

el tiempo. De esta forma se entiende mejor el papel que juega el microrrobot en la actualidad.

- Capítulo 3: En el tercer capítulo se estudian los diseños de los trabajos previos que sirven de referencia inicial para el diseño final. Los planteamientos aproximados en los trabajos pasados, sirven como evaluación de las características deseables del microrrobot. También se plantea el proceso de diseño iterativo que se seguirá en los capítulos siguientes.
- Capítulo 4: En este capítulo se estudiarán los posibles sistemas de actuación del microrrobot. Desde micro-actuadores a los materiales inteligentes, su evaluación determinará la elección final de actuación, que se deberá incorporar en el proceso de diseño final.
- Capítulo 5: A partir de los planteamientos iniciales y las condiciones de contorno establecidas en los capítulos anteriores, se llevará a cabo el proceso de diseño de cada uno de los elementos que conformarán el microrrobot, desde una concepción modular. Se plantea el mecanismo de actuación y se establece una unión entre módulos. Además, se resuelven los problemas que surgen en el movimiento del mecanismo y se plantea el diseño final con sus posiciones de movimiento.
- Capítulo 6: Se resumen las conclusiones obtenidas de todo el proceso de diseño del microrrobot. Se plantean las líneas futuras a seguir y los posibles desarrollos que surgen a partir del diseño.
- Capítulo 7: Se recoge la bibliografía y los recursos empleados en las investigaciones del trabajo.
- Anexo I: Se recopilan el plano de conjunto y los planos constructivos del microrrobot, de cada uno de sus elementos.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se introduce el entorno de trabajo del robot ápodo dentro de la medicina moderna y las intervenciones asistidas por ordenador a través de los sistemas informáticos que procesan toda la información

Es importante conocer también el estado de la tecnología y revisar su evolución hasta la actualidad, conociendo los sistemas robóticos que han conducido a la necesidad actual de desarrollar herramientas cada vez más especializadas.

2.1. La medicina moderna y las intervenciones asistidas por ordenador

En los avances de la medicina moderna, la tecnología juega un papel fundamental. Las herramientas que ofrece permiten a los profesionales tomar decisiones mejor fundamentadas y orientadas, no sólo a diagnósticos preventivos, sino también al incremento de la eficiencia de las intervenciones.

Los avances tecnológicos han cambiado nuestra vida y nuestra forma de entender el mundo, que hace no más de un siglo, parecerían imposibles o considerados ciencia ficción. En el campo de la medicina ofrecen una información más concreta, completa y contrastable. La complementación que aporta al cirujano hace que pueda actuar con mucha más precisión, otorgando un alcance mayor a zonas antes inaccesibles y permitiendo una destreza, una visión y una capacidad de actuación aumentada respecto a las habilidades humanas. Los beneficios son indiscutibles.

Resulta interesante conocer cómo la informática ha mejorado la medicina moderna mediante la asistencia del ordenador en los procesos y cómo se maneja la ingente cantidad de información que se obtiene en un proceso asistido para que resulte en beneficio del paciente, del equipo médico y de los sistemas de sanidad occidentales.

2.1.1. Intervenciones asistidas por ordenador

Los avances tecnológicos aplicados a la medicina comienzan a principio del siglo XIX. Durante siglos, la medicina ha evolucionado poco a poco, al ritmo que la humanidad comienza a establecer los pilares del saber científico.

Antiguamente la medicina era mucho más limitada y artesanal y los conocimientos no se agrupaban en tantas especialidades. Se transmitía de generación en generación a través de la tradición y el saber, casi místico de maestros a aprendices, ya que el almacenamiento de la información era costoso y complejo.

El interior del cuerpo humano era, por muchas causas, inaccesible. Por ello, el primer aparato que pretende obtener imágenes del interior del cuerpo humano vivo es un hito considerable. Es desarrollado por Philipp Bozzini (1773-1809) en 1805. Considerado un idealista de la endoscopia, fabrica su controvertido “Lichtleiter” (conductor lumínico), que mediante la aplicación de una luz y por medio de reflectores, consigue inspeccionar el interior del oído, uretra, vejiga femenina, cuello uterino, boca, fosas nasales o heridas. Se considera el precursor de numerosos desarrollos que conducirían a los primeros endoscopios modernos, adelantándose tres cuartos de siglo a sus predecesores (Verger-Kuhnke, 2007).

No es hasta principios del siglo XIX, que la medicina avanza gracias al gradual desarrollo de la tecnología y los materiales, debido a las revoluciones industriales que provocan el abaratamiento y la abundancia de estos.

Progresivamente, se van afianzando los pilares de la medicina moderna. Estos avances científicos tempranos permitirán en décadas posteriores desarrollar los instrumentos y herramientas de la actualidad. Roentgen descubre los rayos X en 1895 y no es hasta 80 años más tarde cuando fuera posible capturar imágenes en 3D de la anatomía interior del cuerpo humano. Gracias al desarrollo de la informática a partir de la segunda mitad del siglo XX, se puede almacenar esta ingente cantidad de información y, no sólo eso, también experimentar, comparar y analizar.

A finales del siglo XX, las intervenciones médicas asistidas por ordenador van integrándose poco a poco en los hospitales de todo el mundo lo que, unido a la evolución exponencial que ha tenido la informática, los materiales, la electrónica y la automática, está permitiendo a la medicina mejorar sus herramientas para la lucha eterna de la humanidad contra la enfermedad.

2.1.2. Gestión de la información en las intervenciones médicas asistidas por ordenador

El concepto fundamental es que los médicos sean capaces de obtener, contrastar y manejar la suficiente cantidad de información como para que tengan una mejor capacidad de decisión, de cara a obtener un diagnóstico y unas posteriores acciones terapéuticas con la menor posibilidad de error y de la manera más eficiente y segura. Para ello, es necesario recabar todo tipo de información que resulte útil para el proceso y tener los suficientes medios al alcance para poder manejarla y gestionarla.

Los sistemas de asistencia por ordenador están compuestos por una gran variedad de componentes. De forma general, engloban desde las grandes máquinas de diagnósticos hasta los ordenadores del personal médico. La enorme especialización del software y su integración en cada uno de los distintos procesos, sumado a la gran capacidad del hardware con el que se cuenta hoy en día, han facilitado su adaptación y uso a la gran variedad de necesidad del personal médico.

Los sistemas informáticos son fundamentales hoy en la medicina, ya que recaban la suficiente información al equipo médico como para producir el mejor resultado posible en cualquier punto del proceso: antes, durante y al final del procedimiento y el tratamiento de la enfermedad. La obtención y el procesamiento de cientos de variables y datos es crucial. La información como tomografías, resonancias magnéticas, constantes vitales, datos y patologías previas, alergias y muchos más, debe obtenerse mediante distintos sensores y dispositivos que son capaces de recoger todas las variables y plasmarlas de forma que se pueda entender por los profesionales.

A partir de esta necesidad se desarrollan numerosas herramientas específicas que permiten recoger y recopilar datos para plantear, planear, simular y ejecutar diagnósticos y/o intervenciones terapéuticas. El desarrollo tecnológico ha dado lugar a numerosos tipos de sensores específicos, instrumentos y dispositivos que incorporan sensores y los sitúan en un marco controlable y medible. La repetitividad y la reproducibilidad que tienen es de una calidad extrema ya que además de tratar de proceder sin error y de la manera menos invasiva posible, deben cumplir con las normas éticas profesionales y regulaciones legales.

Otra ventaja de las intervenciones médicas asistidas por ordenador es la de formar y educar mejores profesionales. Las simulaciones por ordenador hacen que los estudiantes

y técnicos puedan practicar en entornos controlados, anticipándose a las complicaciones y problemas que pueden darse en determinadas intervenciones, sin poner en riesgo la salud de los pacientes. El desarrollo de habilidades de decisión y técnicas, en entornos simulados con base en estudios y casos reales, permiten que los médicos puedan formarse de forma más eficiente y adquiriendo más seguridad, permitiendo ampliar también su marco de decisiones dentro de un caso completo. Es el caso del “INTERNIST-I”, un programa consultor de diagnóstico, aplicado a la medicina interna a principios de los 80. El programa permitía hacer múltiples diagnósticos y la resolución propuesta para cada uno de ellos (Miller, 1982).

Se puede poner como ejemplo de la mejora que supone a la hora de procesar el volumen de datos de una tomografía o la enorme cantidad de imágenes que aporta una resonancia magnética a través de los ordenadores y sistemas informáticos. La recopilación de estas cantidades masivas de datos, tanto de pacientes como de patologías y procedimientos históricos llevados a cabo previamente, ha promovido enormemente el desarrollo de la inteligencia artificial (IA). Las herramientas de análisis informático posibilitan extraer información y conocimientos relevantes para la toma de decisiones (Hualmé A. et al. 2017) (Twinanda AP. et al 2017).

El proceso esquemático que sigue el tratamiento de la información en la medicina asistida por ordenador se observa en la Figura 2 (Taylor, 2016). El proceso empieza con la recopilación de la información del paciente que se combina con la información que aporta los conocimientos médicos generales tales como la anatomía, información estadística, fisiología y casos históricos. Toda esta información se emplea para diseñar un modelo computerizado del paciente y un plan de intervención. El modelo debe permitir la correcta ejecución y la supervisión de los asistentes robóticos. La información de la intervención se actualizará, así como la información que arroje la evaluación del paciente post-operado. Las siguientes fases del tratamiento contarán con ella.

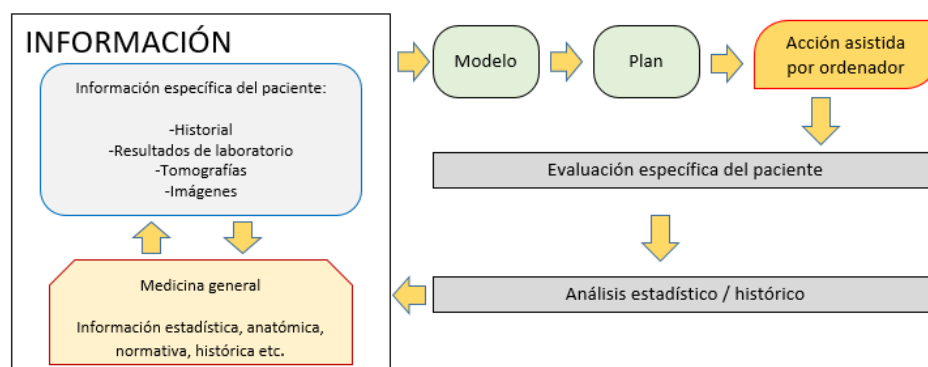


Figura 2. Proceso de tratamiento de la información en las intervenciones asistidas por ordenador (Taylor, 2016)

El médico normalmente agrupa y procesa toda esta información de manera cualitativa y mental a través de sus conocimientos profesionales, teóricos y prácticos. Como ejemplo, en las operaciones laparoscópicas, la introducción de una cámara en el extremo del laparoscopio permitió al equipo de cirujanos poder ver imágenes en tiempo real sobre el avance de la operación en tiempo real.

Las intervenciones quirúrgicas asistidas por ordenador han resultado en un cambio en la cirugía y medicina intervencionista potenciando las habilidades humanas para obtener mejores resultados e intervenciones más eficientes y con menos riesgo de mortalidad. En una intervención asistida, se recoge información sobre la anatomía del paciente, con puntos de control en el movimiento de los instrumentos. Para ello se emplean numerosos dispositivos, como un conjunto de cámaras que analizan el movimiento tridimensional con sistemas de coordenadas absolutas y relativas.

Para entender el campo de aplicación del microrrobot, es necesario detenerse a ver del desarrollo de los “procedimientos mínimamente invasivos”. En estas intervenciones, el objetivo es realizar, en aquellas operaciones que lo permitan, incisiones pequeñas y menos profundas que en las cirugías convencionales. De esta forma, se minimiza el riesgo a la vida del paciente y aumenta su margen de supervivencia ya que el riesgo de hemorragia es menor, hay menor riesgo de infección, la recuperación post-operatoria es más rápida y menos dolorosa y además se disminuye el coste hospitalario (Ruiz, 2010) (Carrozza, 2003). La primera laparoscopia tuvo lugar en 1985 de la mano del profesor Erich Mûhe en Alemania (Walker, 2001).

En este tipo de procedimientos destacan las siguientes técnicas:

- MIS (cirugía mínimamente invasiva, del inglés): la primera que se desarrolla y deja el camino abierto para las siguientes. Se utiliza en operaciones laparoscópicas. Las principales desventajas son la visión realizada en dos dimensiones, el poco sentido de la profundidad y las posiciones incómodas para el cirujano.
- NOTES (cirugía endoscópica transluminal por orificios naturales): evoluciona a partir de la MIS. Se realiza a través de orificios naturales como la boca, recto, vagina, y uretra, por lo que es menos invasivo. Se aplica en ligadura de trompas transvaginal, peritoneoscopia transgástrica y transvesical, histerectomías y colecistectomía (Raman 2008). Con esta cirugía desaparecen las cicatrices y hay menos complicaciones y dolores con una recuperación mucho más rápida. Sin embargo, los instrumentos son caros, hay riesgo de perforaciones internas con hemorragias en órganos y poca visibilidad (Noguera J. 2010).
- LESS (cirugía laparoscópica de incisión única): se lleva a cabo mediante una única incisión en el ombligo, por la cual se introducen los instrumentos quirúrgicos. Se aplica en extracción de cánceres, tumores de ovario, quistes, vesícula biliar... Mucho menos invasiva que la MIS al ser una única incisión, menos daño, mejor aspecto estético. Como desventajas, al tener que introducir todos los instrumentos por el mismo orificio, presenta problemas en su manejo y puede haber colisiones de los mismos. El cirujano tiene que estar muy bien entrenado en esta técnica y requiere de más habilidad.

Es en este último campo donde han destacado notablemente las aplicaciones robóticas, para contrarrestar los inconvenientes que presentan este tipo de intervenciones y potenciar sus ventajas.

2.2. Irrupción robótica dentro de un sistema médico asistido integral

Un robot se entiende como un dispositivo que es capaz de interactuar con los principales protagonistas de la intervención médica: el paciente, el médico, los instrumentos médicos y además todos los sistemas que aportan información en el proceso. Las tareas a realizar son a menudo complejas y únicas, ya que los problemas son diferentes para cada caso y paciente.

Según (Beasley R. 2012), un robot es *“un manipulador reprogramable, multifuncional, diseñado para mover materiales, objetos, herramientas u otros dispositivos específicos a*

través de varios movimientos pre-programados para la realización de determinadas tareas”.

El término “robot quirúrgico” es muy amplio y a menudo se confunde el tipo de tecnología con los términos puramente comerciales. “Robótico” puede sugerir un alto grado de autonomía cuando la tecnología actual no lo permite, mientras que “asistido por ordenador” generalmente implica planes pre-operatorios, navegaciones y guiado por imágenes.

En el caso concreto de los robots médicos, comenzaron en áreas muy concretas de la medicina como cirugía endoscópica, microcirugía, ortopedia, cirugía estereostática cerebral, etc., y contaban con un peso específico pequeño dentro de las intervenciones. Sin embargo, han conseguido evolucionar hasta los grandes asistentes robóticos actuales, con sistemas comerciales ampliamente asentados y un mercado creciente con numerosos campos de investigación.

El entorno de trabajo y la actividad de estas máquinas se desarrollan a menudo junto a seres humanos en entornos complejos y limitados, por lo que deben tener sistemas de seguridad para garantizar la integridad en todo momento. Deben ajustarse a cada aplicación específica, con restricciones y además cumplir las normativas que se les apliquen.

No es objeto de este ensayo el recopilar exhaustivamente cada uno de los robots pero sí resulta interesante revisar los robots que marcaron un hito histórico y sus campos de aplicación. Esto permite ver la evolución que se ha tenido en los últimos cuarenta años y los hechos más importantes que marcan un avance tecnológico.

Los primeros robots funcionales se van desarrollando a mediados de la década de los ochenta. Las intervenciones médicas asistidas por ordenador comienzan a adoptarlos y a incluirlos en sus procedimientos. Las operaciones a las que se van adaptando presentan desventajas para los profesionales como: instrumentos rígidos y pesados, posturas anti-ergonómicas, mala sensibilidad con las herramientas y una alta exigencia en procesos complejos.

Los asistentes robóticos comienzan a hacerse cargo de solventar esas limitaciones quirúrgicas, aportando una destreza y una repetitividad mucho mayor que las humanas y, además, dinamizando el proceso con sensores y guiado de imágenes. Es en 1985, cuando se produce la primera intervención de un robot industrial (no diseñado inicialmente para fines quirúrgicos), PUMA 560 que se puede apreciar en la Figura 3, en una operación de neurocirugía para introducir una aguja en el cerebro (Ricci P. 2008).



Figura 3. Robot industrial “PUMA 560” que fue empleado para introducir una aguja en un cerebro humano mediante guía TAC (Hsien, 2013)

También hay que mencionar el robot Robodoc, que en 1992 se empleó para realizar un reemplazo total de cadera (Paul, 1992). Dentro de una complicada operación, el éxito de esta a medio y largo plazo depende de la tasa de crecimiento del hueso sobre la superficie porosa del implante. Cuanto mejor sea la tasa, menos dolores post-operatorios y mejor será el resultado de la operación para el paciente.

Para ello, tradicionalmente el cirujano tallaba el fémur a mano con distintas brocas, y se fabrica una prótesis aproximada, pero a medida. Con la implementación de Robodoc se emplean las imágenes que nos ofrece el robot para aumentar la precisión del tallado del fémur. De esta forma, se puede aplicar posteriormente un implante que encaje con mucha precisión en el vaciado.

Los resultados se pueden apreciar en la Figura 4. El mecanizado que ofrece el robot, frente al mecanizado hecho a mano por profesionales es mucho más estable y preciso, ya que puede contrarrestar las reacciones de corte de la herramienta variando la velocidad de giro, permitiendo la misma precisión en los distintos tipos de materiales que se encuentran en el núcleo del hueso.

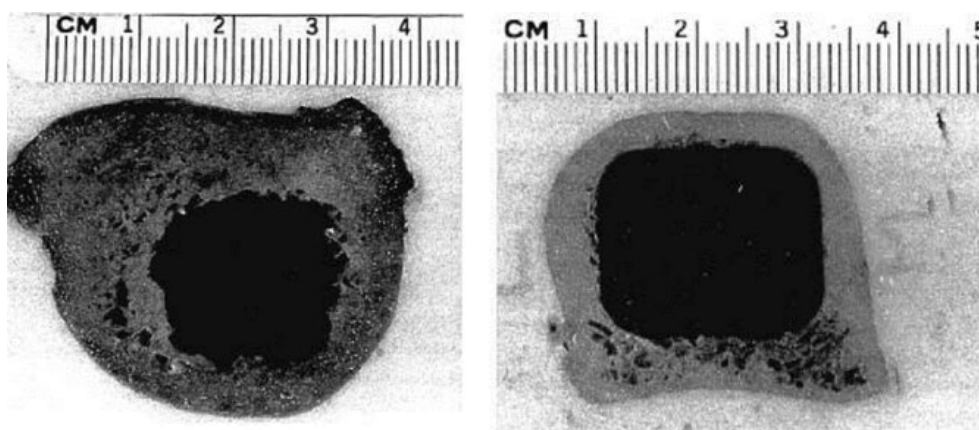


Figura 4. Izquierda, sección del fémur practicado manualmente por el cirujano, se aprecian surcos irregulares debido a los dientes de la brocha. Derecha, vaciado similar practicado por el robot sin aristas irregulares.

De acuerdo a los autores, la diferencia más significativa entre el método tradicional y el asistido por robot es la relación directa entre el estudio preoperatorio y su implementación quirúrgica, que ejemplifica lo que se ha expuesto en este capítulo a cerca del empleo de la información en las cirugías asistidas por ordenador.

Destaca que, por aquel entonces, esas plataformas robóticas se veían muy limitadas por los entornos de ordenador, lentos procesadores e interfaces con bajos retornos, que implicaban estudios pre-operatorios de largas duraciones y bastante complejos. Estos primeros asistentes robóticos que se empiezan a introducir en las salas de operación, junto con otros destacables como Probot o Neuromate, se suelen agrupar en lo que se llama “primera generación” de plataformas robóticas (Diana, 2015).

Los sistemas robóticos que se desarrollan después tienen otro tipo de arquitectura denominada “maestro-esclavo”. La consola y los controles que maneja el cirujano será la “configuración maestro”, mientras que los brazos y herramientas del robot serán la “configuración esclavo”.

El primer asistente que aplica este nuevo concepto es el AESOP (Automated Endoscope System for Optimal Positioning o Sistema Automático Endoscópico de Posicionado Óptimo en español), en 1994. Este sistema robótico es capaz de posicionar una cámara laparoscópica en este tipo de operaciones. Se empleó en cirugías abdominales por la empresa Computer Motion (Sackier, 1994).

A medida que se introdujo cámaras para la visión en tiempo real de este tipo de cirugías, surge el problema de la operatividad de ésta durante la intervención. Se tiene que emplear asistentes adicionales para sostenerla y operar la cámara o es el propio cirujano el que interviene en la misma, impidiéndole otros movimientos mucho más importantes. Además, en caso de ser manejada por alguien externo, se tiene que desarrollar una serie de órdenes precisas para que la cámara le sea útil al cirujano en todo momento. Se desarrollaron elementos mecánicos de sujeción, que de forma “semiautomática” pudiera ser manejada por el propio médico. El robot AESOP, Figura 5, es capaz de sostener y operar la cámara mediante distintos controles accionados manualmente y/o con el pie.

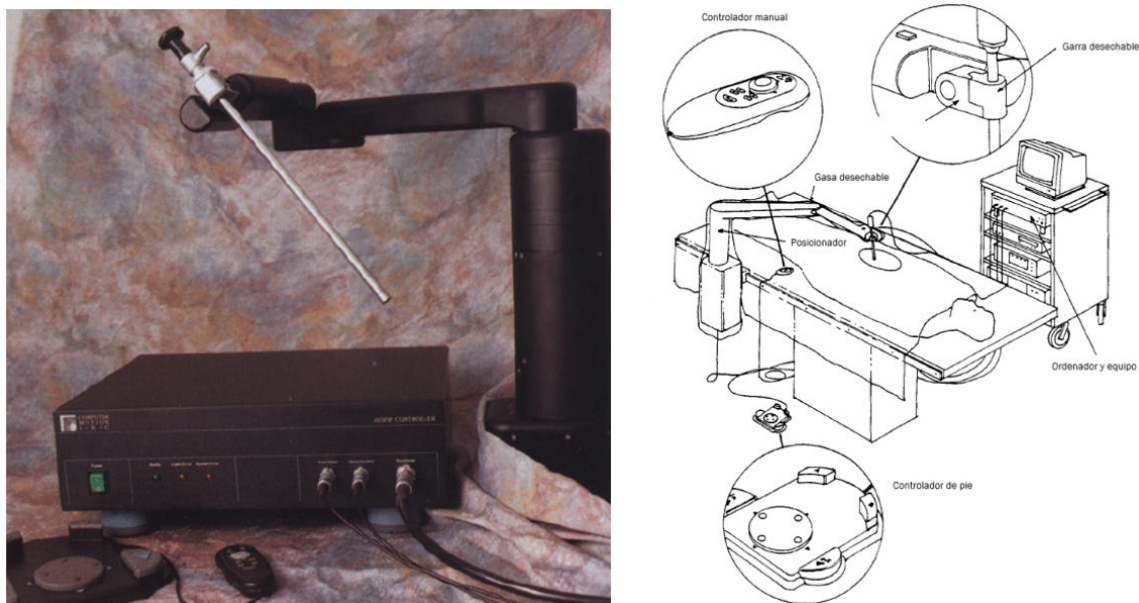


Figura 5. Izquierda, ilustración del robot AESOP con una posición determinada sujetando el laparoscopio. Derecha, esquema de uso de este robot en la operación. Se sujeta a un lateral de la mesa de operaciones y se maneja con el mando y/o pedal (Sackier, 1994)

Después de los éxitos de estas aplicaciones, surge todo un proceso desarrollador que continúa hasta la actualidad. A partir del momento en el que se vio, como robots que no estaban pensados para las intervenciones quirúrgicas, logran realizar operaciones con éxito, marca un punto de inflexión en esta disciplina médica y surge la necesidad de conseguir grandes asistentes robóticos. Estos, que son los más importantes hasta ahora, son: el proyecto ZEUS y el *Da Vinci Surgical System*.

Estos sistemas destacan de entre todos los demás por su gran versatilidad, precisión y calidad. El manejo de las herramientas se hace a través de una consola para lograr operaciones con mayor exactitud, mejor visión y percepción de la intervención. Se componen de varios brazos robóticos, sistema de video tridimensional, distintos sensores y consola para el cirujano.

Computer Motion desarrolla en 1998 el programa ZEUS, en paralelo, Intuitive Surgical crea el sistema *Da Vinci Surgical System*, aprobado para su uso comercial en el año 2000. En 2003, ambas empresas se fusionan, centrando todos los esfuerzos en el sistema Da Vinci y generando el mejor y más completo asistente robótico (Ricci, 2008).

Se mantiene hasta la actualidad el monopolio en grandes asistentes robóticos, lamentablemente, debido a las patentes de Intuitive Surgical. Las barreras de entrada que suponen las patentes impiden la entrada de competidores y mantiene un coste muy elevado de una unidad del sistema Da Vinci, en torno a 2 millones de euros. Este elevado precio, que a menudo no justifica la enorme inversión, provoca que se lleven a cabo estudios con distintas tecnologías, como el presente trabajo.

A pesar de todo, numerosas empresas e investigadores estudian las aplicaciones de distintas plataformas, que sin abarcar tantas intervenciones como el sistema Da Vinci, se especializan más y son más competitivas en menos áreas quirúrgicas.

Es el caso de varios robots como el que desarrolla la empresa italiana Sofar, el sistema Telelap Alf-X (Gidaro, 2014). Cuenta con novedosos sistemas de percepción táctil y sensorial.

También destaca el robot alemán DLR MiroSurge Figura 6, desarrollado por el Instituto de Robótica y Mecatrónica (RMC) y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Se compone de tres robots Miro, con siete grados de libertad desempeñan aplicaciones de tele cirugía y cirugía cardiaca (Tobergte, 2011).

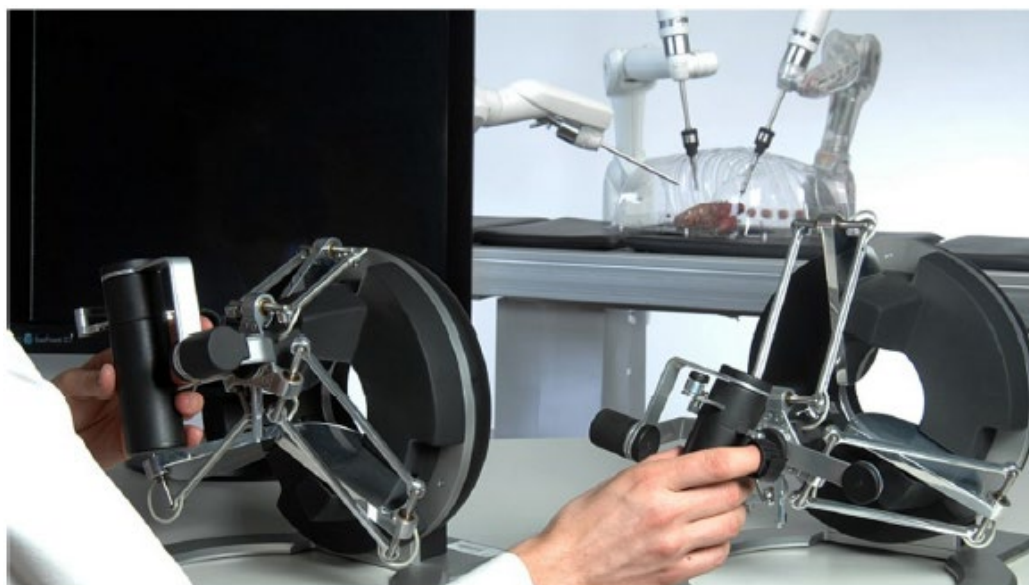


Figura 6. Robot quirúrgico MiroSurge, con sensores de realimentación de fuerza para mejorar su sensibilidad al tacto (Tobergte, 2011)

A pesar de todo, la gran mayoría de los pequeños competidores del sistema Da Vinci, aún no tienen permitido su uso en seres humanos por lo que no son aplicaciones comercialmente válidas.

El desarrollo de los robots quirúrgicos está completamente abierto. Aún quedan multitud de retos y problemas que solucionar. En el futuro las aplicaciones deberán

coordinarse entre humanos y robots, encontrando la máxima eficiencia aquellos sistemas que combinen las ventajas de ambos. En la

Tabla 1, se pueden comparar las habilidades de cirujanos humanos y de aplicaciones robóticas.

	Ventajas	Desventajas
Humanos	Excelente capacidad de decisión	Proclive a desconcentrarse y dejar de prestar atención
	Excelente coordinación mano-ojo	Movimientos precisos limitados debido al temblor natural
	Excelente destreza (a nivel humano)	Limitada destreza fuera de su nivel natural
	Capaz de integrar y actuar mucha información de distintas fuentes muy variadas	No ve a través de tejidos
	Versátil y capaz de improvisar	Extremidades voluminosas
	Aprende fácil	Poco estéril
		Se puede ver sometido a radiación, infección etc.
Robots	Excelente precisión geométrica	Muy poca capacidad de decisión
	Incansable y estable	Difícil de adaptarse a nuevas situaciones
	Inmune a radiación ionizante	Destreza limitada
	Se puede diseñar para operar a muchas escalas y capacidades de carga	Limitada coordinación entre ojos y manos
	Es capaz de integrar y gestionar mucha información numérica y sensorial	Muy poca seansación háptica (Actualmente)
		Limitada la habilidad para interpretar la información compleja

Tabla 1. Tabla comparativa de las ventajas entre humanos y los robots

Una de las principales cuestiones, es que los cirujanos ven aumentadas sus capacidades en el empleo de los asistentes robóticos, pero se sigue necesitando habilidad previa y un gran proceso de estudio, aprendizaje y experiencia. Esto a menudo supone otro obstáculo más para el tratamiento de una enfermedad, el tiempo de espera.

2.3. Microrrobots en la medicina

El gran tamaño de los asistentes robóticos hace que muchas veces su empleo sea complejo es por eso que la robótica en miniatura ha desarrollado robots de tamaño milimétrico, para poder manipular o intervenir en operaciones mucho más pequeñas.

El desarrollo de estos mini o microrrobots es posible gracias a la creación de los microcontroladores, que posibilitan la miniaturización de aplicaciones electrónicas.

En el campo de la medicina, tratan de solucionar los problemas que tienen los grandes robots de asistencia quirúrgica a la hora de trabajar en lugares complejos o pequeños.

Su campo de desarrollo es a menudo las cirugías mínimamente invasivas, como endoscopias, laparoscopias o cirugías abdominales. Tratan de diagnosticar y tratar un gran número de enfermedades como los distintos tipos de cáncer, biopsias etc.

Destacan de entre los muchos ejemplos de microrrobots, las cápsulas endoscópicas. Estos dispositivos biocompatibles, se emplean introduciéndose en el cuerpo por orificios naturales, generalmente el tracto digestivo y se mueven por los movimientos peristálticos del mismo.

Cuentan con sistemas de recepción y envío de señales, para poder localizarlas dentro del cuerpo. También cuentan con baterías internas, que permiten hacer capturas de imágenes dentro del cuerpo y cuentan con sistemas de iluminación Figura 7. Esta en concreto mide 26mm con un diámetro de 11mm y un peso de 3.7 gramos (Swain, 2003).



Figura 7. Ejemplo de cápsula endoscópica comercial con cámara Pillcam (Swain, 2003)

Las cápsulas resuelven muchos problemas de forma simple y su uso está extendido notablemente para diagnóstico del tracto gastrointestinal. Sin embargo, cuentan con desventajas claves, como es el no poder dirigir la cámara a un punto deseado y la falta de control en su movimiento ni en su orientación. Esto puede constituir errores de diagnóstico, falsos positivos, diagnósticos incompletos etc.

Las investigaciones actuales tratan de solucionar estos problemas mediante sistemas de locomoción controlables o distintos sistemas de anclajes en zonas determinadas.

2.4. Robots hiperredundantes

Los robots hiperredundantes son una clase de robots que tienen cuerpos y/o apéndices estructurales muy alargados que se doblan y giran sobre sí mismos obteniendo formas curvas en su totalidad o parte de ella. Normalmente inspirados en la naturaleza del movimiento de una serpiente, el funcionamiento de la trompa de un elefante o el movimiento continuo y fluido de un gusano, desempeñan distintos tipos de tareas debido a sus características especiales de movimiento.

Se puede distinguir por la continuidad de sus componentes, tipo serpiente si lo conforman numerosos elementos discretos unidos con enlaces que puedan girar o tipo continuo, si están compuestos de un material flexible.

Respecto a su sistema de actuación, se pueden distinguir dos tipos de robots hiperredundantes:

- **Intrínsecos:** Cuando su sistema de actuación está integrado en cada uno de las secciones que los componen.
- **Extrínsecos:** Cuando la actuación proviene de cualquier otro lugar que no sean sus segmentos, como por ejemplo en su base.

La actuación intrínseca es más comúnmente empleada en brazos robóticos continuos con motores neumáticos por su fácil integración en este tipo de estructuras. Son capaces de extenderse, girar y doblarse sobre sí mismos.

Por el otro lado, la actuación en los extrínsecos se hace indirectamente mediante la tensión de cables simulando "tendones", basado en el movimiento de las fibras longitudinales musculares de los gusanos o los pulpos. La fuerza la realizan actuadores como motores eléctricos, generalmente en la base y la transmiten a través de puntos de anclaje.

Ante las numerosas ventajas y desventajas que cada uno de los tipos presenta, han surgido una variedad de tipos híbridos de estos sistemas. Es el caso del robot *OctArm*, mostrado en la Figura 8 un robot de varias secciones actuado por músculos neumáticos (McMahan, 2006). Emplea su segmento distal para agarrar y manipular objetos. Puede realizar formas complejas y tiene una estructura muy flexible pero debido a ello, también está limitado en su capacidad de carga.



Figura 8. Brazo robótico *OctArm*, montado sobre una plataforma móvil TALON de Foster-Miller (McMahan, 2006)

Los músculos neumáticos basan su principio de funcionamiento en la de mantener, dentro de una cavidad, el volumen de aire constante. Provocando deformaciones dimensionales en una dirección, consigues otras deformaciones en las otras dimensiones. El tipo de actuador empleado aporta mucha fuerza en relación a su bajo peso. Un tubo elástico de látex se recubre con materiales elásticos que fuerzan al tubo a mantener su posición de reposo. Mediante la introducción de aire se puede contraer y extender el tubo. También girar y doblarse.

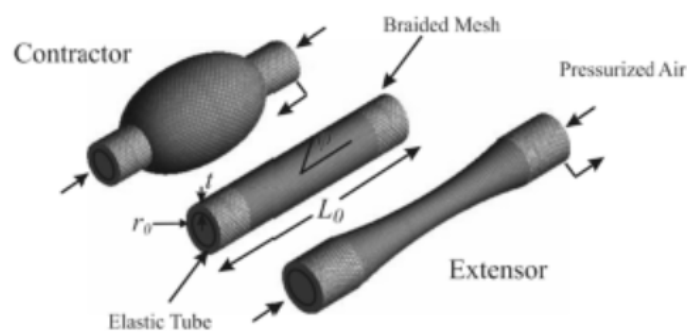


Figura 9. Detalle de los músculos neumáticos empleados en el robot *OctArm* (McMahan, 2006)

Dentro de los diseños de robots hiperredundantes, otro tipo se inspira en la trompa de los elefantes. Este apéndice animal, cuenta con hasta 100000 músculos y tendones (Spinage, 1994), mientras que el cuerpo humano en total tiene 639 músculos. Además, los elefantes pueden elevar hasta un 4,5% de su propio peso con su trompa.

De forma análoga, en (Yang, 2005), se diseña, desarrolla y analiza un prototipo de robot hiperredundante y flexible basado en la trompa de un elefante Figura 10. Está formado por ocho segmentos que pueden aumentar si fuera necesario, actuados por un

muelle de compresión en las dos direcciones transversal y axial, empleando un sistema de cables.

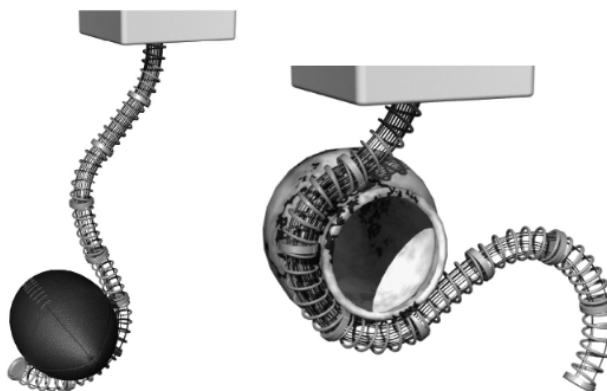


Figura 10. Diseño de un robot hiperredundante basado en el funcionamiento de una trompa de elefante (Yang, 2005)

La fuerza de los músculos es reemplazada por la de los muelles. Su construcción es sencilla y su diseño mecánico es robusto, confiable y de bajo coste de implementación. Los actuadores que tensan el sistema de cableado se encuentran en la base del robot.

El mecanismo de actuación es simple, un disco con un muelle de una constante de rigidez alta, con tres cables unidos a la placa. El actuador tensa el cable y reorienta el sistema, provocando su movimiento. Cada disco tiene una actuación particular.

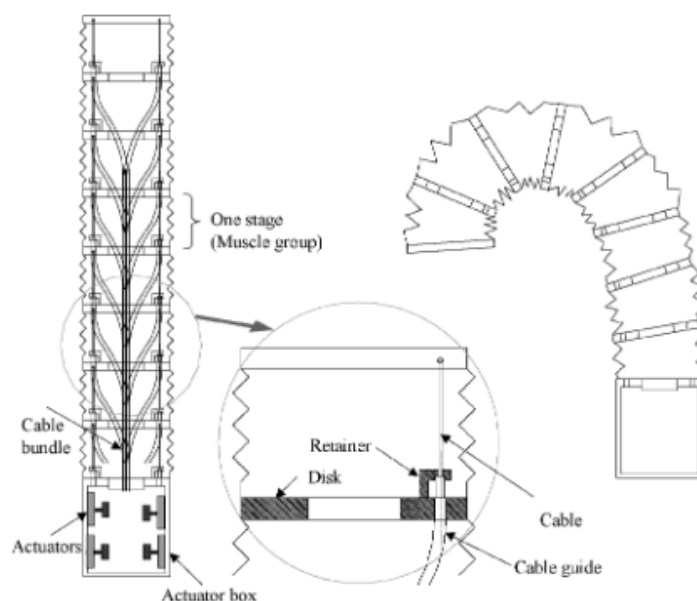


Figura 11. Detalle del esquema de actuación del robot tipo trompa de elefante (Yang, 2005)

En los últimos años, este tipo de robots se han desarrollado bastante debido a su creciente interés. Su uso se plantea tanto en el ámbito doméstico como para realizar tareas peligrosas y nocivas como la manipulación de residuos radiactivos, tratamiento de contaminantes o inspecciones de entornos peligrosos como reactores nucleares, búsqueda de supervivientes de terremotos, limpieza de entornos nocivos para seres humanos etc.

La necesidad de manipuladores robóticos de gran alcance, preciso, maniobrable, crece con los avances tecnológicos y la ingeniería mecánica ofrece cada vez más soluciones a partir de ingeniosos diseños y nuevos actuadores.

3. LÍNEAS DE DISEÑO

En este capítulo se revisarán las líneas de diseño que se han llevado a cabo en proyectos previos y se analizarán los requerimientos que tiene que superar el microrrobot en el desempeño de su trabajo.

Varios trabajos de fin de grado y de máster han realizado numerosos planteamientos de diseños del microrrobot. La mayoría pretenden investigar distintos enfoques sobre su funcionamiento y obtener un modelo con el que trabajar y sacar conclusiones.

Se va a partir de estos ensayos para plantear un diseño definitivo y realizable, con el que se pueda seguir trabajando en el futuro y que suponga un punto de inicio para los próximos proyectos.

3.1. Proceso de diseño

El diseño se plantea para resolver un problema concreto, idear un sistema, un componente o satisfacer una necesidad. Se debe llevar a cabo un proceso de toma de decisiones, generalmente iterativo que sepa gestionar los recursos de los que se dispone para obtener un producto funcional, seguro y alcanzable.

Es una tarea compleja y es necesario subdividir las tareas que se deben desempeñar en partes más simples dentro de un esquema general para poder organizar el proceso de la mejor forma posible. La toma de decisiones tiene que tener siempre en cuenta la decisión más óptima, fruto de la valoración de cada opción, eligiendo como mejor opción la que más consecuencias deseables tiene frente a las menos deseables con un coste de recursos alcanzable.

Diseñar es, a menudo, un proceso iterativo con distintas fases. El ingeniero tiene que ser capaz de ser competente en su campo y a su vez gestionar el torrente de información necesario para decidir tanto de lo que conoce, como de disciplinas totalmente ajenas a él. En el caso de este trabajo, la medicina y en concreto, los procesos endoscópicos y laparoscópicos.

Durante la toma de decisiones, se deben abordar aspectos que se desconocen, con poca información o con exceso de ella, que a veces puede contradecirse, siendo necesario saber filtrar y acabar con informaciones incorrectas o parcialmente incorrectas. Esto provoca que en el proceso haya que tener en cuenta los pasos que se han tomado y qué datos van validando estas decisiones si se avanza sobre informaciones parcialmente completas podría ser necesario volver a valorar decisiones tomadas o ajustarlas convenientemente según se actualizan los datos e informaciones que se conocen.

El diseño no es un proceso puramente secuencial, sino que se puede entender como una serie de iteraciones con numerosas realimentaciones. En la Figura 12 se puede ver, a grandes rasgos, la idea de un proceso de diseño.

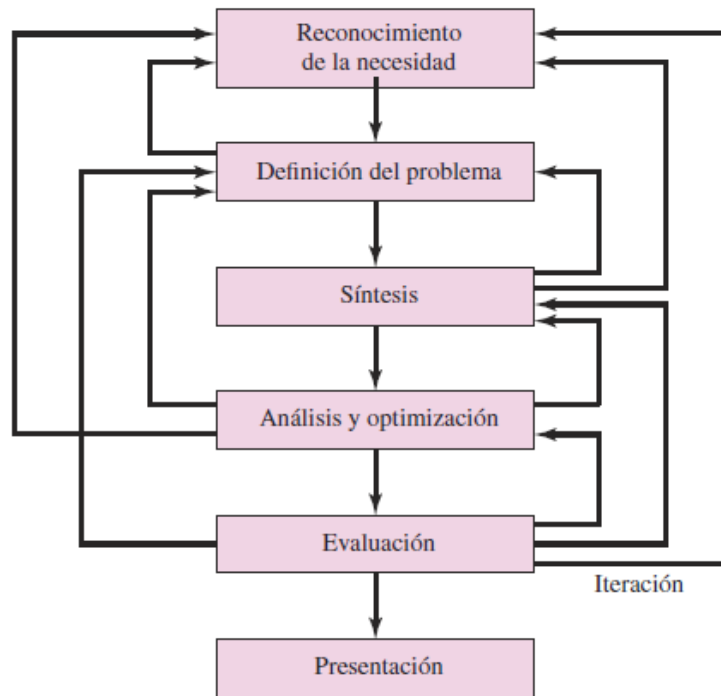


Figura 12. Fases de diseño con sucesivas iteraciones y realimentaciones (Sighley, 2019)

Comienza identificando una necesidad y la decisión de llevar a cabo una serie de pasos para cubrirla. Se desarrolla el proceso y se acaba por una presentación de la solución que satisface esa necesidad. Para reconocer la necesidad es necesario encontrar esa inquietud, problema y/o funcionamiento incorrecto. A menudo comienza de forma orgánica, observando su funcionamiento o como una simple necesidad de optimizar o mejorar una determinada aplicación.

En el caso del microrrobot, en trabajos anteriores se plantean actuadores mecánicos muy esquemáticos, prácticamente teóricos. Su objetivo no era determinar el sistema concreto de actuación sino plantear un modelo con el que simular y entender el comportamiento futuro del mismo. Por lo tanto, existe la necesidad de dar con un diseño que solucione las necesidades que se describen en esta serie de trabajos enfocados a obtener un robot ápodico, modular e hiperredundante.

El reconocimiento de la necesidad constituye una actividad creativa, a menudo puede ser una mera disconformidad o una sensación de incomodidad con el producto o proceso examinado.

En el caso del microrrobot, la necesidad es obtener un diseño definitivo, del que se puedan desarrollar modelos teóricos y que tenga capacidad de adaptación a los futuros planteamientos, desarrollos y objetivos. Esta necesidad es concreta y clara, viene definida por parte de un proceso de diseño mayor, como es el desarrollo del microrrobot por un equipo multidisciplinar de alumnos y docentes de la Universidad.

La definición del problema debe ser más específica. Tiene que identificar qué cualidades y especificaciones debe tener el producto, a qué limitaciones se ve sometido, cómo debería ser y cómo no. De forma general, se debe especificar cantidades, vida del producto deseada, intervalos de actuación, temperaturas de operación, repetitividad etc. También se deben analizar las limitaciones a las que se puede ver sometido el diseño final y ordenarlo en relevancia, como aquellas cosas que debe cumplir y aquellas que no son tan necesarias o que se pueden incluso obviar. En el proceso de diseño en particular, se pueden tener en cuenta desde limitaciones de espacio, inventarios, métodos de

fabricación disponibles hasta condiciones de repuestos de los elementos comerciales. Todo ello haciendo balance en el coste final del producto, ya que todas las opciones tienen sus distintos costes específicos.

Para definir la problemática de nuestro microrrobot se puede enumerar los siguientes puntos:

- El microrrobot forma parte del primer prototipo teórico y no se espera la fabricación inmediata, por lo tanto, de tener que fabricar alguna pre-serie, cabría esperar tener que fabricar pocas unidades.
- Debe ser capaz de operar en el extremo de un endoscopio, como un cabezal móvil. Para ello debe tener un tamaño reducido y ligero, del orden milimétrico y, además, debe tener una estructura modular, formada por varios módulos interrelacionados y controlables entre sí. Con una longitud suficiente para alcanzar distintas partes del cuerpo inaccesibles para la tecnología actual.
- Debe ser capaz de trabajar en el interior del cuerpo humano en un entorno de temperatura y humedad exigentes ya sea en las distintas partes del colon, en el aparato digestivo y/o a través de incisiones mínimamente invasivas.
- Será alimentado energéticamente desde el exterior y no se contempla su autosuficiencia energética ni el transporte de fármacos o distintos subsistemas.
- Su actuación debe ser controlable desde el exterior con tiempos de reacción suficientes para proceder tanto automáticamente como manualmente por un profesional.
- No es necesario una velocidad elevada pero tampoco bajas velocidades por la incomodidad que puede sufrir el paciente.
- La limitación de los materiales es importante, debido al empleo de materiales complejos, compuestos e inteligentes, que actualmente se encuentran en desarrollo. Se considerarán los diferentes procesos que hay actualmente y valorarlos antes de tomar decisiones.

En la tarea de síntesis, Figura 12, generalmente se interrelacionan todas estas opciones y se plantea el primer concepto de diseño y comienzan los distintos esquemas de desarrollo (Stuart P, 1991).

A partir de entonces comienza el proceso de realimentación con el análisis y la optimización mediante la investigación y la cuantificación de los esquemas de desarrollo que se realizarán cada vez que se vaya desarrollando el concepto de diseño. Este análisis revisará los pasos anteriores que no queden bien definidos. Los esquemas que no cumplan se revisarán y se mejorarán o se desecharán. En caso de tener varios esquemas de desarrollo viables, se compararán exhaustivamente para obtener el producto más competitivo y que mejor alcance las necesidades. Estos son los procesos más iterativos.

El resultado de este proceso conduce a una evaluación final, que dé por válido el diseño y se confirme que el producto satisface la necesidad. Se puede hacer a través de prototipos físicos y/o modelos digitales y matemáticos, que simulen cómo se resuelve las necesidades para ver en qué grado se cumple o cómo puede fallar.

Suele suponer una condición de diseño que se debe tener en cuenta en la fabricación del prototipo. De nuevo, si la condición no se cumple del modo esperado, es necesario volver al proceso iterativo, y/o analizar otras posibilidades para que cumpla el análisis. Todo ello con el objetivo de comprobar si el diseño cumple con las necesidades que se plantearon al principio.

Finalmente, el diseño se debe presentar conforme a un planteamiento y unos resultados, analizando posteriormente todos los pasos que se crean necesarios.

3.2. Estudio de los modelos iniciales

En los trabajos previos, se han desarrollado diferentes geometrías y disposiciones. El objetivo que se persigue en todos es crear un microrrobot BHRM o un manipulador binario, hiperredundante (de su traducción en inglés *Binary, Hyper-redundant Manipulator*). Además, que sea ápedo y modular, capaz de introducirse en el cuerpo humano y de ser manejado desde el exterior para realizar intervenciones en su interior.

Se van a presentar aquí sus diseños y se analizarán para poder ver los errores o las insuficiencias en el diseño, permitiendo extraer lecciones válidas y pautas de diseño.

3.2.1. Maquetas prototipo

Uno de los primeros prototipos que se plantean, previo a esta serie de trabajos fin de grado y de máster, se realiza en el Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y Fabricación, (CARTIF) en colaboración con la Universidad de Valladolid (UVA).

Es un primer robot diseñado en módulos, con cuatro actuadores electromagnéticos por módulo que permiten orientar el módulo superior en las cuatro direcciones cartesianas. Los actuadores son lineales y funcionan a modo de pistón, cuya superficie de empuje se orienta según el módulo superior y le aplican una fuerza lineal.

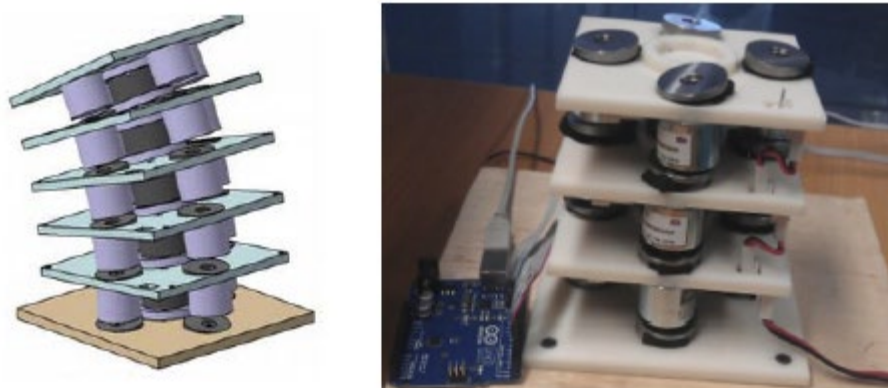


Figura 13. Izquierda, primer modelo de un robot modular, hiperredundante. Derecha, 3 módulos del prototipo del modelo diseñado (Samuel, 2013).

De este primer modelo, se obtiene el prototipo de un posible mecanismo. A partir de este modelo inicial, se mejora el diseño, planteando un módulo circular que tiene una mejor forma final a la hora de implementarlo en el cuerpo humano ya que no tiene aristas vivas que puedan hacer peligrar la integridad de los tejidos blandos del cuerpo humano.

Los actuadores mantienen la disposición formando un cuadrado, pero la superficie disminuye. Se plantea una placa electrónica para cada módulo que permita controlar cada actuador independientemente y un diseño de módulos circular, Figura 14.

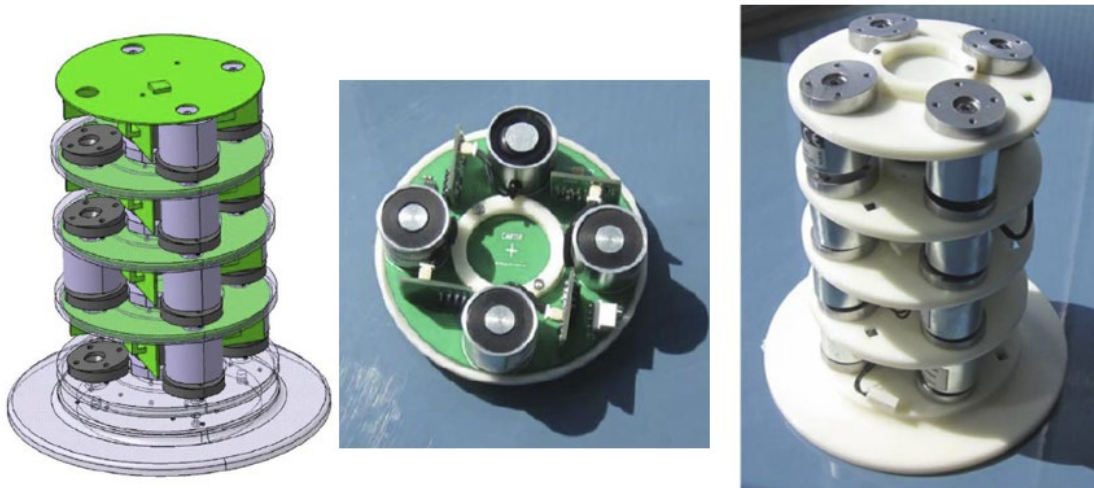


Figura 14. Izquierda, modelo diseñado con herramientas CAD. Centro, posible módulo planteado con placa electrónica. Derecha, 4 módulos del robot prototipo hiperredundante (Madruga, 2015).

Como característica común, estos dos prototipos están anclados al suelo y resultan dimensionalmente muy alejados de las condiciones planteadas. Este tipo de maquetas o prototipos, pueden situarse dentro del proceso de diseño en una fase inicial, que busque comprender los movimientos que se van a llevar a cabo o incluso plantear un modelo miniaturizado que imite al modelo maquettato.

3.2.2. Módulos actuados

El siguiente modelo planteado (Pedrejón, 2016) es modular y plantea una aproximación milimétrica, más acorde con las dimensiones del microrrobot. En la Figura 15, se pueden apreciar cuatro módulos del planteamiento modular con otro sistema de actuación.

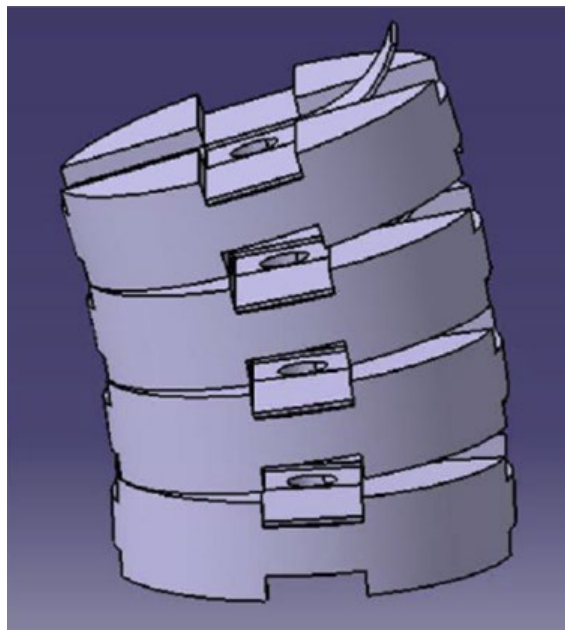


Figura 15. Diseño en CAD del diseño del posible microrrobot. Cuatro módulos actuados por palancas actuadas (Pedrejón, 2016).

Se mantiene el diseño circular y el número de actuadores, que sigue siendo de cuatro por cada módulo. El movimiento relativo entre ellos se plantea con palancas, ya que no se han definido actuadores electromagnéticos escalables en las maquetas iniciales. De esta

forma, activando un actuador, se consigue deformar a flexión y desplazar y girar el módulo inmediatamente superior de una manera sencilla. Ya no se actúa linealmente sobre los puntos del módulo superior. Además, se propone un orificio central que permita comunicar los módulos.

El material de estas palancas se planteó como polímeros electrostáticos, un material flexible y ligero que puede tener grandes deformaciones. Puede ser un buen punto de partida para plantear un actuador realizable.

Sin embargo, la limitación a la que se ve sometido este sistema es el deslizamiento entre módulos. El actuador, simplemente desliza el módulo, sin aplicarle una unión rígida que impida que el disco, en ausencia de otro impedimento, deslice libre y se desacople del resto de módulos. Además, en situación vertical es ejecutable, pero si la gravedad o los movimientos peristálticos del cuerpo actúan de manera transversal o inversa al orden original, puede desestabilizar toda la estructura, por ejemplo, si el microrrobot se encontrase boca abajo.

Este inconveniente se puede solucionar embebiendo los módulos con un recubrimiento y aplicando una unión relativa entre módulos. Esto impediría, en cierta medida, movimientos de desacople, pero probablemente el actuador no funcionaría de la manera deseada por lo que se tiene que diseñar una unión relativa entre módulos que permita el movimiento, pero no el desacople total.

En (Chumillas, 2019) se ha planteado otro tipo de actuación. Mantiene el modelo dimensional del resto de diseños como un microrrobot modular hiper-redundante basado en la actuación sobre el módulo superior. Sin embargo, en su proceso de diseño, que es completo desde el punto de vista de búsqueda de resolución de una necesidad y planteamiento final con prototipo de pruebas, busca otro tipo de actuación.

Basándose en otros trabajos paralelos, ha evaluado sus opciones y mejora el diseño. En otros trabajos se busca, en vez de actuación con polímeros, una actuación con cables. Buscando una aproximación a otro tipo de robots macroscópicos, mediante el tensado de cables como se ha visto en el Capítulo 2.

Los cables se tensan y destensan con la actuación de un motor externo (Hernando, 2018). El cable, embebido en una palanca móvil o rígida, Figura 16, arrastra al módulo de manera similar a los modelos anteriores.

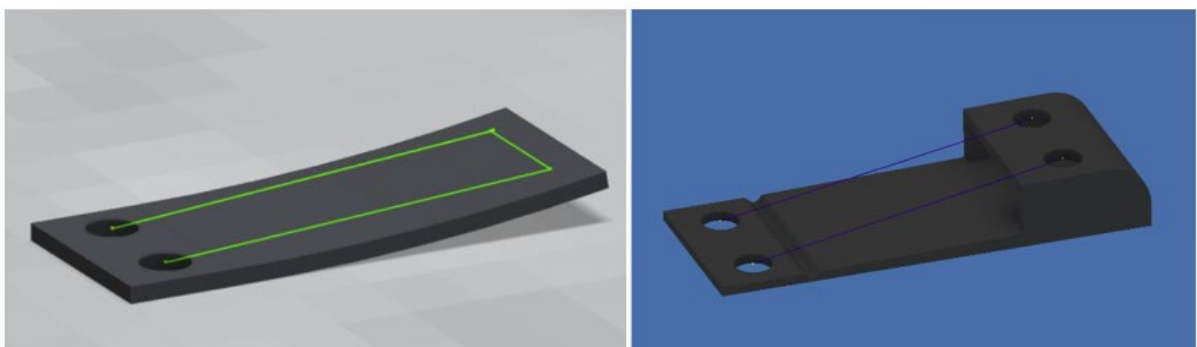


Figura 16. Izquierda, planteamiento del actuador flexible anclado al módulo por un lado y tensionado por un cable. Derecha, planteamiento de una palanca rígida actuada por un cable, anclada al módulo por un extremo (Hernando, 2018).

Tras analizar ambos modelos, la palanca rígida es mecánicamente mejor que una lámina flexible. El mecanismo de actuación planteado es un motor DC, un motor paso a paso y un cable deformable de Nitinol, que forma parte de los llamados SMA (aleación de

memoria de forma, por sus siglas en inglés *Shape memory alloy*). Es una aleación de níquel y titanio muy ligeros y biocompatibles que cambian su estructura interna en función de la temperatura, consiguiendo una deformación que pueda levantar la palanca.

En su proceso, analiza, simula y evalúa las tres opciones con prototipos. Los motores no consiguen validar la solución ya que no tienen el par suficiente. Las pruebas con SMA consiguen el objetivo por lo que se desarrolló el prototipo con ellas, Figura 17.



Figura 17. Izquierda, modelo en CAD del sistema de actuación planteado. Derecha, prototipo de un módulo finalizado con los hilos de SMA actuando las palancas rígidas.

En este modelo, se aplica correctamente el sistema iterativo de diseño para desarrollar un prototipo realizable. Mantiene los planteamientos generales de los diseños de trabajos previos y, de la misma manera, también los inconvenientes funcionales que se han observado. El más crítico de ellos es el desacople de los módulos ante la ausencia de una unión relativa de los mismos.

Sin embargo, obtiene un punto diferencial con el resto al emplear materiales inteligentes. Llamados así por su cambio de características de un modo más o menos controlable, recientemente cada vez más investigaciones se centran en la funcionalidad y aplicabilidad de los mismos a los micro electro-mecanismos. El tratamiento de la actuación y los materiales con los que llevarlo a cabo es clave para el diseño del microrrobot.

3.2.3. Módulos con unión mecánica

El formar una unión entre los módulos constituye un problema a la hora de evitar desacoples y problemas de funcionamiento en el microrrobot.

En los últimos trabajos llevados a cabo (Cabezas, 2019) y (Hontiyuelo, 2021) se ha tratado de resolver esta problemática.

Comienza introduciéndose una rótula, quizás buscando el par prismático con el que logre mantener la posición relativa, pero permitir el giro y movimiento del módulo inmediatamente superior. En la Figura 18. Diseño inicial con rótulas (Cabezas, 2019) se puede observar el planteamiento inicial.

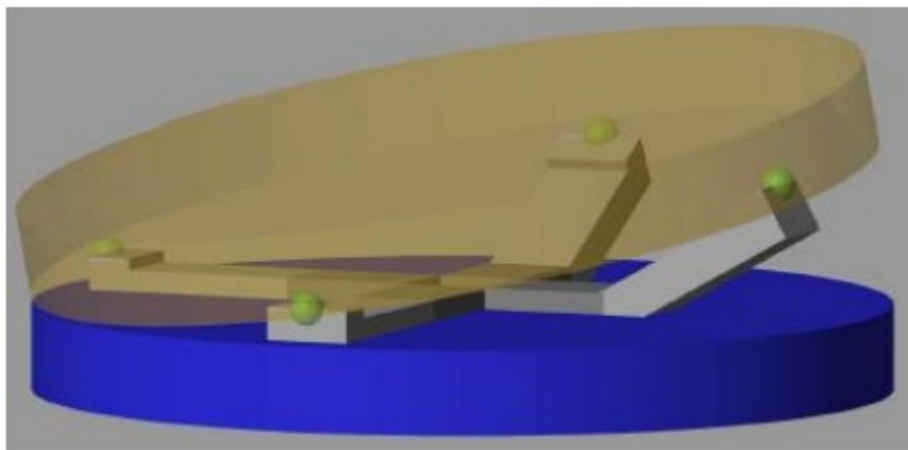


Figura 18. Diseño inicial con rótulas (Cabezas, 2019)

Este planteamiento se concreta en el trabajo de fin de máster (Hontiyuelo, 2021). Del mismo modo que en los trabajos previos, se mantienen las ideas funcionales tales como el orificio central, el mecanismo principal de actuación como palancas flexionadas, el posible revestimiento exterior y el diseño circular.

Además, se añaden las guías prismáticas que permiten el desplazamiento en las direcciones principales de actuación. Sin embargo, esto conlleva un problema: si las guías prismáticas no tienen movimiento relativo entre ellas, el giro del módulo en alguna de las direcciones provocará que al menos una de las palancas se tenga que retorcer. Es por ello que se diseña una placa con un pequeño movimiento relativo para que las palancas puedan actuar correctamente. En la Figura 19 se puede observar las partes que componen el nuevo módulo con la unión relativa inter-módular.

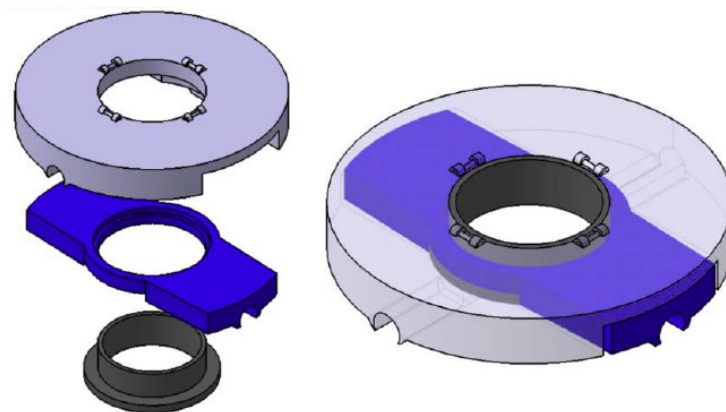


Figura 19. Explosionado de las partes que constituyen un módulo y módulo completo. Se pueden observar las ranuras por las que correrá la rótula. Estos dos elementos conforman la unión relativa entre módulos (Hontiyuelo, 2021).

La complicación de añadir este subsistema a cada módulo, para que otorgue un movimiento relativo entre guías prismáticas, se ve recompensada al obtener una unión rígida que elimina de una vez los problemas de movilidad entre módulos.

Para comprender mejor el movimiento de las palancas rígidas se puede ver la Figura 20, donde las palancas actuadoras verde y roja estarían retorcidas si las guías fueran rígidas, lo que probablemente provocaría el bloqueo del movimiento del giro del módulo superior, porque las palancas son lo suficientemente rígidas y se deformaría el eslabón

más débil de la unión, como puede ser la rótula, las paredes de la guía, la unión de la palanca con el módulo y/o la propia palanca.

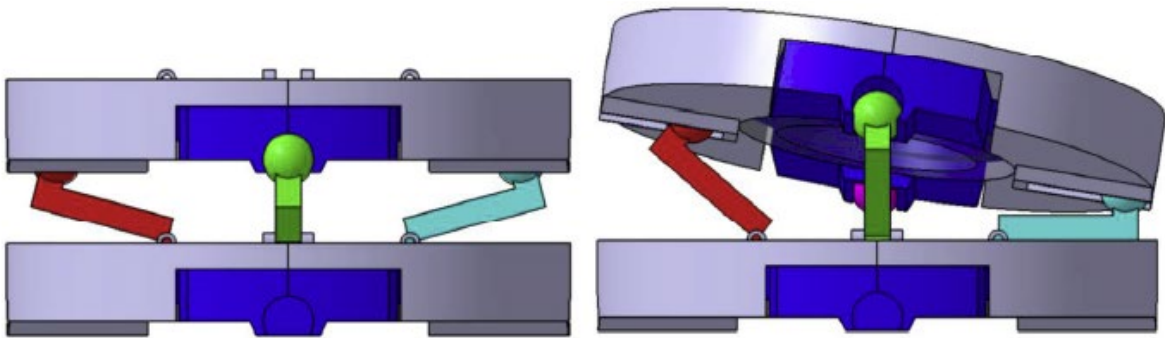


Figura 20. Detalle de la secuencia en reposo (izquierda) y actuada (derecha) del funcionamiento de la guía prismática giratoria. Al elevarse los actuadores de giro rojo y verde, de no existir el giro de la pieza morada, se verían retorcidas en su movimiento.

Es pues, fundamental, tener en cuenta esta consideración en el diseño del presente trabajo fin de máster para que en el futuro los modelos teóricos de los trabajos partan de unas dimensiones determinadas.

3.3. Consideraciones de la evolución del diseño

Se ha considerado importante para el proceso de desarrollo del microrrobot determinar los puntos clave del diseño que se han expuesto en trabajos anteriores. Extraer conclusiones sobre la evolución de estos aportará valor al diseño final, así como considerar todos los cambios que ha habido permitirá aplicar esas mejoras o al menos tenerlas en cuenta.

En las primeras fases del proceso llevado a cabo en el presente trabajo se aproximó una solución inicial a la necesidad planteada sin haber visto los trabajos previos. Esto es recomendable al iniciar un proyecto de este tipo. Las características de este proyecto de la Universidad de Valladolid son de una gran longitud en el tiempo y con muchos alumnos y profesores multidisciplinares que aportan numerosas ideas al desarrollo común. Por esta razón, es importante plantear todo desde un punto de vista nuevo, sin influencias del estado en el que se encuentre el proyecto. Con estos nuevos enfoques, que son más creativos al principio, se logra aportar ideas novedosas que puede que no se hayan tenido en cuenta previamente.

En el caso actual, el desarrollo ha tenido cambios significativos desde sus primeras aproximaciones. Se explicarán a continuación.

3.3.1. Módulos

En todos se mantiene el diseño modular. Es una condición de diseño principal y se espera que los módulos formen la estructura principal del microrrobot. Esta, además, será móvil y tendrá los grados de libertad suficientes para moverse y desempeñar las tareas necesarias.

Además, se recubrirá de un material biocompatible que sirva de elemento separador entre él y el cuerpo humano.

3.3.2. Unión modular

La unión entre módulos es importante para establecer el diseño y el mecanismo del microrrobot. En algunas aproximaciones realizadas en los trabajos iniciales no hay o no se plantea.

Está relacionada con los grados de libertad del sistema y su diseño final debe obtener unos módulos fiables, controlables y que no puedan moverse de forma indeseada.

3.3.3. Base

La base sirve de soporte a cada módulo. Su parte inferior es actuada por el módulo inferior y en su superficie se colocan los mecanismos que van a servir de actuación. Inicialmente tiene forma de paralelepípedo y posteriormente se transforma en una forma circular. De este modo, es más fácil su introducción en el cuerpo, sin presencia de aristas vivas.

También elimina material del módulo, reduciendo el peso total del microrrobot. La ligereza es algo importante de cara al funcionamiento y a la caracterización del sistema de actuación.

3.3.4. Actuadores

Los actuadores se han considerado en muchos trabajos previos. Generalmente su número siempre se ha planteado en cuatro. Desde el punto de vista funcional, es el número mínimo de actuadores que se puede tener si se debe mover en cuatro direcciones principales. Aumentar el número, implica necesariamente añadir más control y complejidad al mecanismo. La sencillez es clave, al menos en las fases iniciales del proceso.

El funcionamiento de estos actuadores es binario. Esto quiere decir que su movimiento sólo tiene dos estados: activado completamente o desactivado. No hay un control gradual. Esto es importante para caracterizar el funcionamiento final de la actuación porque determina el comportamiento de todo el microrrobot.

3.3.5. Sistema de actuación

El modo de actuación también ha variado. Se ha pasado de empujadores lineales de gran tamaño a palancas de flexión de materiales inteligentes, considerando entretanto el empleo de pequeños tipos de motores. La actuación lineal está bien, pero es más complicada de aplicar en la pequeña dimensión. Es similar al caso de motores pequeños que, aparte de ser difíciles de miniaturizar más, no son capaces de entregar el par necesario.

La flexión de materiales inteligentes puede ser clave para el desarrollo del movimiento del microrrobot. Tanto materiales tipo poliméricos como SMA, que con sus deformaciones empujen las palancas de actuación.

3.3.6. Control

El control del microrrobot determina el funcionamiento del mismo. Para que lo haga correctamente, es necesario que la velocidad de la operación se encuentre en los niveles cómodos para la intervención. Si el mecanismo es adecuado pero muy lento, puede quedar invalidada esa opción si las operaciones se alargasen demasiado en el tiempo.

Todas estas estas consideraciones se tendrán que ir resolviendo a medida que avance el proceso de diseño. El hecho de resolverlas o desecharlas implicará la aparición de nuevas opciones que también influirán en el resultado y se deberán tener en cuenta. Todo forma parte del proceso iterativo de diseño.

Como se vio en la Figura 12, en el esquema de diseño, el análisis y la optimización interrelacionará todos los conceptos entre sí provocando buenas, malas u óptimas combinaciones. Todas las decisiones pueden ser rechazadas o reconsideradas y siempre se buscará que los pasos intermedios vayan conduciendo a la solución de la necesidad original.

4. CARACTERIZACIÓN DEL MECANISMO DE ACTUACIÓN

El objetivo de este capítulo es analizar las opciones existentes de sistemas de actuación que permitan controlar y dirigir los movimientos del microrrobot. Para ello, es necesario estudiar las diferentes opciones disponibles en la actualidad.

Para dar por válida la elección del material de actuación, es necesario que se pueda adaptar a las condiciones de contorno establecidas como objetivo de diseño en los capítulos anteriores.

Como líneas generales de diseño, se plantea un control modular individual, manteniendo la línea de los trabajos presentados anteriormente. Para dirigir el microrrobot de un punto a otro, es necesario controlar el movimiento de cada módulo de forma individual para obtener una configuración total establecida previamente. Se controla a través de un algoritmo que queda fuera del ámbito de este Trabajo de Fin de Máster y que se aborda en otros trabajos.

4.1. Micro actuadores

En capítulos previos se han presentado algunas versiones de robots ápodos, modulares e hiperredundantes a escala macroscópica. Se trata a menudo, de sistemas mecánicos actuados mediante subsistemas motrices.

Estos sistemas se basan en la actuación de sistemas externos que provocan movimientos relativos en los módulos. Por ejemplo, la tensión de cables, engranajes, correas, pistones, guías prismáticas, músculos neumáticos etc.

Estos sistemas de actuación a nivel macroscópico están bien, pero la escala del microrrobot que se está diseñando es una condición de contorno que limita el empleo de grandes sistemas de actuación. No sólo por su tamaño si no por la gran cantidad de piezas y mantenimiento que requieren.

El microrrobot diseñado opera el interior del cuerpo humano y para introducirlo requiere realizar una incisión u orificio natural, por lo que es preciso que tenga un tamaño reducido. Las dimensiones del mismo tienen que ser suficientes para garantizar su uso y manejo, pero al mismo tiempo tiene que ser lo suficientemente pequeño como para operar en este entorno limitado.

En el estado de avance de la tecnología actual, es necesario encontrar un sistema que garantice cumplir las condiciones de contorno del diseño. Los requisitos fundamentales que se buscan, a parte de un tamaño reducido, es la sencillez en sus componentes, manejo controlable, tiempo de actuación adecuado etc.

De entre la gran cantidad de desarrollos que se investigan en la actualidad, destacan notablemente los avances en fabricación aditiva. Permiten obtener micromotores y piezas de dimensiones microscópicas capaces de convertir energías externas en movimiento. El desarrollo de estas técnicas de fabricación de unos años a esta parte ha sido muy grande, ya que ahora tienen una precisión y una resolución que hace pocos años sólo se podía teorizar.

En (Wilson, 2020), se hace una revisión exhaustiva de los prototipos de motores que se están investigando actualmente mediante esta tecnología. Sin detenerse más de lo necesario, se mostrarán algunos ejemplos destacables.

Con distintos procesos de fabricación aditiva y micro-mecanizado, se pueden conseguir micromotores con mecanismos móviles ya ensamblados, estructuras con movimientos relativos de sus partes y réplicas de sistemas macroscópicos.

En una primera aproximación a la concepción del diseño, puede resultar útil tratar de replicar microscópicamente, sistemas que funcionan a escala normal. En la Figura 21 se pueden ver algunos ejemplos.

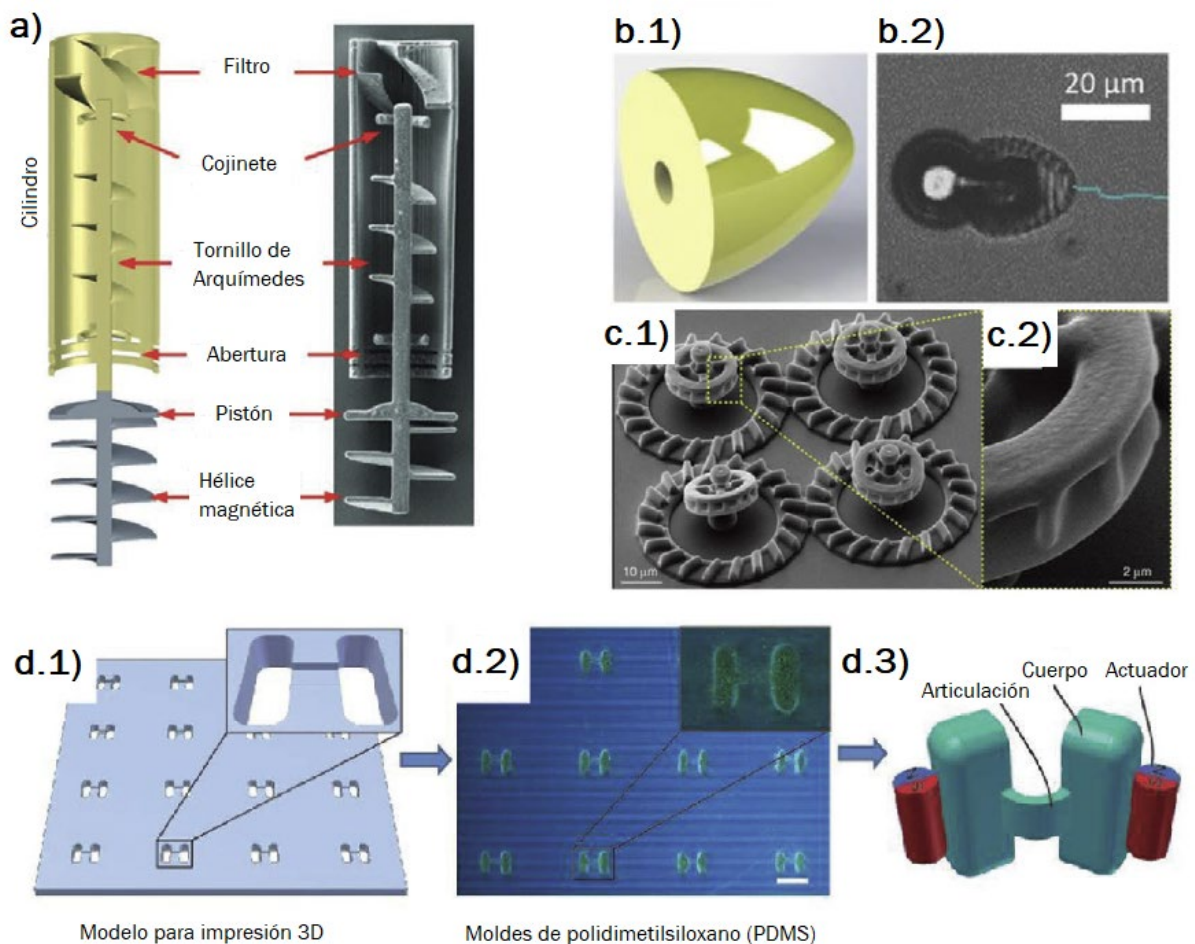


Figura 21. Distintos tipos de micro-actuadores. a) Sección de un microtransportador (Sakar, 2015) b.1) Diseño 3D e b.2) imagen de contraste de un micro motor auto-propulsado tipo “bala” (Sitti, 2017) c.1) Perspectiva de un sistema de micro-engranajes y c.2) detalle de las micro cámaras (Leonardo, 2017) d.1) Molde, d.2) modelo y d.3) diseño del resultado del robot nadador (Fischer, 2014)

La Figura 21 a), se muestra una sección de un micro transportador que puede recoger, transportar y soltar controlablemente micro y nano agentes. Su fabricación se basa en escritura 3D mediante láser directo (de sus siglas en inglés DLW, *Direct Laser Writing*) y por la deposición de vapor de material magnético (de sus siglas en inglés PVD, *Physical Vapor Deposition*). Su característica más notable es que ensambla dos tipos de material en la propia fabricación, uno de ellos con propiedades magnéticas. Es controlado mediante campos magnéticos externos (Sakar, 2015). Idea interesante pero alejada de un sistema sencillo y poco complejo, además de estar concebido para otra funcionalidad.

En la Figura 21 b.1) se puede ver el diseño CAD de un micro motor autopropulsado tipo “bala”, planteado en (Sitti, 2017). La Figura 21 b.2) muestra el prototipo del micromotor en una imagen de contraste. Su fabricación se realiza también mediante DLW. El complejo proceso de fabricación requiere plantear la estructura previamente en un diseño 3D CAD para luego imprimir la estructura microscópicamente. Los materiales que lo conforman interactúan para conseguir una reacción química de catálisis en una cavidad interior, obteniendo un flujo de burbujas constante que propulsa al micromotor. El concepto de autopropulsión abre la puerta a numerosos diseños que integren esta tecnología en sistemas más complejos, en tareas como la entrega de medicación mínimamente invasiva y focalizada en partes concretas del cuerpo, ingeniería de tejidos y actuadores biohíbridos. En cualquiera de los casos, sistemas complejos que se alejan de las condiciones de contorno necesarias para el diseño.

La Figura 21 c.1) se muestra un micromotor propulsado biológicamente gracias a las bacterias *E. coli* confinadas en cada una de las cámaras, que se detallan en c.2) (Leonardo, 2017). Mediante la técnica DLW, se pueden fabricar estas estructuras compuestas, con dos partes móviles unidas mediante un eje de dimensiones micrométricas. El control de la velocidad de giro del motor, se realiza gracias a la fotosensibilidad de las bacterias de *E. coli*, de manera que gracias a la intensidad de la luz, se controla la velocidad de giro. Con esta aplicación se pueden desarrollar futuras micro bombas o micromotores que puedan suministrar medicamentos de manera localizada. Sin embargo, las dimensiones son demasiado pequeñas para poder plantear alguna actuación en el microrrobot aparte de ser una aplicación en vías de investigación.

Por último, en la Figura 21 d) se puede apreciar un prototipo de microrrobot nadador que se desplaza inmerso en un líquido estable, de bajo número de Reynolds (Fischer, 2014). Cuenta con una forma de bisagra que en sus extremos cuenta con dos micro imanes y en su centro un tramo más estrecho que actúa de bisagra. Se desplaza mediante la variación de un campo magnético externo que actúa sobre los micro imanes, de forma similar a las almejas marinas.

La Figura 21 d.1) muestra la impresión 3D de un molde en cuyo negativo se imprimirá el modelo Figura 21 d.2) mediante la tecnología de *Polyjet*. Con este método de fabricación se pueden crear materiales poliméricos de gran complejidad. El resultado es un micromotor Figura 21 d.3) que puede ser propulsado exteriormente, convirtiendo la variación del campo magnético en un movimiento. Su movimiento, aunque controlable, es poco preciso y la aplicabilidad de este actuador no cumple con los requisitos del diseño.

Después de examinar algunos de estos micromotores que ofrece la tecnología de fabricación aditiva, se puede resumir que las soluciones microscópicas que ofrecen son insuficientes para satisfacer las necesidades del diseño del accionamiento del microrrobot. Tratar de replicar, por estos medios, sistemas macroscópicos convencionales a escala microscópica, plantea sistemas demasiado complejos de llevar a cabo un diseño sencillo.

Los pequeños actuadores que se han investigado se muestran insuficientes para llevar a cabo la actuación del microrrobot. O bien su escala es demasiado pequeña, o resulta difícil su manejo y control. Tratar de diseñar sistemas accionados por estos es inviable. Es necesario, por lo tanto, seguir analizando más soluciones.

4.2. Materiales inteligentes

Se conocen como materiales inteligentes un amplio campo de tipos de transductores electromecánicos. Ante el estímulo de energía eléctrica, estos materiales reaccionan devolviendo energía mecánica en forma de deformación y al revés, pudiendo funcionar también como sensores. Tienen propiedades como la piezoelectricidad, magnetostricción o la memoria de forma.

Esta característica les hace muy atractivos para muchas aplicaciones como la ciencia aeroespacial, electrónica, la industria médica, robótica incluso la industria textil en prendas inteligentes.

Tienen un alto grado de parecido con los músculos animales desde el punto de vista mecánico y funcional. El tejido muscular responde al estímulo de un nervio y convierte energía almacenada en sus células en energía mecánica, mediante la contracción elástica de su estructura (Nordqvist, 2017). Además, su optimización desde el punto de vista del diseño mecánico es sorprendente y, de entre todas las especies animales, hay muy poca variación en las propiedades básicas y configuración de estos. Lo que viene a establecer que, a través de millones de años de evolución, los músculos son la solución ideal que han desarrollado los animales para el movimiento mecánico controlado.

Los seres humanos han tratado de imitarlos con los actuadores convencionales, obteniendo réplicas inferiores, más pesadas, ruidosas e ineficientes en contraste con los músculos. Sin embargo, la actuación polimérica por medio de la electricidad se acerca mucho.

Las propiedades más destacables de los materiales inteligentes son que provocan grandes deformaciones, buena eficiencia mecánica respecto a su peso y bajo coste.

También pueden realizar la tarea inversa, como sensores ante varios tipos de energía o, incluso, actualmente se estudian hasta como recolectores de energía.

Debido a la versatilidad de propiedades, se denominan materiales inteligentes y en concreto, los que se estudian y se aplican como actuadores, se suelen denominar “actuadores ligeros” (*soft-actuators*), de su traducción del inglés, ya que son perfectos para robótica ligera, en aplicaciones que no requieran grandes movimientos de cargas.

Se van a exponer algunos ejemplos de materiales inteligentes sin profundizar en ellos. No es el objetivo del trabajo y es un campo tan extenso que merecería un trabajo a parte.

Destacan entre otros:

- **Piezoeléctricos:** Quizás unos de los más conocidos. Al aplicar una tensión en estos materiales, se produce una diferencia de potencial eléctrico. También sucede al revés. Los componentes fabricados con este material podrán doblarse, expandirse o contraerse al aplicarles un voltaje (Gaudenzi, 2009).
- **Aleaciones con memoria de forma:** Con gran capacidad de deformación, son materiales a los que pueden inducirse grandes deformaciones mediante cambios en la temperatura o de tensión. Esto se produce por cambios y reorientación en la estructura cristalina del material, entre martensita y austenita, con las altas temperaturas (Muñoz, 2008).
- **Magnetostrictivos:** Materiales ferromagnéticos que cambian su forma con la variación de un campo magnético debido a la reorganización en su estructura material (Gaudenzi, 2009).
- **Polímeros electroactivos (EAP, del inglés *Electro-Active Polymers*):** Son materiales que cambian su volumen bajo la influencia de campos eléctricos. Pueden cambiar mucho su deformación y tienen unas características tan ventajosas que se estudiarán en el siguiente apartado.

Dentro de estos grandes grupos de materiales hay una gran variedad de subgrupos con variadas características y con ventajas y desventajas. Se ha decidido destacar, respecto a los demás, a los polímeros electroactivos por sus propiedades como su gran flexibilidad, controlabilidad y sus cómodos rangos de funcionamiento.

Además, a diferencia de otros materiales, los polímeros son fáciles de procesar y de producir en masa (Anderson, 2012) y su respuesta mecánica a la electricidad, encaja dentro de las líneas de diseño del microrrobot.

4.3. EAP (Electro-Active-Polymer)

Los polímeros electroactivos o EAP (del inglés, *Electro-Active Polymers*), forman parte de los denominados “materiales inteligentes” pero son tan ampliamente estudiados por la comunidad científica y cuentan con tanta bibliografía y recursos que merecen ser analizados en un epígrafe propio debido a sus ventajosas características.

Este tipo de polímeros, consiguen una gran deformación en sus dimensiones ante un estímulo eléctrico, algunos tipos hasta un 300% de deformación (Soon, 2007).

Reúnen varias características que son interesantes para la actuación del microrrobot. La combinación de grandes deformaciones, altas densidades energéticas, buena eficiencia y rápidas respuestas se asimila mucho a los músculos animales.

Se dividen en dos grandes grupos: los inducidos por campos eléctricos (EAP activados por campos) e inducidos por difusión iónica (EAP iónicos). Cada uno cuenta con sus campos de aplicación y áreas de mejora.

-EAP Activados por campos: Se provoca un desplazamiento cuando se les aplica una diferencia potencial eléctrico continuo (CC, corriente continua) debido a las fuerzas de Coulomb por lo que requieren de grandes diferencias de potencial. Los más investigados son los ferroeléctricos y los elastómeros dieléctricos.

- Ventajas:
 - Puede funcionar en condiciones ambientales durante largos períodos.
 - Respuesta rápida, en milisegundos.
 - Provoca grandes fuerzas de actuación.
- Desventajas:
 - Requiere grandes campos eléctricos, lo que supone trabajar con grandes voltajes. Del orden de $150 \text{ V}/\mu\text{m}$ ~10% de deformación en elastómeros dieléctricos y de $20 \text{ V}/\mu\text{m}$, en aleaciones compuestas de ciertos elastómeros dieléctricos (Bar-Cohen, 2004)
 - La deformación provoca una actuación monopolar que es independiente de la polaridad del voltaje

-EAP iónicos: La deformación se produce debido a la diferencia de potencial de dos electrodos, por la difusión de iones del material electrolítico que los une. Generalmente, requieren de pequeñas diferencias de potencial y pueden emplearse de actuadores por su deformación y sensores por su función inversa.

Dentro de este grupo destacan los polímeros conductores, los geles poliméricos iónicos, nanotubos de carbono y compuestos iónicos de polímero y metal metal, o IPMC (de sus siglas en inglés, Ionic Polymer-Metal Composites)

- Ventajas:
 - Grandes desplazamientos.
 - Poco voltaje.
 - Actuación bidireccional en función de la polaridad del voltaje.
- Desventajas:
 - Salvo excepciones, no mantienen la deformación bajo corriente continua.
 - Respuesta lenta, en fracciones de segundo.
 - Relativamente baja fuerza de actuación.
 - Actuación en agua, sufre electrolisis para valores del voltaje superiores a 1,23V.
 - Actuación en aire es necesario atender al electrolito.
 - Baja eficiencia electromecánica

Dentro de cada gran grupo se pueden encontrar subgrupos que tienen sus propias características. Para valorarlos como sistema de actuación del microrrobot, es necesario realizar un análisis en por grupos.

4.3.1. EAP ACTIVADOS POR CAMPOS

Estos polímeros requieren de grandes voltajes, pero son controlables. Las fuerzas de Coulomb, electrostricción, piezoeléctrica, electrostática y ferroeléctrica ejercen la deformación sobre este material.

4.3.1.1. **FERROELÉCTRICOS**

Los actuadores poliméricos ferroeléctricos se caracterizan por que la polarización eléctrica puede cambiar en función del campo eléctrico aplicado.

Es ligero, fácil de procesar y se ha estudiado en muchas aplicaciones electromecánicas (Lovinger, 1983), sin embargo, su baja deformación (~0,1%) limita mucho su uso. Esto cambia en 1998 se descubre, que, aplicándole una radiación de electrones, se aumenta la constante dieléctrica (Zhang, 1998), y se logra aumentar su deformación (~10%) aunque su gran histéresis supone un inconveniente.

El más investigado es el denominado "Poly" (floruro de vinilideno), conocido PVDF o PVF2 y también por sus copolímeros como el P(VDF-TrFE) (Bar-Cohen, 1996). Mediante investigaciones más exhaustivas, se han desarrollado materiales que con un 5% de deformación obtienen niveles de presión de 45 MPa con voltajes de 150 V/ μm (150 MV/m) (Zhang, 1998).

Los terpolímeros, diseñados molecularmente como un material compuesto relleno de material dieléctrico con una gran constante dieléctrica ($K > 10000$) tienen un comportamiento similar al PVDF.

Los elastómeros de electrostricción (del inglés, *electrostrictive graft elastomers*), desarrollados por la NASA, están formados por dos componentes, una macromolécula flexible en forma de columna vertebral y un polímero injertado de estructura molecular o

nanocrystalina polarizable. Son capaces de obtener una deformación del 4% y una presión de 24 MPa para campos eléctricos que rondan los 130 V/ μm (130 MV/m) (Su, 1999).

Como se puede comprobar, este tipo de actuadores se comportan de manera similar. Diferencias de potencial muy elevadas a cambio de grandes esfuerzos con poca deformación. Para la aplicación del microrrobot no se necesitan tanta fuerza de actuación, se requiere bastante deformación y trabajar con voltajes tan elevados es complicado en aplicaciones médicas.

4.3.1.2. ELASTÓMEROS DIELECTRICOS

El principio de actuación es bastante simple, consiste en una membrana de material dieléctrico elastomérica recubierto con láminas que actúan de electrodos maleables, algo así como condensadores flexibles.

Al aplicar voltaje en los electrodos, el material sufre una deformación mecánica. El principio de funcionamiento se ve en la Figura 22. En el proceso de la Figura 22 a), se observa el esquema de actuación de un elastómero dieléctrico bajo la aplicación de un voltaje (Gonzalez-Jiménez, 2015) b) Actuador dieléctrico carbono-acrílico con una configuración plana circular en reposo y actuado (Gisby, 2009). c) Actuador lineal mostrando la deformación bajo un voltaje (Bar-Cohen, 2004) y la expansión del material. En las imágenes de la Figura 22 b), se observa de igual modo la expansión de un elastómero dieléctrico compuesto por electrodos estirables de carbono, revistiendo a un dieléctrico acrílico.

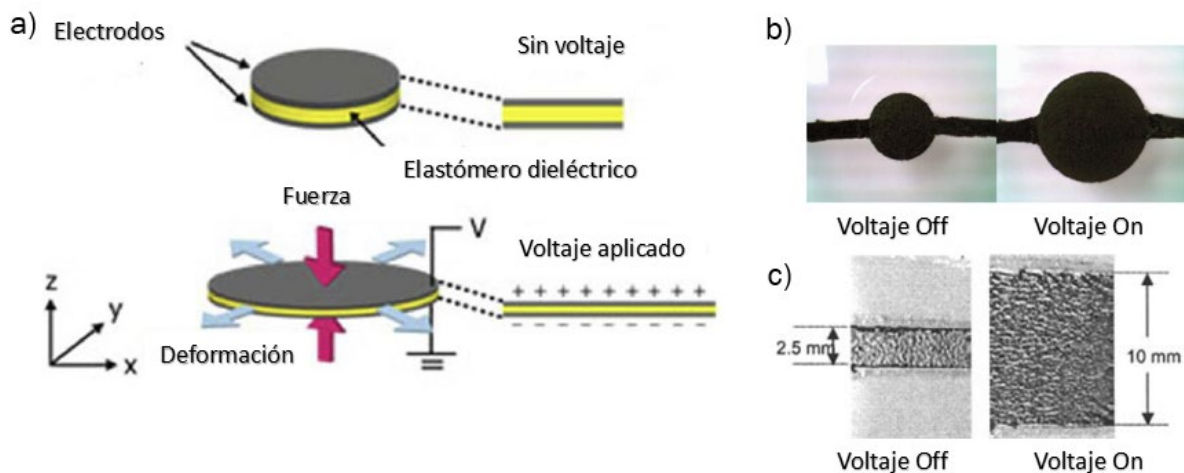


Figura 22. a) Esquema de actuación de un elastómero dieléctrico bajo la aplicación de un voltaje (Gonzalez-Jiménez, 2015) b) Actuador dieléctrico carbono-acrílico con una configuración plana circular en reposo y actuado (Gisby, 2009). c) Actuador lineal mostrando la deformación bajo un voltaje (Bar-Cohen, 2004)

Se pueden obtener varios rangos de deformaciones que van desde el 10 al 300%, con baja histéresis y con altas densidades de energía 8 MJ/m³. El inconveniente que tienen es, como en este subgrupo de EAP, su alto campo eléctrico de 100 V/ μm para provocar la deformación mecánica (Romasanta, 2012).

Actualmente, se busca producir elastómeros de silicona con una constante dieléctrica alta mientras se mantiene un módulo de Young bajo que provoca una actuación correcta y una fuerza dieléctrica alta. También se busca producir actuadores dieléctricos que sean capaces de operar a bajos voltajes, pero esto es aún un objetivo no desarrollado para este material como se discute en (Opris, 2018).

Por lo tanto, este material no supone una primera opción en la aplicación del microrrobot, por el mismo motivo que el subgrupo ferroeléctrico, a pesar de las buenas deformaciones y características, requieren de voltajes muy elevados.

4.3.2. EAP IÓNICOS

En este grupo, la deformación del material es producida por la movilización o difusión de iones del material electrolítico embebido por dos electrodos. Generalmente se obtiene un movimiento de flexión sobre el material al aplicar bajos voltajes, pero son peor controlables que los polímeros activados por campos eléctricos.

Los más estudiados son los geles iónicos poliméricos, los polímeros conductores, los nanotubos de carbono y los compuestos polimérico-metálicos, IPMC (por sus siglas en inglés *Ionic Polymer-Metal Composites*).

4.3.2.1. *GELES IÓNICOS POLIMÉRICOS*

Este tipo de EAP se encuentra en un estado tipo gel, intermedio entre el sólido y el líquido, una solución que puede variar su estado ante un estímulo externo, generalmente una reacción electroquímica que causa que el gel se contraiga o se expanda. El cambio mecánico es debido al desplazamiento del agua fuera del gel o viceversa.

Los estudios indican que, generalmente, el gel provoca grandes deformaciones, pero muy poca fuerza de actuación (Rasmusen, 2009) y hasta la actualidad, no se han hecho grandes avances. Estas características, junto la complejidad del estado de agregación de la materia y su difícil manipulación hace que su aplicación en el posible sistema de actuación sea inviable.

4.3.2.2. *NANOTUBOS DE CARBONO*

Los nanotubos de carbono o CNT (del inglés *Carbon NanoTubes*), consisten en tubos de tamaño del nanómetro que son capaces de producir deformaciones del 1% (Mirfakharai, 2008). El empleo de estos nanotubos en materiales actuadores como EAP tiene potencial para trabajar en grandes ciclos de trabajo y tienen un gran módulo de Young. Los voltajes de trabajo se sitúan en torno a 1 V.

Reúne características ventajosas para el empleo de estos materiales en aplicaciones como supercondensadores eficaces, actuadores y protectores electromagnéticos ligeros. Los últimos avances han permitido la integración de los materiales de CNT en láminas electrónicas y grandes recubrimientos en área, que son ideales para baterías recargables, partes del automóvil etc (De Volder, 2013).

Este material tampoco reúne las condiciones necesarias para conformar el sistema de actuación del microrrobot. Tiene unas propiedades prometedoras, pero actualmente es de difícil manejo y es complejo de manipular.

4.3.2.3. *COMPUESTOS IÓNICOS DE POLÍMERO Y METAL (IPMC)*

Este material inteligente, ofrece una gran capacidad de deformación ante una diferencia de potencial bajo, en torno a 1-3 V (Bar-Cohen, 2004). Son fabricados como

estructuras tipo sándwich, donde dos láminas metálicas hacen de electrodos unidos por una membrana de polímero iónico.

Su funcionamiento es sencillo, cuando se aplica un campo eléctrico a los electrodos, los cationes del material polimérico se mueven hacia el cátodo haciendo que el material polimérico se expanda en el lado del cátodo ocasionando un gradiente de presión en el material y provocando su deformación, Figura 23. En la situación contraria, generarán una señal eléctrica si se provoca una deformación en el material.

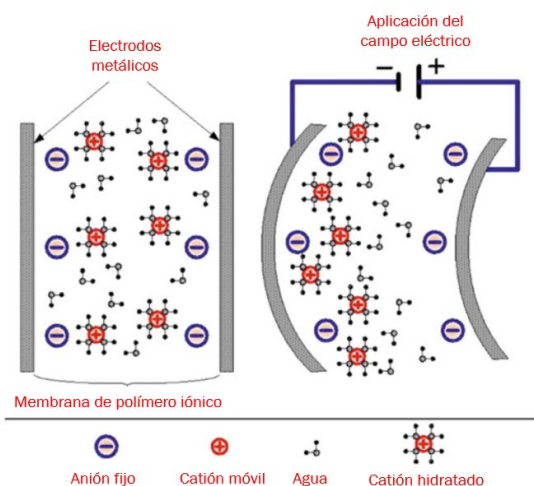


Figura 23. Funcionamiento a nivel molecular de una sección del compuesto iónico polímero y metal (IPMC), en estado de reposo (izquierda) y bajo la actuación de una diferencia de potencial eléctrica (derecha) (Nemat-Nasser, 2003)

Los electrodos lo forman metales con buena conducción como el oro o el platino. La membrana polimérica suele estar formada por los polímeros iónicos de Nafion o Flemion (Shahinpoor, 2016). En la Figura 24 se puede ver el esquema del estado de deformación que sufren los electrodos y el material real en funcionamiento.

Los electrodos sufren de compresión o tracción en función de la migración iónica del material polimérico que los une. Los cationes hidratados se mueven al lado del cátodo y se produce la deformación, Figura 24 a). Mientras en la Figura 24 b), se muestra una secuencia de movimiento de la lámina al aplicarle 4V cada 0.5 segundos en aire.

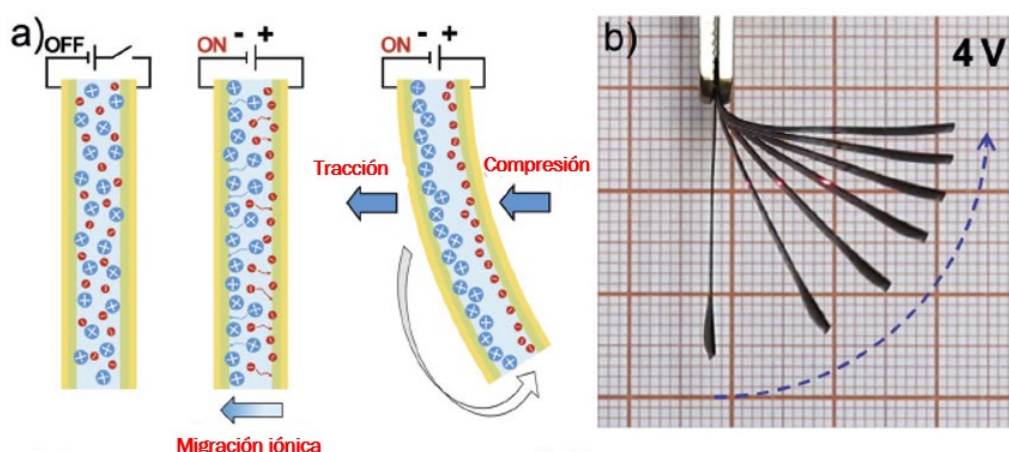


Figura 24. a) Esquema de comportamiento del material IPMC bajo corriente continua. b) Serie de imágenes superpuestas de IPMC, tomadas cada 0.5s al aplicarle una corriente continua de 4V (Ma, 2020)

El comportamiento del IPMC en corrientes continuas se ve en la figura Figura 25. En función de la diferencia de potencial, la migración de los cationes hidratados se desplaza en uno u otro electrodo, como se muestra en el esquema de la Figura 25 a). A la derecha, también se ve el comportamiento real del material.

En función de la frecuencia, la migración será más rápida o lenta. En frecuencias altas, se produce una migración ultrarrápida de los iones debido al cambio rápido de la polaridad del voltaje. Para frecuencias bajas, la punta del actuador obtiene un desplazamiento mayor, cuanto mayor sea el voltaje, de forma similar a como ocurre para corriente continua (Figura 25 b). En el gráfico adjunto, se ve el máximo desplazamiento de la punta del actuador en función del voltaje. Para un voltaje de 1V se obtiene un desplazamiento máximo de 1mm y para 4V se obtienen 19mm.

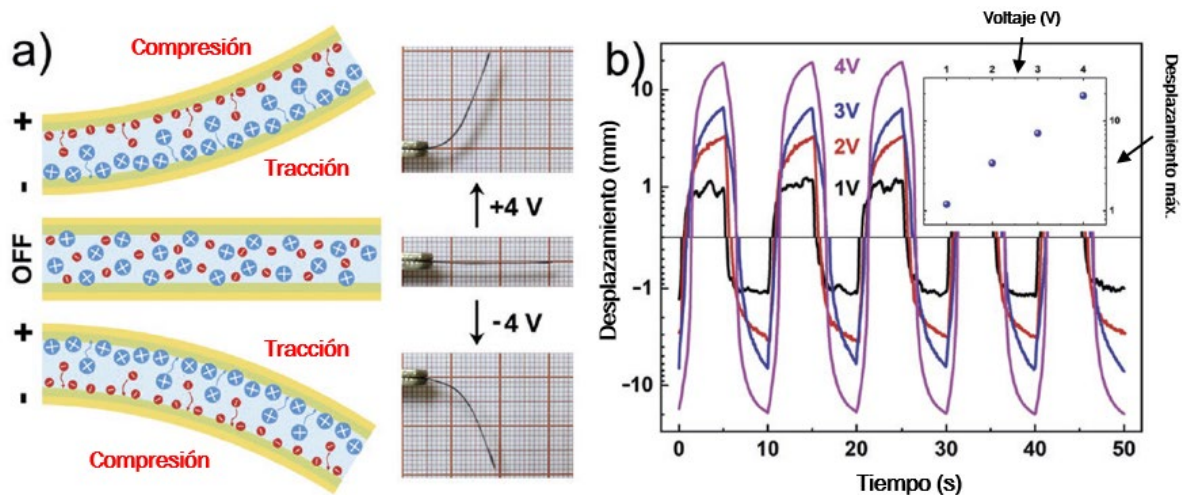


Figura 25. a) Esquema de comportamiento del material IPMC bajo corriente alterna. b) Desplazamiento en la punta del material del actuador para señales de entrada cuadradas de 1 a 4 V para una frecuencia de 0.1Hz. En la tabla adjunta, se ve el máximo desplazamiento obtenido para cada voltaje (Ma, 2020)

Este comportamiento del material, indica que puede operar con relativamente altas frecuencias de hasta 2 Hz sin apenas retraso y una respuesta rápida en corriente alterna (Ma, 2020).

El mayor inconveniente de los IPMC es la baja fuerza que devuelve. Para una sola lámina de IPMC la máxima fuerza registrada fue de menos de 50mN, (5 gf). A pesar de ello, numerosas investigaciones estudian desde la optimización del proceso de fabricación y la de los materiales que lo conforman. Además, también se estudia la disposición y dimensión de los actuadores IPMC para lograr conocer y aumentar la fuerza que transmiten. En (Yang, 2020), se estudia el proceso de fabricación del IPMC y su espesor. Sus conclusiones son que, para un mayor espesor, más fuerza aplica el actuador de IPMC, con 10.74 mN para un voltaje de 6.5 V.

El espesor y la disposición dimensional de las láminas de IPMC juegan un papel fundamental en el comportamiento de este y en la fuerza que transmite. Junto con las características de bajos voltajes de aplicación, facilidad en su control, manejo, bajo peso para su gran deformación, hace que sea un candidato para el sistema de actuación del microrrobot.

En la práctica, muchos prototipos y aplicaciones demuestran que este material es aplicable, útil y realizable, como en la recopilación de trabajos que hace (Chen, 2015). En esta recopilación, se pueden ver ejemplos de IPMC empleados como deformadores de espejos en aplicaciones de fibra óptica, como actuador enfocando lentes, como micro garras y un largo etcétera.

Por lo tanto, esta decisión, desde el punto de vista del proceso de diseño, se toma en base a que las ventajas que ofrece el material IPMC son mejores que las de los demás candidatos y se emplea en numerosos dispositivos de robótica ligera.

4.4. Caracterización del material IPMC como actuador

El objetivo del sistema de actuación es provocar un movimiento en el módulo del microrrobot. Tiene que ser un movimiento controlado y repetible, que llevado y replicado a todos los módulos del microrrobot provoque su movimiento total.

Este sistema tiene que estar formado por cuatro actuadores, o puntos de actuación, para permitir el movimiento binario del módulo. El material inteligente IPMC, tiene que conseguir mover el módulo directa o indirectamente a través de un elemento que lo mueva. Tiene por lo tanto que realizar una transducción de energía eléctrica a mecánica.

4.4.1. Propiedades

Los compuestos iónicos de polímero y metal, IPMC llevan dos décadas estudiándose por numerosos investigadores y cuentan con grandes ventajas que son empleadas en diversos e innovadores sistemas de actuación robótica.

Se han desarrollados modelos teóricos que explican y replican su movimiento y se comprueban experimentalmente. Es importante conocer las propiedades del material, desde su proceso de fabricación, sus propiedades dimensionales y su densidad energética para poder caracterizar un sistema de actuación para el microrrobot.

4.4.1.1. *Método de fabricación*

El principal problema que hay que resolver es su baja capacidad de fuerza otorgada en su deformación. Algunos estudios, tratan de mejorar esta propiedad fabricando el material con distintos procesos.

De entre los numerosos estudios enfocados al proceso de fabricación de este material inteligente, destacan el que se realiza en (Ma, 2020). En él, consigue aumentar la deformación, la fuerza y la respuesta de un IPMC a través de un proceso de fabricación distinto a los procesos convencionales. Consiguen fabricar unos electrodos de gran calidad, recubriendo homogéneamente la membrana polimérica de electrodos de metal.

El IPMC se comporta mucho mejor, con una gran deformación en la punta de la lámina bajo corriente continua. En la Figura 26 se pueden ver los ensayos llevados a cabo en el estudio de (Ma, 2020).

En la primera imagen de la Figura 26 a) se muestra la disposición llevada a cabo para comprobar la fuerza de actuación. Se plantea un sensor que pueda medir la capacidad que tiene el IPMC de ejercer su fuerza de deformación en la punta de la lámina.

Cuando se aplica el voltaje se detecta la fuerza, que se refleja en la tabla de la Figura 26 b) con varios voltajes, de 2 a 5 V durante 10 segundos. La mayor fuerza que se recoge no llega a los 35 mN, que es notablemente mayor que la mayoría de las aplicaciones de media 10 mN (Jain, 2010).

En la Figura 26 c) se plantean el ratio de carga, expresado como la carga elevada en función del peso propio del actuador a 4 V en corriente continua (CC). A medida que aumenta la ratio de carga de 0 a 20, manteniéndose el mismo actuador, baja la elevación de la carga desde algo menos de 25mm sin carga, a apenas 2,5mm con 20 veces su peso.

Para terminar de caracterizar el material en corriente continua, en la gráfica Figura 26 d), se expresa la distancia de elevación en milímetros en función del voltaje para un ratio de carga de 5 veces su peso. A medida que se incrementa el voltaje linealmente de 2 a

5V, se aumenta la distancia de elevación de 1mm a 9mm con 5 V. Es decir, cuánto más voltaje más alto es capaz de elevar la misma carga.

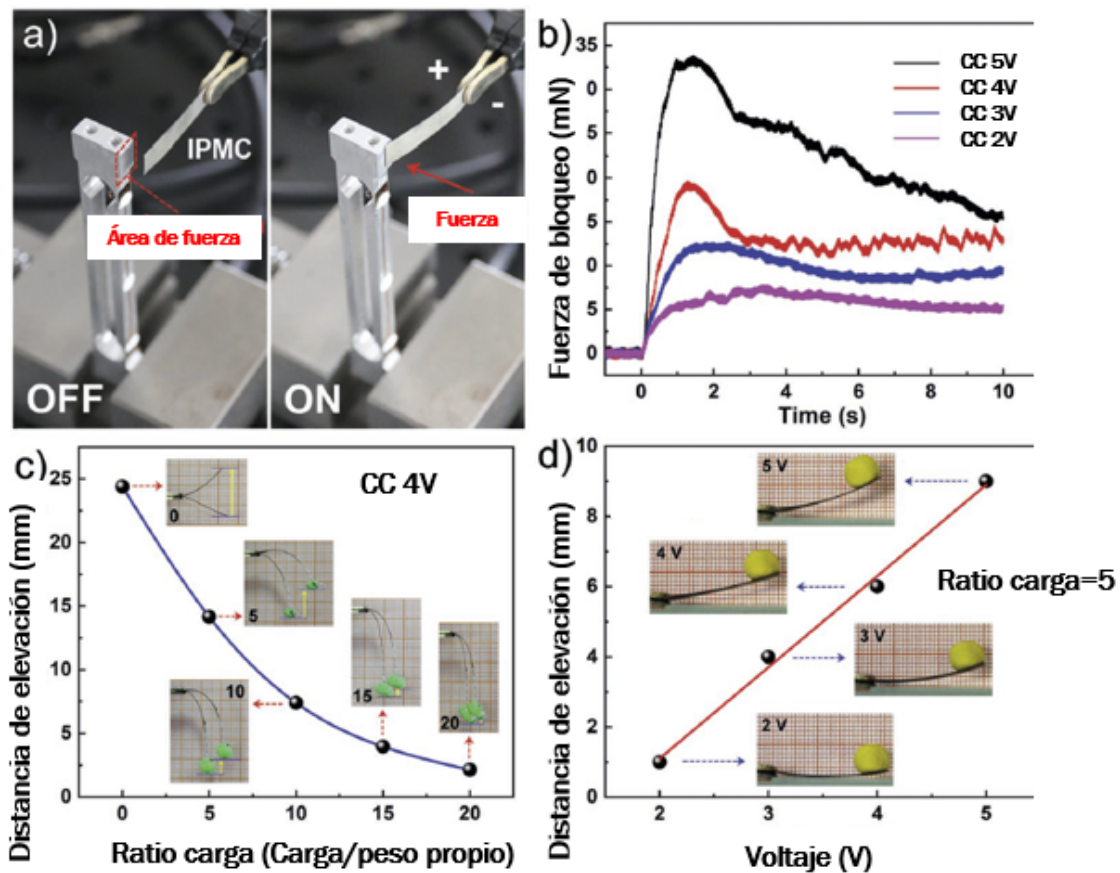


Figura 26. a) Imágenes de la célula de carga que caracteriza la fuerza de actuación del IPMC en corriente continua. b) Fuerzas de bloqueo para el actuador con diferentes voltajes aplicados durante 10s en corriente continua. c) Ensayo de elevación de carga en corriente continua para 4V. El peso es de 5, 10, 15 o 20 veces el del actuador de IPMC. d) Ensayo de elevación de carga del IPMC bajo diferentes corrientes continuas con un objeto superior en masa 5 veces (Ma, 2020)

Este tipo de estudios demuestran que las capacidades de los IPMC no están todavía desarrolladas y que en un futuro puede que sus propiedades mejoren notablemente gracias a la mejora en los procesos de fabricación.

4.4.1.2. Características dimensionales

Otros estudios tratan de mejorar las capacidades del IPMC atendiendo a sus características dimensionales. Se ha comprobado que la morfología de la lámina del actuador hace que varíe notablemente su comportamiento, (Shen, 2007), (Wang, 2020) y (Yang, 2020).

La diferencia de potencial y el peso propio de la lámina puede hacer que el material se comporte de manera diferente según se aplique a un IPMC ancho, largo pero estrecho, muy grueso o con un espesor pequeño.

Las propiedades dimensionales se comportan, según los estudios, de la siguiente manera:

- Si se incrementa la longitud del actuador, la deformación aumenta considerablemente, pero la resistencia superficial del mismo hace que el voltaje se disperse más y se consiga menos curvatura en la punta (Shen, 2007)

- Cuando se aumenta el grosor del material, la fuerza aumenta, pero baja la deformación y la velocidad de deformación. En algún caso un actuador muy ancho, del orden de milímetros, puede ofrecer 144mN a 30mm a 4V, pero tarda en alcanzar ese estado 30 segundos (Wang, 2020)
- Si se aumenta el ancho de la lámina, aumenta la fuerza del actuador y no afecta tanto al comportamiento de la deformación (Yang, 2020), aunque aparecen problemas de deformación en anchura del material, al dispersarse el voltaje.

Por lo tanto, para el sistema de actuación, será recomendable incorporar una lámina de IPMC lo suficientemente corta para poder provocar un movimiento de curvatura en su parte final, lo suficientemente ancha como para tener más fuerza y no excesivamente gruesa para no comprometer la velocidad de actuación. En la caracterización del microrrobot puede haber numerosos módulos y no interesa que, para mover, por ejemplo, un segmento de 10 módulos, cada actuador tarde 30 segundos en moverse.

Además, las reducidas dimensiones del microrrobot implicarán un bajo peso para la totalidad de su actuación.

4.4.1.3. Densidad energética

La densidad energética es un factor importante a la hora de caracterizar las propiedades de funcionamiento del material. En el caso de las láminas de estos compuestos, la densidad energética se puede entender como la capacidad del material polimérico de aportar cationes hidratados para la deformación de los electrodos.

A menudo se trata de mejorar con distintos materiales, pero en la bibliografía estudiada, también se trata de aumentar esta densidad de forma mecánica, procurando combinar o aplicar varias láminas para obtener un sistema de actuación de mayor densidad energética que una sola lámina.

La densidad energética de este tipo de láminas suele ser de $\sim 5 \text{ KJ m}^{-3}$ que es similar a los músculos biológicos, que tienen un rango más amplio de entre 8 y 40 KJ m^{-3} (Takagi, 2014). Para conseguir más fuerza, los músculos están formados por fascículos que contienen fibras apiladas a lo largo de las direcciones radial y tangencial. La energía es administrada por toda la superficie de las fibras, ya que las mitocondrias la producen y la reparten con la red de túbulos Figura 27.

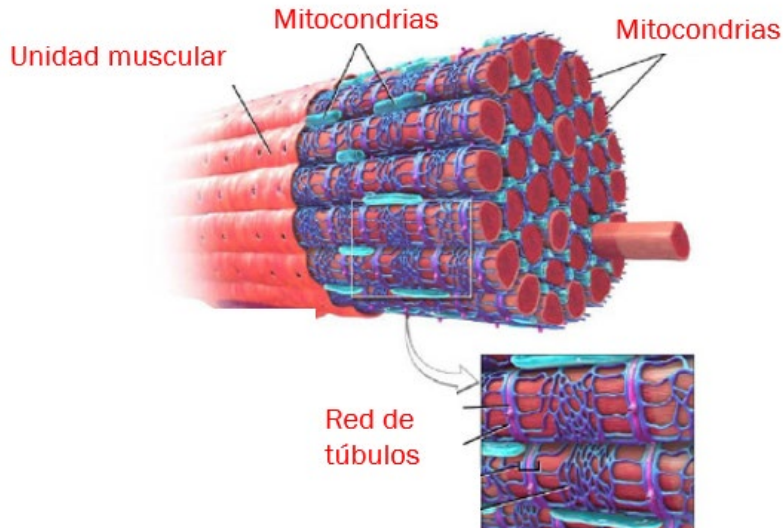


Figura 27. Esquema de un fascículo formado por numerosas fibras musculares (Blausen, 2021)

Se puede plantear que el apilamiento de los IPMC puede resultar, al igual que los músculos, en mayor fuerza de actuación. Pero puede haber problemas con las deformaciones de los actuadores apilados de forma simple, tanto en horizontal como en vertical, debido a las fuerzas tangenciales en las superficies. Sin embargo, hay formas de apilar este material que pueden resultar útiles a la hora de aumentar la fuerza del mismo. En (Changashen, 2021), idean un sistema de apilamiento que incrementa de manera notable las propiedades del IPMC.

El problema de aumentar el ancho, como se ha expuesto anteriormente, es que se generan deformaciones a medida que aumenta la superficie del material por qué se va perdiendo diferencia de potencial. De forma similar, otras disposiciones generan fuerzas y restricciones inadecuadas, como en la Figura 28.

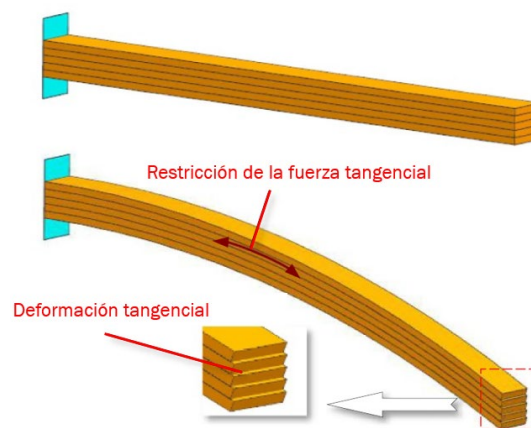


Figura 28. Restricciones en el movimiento de actuadores de IPMC apilados de forma simple, debido las fuerzas tangenciales que se producen

La clave para evitar los problemas del apilamiento es sincronizar la deformación para que el material trabaje de la misma manera. Los apilamientos en anchura son más fácil de manejar, ya que su accionamiento resulta más sencillo al contar con todas sus superficies más accesibles.

El procedimiento que se emplea en (Changsheng, 2021) es el mostrado en la Figura 29. Se fija en un extremo a la zona que servirá de accionamiento dónde aplicar el campo

eléctrico. En el otro extremo, una brida a medida impresa en plástico 3D se fija junto con el resto de las puntas de las láminas adyacentes. Para poder sincronizar los actuadores, es importante que todas las láminas sean del mismo tamaño y material, para que su movimiento sea similar y sincronizado posible.

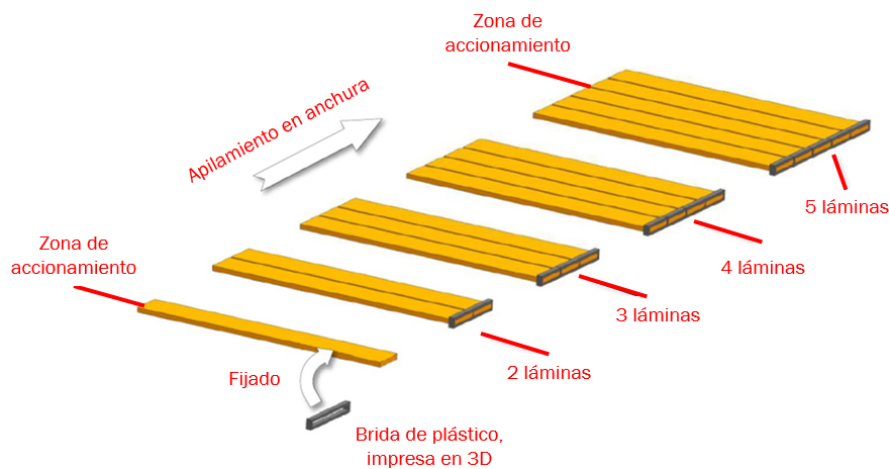


Figura 29. Esquema de apilamiento en anchura para láminas de IPMC. Cuentan con una zona de fijación a la zona de accionamiento y el otro extremo se mueve libre pero ligado al resto de láminas con la brida de plástico (Changsheng, 2021)

Con este método, se consigue eliminar los problemas de una lámina ancha equivalente, pero mantener sus ventajas. La fuerza de actuación aumentará como se puede ver en la Figura 30. Un sistema de accionamiento sujeta y aplica un diferencial de potencial eléctrico a las láminas de IPMC. Un sensor en el otro extremo recoge los valores de fuerza que a la deformación del material aplica sobre él.

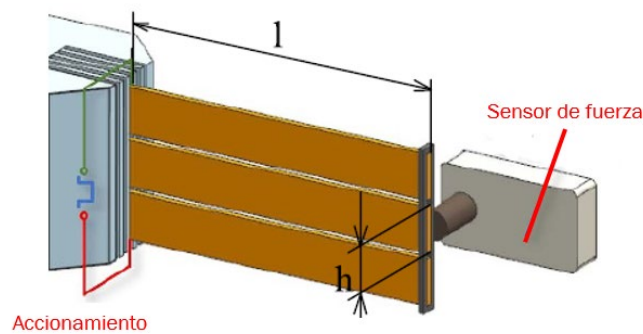


Figura 30. Disposición del experimento para comprobar la fuerza de accionamiento de la disposición en anchura (Changsheng, 2021)

En el experimento llevado a cabo, se aplicaron 3 V de corriente continua. Las dimensiones de las láminas eran de $l=50$ mm y la anchura de $h=6$ mm.

Los resultados experimentales muestran que para 5 láminas se obtiene una fuerza máxima de 110.4 mN, una eficiencia de deformación del 90% y un desplazamiento de la punta de 11.58 mm. Con un planteamiento teórico, la eficiencia de la aplicación es del 91 %, que no es del 100% debido a pérdidas de fricción entre las láminas, algo que resulta aceptable (Chengsheng, 2021).

Por lo tanto, este experimento demuestra que se puede trabajar con garantías con este material y que su densidad energética puede aumentar en la medida en que se puedan combinar varios actuadores.

4.4.2. Caracterización de diseño

Como se ha visto, se puede contrarrestar la principal desventaja de este material, que es la poca fuerza que otorga, variando sus propiedades tanto de composición, de dimensión y de disposición.

Con los datos que se han recogido hasta ahora, el sistema de actuación del microrrobot se puede plantear ya que, a falta del proceso de diseño final, se pueden dejar claros las condiciones de contorno específicas que deben tener los actuadores.

Se va a disponer de cuatro sistemas de actuación. Cada sistema, dispondrá de varias láminas de IPMC. En un lado, estarán fijadas al módulo y es por donde recibirán energía eléctrica en forma de diferencia de potencial. En el otro extremo, se fijarán los cinco extremos de las láminas para sincronizar su movimiento y hacer más eficiente su deformación a la hora de aportar fuerza en el movimiento del módulo.

Se emplearán láminas de IPMC para hacer de actuadores. Provocarán la transducción de energía eléctrica aportada al sistema a energía mecánica de deformación. De acuerdo con las propiedades estudiadas, deberán ser de la siguiente manera:

- Las láminas de IPMC serán de pequeña longitud, ya que no pueden ser de grandes dimensiones por que el voltaje se va perdiendo en las superficies al repartirse.
- Del mismo modo ocurre con su anchura, se mantendrá un largo superior al ancho porque si la superficie es grande, tendrá pérdidas de voltaje.
- El espesor influye en el tiempo de actuación, no debe ser un espesor demasiado grande para evitar que la actuación sea demasiado larga en el tiempo.
- El material del IPMC deberá ser el que más fuerza aporte y mejor se comporte. Como se ha visto, en (Ma, 2020) se logra un polímero con electrodos injertos de metal que tiene grandes características.
- La disposición será una combinación de láminas apiladas en anchura y unidas por su extremo.

Estas características forman las condiciones de contorno que se deben cumplir en el diseño final del sistema de actuación. Se pueden plantear en una disposición inicial, que incluya todas y pueda servir como punto de partida para el diseño final

En la Figura 31 se puede ver gráficamente una posibilidad de disposición. La clave para que la actuación se ejecute bien, es que los contactos eléctricos individuales a cada lámina apliquen una diferencia de potencial en las caras de la lámina. Deberán estar recubiertas por un material pasivo y que se sujete al módulo. Además, tiene que posibilitar la actuación eléctrica para poder llevar energía eléctrica a cada contacto. La actuación de las láminas de IPMC deberá estar sincronizada gracias a una brida pasiva, que sirva de unión de las puntas de las láminas.

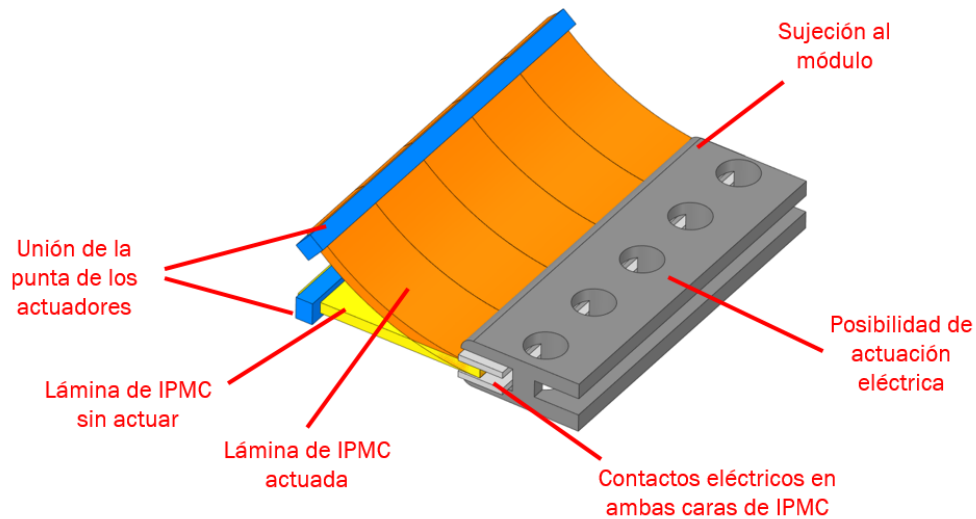


Figura 31. Esquema con la posible disposición del sistema de actuación formado por láminas de IPMC

El sistema de actuación dependerá de la disposición final del microrrobot. En función del peso propio del robot y las tareas que se desempeñen, requerirá de unas necesidades específicas de funcionamiento que harán variar las necesidades de actuación. Del mismo modo que la elección de un motor en una máquina, las necesidades finales de la misma definirán la potencia requerida.

Se considera necesario que el sistema de actuación pueda ser versátil y adaptativo a posibles cambios en las necesidades de futuros desarrollos. En el siguiente capítulo, se dará una forma final a este sistema de actuación en función del resto de elementos.

5. INTEGRACIÓN DEL DISEÑO

En los capítulos anteriores se ha expuesto como es un proceso de diseño y qué fases hay que seguir. Se han analizado los procesos de diseño de los trabajos anteriores a éste y se han señalado sus errores para poder solucionarlos en el presente diseño. También se ha llevado a cabo un análisis de los sistemas de actuación y se ha decidido implantar los polímeros iónicos compuestos metálicos IPMC.

En este capítulo se desarrolla el proceso de diseño final, donde se tendrán en cuenta todos los pasos seguidos hasta ahora y se integran en un diseño final funcional.

5.1. Planteamientos iniciales de diseño

Hasta ahora, las aproximaciones iniciales a un modelo tridimensional del microrrobot manipulador binario e hiperredundante, BHRM (de sus siglas en inglés, *Binary Hyper-redundant Manipulator*), se han planteado como una serie de módulos apilados unos encima de otros. El sistema de actuación hace que los módulos se muevan relativamente entre sí, controlados de forma binaria.

Este control implica, que un actuador puede estar activado o relajado, sin movimientos intermedios. Bajo este planteamiento y manteniendo en cuatro, el número de actuadores por módulo, se tiene hasta 16 configuraciones posibles. Para poder explicarlo, se enumeran los actuadores del 1 al 4. Al ser cuatro actuadores, se plantean de forma ortogonal, separados 90° uno de otro, sobre la base del módulo. El actuador 1 estará enfrente o separado 180° al 3 y el 2 al 4 como se puede ver en la Figura 32.

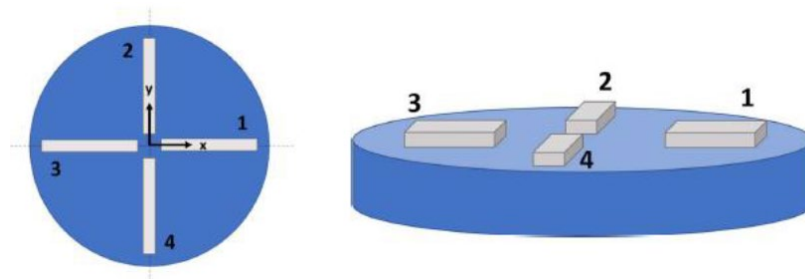


Figura 32. Disposición esquemática de los actuadores y su designación (Martínez, 2021)

Si se plantea el sistema como un sistema binario, donde el valor 1 indica que el actuador está activo y el 0 como desactivado, todas las posibles configuraciones se muestran como quedan en la Tabla 2.

Actuador 1	Actuador 2	Actuador 3	Actuador 4	Código binario	Nº Configuraciones
0	0	0	0	0000	0
0	0	0	1	0001	1
0	0	1	0	0010	2
0	0	1	1	0011	3
0	1	0	0	0100	4
0	1	0	1	0101	5
0	1	1	0	0110	6
0	1	1	1	0111	7
1	0	0	0	1000	8

1	0	0	1	1001	9
1	0	1	0	1010	10
1	0	1	1	1011	11
1	1	0	0	1100	12
1	1	0	1	1101	13
1	1	1	0	1110	14
1	1	1	1	1111	15

Tabla 2. Configuraciones totales de los cuatro actuadores de un módulo.

Sin embargo, como se explica en (Martínez, 2021) por motivos de estabilidad, hay un cierto número de configuraciones que no son posibles. Las uniones entre los actuadores y la base inmediatamente superior se plantean como elementos deslizantes sobre el plano superior pero en una sola dirección. Esta unión provoca problemas cinemáticos, ya que no todos los actuadores podrían deslizarse correctamente o que se interferirían unos con otros.

Si se atiende a la disposición de los módulos actuados:

- La activación de un único actuador es inestable, no se aplicará el movimiento de deslizamiento relativo entre los mismos correctamente. Por lo tanto, las configuraciones 1, 2, 4, y 8 no valen.
- Del mismo modo, tres actuadores activos tampoco son estables, harán que los movimientos relativos entre ellos y el actuador desactivado no se deslice correctamente. La configuración 7, 11, 13 y 14 no son posibles.
- Los actuadores enfrentados entre sí tampoco son configurables por las mismas razones. Sus contrarios tampoco pueden moverse correctamente. Las configuraciones 5 y 10 tampoco se pueden establecer.

De este modo, las configuraciones realizables son la 0, 3, 6, 9, 12 y la 15.

En este punto, se puede pensar en plantear la unión entre los actuadores y los módulos con otro tipo de unión, quizás una con un grado más de libertad que pudiera permitir todas, o al menos más configuraciones a través del diseño de otro tipo de actuación. Sin embargo, se ha mantenido este planteamiento y se ha optado por considerarlo una condición de diseño. Si se mantiene esta condición, no quedan invalidados los avances en los trabajos previos, ya que todos los demás planteamientos, algoritmos, cálculos cinemáticos, dinámicos y los avances logrados se basan en este tipo de unión y movimiento inter-modular.

Además, las configuraciones restantes permiten el movimiento de cada módulo respecto de los demás. Por lo que, llevado al conjunto de módulos, el robot, con las configuraciones disponibles, es capaz de realizar todos los movimientos necesarios.

Las configuraciones definitivas vienen dadas como aparecen en la Tabla 3:

Actuador 1	Actuador 2	Actuador 3	Actuador 4	Código binario	Nº Configuraciones
0	0	0	0	0000	0
0	0	1	1	0011	3
0	1	1	0	0110	6
1	0	0	1	1001	9
1	1	0	0	1100	12
1	1	1	1	1111	15

Tabla 3. Conjunto de las únicas configuraciones posibles de los actuadores

De este modo, si se trasladan estas configuraciones a los actuadores, el movimiento quedaría definido de la siguiente manera:

- Configuración 0 ([0000]): Todos los actuadores desactivados, no hay movimiento relativo entre módulos.
- Configuración 3, 6, 9 y 12 ([0011], [0110], [1001] y [1100]): Configuraciones intermedias, con los actuadores adyacentes activados dos a dos. Permiten girar el módulo en las cuatro direcciones. Con una buena combinación de giro inter-modular, se pueden obtener distintos tipos de giro del microrrobot en su longitud total.
- Configuración 15 ([1111]): Todos los actuadores activados. De esta forma, se puede elevar linealmente el módulo superior respecto del inferior. Se puede obtener un alargamiento final del microrrobot completo.

Se ha decidido mantener las configuraciones y el sistema de actuación como se viene haciendo en el proceso global de los trabajos previos. Esto implica mantener ciertas condiciones en el diseño como condiciones de contorno.

5.2. Proceso iterativo de diseño

En un proceso de diseño se suele partir de unas ideas generales y una vez que se van definiendo, se va concretando el problema y obteniéndose una solución. En el diseño actual se ha tenido que seguir un proceso similar, pero partiendo de unas condiciones de contorno más definidas y concretas, definidas en la línea global de diseño de los trabajos previos.

Para no invalidar el trabajo que se ha conseguido durante estos años, se ha tratado de respetar, siempre en la medida de lo posible, las hipótesis que se han planteado previamente a la realización de este trabajo y que han determinado los avances de este proyecto.

5.2.1. Condiciones de contorno previas

El microrrobot debe desempeñar tareas concretas dentro del cuerpo humano. Su objetivo tiene que viene dado por un profesional cirujano que define un punto de destino. A través de su algoritmo, el robot debe ser capaz de alcanzar el objetivo de forma autónoma y para ello tiene que ser capaz de orientar y mover todos sus módulos y además de forma binaria. El sistema de actuación debe de conseguir este funcionamiento.

Se mantiene el sistema de módulos apilados. Los cálculos cinemáticos y dinámicos previos plantean, además, un gran número de ellos. Este punto depende mucho del tamaño del módulo y del giro de estos, ya que en función de su tamaño y movilidad dependerá el número final de ellos. No es una condición necesaria por lo que se puede desarrollar más adelante la idea de aumentar o disminuir el número total de módulos.

El estudio cinemático llevado a cabo en (Cabezas, 2019) establece que los movimientos llevados a cabo por el módulo son más complejos que un simple giro alrededor de un eje exterior. En la Figura 33, se muestra la hipótesis de que el módulo superior gira en torno a un eje exterior w .

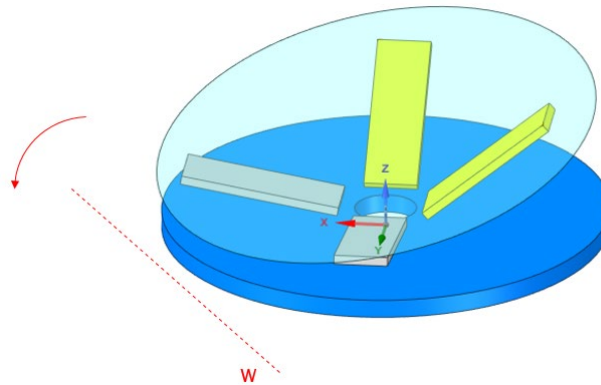


Figura 33. Hipótesis de giro no válida, empleada en varios trabajos previos

Esta hipótesis de funcionamiento se demuestra en su trabajo, que es incompleta y está mal planteada. El verdadero movimiento del módulo está compuesto de tres movimientos simultáneos del módulo superior respecto del inferior y que representan los grados de libertad de cada módulo:

- Traslación en la dirección del eje z (d): El módulo superior tiene como grado de libertad el desplazamiento d en el sentido del eje que es perpendicular a su base, Figura 34. Su sentido siempre será positivo en este caso de diseño.

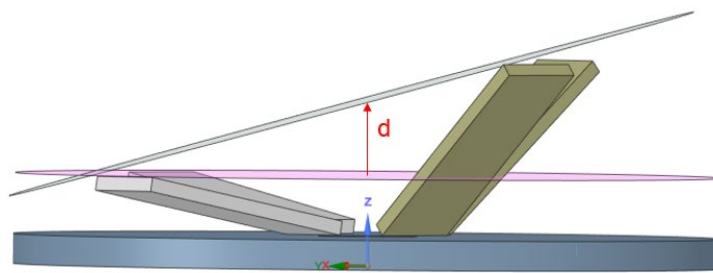


Figura 34. Traslación en el eje z. Grado de libertad d.

- Rotación del eje x (θ_1): Es el ángulo que tiene permitido girar el eje x del módulo superior respecto del eje x del inferior. Es decir, el giro alrededor del eje y, obtenido de la transformación anterior, Figura 35.

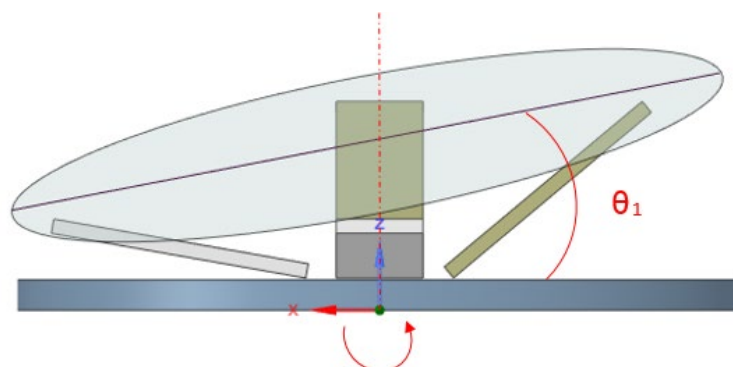


Figura 35. Giro respecto del eje x. θ_1 es el grado de libertad que forma el ángulo entre los ejes x de ambos módulos.

- Rotación del eje y (θ_2): De la misma forma, es el giro que puede realizar el módulo superior alrededor del nuevo eje x' transformado, el ángulo que forma los ejes y de la transformación total. En la Figura 36, se puede apreciar la última transformación de los módulos, verde para la configuración final

totalmente transformada y en rosa la intermedia. El giro alrededor de x' constituye el tercer grado de libertad.

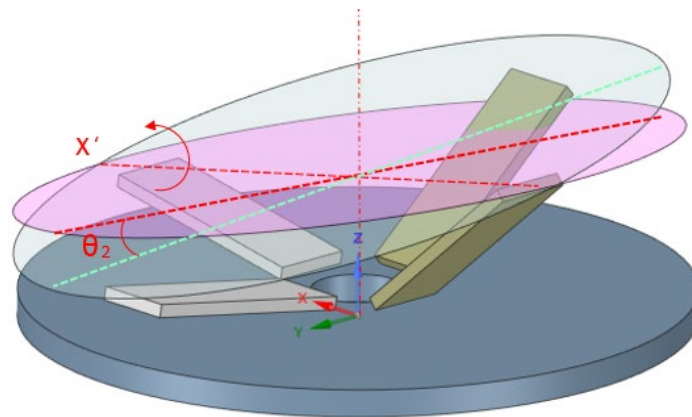


Figura 36. Giro respecto del eje x' . θ_2 es el ángulo formado los ejes y transformados de ambos módulos y constituye el tercer grado de libertad.

Una vez visto el caso particular de dos módulos inmediatos, la transformación completa del microrrobot BHRM será la suma de todos los módulos que lo componen.

Este estudio del movimiento, ya aplicado en (Cabezas, 2019) constituye otra condición de contorno que el diseño debe cumplir.

Por cuestiones físicas y debido al movimiento compuesto de los módulos, es necesario contar con una altura inicial de partida entre los módulos. Si los módulos no tienen espacio para girar, el movimiento no puede producirse, situación que viene reflejada en la Figura 37. Se puede ver como si no hubiera una distancia inicial el movimiento se hace imposible en la imagen izquierda y sin embargo, mantener una altura suficiente permite el movimiento del módulo superior.

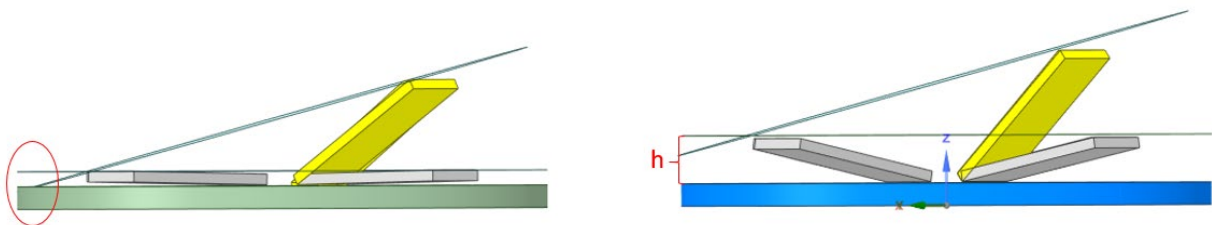


Figura 37. Imagen izquierda, movimiento de giro del módulo impedido. Derecha, altura inicial suficiente para el movimiento del módulo superior.

Es condición necesaria y obligada mantener una altura de diseño en el sistema de actuación. Puede ser motivo de rechazar las propuestas preliminares de diseño al impedir el movimiento de los módulos.

Como condiciones de contorno de funcionamiento general, es necesario que el microrrobot sea capaz de llevar las herramientas de cirugía que se consideren oportunas. Esto implica que dentro de la estructura, debe contar con espacios que permitan la incorporación de herramientas y de sistemas auxiliares. El área que ocupe el sistema de actuación se convierte en algo crítico ya que todo el espacio que quede libre para los sistemas auxiliares hará que la funcionalidad del microrrobot aumente. Un sistema que sea muy bueno pero que ocupe gran cantidad de espacio y que no permita apenas incluir funcionalidades al robot no valdría de nada.

Se debe prestar atención también al peso de cada módulo pues el sistema debe ser lo más ligero posible. Es una condición de diseño que el peso no sea excesivo para este tipo de instrumental médico.

Los materiales deben ser biocompatibles. No deben ser agresivos ya que el interior del cuerpo humano es un entorno delicado y a menudo hostil para los materiales.

Es necesario que se recubra todo el microrrobot de una capa que haga frontera con el interior del cuerpo y del exterior. Separar los dos medios es fundamental para el correcto funcionamiento del microrrobot y la seguridad de la operación.

5.2.2. Diseño preliminar: primeras aproximaciones a la solución

A continuación, se va a exponer el proceso seguido en las primeras versiones del diseño del microrrobot. Como se ha visto, se van a mantener las condiciones necesarias del diseño en las que se basan los avances de los trabajos previos.

Para simplificar los dibujos, se ha simplificado el sistema de actuación para poder entender mejor el funcionamiento.

El primer diseño preliminar es el de un módulo esférico. Se trata innovar en su forma para que su movimiento sea mucho más sencillo. Se puede apreciar en la Figura 38. El sistema de actuación es que se ha planteado como solución, cuatro actuadores de material iónico polimérico metálico compuesto, IPMC. A través de la estimulación eléctrica de cada lámina individual de este componente, se deforma consiguiendo el movimiento. Como novedad, se incluye la carcasa esférica que hace de contenedor del sistema y de base del módulo. Se incluye una cavidad en el centro que inter-comunica con el resto de los módulos y también el sistema eléctrico de actuación.

En la parte superior, cuenta con una ranura que sirve de apoyo a las láminas de IPMC. Se puede ver en la Figura 38 a), cómo está dispuesto un módulo individual. En el caso de que el microrrobot necesite alargar su longitud, activaría la configuración “15” [1111] y pasaría del estado de reposo, Figura 38 b) al estado de activación de sus cuatro actuadores, Figura 38 c).

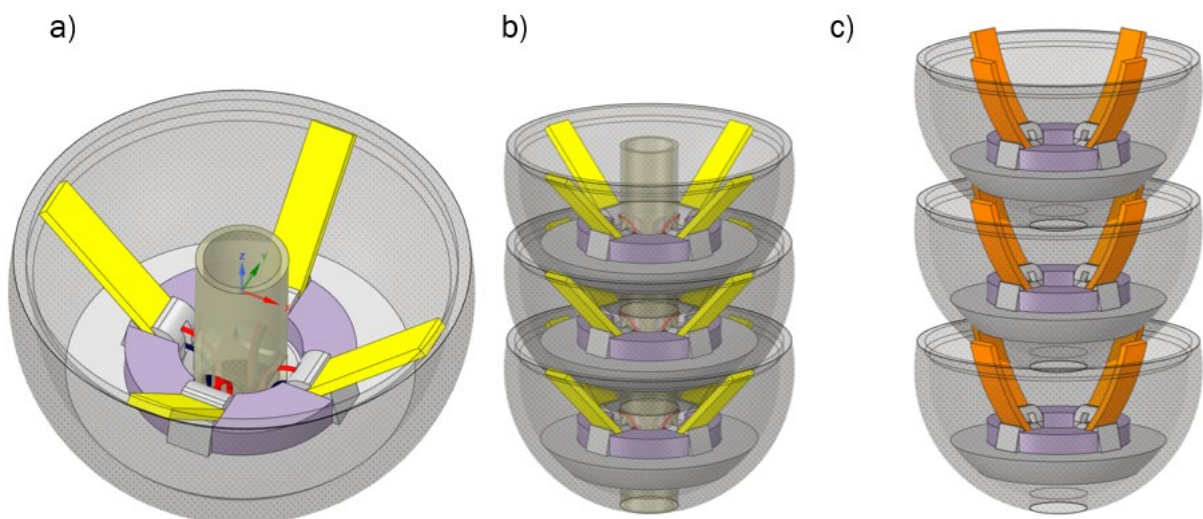


Figura 38. Diseño preliminar a) Un único módulo b) Tres módulos apilados en reposo c) Tres módulos apilados totalmente activados, provocando un alargamiento del microrrobot

Unas mordazas sujetan el material y aplican la diferencia de potencial entre sus dos caras. Con esta sujeción, se consigue un ángulo de 45° en reposo. El objetivo es que en esta posición pueda sostener mejor la parte del plano esférico del módulo superior. En la Figura 39 siguiente, se puede ver en detalle el esquema de activación del sistema de actuación. En la Figura 39 a) se puede ver cómo se comporta un actuador activado. Al

aplicar una diferencia de potencial a cada cara del IPMC, (Figura 39 b)), se obtiene una deformación del material.

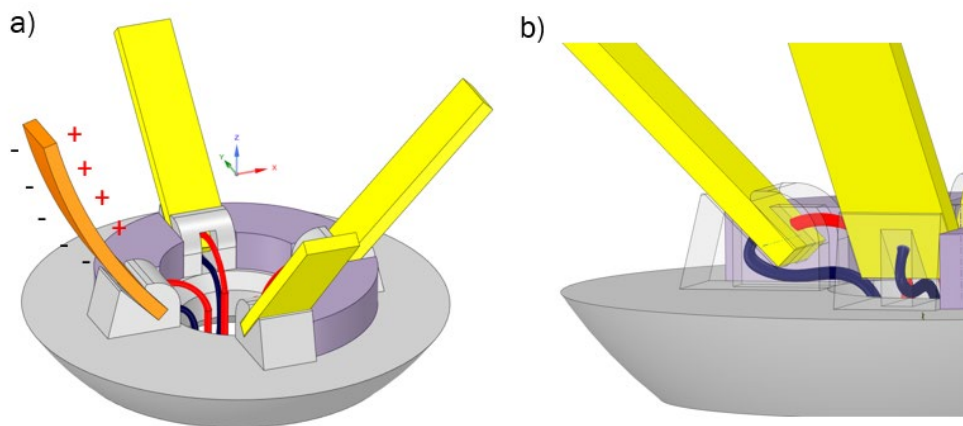


Figura 39. a) Sistema de actuación activado un solo IPMC. b) La diferencia de potencial tiene que ser aplicada a cada una de las caras del material

Los principales problemas que presenta este diseño, es un aumento de masa con respecto de un módulo plano. Una esfera es volumétricamente más grande que un prisma plano equivalente. Este aumento de masa podría tener validez si aportase muchas ventajas claras, pero no es así. Es cierto que desliza mejor, pero necesita un tope mecánico para evitar el deslizamiento descontrolado entre módulos. Como se ve en la Figura 40, nada impide que el módulo, ya actuado, pueda deslizarse o volver a girar en una dirección no deseada por gravedad o por la acción de fuerzas externas.

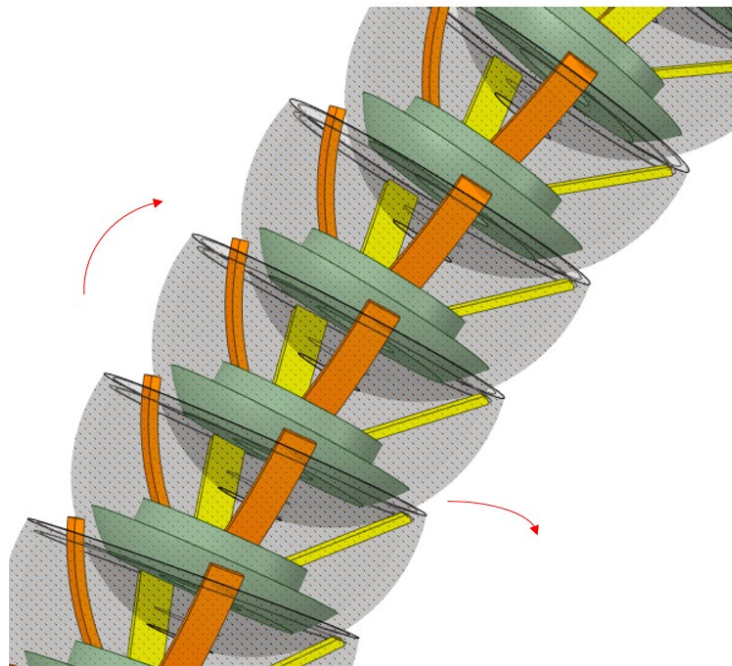


Figura 40. Movimientos indeseados de los módulos una vez actuados en un proceso de giro normal

Se puede plantear sistemas que impidan estos movimientos. Se pueden tratar de diseñar guías en la cara externa de la esfera o sistemas elásticos que traten de aportar rigidez extra, pero al ser rechazado por el aumento de peso y el movimiento inestable que presenta, no se sigue empleando más recursos en el desarrollo de soluciones. Es, por tanto, un modelo rechazado, en el que no se volverá a no ser que resulten infructuosos futuros diseños y se tenga que revisar más opciones.

A pesar del rechazo, se pueden sacar ideas de este diseño. El hecho de aplicar una guía elástica hueca por el medio de la estructura y que haga las funciones de “espina dorsal” del microrrobot puede llegar a resultar útil.

También es crucial la condición de contorno del módulo ligero, que ha sido el principal elemento de rechazo. Es necesario realizar los módulos con el menor material posible para que su peso disminuya sin hacerlo demasiado débil ante las fuerzas externas.

Dentro del volumen interior del módulo, el sistema de actuación ocupa cierto espacio, pero apenas quedan superficies planas para poder situar los elementos de control. Insertar una placa electrónica o el paso de cables y subsistemas, puede verse comprometido por la falta de espacio.

Otro de los puntos clave para el movimiento del microrrobot es que sea preciso. Se tiene que poder mover con la mayor exactitud por lo que es necesario una unión que limite deslizamientos inadecuados fuera de la línea de acción de los actuadores. En sistemas planteados en trabajos previos, se ha dejado esta condición libre, como si el actuador pudiera deslizarse en cualquier dirección del plano del módulo superior. Se va a optar por eliminar esta opción y dejar una corredera que limite todos los deslizamientos que no sean en la línea de acción de los actuadores.

5.2.3. Proceso de optimización del diseño

En primer lugar, se abandona la idea de módulo esférico, la solución que aporta al problema no es clara y no tiene ventajas notables.

Se retoma el modelo plano del módulo. Esta opción es más ligera que la esfera, pero se puede aligerar más la placa, algo que resultaba más complejo en el módulo esférico preliminar. Para ello, se pueden redondear las esquinas y además, se puede eliminar mucho material sobrante, como se ve en el proceso de optimización de la Figura 41. En la Figura 41 a), se puede ver un volumen cuadrado y plano, más ligero que la esfera pero aún con necesidad de cambios, ya que las aristas vivas son muy poco recomendables en las tareas que va a desarrollar el microrrobot. En la Figura 41 b), se obtiene un módulo más aligerado redondeado en las esquinas. Se mantiene el agujero central pero se lleva la idea más lejos en la Figura 41 c), aplicando la idea de taladro central. Si un orificio central es necesario para pasar los cables y el sistema de control y potencia, también se puede combinar con el aligeramiento del módulo.

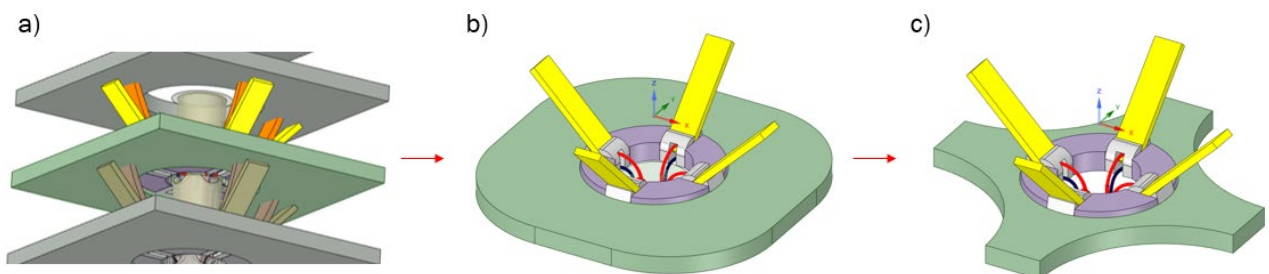


Figura 41. Proceso de optimización del módulo plano. a) Paralelepípedo planar b) Redondeo paso intermedio c) Eliminación total de las esquinas

De esta manera, se obtienen varias ventajas con respecto todos los planteamientos anteriores. En la Figura 41 c), se tiene un módulo muy ligero, mantiene la robustez del diseño a través de su forma continua y sólida. Además, de cara al a funcionalidad, se ve

incrementada ya que ahora es posible implementar cuatro posibles subsistemas nuevos en las esquinas a través de los orificios practicados.

Para poder resolver la unión entre módulos de forma precisa, se piensa en un principio poder asegurar un enganche físico por medio del deslizamiento. Una solución intermedia al deslizamiento libre del planteamiento inicial esférico, y que a la vez cuente con la ventaja de la facilidad del deslizamiento.

El resultado se muestra en la Figura 42, en la que se tiene una sección de varios módulos apilados representados en varias situaciones: un giro, una elevación completa y un estado de reposo. En el giro, se ve como el actuador activo puede deslizarse y empujar al módulo mientras que el inactivo se queda asegurando la unión para evitar deslizamientos.

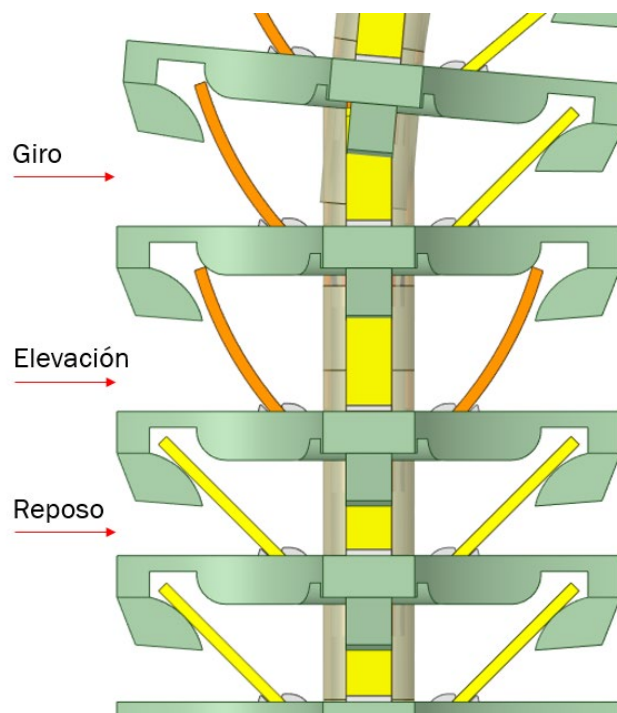


Figura 42. Posible sistema de sujeción de módulos

El problema de esta unión es que sigue sin resolver del todo el movimiento relativo entre módulos. Cualquier sistema de deslizamiento con ciertos grados de libertad no impedidos, puede inducir a giros y movimientos indeseados. En este en concreto, el comportamiento del módulo una vez que están activados los actuadores, puede seguir siendo movido por fuerzas externas o por la gravedad. A pesar de que cuenta con un intento de sujeción no representa una unión perfectamente controlable. El actuador, por sí solo, no es capaz de deslizarse y mantener una fijación con el módulo superior.

Es necesario plantear una sujeción fiable, pero para ello, el actuador necesita una sujeción distinta con el módulo. Se puede pensar en modificar físicamente el material IPMC, pero puede verse afectado su funcionamiento.

La solución es encontrar un elemento intermedio entre el actuador de IPMC y el módulo superior. De esta forma, el actuador se limita a aplicar la fuerza sobre el elemento intermedio y éste actuará de intermediario con el módulo, transmitiéndole el movimiento. El diseño de este elemento contendrá los elementos necesarios que garanticen la unión correcta, como sucede, por ejemplo, en las máquinas macroscópicas convencionales como es el caso de un mecanismo de biela-pistón.

Estudiando los avances en el campo de la manipulación y el control de IPMC, destaca el estudio realizado en (Kruusmaa, 2008), que recoge otras investigaciones que se centran en las características de trabajo del material IPMC. En él, se comparan el control y la eficiencia de una lámina de IPMC y una lámina más corta, pero con un enlace pasivo. Este enlace pasivo es como una elongación rígida de plástico y se une a la lámina del material inteligente. No realiza otra función que la de ser arrastrado por el movimiento y no afecta al comportamiento del material, ver Figura 43.

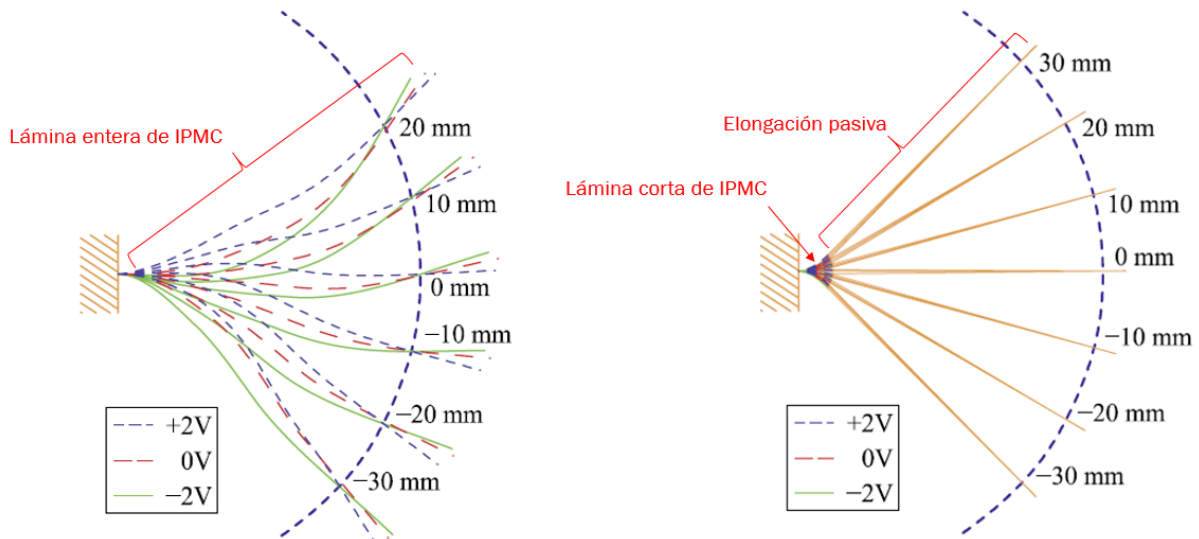


Figura 43. Estados comparativos de equilibrio estático de una lámina larga de IPMC (izquierda) y una lámina corta pero con una elongación pasiva y rígida (derecha) (Kruusmaa, 2008)

Tras la comparación, planteamiento y contraste de hipótesis, las conclusiones del estudio teórico son:

- El material IPMC actúa como una línea de transmisión del circuito resistivo-capacitivo con pérdidas. Cuanto más largo sea el material, más larga la línea de transmisión con las consecuentes pérdidas y distorsiones de la señal y más complejo el modelo y, por lo tanto, más difícil de controlar (Punning, 2007).
- Un actuador IPMC en voladizo, con uno de sus extremos fijos y otro libre, puede ser reemplazado con una elongación pasiva sin pérdida de fuerza de actuación (Anton, 2008).
- La fuerza del actuador no depende de la longitud de la lámina de IPMC, si no del ancho. Cuanta más fuerza se requiera, la lámina debe ser más ancha, no más larga (Kruusmaa, 2008).
- Si una lámina larga de IPMC es reemplazada por una más corta y una elongación pasiva equivalente, a igual eficiencia, el modelo mecánico del actuador se simplifica. La relación fuerza-posición se hace lineal y la forma del actuador resulta más predecible (Kruusmaa, 2008).
- La relación entre el voltaje y el ángulo de deformación tiene una relación lineal hasta cierta longitud de la lámina de IPMC, (Kruusmaa, 2008).

Tras estas conclusiones, plantean un modelo y preparan un prototipo para validar el modelo experimentalmente. Se puede ver el prototipo real en la Figura 44. Está formado por una serie de dos elongaciones de plástico actuadas por láminas de IPMC. Una lámina actúa como una bisagra entre las dos elongaciones y la otra como actuador principal fijado

al extremo fijo. Se pueden observar los cables de cobre empleados en actuar el polímero electroactivo de IPMC.

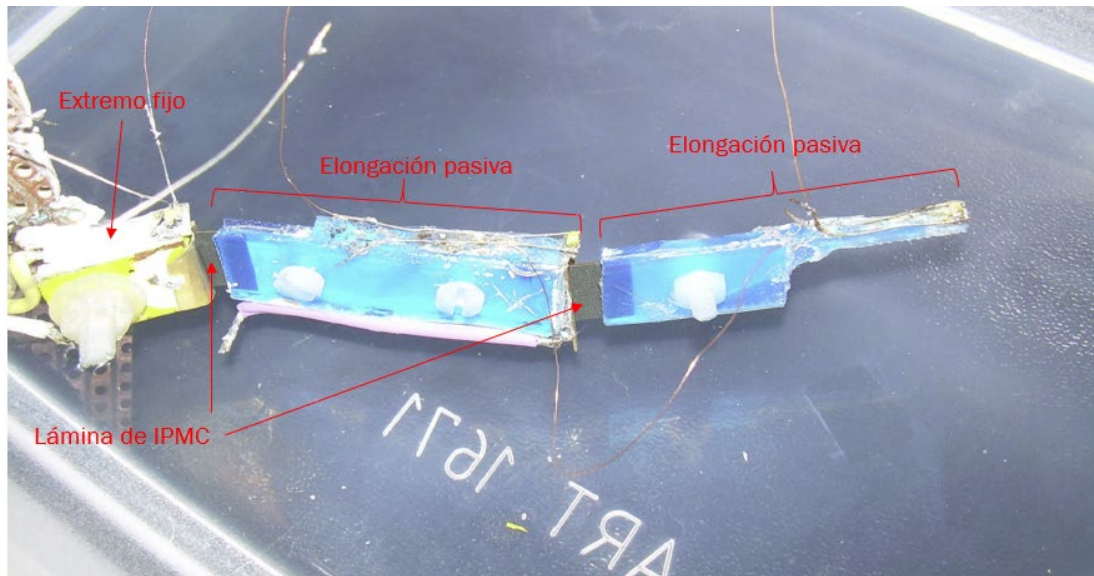


Figura 44. Prototipo del manipulador en voladizo, con una combinación de láminas de IPMC intercaladas con elongaciones pasivas de plástico (Kruusmaa, 2008)

A través de la validación de la teoría a través del prototipo, en (Kruusmaa, 2008), se obtiene un modelo que explica la linealidad de la solución y las ventajas que implica para el control posterior de un sistema similar.

Bajo estas premisas, se procede a plantear un sistema con estas características para la implementación final del sistema de actuación. Se decide emplear un sistema que sirva como una elongación del actuador pero que contenga los elementos necesarios para la sujeción efectiva de los módulos.

Si se analiza los tres grados de libertad que se han planteado en el modo cinemático, debe haber dos giros sobre los ejes y un movimiento de translación de forma perpendicular.

5.2.4. Sistema de unión inter-modular

El objetivo propuesto es encontrar los elementos mecánicos que permitan caracterizar el sistema de actuación de acuerdo con los grados de libertad que se hayan permitido. Para poder aproximarse al problema es mejor particularizar a un solo elemento y una vez resuelto, extenderlo al resto.

En una primera aproximación, se simplifica el sistema de actuación y se plantea una elongación rígida de plástico. Ésta, se considera unida al IPMC por un extremo, de forma pasiva sin modificar el funcionamiento de este. En el otro extremo de la elongación pasiva, es dónde se transmitirá la fuerza al módulo.

En la Figura 45, se tiene una vista de perfil del actuador aislado con la elongación. Se tienen representadas las bases en verde, los actuadores de IPMC en amarillo y las elongaciones en azul.

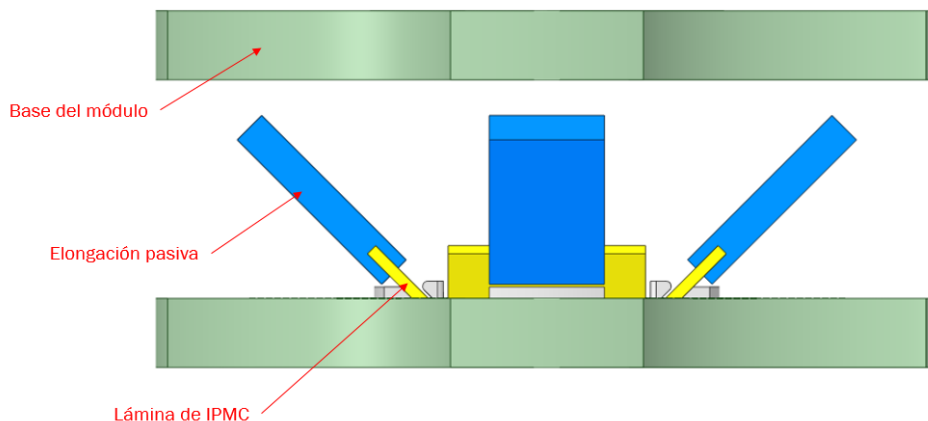


Figura 45. Vista de perfil del modelo simplificado con los elementos principales

El actuador debe transmitir la deformación que le produce la diferencia de potencial en ambas caras de la lámina de IPMC al módulo superior. Para ello, su extremo debe estar fijo en una sujeción tipo garra, que lo sujete pero que permita el giro. Se puede plantear topológicamente esta unión al módulo inferior como un apoyo fijo con rótula, Figura 46, ya que permitirá el giro de la lámina de IPMC.

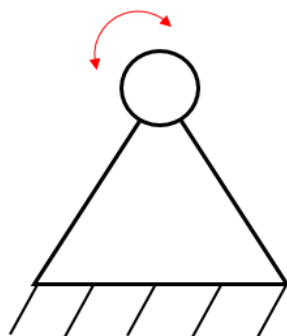


Figura 46. Apoyo fijo con rótula

Este apoyo tiene que cumplir, además, con las condiciones de contorno establecidas por la naturaleza del sistema de actuación. El prototipo planteado de forma previa en el capítulo anterior, se puede ver en la Figura 31. En él se han plasmado todas las necesidades de diseño del actuador de IPMC.

Para empezar, se inclinará la garganta para facilitar el movimiento del actuador. Una fijación inclinada, permitirá elevar la distancia entre módulos y no impedirá el movimiento de orientación entre ellos, como se vio en la Figura 37. Tampoco añadirá un número excesivo de módulos.

Esta fijación tiene que sujetar los contactos eléctricos para el sistema de actuación, cerrando el IPMC el circuito de corriente eléctrica. Para ello tiene que permitir el paso de la actuación en ambas caras de la lámina de IPMC.

El diseño previo del apoyo o garra se muestra en la Figura 47. Es un bloque perforado para permitir la actuación eléctrica y sujeta los contactos eléctricos del sistema de actuación.

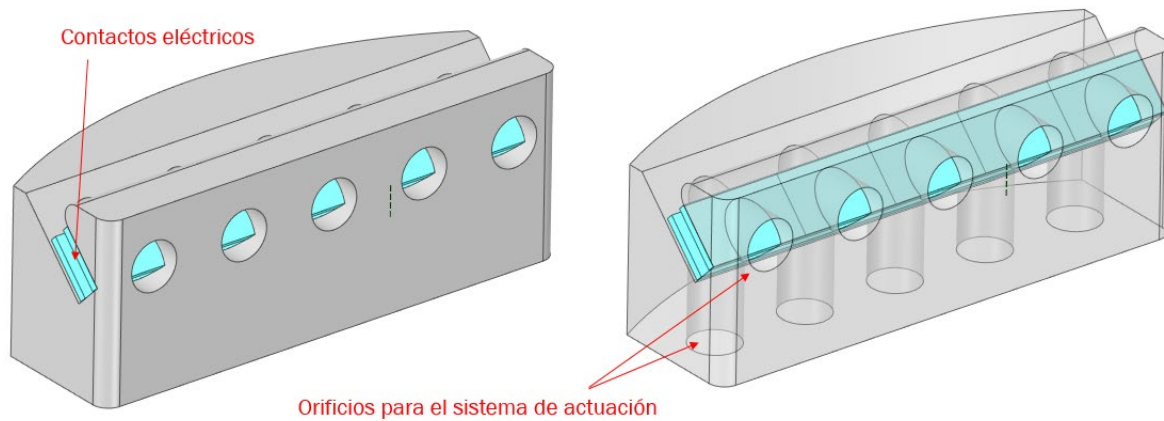


Figura 47. Dos vistas de la garra de sujeción con los orificios para el sistema de potencia y los contactos eléctricos del sistema de actuación

La forma de la garra dependerá del actuador final empleado. Hay varios tipos de grosores de las láminas de IPMC, aunque para este diseño se ha empleado de 0.9mm. También el esquema eléctrico que requiera su control determinará la mejor forma de situar los cables a ambas caras de la lámina de IPMC. Se ha tratado de diseñar la garra con la mayor versatilidad para estas operaciones concretas que se tendrán que llevar a cabo con la elección final del IPMC disponible. Lo más recomendable desde el punto de vista de anclaje mecánico de la garra a la base del módulo, es que se fabriquen en una sola pieza para evitar desalineamientos indeseados.

Para el caso concreto de elevación, debe poder mover en vertical sin variar el giro. Esta condición es la más restrictiva pues debe de permitir tanto la elevación en vertical como provocar el giro del módulo cambiando su orientación. Desde el punto de vista topológico, se puede aplicar el modelo de una guía-corredera o guía-botón articulada, como se muestra en la Figura 48.

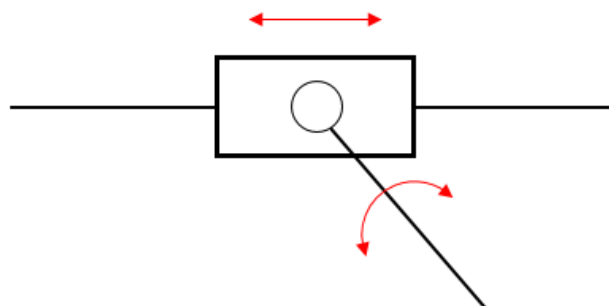


Figura 48. Guía-corredera con los diferentes movimientos que permite

Para poder replicar una guía corredera, en las aplicaciones convencionales se puede resolver mediante varios sistemas como carril con carrito de ruedas, guías con carrito deslizando, incluso sistemas neumáticos. La escala del diseño del microrrobot no permite grandes aplicaciones con muchos componentes. Para la situación actual, se diseña una guía tallada inserta en el módulo, que pueda alojar un extremo de la elongación del actuador. Se puede apreciar en la Figura 49.

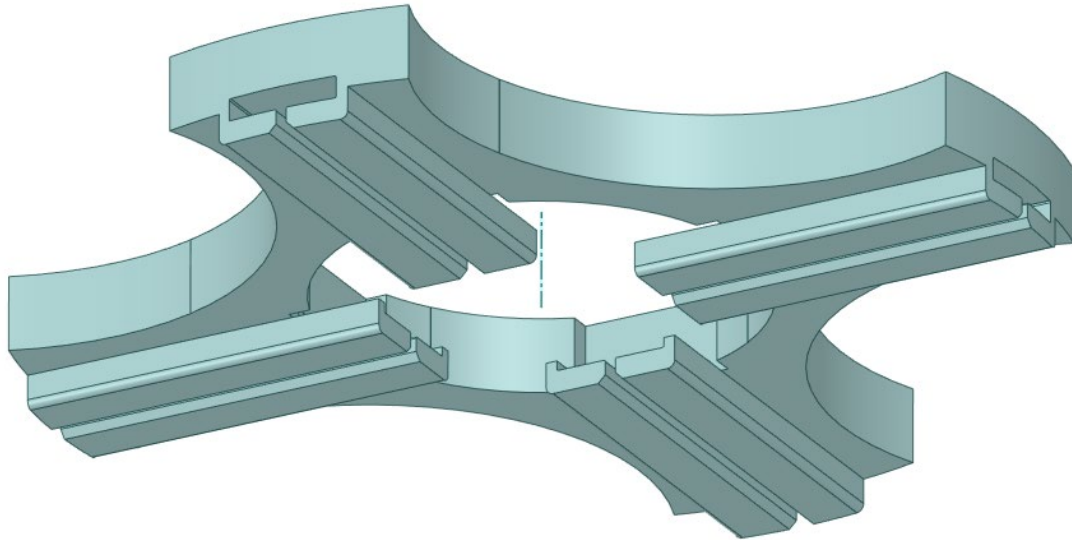


Figura 49. Detalle de la guía mecanizada implementada en la base del módulo

Se puede plantear de muchas formas, una alternativa posible es mecanizar la guía de forma independiente y unirla a la base del módulo a través de elementos externos como roscas, remaches u otros elementos de sujeción. Sin embargo, estas alternativas son descartadas por las dimensiones de diseño. En una aplicación macroscópica, serían posibles, pero gracias a los procesos de fabricación aditiva y la micro-mecanización se puede obtener estas piezas con la tecnología actual.

La unión de la elongación del actuador trabajará como un elemento de enlace entre el elemento fijado a la base y la guía de la corredera. En cada extremo deberá haber, desde el punto de vista topológico, dos enlaces que permitan el giro, es decir, dos rótulas. El propio material IPMC actúa como un enlace con rótula, aporta el movimiento y se podría tratar como un apoyo fijo que aporta movimiento, como un motor rotativo. Sólo se trata de asegurar la unión entre el enlace y la lámina de IPMC.

Para el enlace de guía-corredera, se puede diseñar un elemento intermedio que haga de carrito y esté unido por un eje al elemento pasivo, un enlace con rótula. En una primera aproximación se puede plantear de la siguiente manera, Figura 50. Se puede apreciar rótula-corredera inserto en la guía y puede permitir el giro respecto del brazo por el eje que los une.

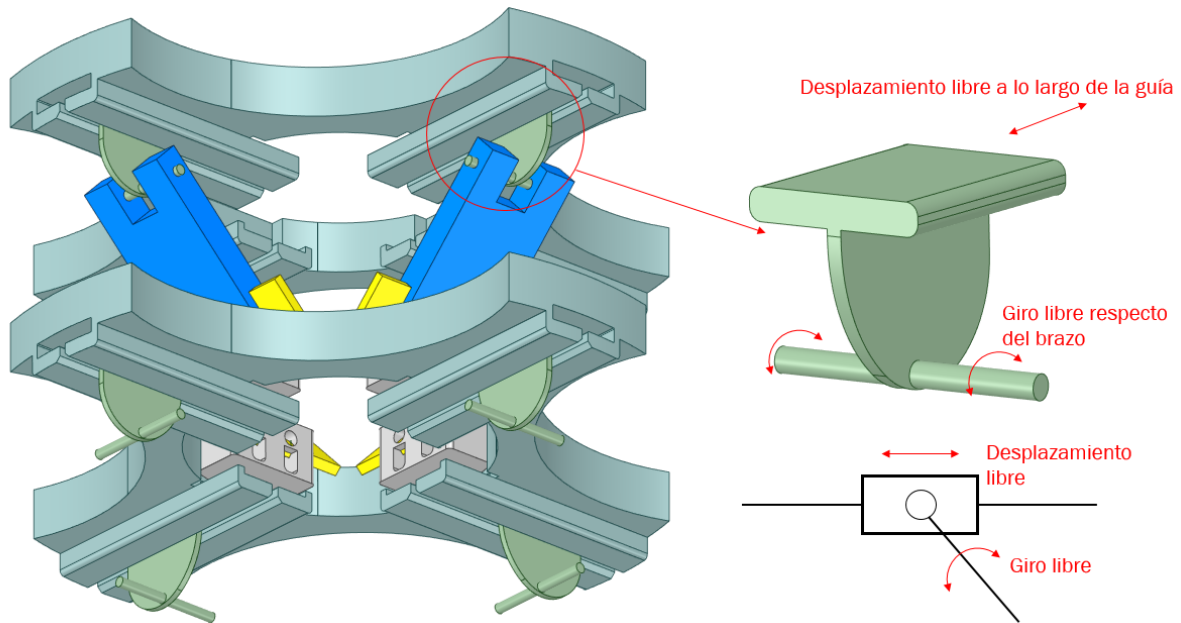


Figura 50. (Izquierda) Diseño de la guía corredera, con el elemento intermedio tipo rótula-corredera. (Derecha) Detalle del elemento comparado con su referencia topológica (abajo derecha)

Para validar la solución, este enlace debe permitir los tres grados de libertad planteados para el movimiento de los módulos. En el desplazamiento vertical, con los cuatro actuadores activados, el movimiento ocurre sin problemas.

Sin embargo, cuando el módulo gira hacia un lado, con dos actuadores adyacentes activados y los otros en reposo, se detecta un problema. Cuando se han descrito los grados de libertad, (Figura 34, Figura 35 y Figura 36), tenemos un desplazamiento vertical (d) y dos giros (θ_1 y θ_2). Si se implementa este sistema, el giro del eje x' transformado, (θ_2) no se puede realizar, puesto que la rótula que se ha diseñado, al estar unida con un eje, no permite, el giro está impedido, Figura 51.

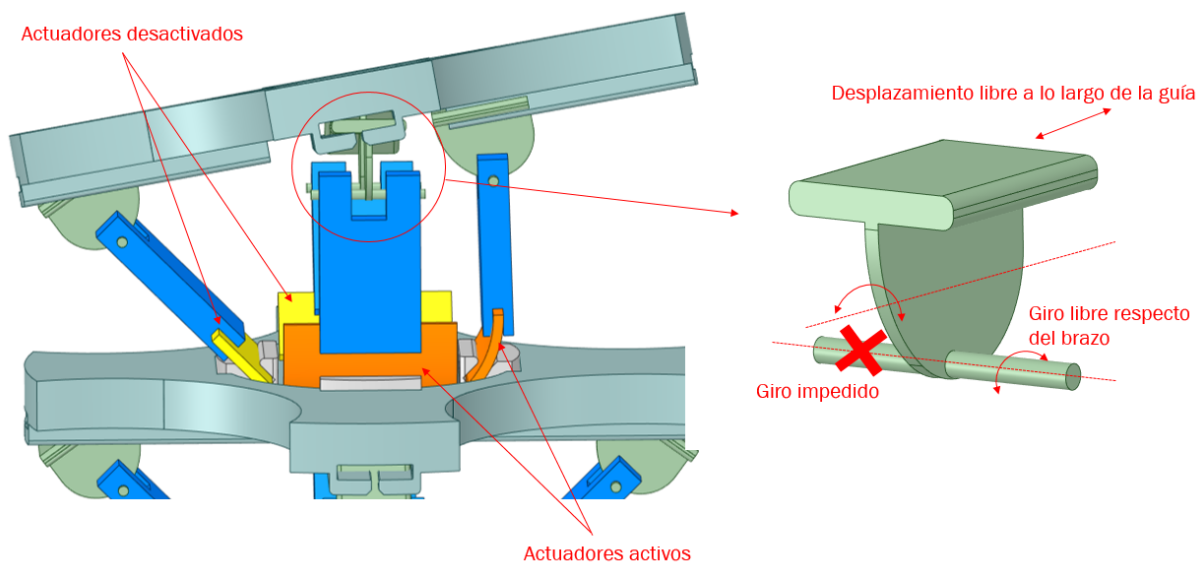


Figura 51. (Izquierda) Giro simulado de un módulo en una dirección determinada. (Izquierda) Detalle del giro impedido por la configuración de la rótula

Por lo tanto, un enlace con una rótula simple queda invalidado y hay que mejorar el diseño del enlace. En dos dimensiones, desde el punto de vista topológico puede ser correcto pero para la configuración tridimensional, hay que implementar otro tipo de enlace que permita el giro completo.

Para resolverlo, se ha variado el extremo del enlace pasivo, se ha añadido un enlace esférico. Denominado par esférico o rótula esférica Figura 52, las superficies de contacto son esféricas y permiten una rotación de un elemento respecto de otro manteniendo un punto en común, el centro de las superficies en contacto. Permite tres grados de libertad relativos entre los miembros (Cardona, 2001).



Figura 52. Par esférico o rótula esférica

Se vuelve a plantear el extremo de la elongación del actuador, y ahora, como un extremo esférico. La rótula se acopla al elemento intermedio que corre por la guía de forma similar a como estaba en el enlace previo.

Las superficies esféricas de ambos están en contacto, permitiendo el movimiento que antes estaba impedido. Esta nueva rótula-corredera esférica, Figura 53, girará en torno al punto que comparten ambas superficies esféricas. En la Figura 53 se puede ver la elongación pasiva que llevará en su extremo una esfera donde se alojará la rótula-corredera con su superficie esférica. En el otro extremo de la rótula llevará la parte que encaja con la guía.

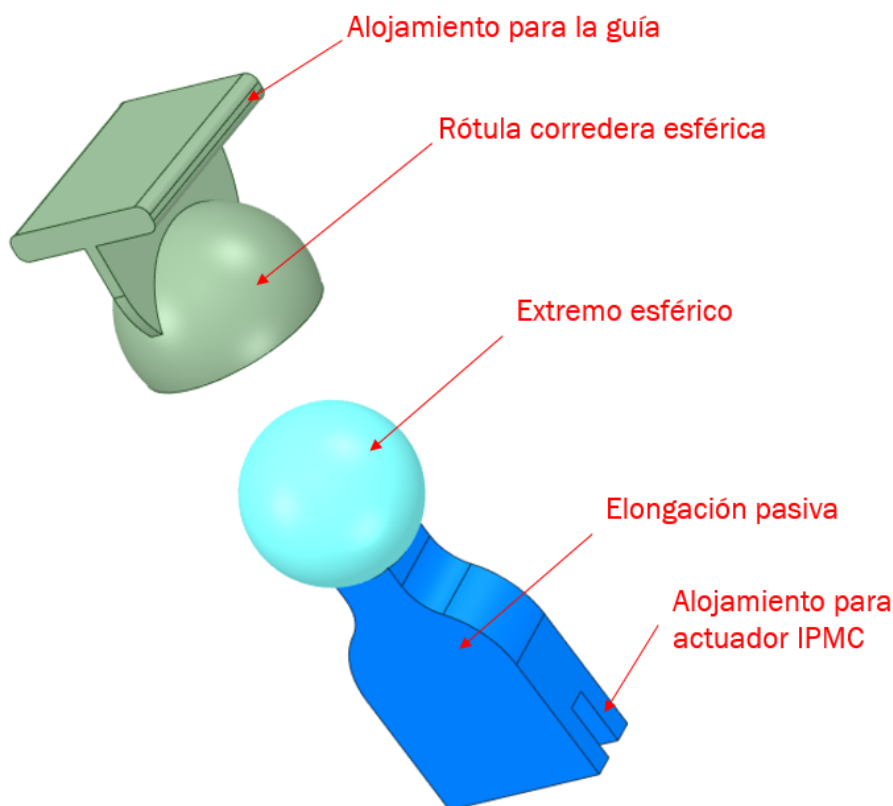


Figura 53. Detalle del enlace esférico empleado para resolver la unión entre elementos y favorecer los grados de libertad requeridos

De nuevo, para validar los cambios en el diseño, es fundamental simular todas las posiciones del módulo en su movimiento o las más críticas si no fuera posible todas,

atendiendo a posibles problemas o errores. Para el diseño se han planteado dos, el del movimiento vertical final, con todos los actuadores activados, y el del giro hacia un lado, con sólo dos actuadores adyacentes activados.

Se simula la acción del módulo en un movimiento vertical. Las rótulas corren por las guías y el enlace rótula-corredora se mueve para permitir el enlace sin ninguna colisión, como se ve en el proceso de la Figura 54.

En el módulo inferior, los actuadores permanecen en reposo, pero en el superior, todos tienen la configuración activada para poder elevar verticalmente el módulo superior.

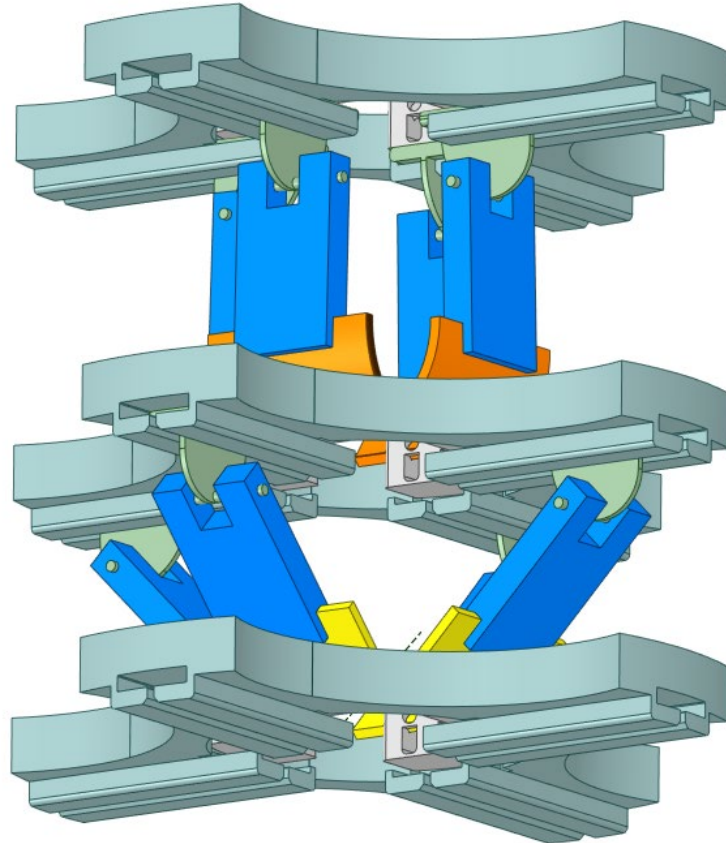


Figura 54. Elevación vertical de un módulo sobre otro. Todos los actuadores están activos y no hay problemas en el movimiento de las rótulas correderas

Ahora se simula el caso del giro hacia un lado, donde dos actuadores adyacentes se activan mientras los otros dos se mantienen en reposo. Como el giro que se veía en la Figura 51, se vuelve a plantear con este nuevo enlace con el resultado que se muestra en la Figura 55.

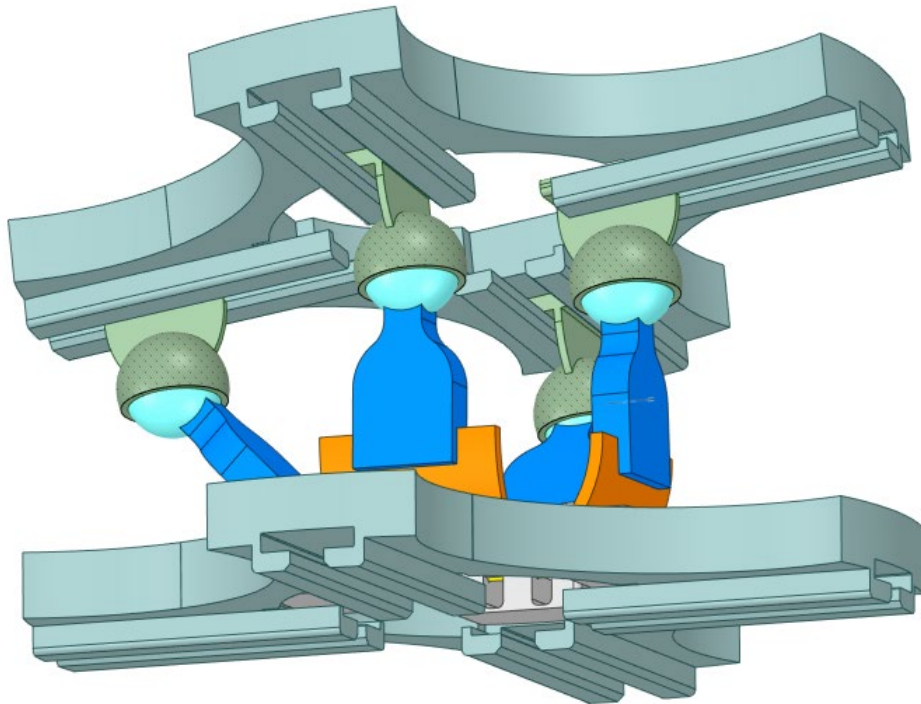


Figura 55. Simulación de un giro hacia un lado con la nueva rótula

Se detecta un pequeño problema, y es que no coinciden los ejes de la corredera a la perfección. Ocurre que, al elevar los actuadores parejos, las líneas que unen los puntos de acción del enlace no forman cuatro ángulos de 90° como cabría esperar. En realidad hay una pequeña desviación de 91.4° y 89.6° , como se muestra en la Figura 56.

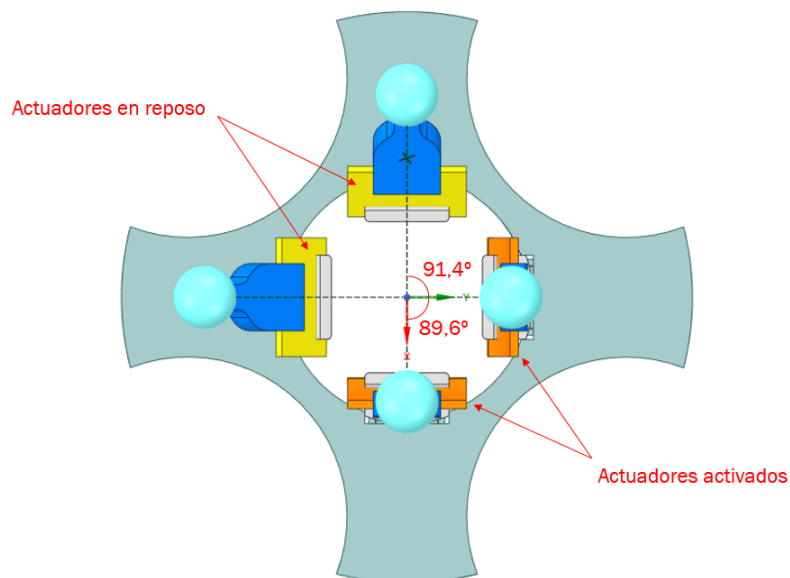


Figura 56. Desajuste en las líneas de acción equivalentes a la acción de la corredera

Las líneas de acción equivalen a los ejes de la guía-corredera, por lo que, si hay una desviación en ellos, puede haber un problema de desalineamiento en la rótula-corredera esférica. En la Figura 57, se puede ver una vista en verdadera magnitud de la guía. Las rótulas-correderas esféricas se deben alinear con la guía, pero se aprecia cómo no es así e incluso hay interferencias físicas con las paredes de la guía.

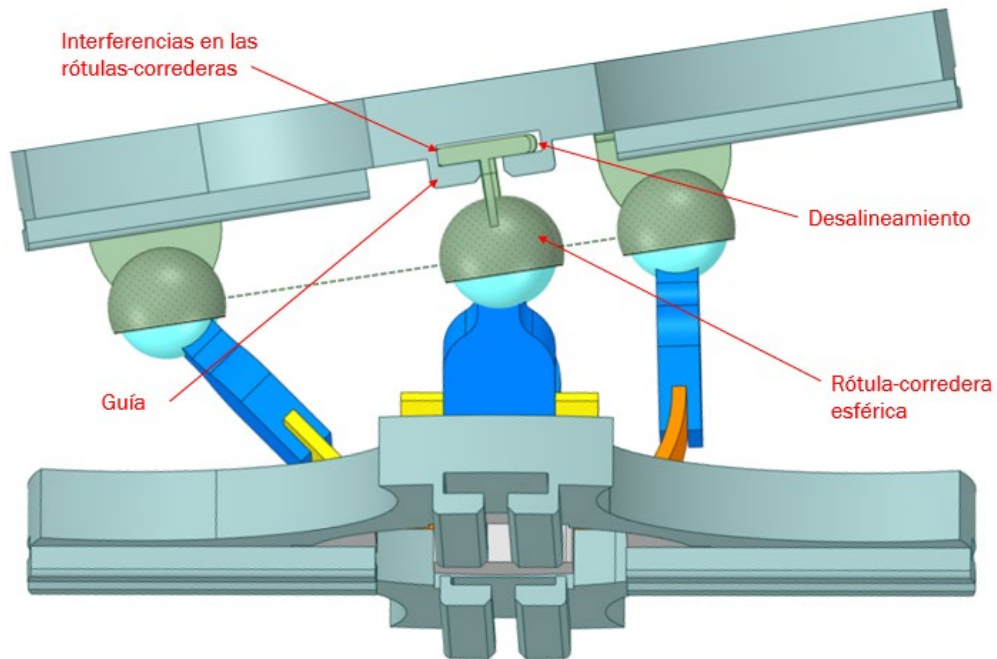


Figura 57. Vista en verdadera magnitud del alzado de la guía. Al no haber perpendicularidad, se aprecian interferencias en las rótulas-correderas con la guía y también problemas de desalineamiento

Esto sucede debido a un problema que también se señala en (Hontiyuelo, 2021). Las proyecciones de las guías que son activadas no están alineadas con las guías en reposo y forman un pequeño ángulo entre ellas. El cambio de orientación que se quiere dar al módulo provoca esta pequeña desviación.

Al realizar el diseño (Hontiyuelo, 2021), se implementó una guía rotativa que absorbiera estas pequeñas desviaciones de ángulo. En la Figura 58, se puede ver la guía rotativa resaltada en azul. En el caso de la izquierda, está centrada, pero en el de la derecha está girada para absorber la desviación de ángulo en el caso de un giro de módulo, con cambio de orientación es decir, dos actuadores adyacentes activados y los otros dos en reposo.

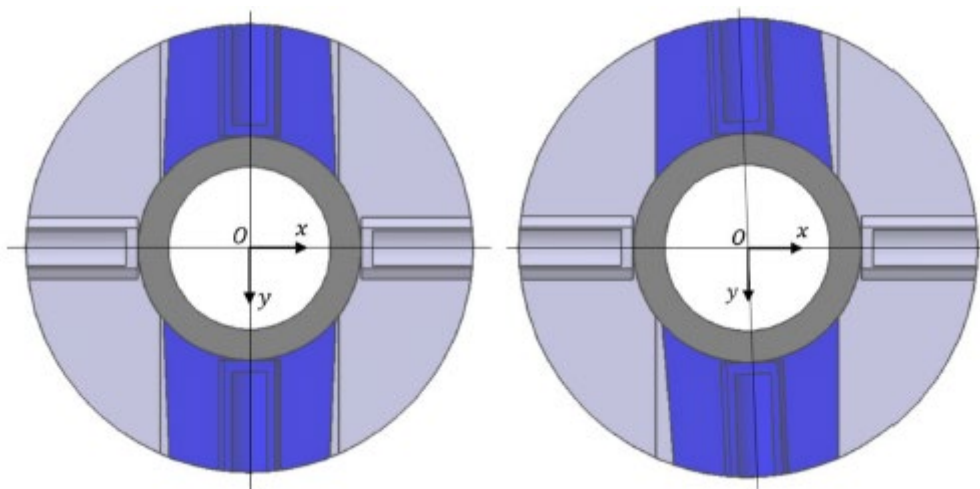


Figura 58. Disposición de la guía móvil en reposo (izquierda) y actuada en un giro y cambio de orientación del módulo (derecha) (Hontiyuelo, 2021)

Para el diseño actual se va a variar el concepto de guía rotativa. Al tener que girar sobre su módulo, implica introducir un elemento de unión entre el módulo y la posible guía

rotativa que permita un giro relativo entre ellos. Por lo que no se considera necesario añadir un subsistema tan grande de guía rotativa que puede implicar, además, problemas de funcionamiento si se atascasen los giros de varios tramos de guías rotativas.

Para la manipulación de los módulos, se va a concentrar toda la capacidad de movimiento en las rótulas-correderas esféricas. Se modifica la forma de la misma para permitir absorber el pequeño giro que puedan tener las proyecciones de los actuadores Figura 59.

El alojamiento deslizante que corre dentro de las guías tiene que disminuir de ancho para que no haya interferencias con las paredes. Cambiando esa dimensión junto con el redondeo de las esquinas va a permitir que no haya problemas de guiado cuando haya un pequeño grado con la guía.

En la sujeción entre la parte deslizante la corredera y la superficie esférica se va a eliminar la unión plana y se añadirá un eje que sujete ambas partes. Esto provoca que haya que agrandar la garganta de la guía, pero favorece que se absorba la pequeña desviación al poder girar libremente, que antes no podía al haber una unión plana.

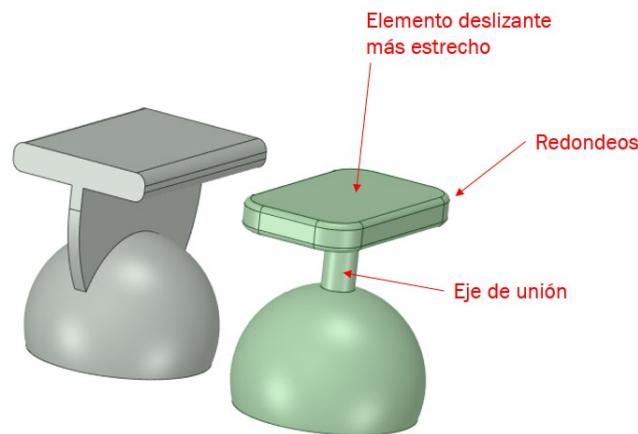


Figura 59. Cambios en la rótula-corredera esférica

En la Figura 60, se representan dos vistas en verdadera magnitud de las guías del módulo orientado. Es el mejor punto de vista para ilustrar el desalineamiento que hay entre los puntos de giro de los enlaces esféricos y las líneas de las guías. Desde

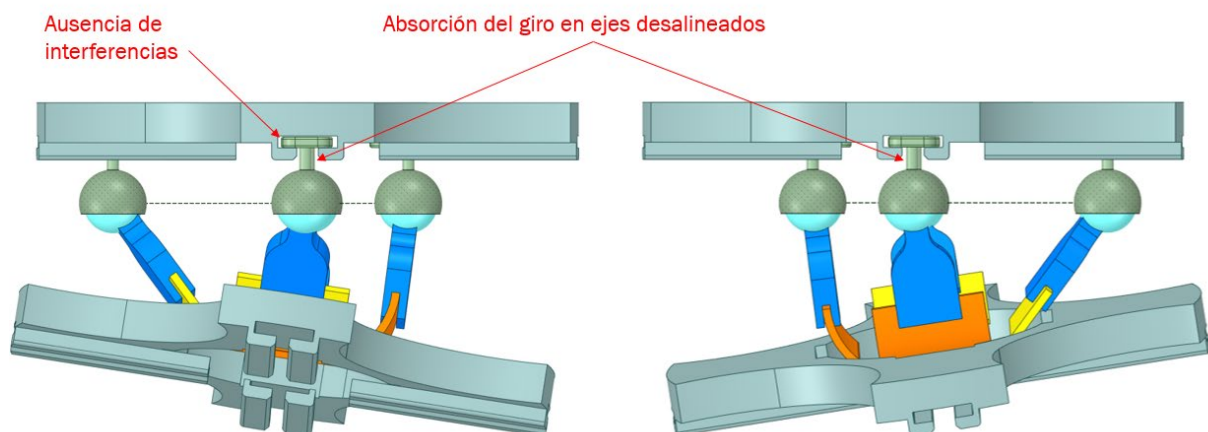


Figura 60. Vistas en verdadera magnitud de las dos guías por los lados del sistema actuado

Gracias a las modificaciones realizadas, se puede resolver este problema de forma sencilla sin introducir más subsistemas que puedan dar errores de funcionamiento o complicaciones adicionales.

Por último, es necesario una pequeña modificación respecto a la elongación pasiva. Debido al comportamiento del IPMC, la mejor disposición es la descrita en el capítulo 4 pero es necesario que los extremos de las láminas de material estén unidos. Para el diseño se ha planteado una simplificación del actuador IPMC por lo que es necesario ahora ajustar la forma de la elongación como se ve en la Figura 61. Simplemente se alarga el material para que pueda rodear todas las láminas de IPMC y que pueda recibir la máxima fuerza de ellas.

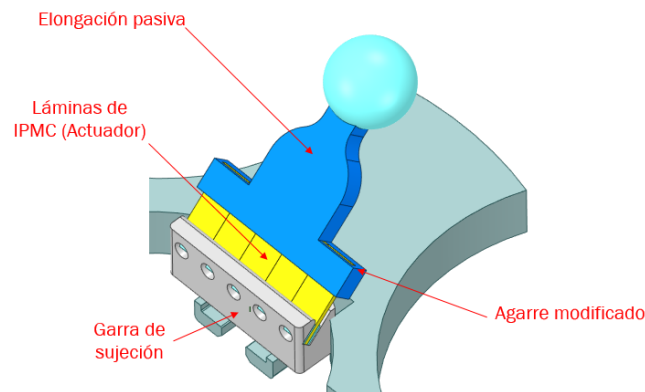


Figura 61. Modificación del agarre de la elongación pasiva

Se ha obtenido un módulo más ligero y versátil que sus antecesores eliminando material sobrante y reduciendo el área ocupada. Esto puede suponer un problema en el futuro por si es necesario ocupar esa área por placas electrónicas o controles y resultase insuficiente. Como el diseño planteado es versátil, en caso de necesitar más área, el tamaño del hueco de las esquinas, por donde se pueden introducir otros subsistemas, se podría volver a reducir, añadiendo tanto área como sea necesario.

También es posible reducir aún más material por si es necesario aligerar el módulo redondeando las esquinas o realizando taladros pasantes en el módulo Figura 62, siempre que no comprometa su integridad estructural.

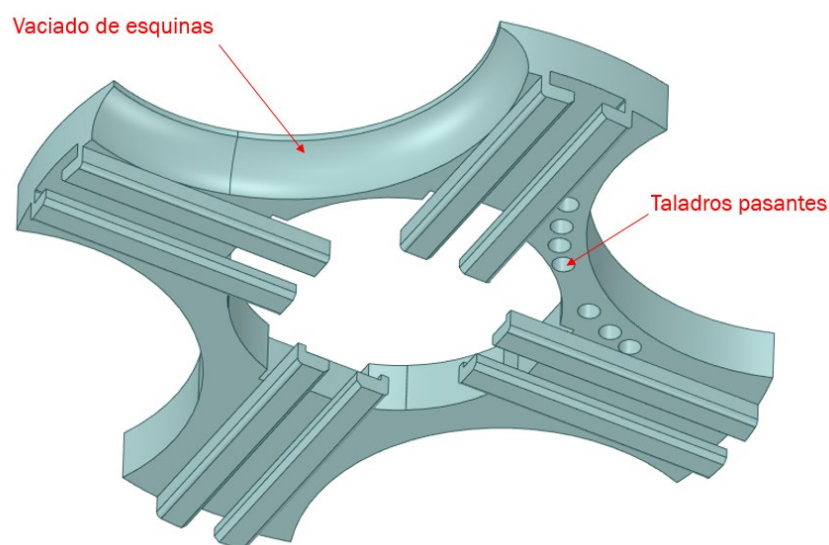


Figura 62. Ejemplos de posibles aligeramientos del módulo en caso de necesitar aún menos peso por módulo

De esta forma, el mecanismo de funcionamiento está finalizado. El módulo es capaz tanto de girar y cambiar su orientación como de elevarse verticalmente, obteniendo así, todos los grados de libertad planteados en trabajos previos que permitan predecir y controlar el movimiento final del microrrobot en su conjunto.

Se ha obtenido una solución al problema de unión entre los módulos planteados en los trabajos previos y ligeramente tratado hasta ahora. El movimiento ha pasado de ser un deslizamiento libre entre el actuador y la cara del módulo superior a ser un movimiento preciso a través de una guía-corredera. Ante la irrupción de distorsiones exteriores, el módulo puede resistir sin verse comprometido en movimientos indeseados debido a la unión deslizante libre, presente en anteriores planteamientos.

5.3. Caracterización de los materiales y los sistemas funcionales

En este apartado se exponen los posibles materiales elegidos para los componentes del microrrobot. Este análisis requeriría el estudio en profundidad de los materiales y sus relaciones para caracterizarlos correctamente. Se van a plantear las posibles elecciones de material de forma general, ya que además de un estudio extenso, también requeriría de un análisis de los mejores procesos de fabricación para obtener el diseño planteado.

En la elección de materiales no existe una única solución perfecta, siempre depende de muchos otros factores como los costes de fabricación o los tipos de materiales que se van a emplear.

También se analizarán las posibilidades que ofrece respecto a incluir distintos subsistemas que hagan las funcionalidades útiles para el uso del microrrobot. Se estudiarán las posibilidades que ofrece el diseño a la hora de manejar y emplear sistemas para su uso dentro del cuerpo humano.

5.3.1. Materiales estructurales

El microrrobot está compuesto por una serie de módulos apilados unos sobre otros. El sistema de actuación se ocupa de mover y orientar los módulos consiguiendo un movimiento preciso en la extensión total del microrrobot. Para ello, se sirve de unas guías por las que circulan las correderas que le cambian la orientación.

Ante la necesidad de contener elementos deslizantes, el material debe tener propiedades de este tipo. También, el módulo tiene que ser ligero y no debe estar hecho de un material muy pesado. Hay que tener en cuenta que la forma del módulo no es compleja pero sí la de la guía.

Con estas premisas, lo más conveniente para fabricar este tipo de material es emplear la fabricación aditiva y en concreto la impresión 3D. Dentro de este tipo de fabricación, actualmente destaca la tecnología PolyJet, desarrollada por Stratasys (Stratasys, 2021).

Con este tipo de fabricación aditiva, se pueden conseguir acabados de hasta 0,014mm, con paredes finas y geometrías complejas tales como cavidades o superficies esféricas con una amplia gama de materiales. Para que la corredera y la guía se deslicen sin apenas rozamiento, es muy importante cuidar el acabado del material.

Además, cuenta con numerosos tipos de materiales que son biocompatibles para uso en la tecnología médica. Por ejemplo, MED610 y MED620, son materiales biocompatibles que permiten un contacto con la piel de hasta 30 días y con la mucosa hasta 24 horas. Cuenta con cinco aprobaciones médicas incluidas citotoxicidad, genotoxicidad, hipersensibilidad retardada, irritación y plástico USP clase VI (Stratasys, 2021).

Uno de los aspectos que más destaca es la posibilidad de crear un solo modelo con mezcla de varios materiales o combinar dos tipos de materiales con distintas propiedades, como en la Figura 63 a), en la que se ha impreso un modelo de mano con dos tipos de materiales para los huesos y la carne, uno más duro y otro tipo goma transparente. En la Figura 63 b), se han impreso directamente el ensamblaje con sus partes ensambladas, funcionales y con unos acabados determinados.

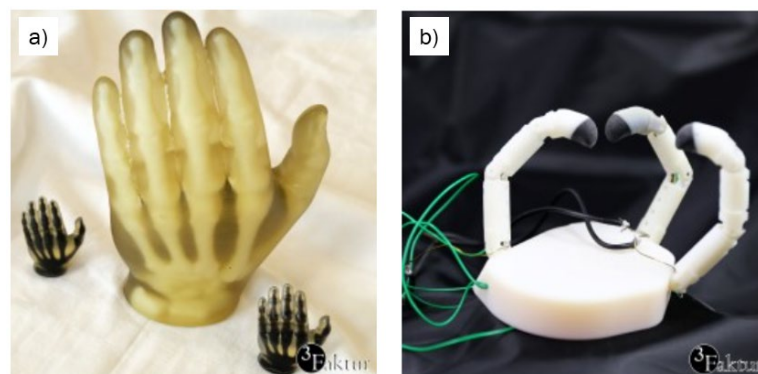


Figura 63. Ejemplos de impresión combinada a) Modelo de mano humana con dos tipos de materiales para los huesos y la carne. b) Modelo impreso con ensamblajes combinados

Se cuenta con la posibilidad de una impresión combinada con montaje de las rótulas-correderas esféricas y así sólo tener que implementar el sistema de actuación y los cableados. Aunque se ha dejado los extremos de las guías abiertas para poder colocar la parte deslizante de las correderas de ser necesario. Los espacios que ofrecen las impresoras comerciales son, típicamente suficientes para la aplicación del microrrobot. En concreto, las dimensiones máximas comerciales son para la Objet500 Connex1 de 490x390x200 mm (Stratasys, 2021).

Las garras que sujetan el actuador de IPMC pueden estar unidas o fabricadas solidarias al módulo. Su función es sujetar firmemente los actuadores y poder pasar los cables hasta ellos. Dependerá de la aplicación concreta de los actuadores IPMC, así como de su control y esquema eléctrico. Si su montaje eléctrico fuera sencillo, es recomendable fabricar la garra solidaria al a base.

El diseño se ha tratado de que tuviera la mayor versatilidad posible para poder incluir mejoras, modificaciones o nuevos elementos en el futuro.

5.3.2. Componentes móviles

Los componentes que constituyen el microrrobot, que no es la estructura del módulo con las guías, son los elementos móviles que transmiten la energía de deformación de los actuadores al módulo: las elongaciones pasivas y las rótulas-correderas.

De nuevo, la fabricación de estos componentes se plantea la fabricación aditiva, sus ventajosas características combinan muy bien con las necesidades que requiere el microrrobot: ligereza, combinación de materiales, formas complejas.

Las rótulas-correderas Figura 59, al contener un elemento deslizante, se pueden imprimir como combinación de dos tipos de material. En (Przekop, 2020), se plantea los

posibles avances de los materiales impresos en 3D para elementos específicos de deslizamiento. A través del PLA, ácido poliláctico de sus siglas en inglés (*Poly lactide*), biodegradable, pero con compuesto con un porcentaje de grafito. Esta combinación, funciona especialmente bien para el deslizamiento. Si bien sus resultados muestran que las características del PLA no varían significativamente, sus propiedades mecánicas si lo hacen y determina que es un paso intermedio en la obtención de este tipo de materiales.

Esto hace pensar que en un futuro cercano se pueda elegir aún más características y propiedades de materiales convencionales, por lo que la elección de materiales en un futuro será aún más decisiva.

Para la fabricación de las elongaciones que hacen de brazos, que se pueden ver en la Figura 53, se plantean dos posibilidades: seguir con la fabricación aditiva o emplear alguna otra técnica de fabricación plásticos.

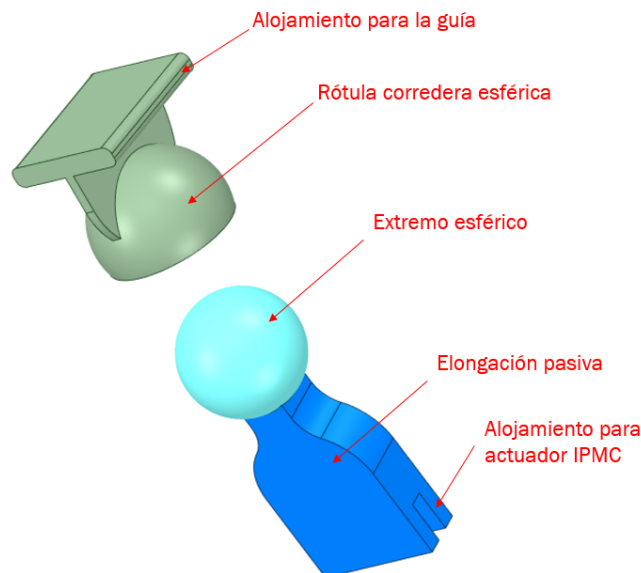


Figura 64. Detalle del enlace esférico empleado para resolver la unión entre elementos y favorecer los grados de libertad requeridos

Las funcionalidades que debe tener este elemento, fundamentalmente, es que sea capaz de transmitir la fuerza de deformación del actuador IPMC a la rótula-corredera. Para ello tiene que ser lo suficientemente robusto pero ligero a la vez. El material plástico es el que mejor puede conseguir estas propiedades.

Lo más complejo del elemento es su esfera final. Fabricarla por medios convencionales puede dar buen resultado al igual que imprimirlo por fabricación aditiva. Dependerá en mayor o menor medida, de cómo sea el proceso global, como ya se ha dicho, la elección de materiales no es única e infalible, hay muchas posibilidades. Se pueden abaratar costes si no diversificamos mucho la fabricación, por lo que si la mayoría de las piezas se fabrican por un método, quizás lo mejor es continuar y realizar todas las piezas posibles así. Desde el punto de vista de diseño, puede que haya que absorber ciertas tolerancias de fabricación, pero también todas las piezas tendrán el mismo error si se fabrican por el mismo proceso, cosa que permitirá prever ciertos tipos de errores.

En cualquier caso, el material vendrá dado por el método de fabricación que esté disponible en cada momento, y lo más crucial es fabricar el par esférico de la manera correcta. En este caso y con la posibilidad de imprimir mediante PolyJet, puede permitir

fabricar y a la vez montar el par esférico, con una buena precisión y sin apenas rozamiento cuidando el acabado de ambas piezas. Además, el montaje del par esférico, fabricando las piezas de la rótula y la esfera por separado y luego montándolas se antoja complicado.

La unión con el material del IPMC debe hacerse de forma pasiva, el material no puede conducir la electricidad. También es una decisión que dependerá del material IPMC fabricado.

5.3.3. Subsistemas funcionales y caracterización de los materiales

El objetivo del microrrobot es poder llegar a un punto dentro del cuerpo humano y realizar tareas útiles bajo la supervisión de un cirujano. Para ello es fundamental que pueda interactuar con el interior del cuerpo humano, es decir, que pueda transportar las herramientas que el cirujano precise, que no puede introducir normalmente.

La tecnología más avanzada y que mejor se aplica en este aspecto es la de la endoscopia. Sin profundizar más de lo necesario, se va a revisar los tipos de subsistemas que pueden complementar al microrrobot en su funcionalidad médica.

Lo primero que hay que indicar son las dimensiones del microrrobot. La más importante es la superficie que abarca cada módulo. En la Figura 65, se tiene la vista en planta de un módulo con sus medidas en décimas de milímetro, es decir, el diámetro exterior del módulo ocupa $\varnothing 13.6\text{mm}$. Típicamente, los endoscopios tienen un diámetro exterior de $\varnothing 13.2\text{mm}$ en su parte más ancha, luego el calibre es similar. El diseño del microrrobot permite su escalado, es decir, para su conceptualización se ha realizado el diseño con este calibre de ancho del módulo, pero sus dimensiones finales dependen de la funcionalidad que se le dé.

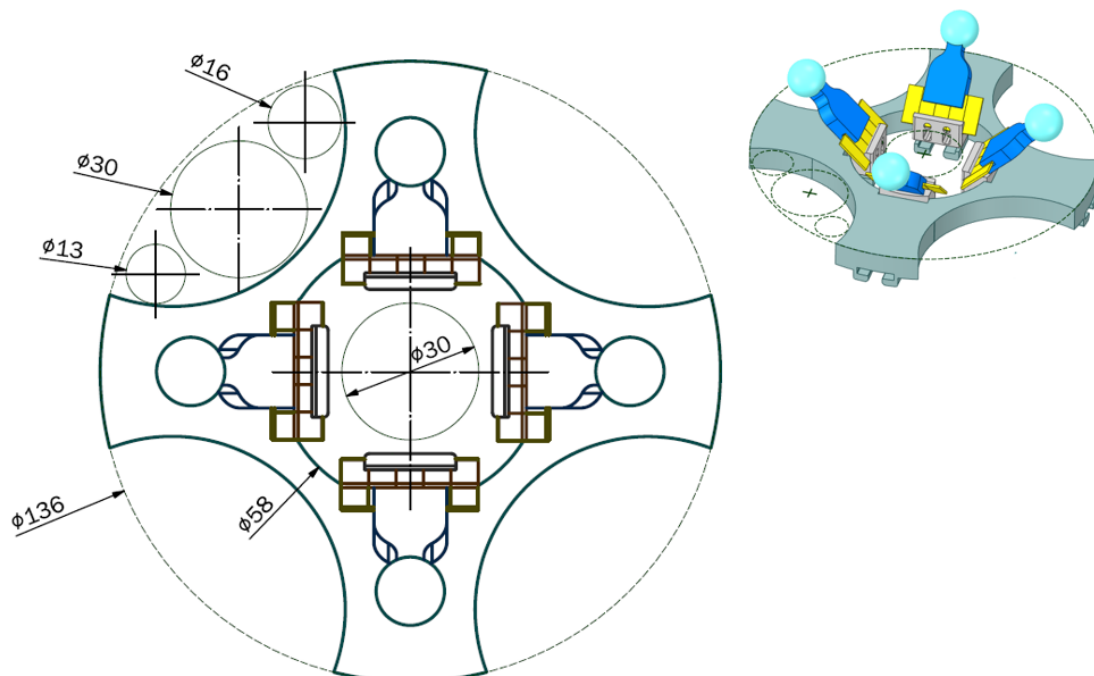


Figura 65. Vista en planta de las dimensiones de un módulo del microrrobot. Medidas de ejemplo en décimas de milímetro

Existen dos grandes tipos de endoscopios, los gastroscopios y los colonoscopios. Los primeros se emplean en la parte superior del sistema digestivo y los segundos sólo al colon.

El endoscopio se puede describir como un tubo largo y flexible, que porta canales en su interior para la luz, la cámara y otros subsistemas tales como canales para posibles biopsias, canales de aire o tubos de agua. Se introduce mediante pequeñas incisiones de cirugía mínima invasiva o a través de aberturas naturales como la boca, el recto o la vagina.

Mediante un mando de control exterior, el endoscopista puede manejar la punta del endoscopio de forma rudimentaria mediante el giro de los engranajes del mando. A diferencia de un control guiado automático, como es el objetivo de este diseño.

Los materiales de ambos, a pesar de variar en su diseño y su aplicación, son prácticamente los mismos:

- Titanio
- Acero inoxidable
- Plásticos
- Cristales ópticos

Para dimensionar los subsistemas que se pueden encontrar en la sección de un endoscopio, es fundamental la Figura 66, donde se puede ver una sección transversal y esquemática de un endoscopio. El tubo de inserción lleva todos los instrumentos a través de los canales dentro del cuerpo. A través del cuerpo de control, se introducen los elementos que juegan un papel importante en una endoscopia.

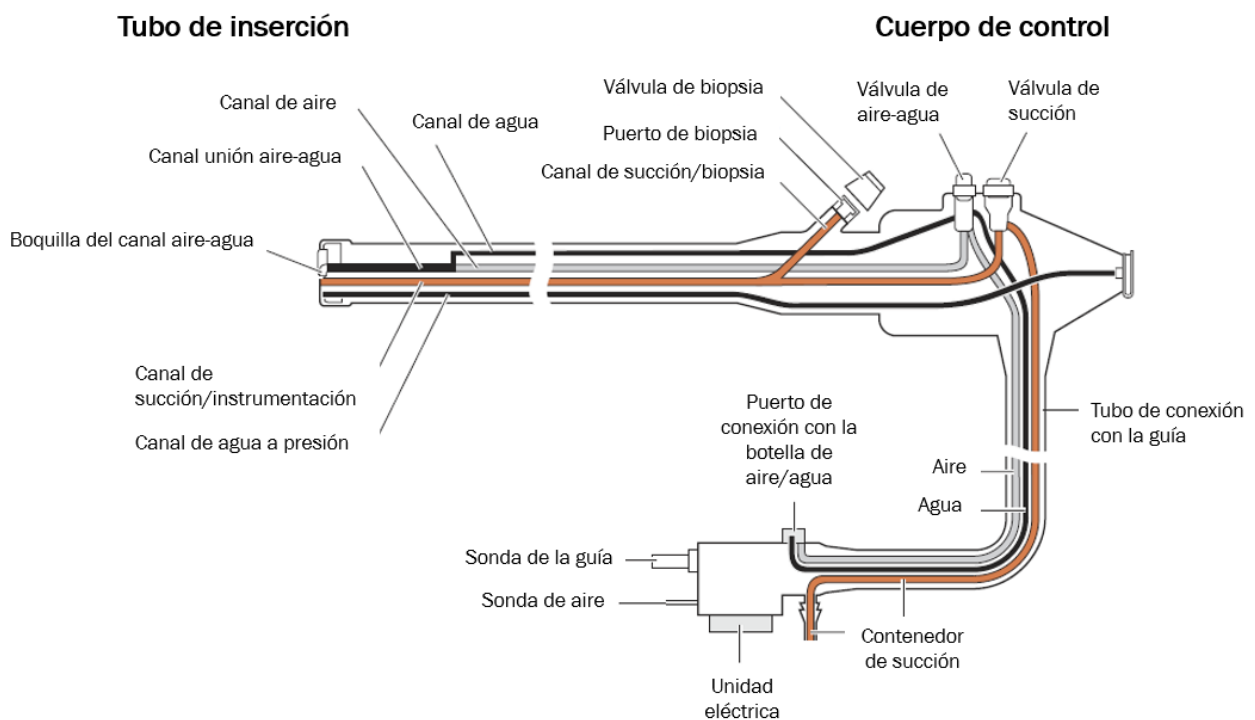


Figura 66. Sección de un endoscopio convencional tubo de inserción y cuerpo de control (Haycock, 2014)

El diámetro del canal de la biopsia, por ejemplo, es uno de los datos más importantes a la hora de seleccionar un endoscopio. Una biopsia es el proceso de toma de una muestra de tejido del paciente. Para la obtención de esta, se emplea este canal que debe de ser capaz de transportar a lo largo del endoscopio la muestra deseada.

También pueden ser necesario otros elementos como emplear el agua a presión para poder retirar todos los obstáculos presentes en el tracto gastrointestinal o en su parte más

distal como son el colon y el recto. Para eliminar cualquier resto se puede retirar a través del canal de succión.



Figura 67. Agua a presión en el extremo del endoscopio

Uno de los sistemas más importantes es el de la visión, que permite al profesional obtener imágenes en tiempo real a través de una cámara del extremo Figura 68, que está complementada con dos focos de luz que también van alojados dentro del tubo de inserción.

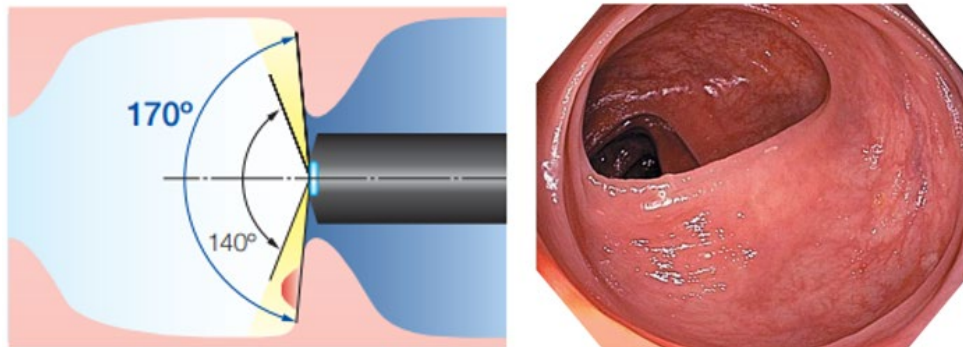


Figura 68. Ejemplo de cámara endoscópica. Izquierda, concepto de cámara con gran angular. Derecha, imagen obtenida por una cámara EVIS EXERA III, CF-HQ 190L/I (Olympus, 2021)

Además de todos estos subsistemas convencionales, también hay otros más específicos como pequeños fórceps, cepillos citológicos, agujas flexibles e incluso bocas de endoscopios para láseres o coaguladores por gas de argón.

Para poder implementar estos subsistemas en el microrrobot, se deberá contar con un extenso trabajo de adaptación de estos controles a la topología del microrrobot.

Lo fundamental del diseño presentado es que deja bastante espacio para implementar subsistemas que lo recorran longitudinalmente. Como se ha explicado, los endoscopios cuentan con un canal principal, cuyo diámetro suele valer entorno a los $\text{Ø}3\text{mm}$, que es el espacio que hay en las esquinas del microrrobot a esa escala Figura 65.

El recubrimiento externo del microrrobot tiene que englobar las partes externas de los módulos y adaptarse en un extremo al sistema de control y en el otro al cabezal funcional. Uno de los materiales más extendidos es el caucho Viton. Un termopolímero de hexafluorpropileno, con fluoruro de vinilideno, tetrafluoretileno y eterperfluoro metilvinílico. Su abreviatura internacional es FPM o FKM del inglés, (*Fluorocarbon monomer*).

Sus propiedades, entre otras muchas, destacan en una resistencia de la temperatura de hasta 250° sin perder propiedades mecánicas. También tiene una alta resistencia a ácidos, aceites, grasas etc. Se emplea tanto en refinerías e industria pesada, como en la industria alimentaria y médica en recubrimientos, juntas de estanqueidad y un sinnúmero de aplicaciones más (Viton, 2021).

Finalmente, el cabezal del microrrobot tendrá que distribuir todos los elementos de los que se compone el microrrobot y debe ser el elemento final de los canales que lleguen hasta él. Típicamente están hecho de acero inoxidable.

También hay que tener en cuenta que el sistema de cables, control electrónico y manejo del microrrobot ocupa espacio. Dentro del volumen de cada módulo, tiene que haber espacio para el control de la electricidad suministrado a los actuadores, el sistema de control electrónico que maneja la configuración binaria, así como las conexiones de todos estos elementos y la conexión al actuador de IPMC.

El diseño del área de los módulos del microrrobot es muy importante y va ligado a la elección final de los componentes concretos. El diseño se ha planteado de forma versátil para que puedan implementarse en futuros trabajos todos estos componentes.

5.4. Solución propuesta del nuevo microrrobot

Una vez que se han examinado las demás consideraciones, se procede a presentar el resultado final del diseño del microrrobot BHMR (del inglés, *Binary Hyper-redundant Manipulator Robot*). Como se ha explicado, este diseño está dotado de versatilidad en sus componentes de cara a una aproximación diferente del problema o sujeto a otro tipo de necesidades y componentes.

Más allá de otras consideraciones, el diseño presenta numerosas novedades (Figura 69) con respecto a sus primeras versiones en trabajos anteriores. El sistema de actuación está compuesto por cuatro actuadores colocados a 90° sobre la base del módulo y se componen de un polímero electroactivo, el IPMC. Estos actuadores provocan una deformación si hay una diferencia de potencial eléctrico en sus caras opuestas. Actúan como una palanca móvil y con esa deformación se otorga movimiento al módulo. Un novedoso sistema de unión entre módulos permite el desplazamiento y orientación del módulo basado en un sistema de guías correderas con enlaces esféricos.

Esta disposición permite resolver los problemas cinemáticos y le otorgan al módulo y al microrrobot, los grados de libertad en los que se basan los algoritmos de otros trabajos previos, que gobiernan el movimiento total del microrrobot.

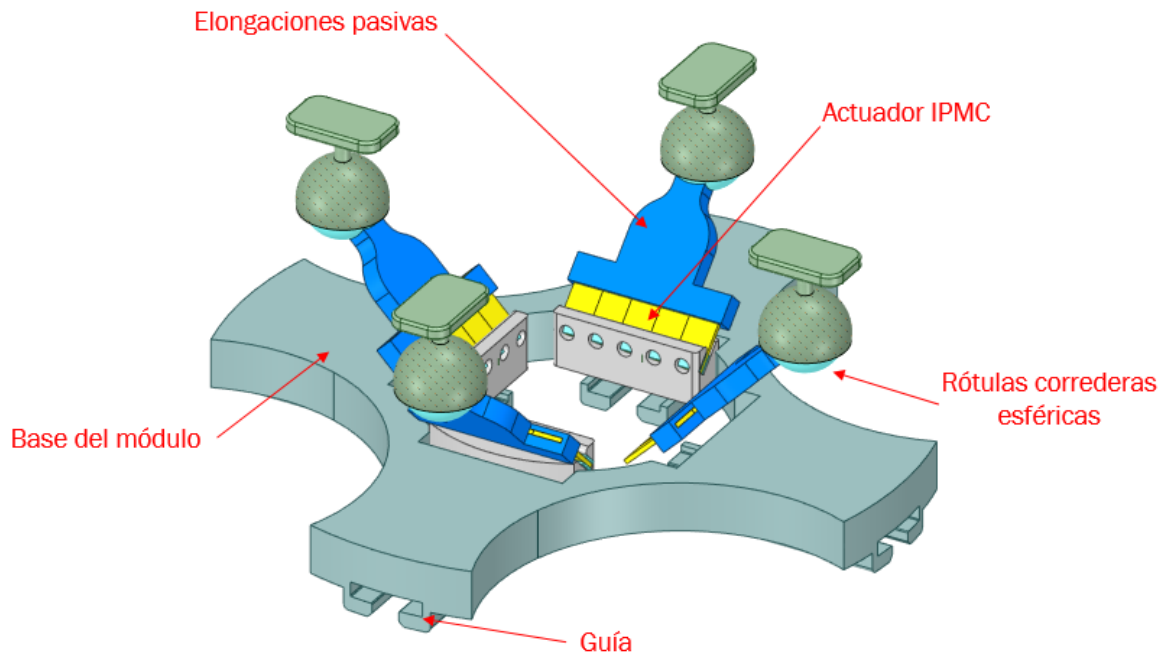


Figura 69. Detalle del módulo con todos los componentes diseñados

EL funcionamiento viene dado por control binario como se ha expuesto en los apartados anteriores. En la Tabla 3 de configuraciones posibles, se recogen todos los estados que puede tener el módulo. Se va a plantear estas configuraciones para una serie cuatro módulos que componen el microrrobot. De esta forma se puede ilustrar mejor el comportamiento.

En la Figura 70, se puede ver el estado de los actuadores y la posición de los módulos cuando se encuentran en la configuración "0" [0, 0, 0, 0]. En esta posición, todos los actuadores se encuentran inactivos y el microrrobot se mantiene estático.

Configuración "0": [0,0,0,0]

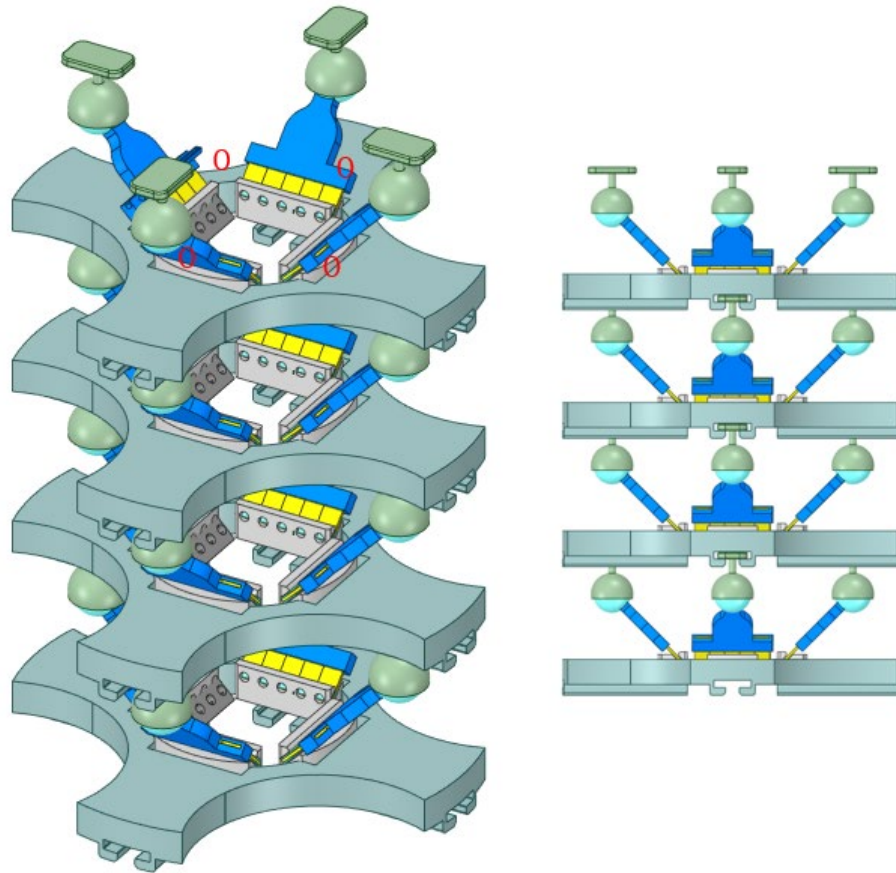


Figura 70. Configuración de los actuadores para la posición "0". Estado de reposo de los módulos

En la siguiente Figura 71 se puede ver la configuración "15" [1, 1, 1, 1]. En este estado se provoca el alargamiento total del microrrobot. Los actuadores se deforman por completo hasta obtener que los módulos suban verticalmente, sin giros.

Configuración "15": [1, 1, 1, 1]

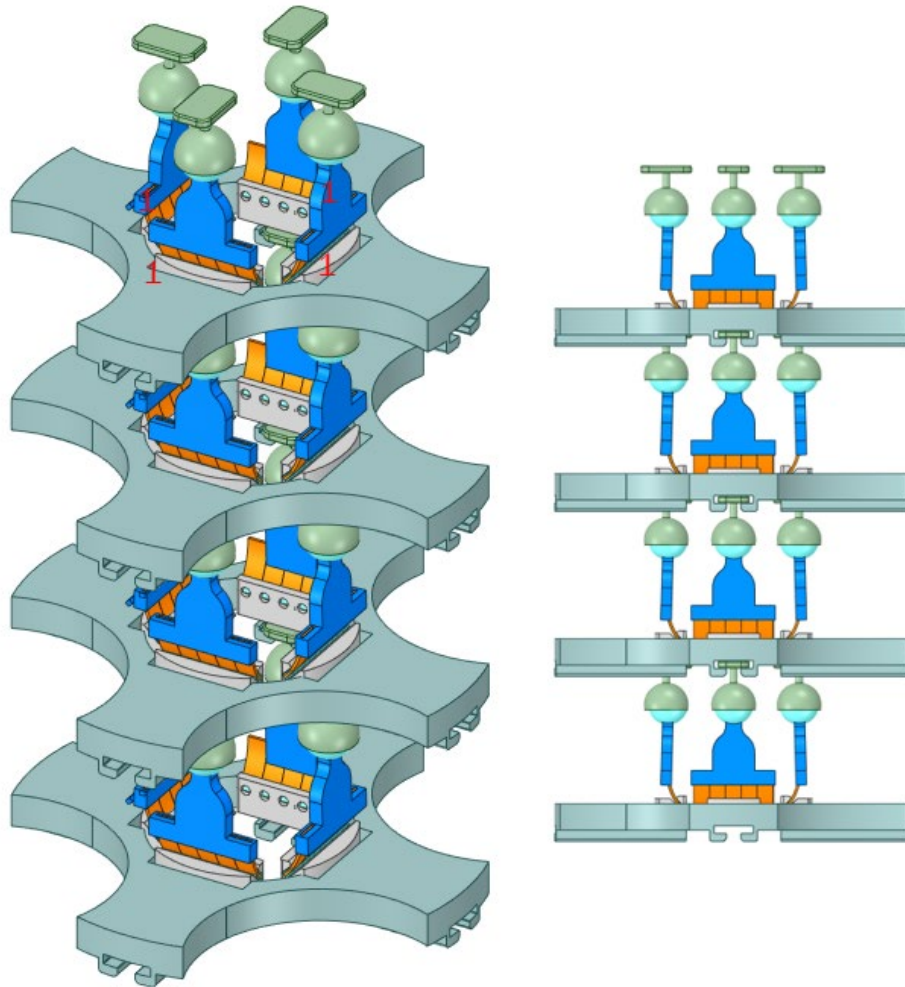


Figura 71. Configuración de los actuadores para la posición "15". Todos los actuadores activados

Para poder girar y orientar los módulos, conduciendo al microrrobot a un giro hacia un lado, se tienen cuatro configuraciones binarias. El funcionamiento consiste en actuar a la vez dos actuadores adyacentes, de esta manera se tienen las configuraciones 3, 6, 9 y 12 ([0011], [0110], [1001] y [1100], respectivamente).

Para una configuración cualquiera de giro, se muestra en la Figura 72 el resultado para cuatro módulos. Una vez resuelto el problema del giro que se vio anteriormente, los módulos son orientados por las guías hacia un giro.

Configuraciones:

3 [0, 0, 1, 1]

6 [0, 1, 1, 0]

9 [1, 0, 0, 1]

12 [1, 1, 0, 0]

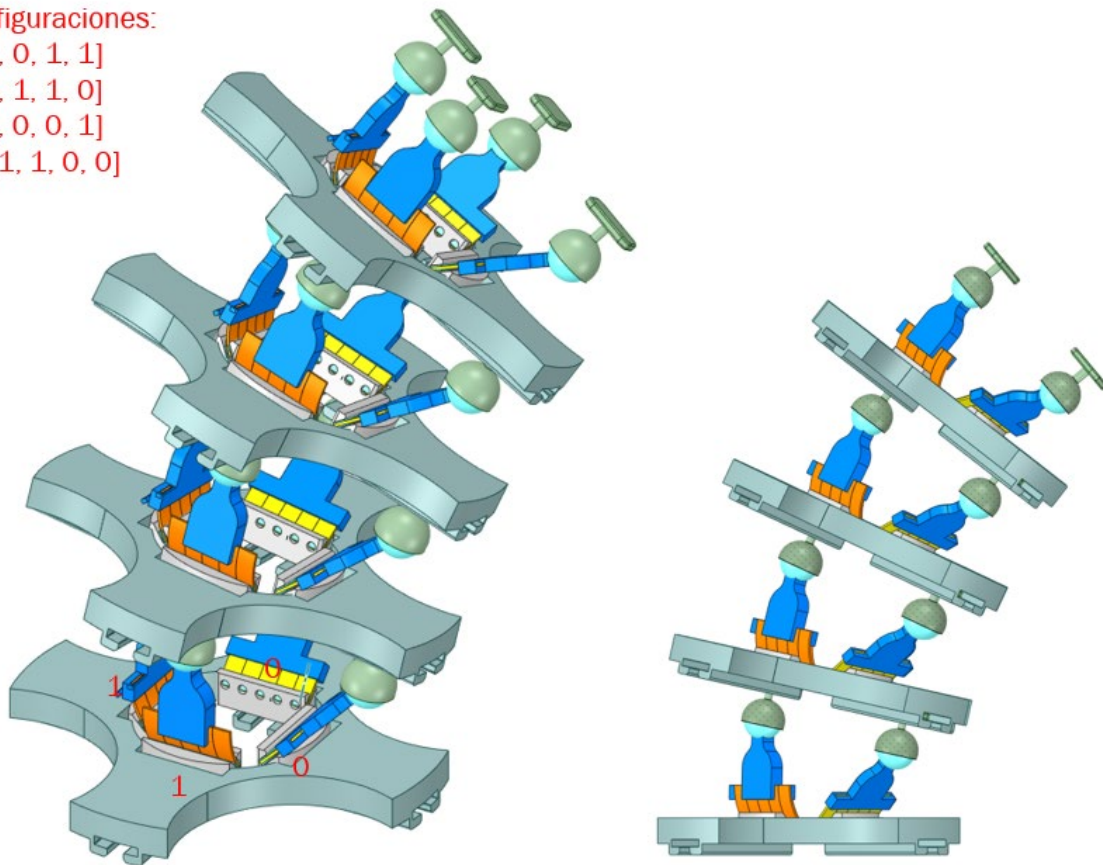


Figura 72. Configuración cualquiera de los actuadores para la posición de giro “3”, “6”, “9” y “12”, solamente dos actuadores adyacentes activados

Queda definida la posición total de los módulos en todos los movimientos del microrrobot puesto que el giro es el mismo para las cuatro orientaciones.

Teniendo en cuenta el recubrimiento y los accesorios que se pueden añadir, se puede obtener una visión aproximada del aspecto final del microrrobot en la Figura 73.

En ella se muestra una posible actuación del microrrobot en un entorno real, dentro del colon Figura 73 a). Se puede ver el recubrimiento exterior y el movimiento del microrrobot observando un determinado punto objetivo.

En la Figura 73 b), se puede ver el interior del microrrobot con sus módulos adecuadamente orientados para la tarea en cuestión y cómo por los huecos interiores se puede pasar los conductos de los accesorios necesarios.

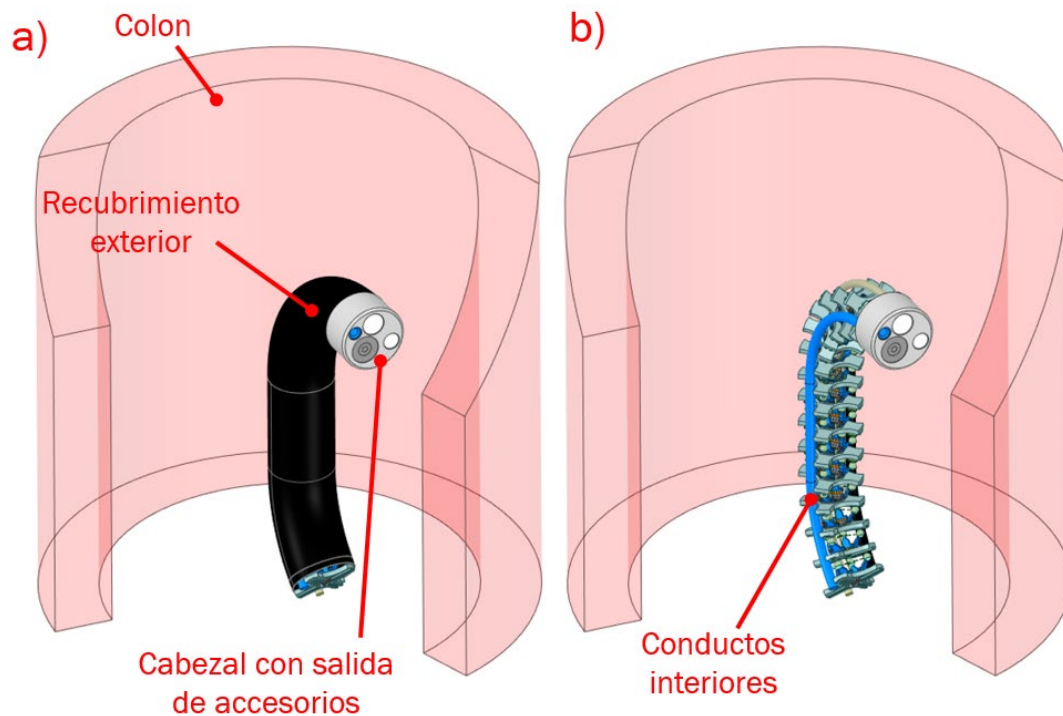


Figura 73. Planteamiento del funcionamiento del microrrobot en un entorno real. a) Microrrobot con un aspecto exterior. b) Misma imagen pero con el interior mostrado y con los conductos interiores de los posibles accesorios

Las dimensiones del microrrobot pueden ser modificadas. El diseño puede miniaturizarse para todos sus componentes. Al estar hechos con fabricación aditiva, puede variar su escala.

De la misma forma el sistema de actuación puede miniaturizarse puesto que las láminas de IPMC se pueden fabricar de las dimensiones requeridas. El sistema de potencia debería adaptarse a ello.

Los accesorios por otro lado requerirán de un estudio en profundidad, tanto de los materiales cómo de las soluciones comerciales existentes.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. Conclusiones

Se van a presentar las conclusiones obtenidas tras haber realizado el proceso de diseño del microrrobot BHRM y su sistema de actuación. El proceso se ha llevado a cabo dentro del proyecto global y multidisciplinar del Instituto ITAP (Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción) de la Universidad de Valladolid, por lo que presenta unas condiciones iniciales de contorno.

Inicialmente, se ha planteado un proceso de diseño iterativo que fuera capaz de asimilar toda la información previa, analizarla y plantear una solución válida de acuerdo con las condiciones de contorno extraídas. Se han estudiado las fortalezas y debilidades de las propuestas de diseño previas que existían para poder tener una mejor información sobre los retos que plantea el diseño.

Se ha realizado un proceso de análisis y estudio de los materiales que hay comercialmente en la actualidad para caracterizar el sistema de actuación de los módulos del microrrobot. El modo de actuación influye totalmente en las necesidades del diseño posterior y es importante saber su composición, funcionamiento e integración dentro de los módulos del microrrobot.

De entre todos los posibles materiales, se ha elegido el compuesto iónico de polímero y metal, el IPMC. Se han analizado sus ventajas y se ha estudiado la mejora de sus desventajas para finalmente integrarlo como sistema de actuación.

Una vez concretado el sistema de actuación, se han ido solucionando los requerimientos de diseño del módulo. Se han creado y diseñado todos los componentes y se ha estudiado su relación entre sí, siendo necesario completar el diseño iterativo a medida que se han ido ensamblando los módulos entre sí. Además, se han tenido en cuenta posibilidades de montaje e integración con otros sistemas como la electrónica y la potencia del microrrobot, planteándose los diseños teniendo en cuenta la integración futura de estos sistemas.

Por último, una vez que se ha completado el diseño modular, se ha ensamblado la serie de módulos que componen el microrrobot y se han representado todas las situaciones de accionamiento para comprobar la correcta integración y ejecución de cada uno de sus elementos en el movimiento de este.

Todo el proceso, así como el diseño final del microrrobot modular BHRM, representa una fuente de información importante de cara a los nuevos desarrollos. Conocer las dimensiones, materiales, actuadores y disposición de los módulos, facilitará en el futuro el desarrollo de algoritmos y procesos teóricos que gobiernen el movimiento del microrrobot.

6.2. Mejoras propuestas y futuros desarrollos

- **Sistema de actuación:** El nivel de tecnología actual permite llegar hasta ciertas cotas de diseño. La ciencia de materiales evolucionará en los próximos años y seguramente los materiales estudiados en este trabajo queden obsoletos. Será necesario revisar de nuevo el sistema de actuación y adaptarlo a las nuevas prestaciones de los nuevos materiales, incluso cambiarlo si fuera necesario.

- **Validación del modelo:** Por la extensión del modelo, no se ha podido dedicar recursos a la realización y validación del modelo planteado con los trabajos previos y sus algoritmos de movimiento. Dentro del movimiento autónomo del robot, tanto las dimensiones como la disposición de módulos puede alterar los algoritmos ya desarrollados. Sería necesario revisar y aplicarlos a este diseño.
- **Integración electrónica:** De cara a plantear una integración total del sistema de actuación y el proceso de movimiento del microrrobot, es interesante desarrollar su sistema electrónico y de control. Durante el proceso de diseño, se ha dejado un módulo versátil, con mucho volumen sin ocupar para poder implementar en un futuro una placa de control electrónica con sus elementos.
- **Implementación eléctrica:** También se ha tenido en cuenta en el diseño las tomas eléctricas para aplicar voltaje al sistema de actuación. Para poder caracterizarlo por completo, es necesario solucionar el apartado eléctrico y de potencia del microrrobot, puesto que es un sistema fundamental.
- **Sistemas auxiliares:** En la presente memoria sólo se han planteado los sistemas auxiliares de funcionamiento como posibles conductos para agua a presión, aire o sistemas de biopsias. En el futuro se puede estudiar su implementación dentro del microrrobot para añadir funcionalidades.
- **Fabricación de un prototipo:** Una vez desarrollados apartados como la electrónica, el control, los algoritmos, las trayectorias, así como el sistema eléctrico y de potencia, resulta fundamental para validar el diseño, la fabricación de un prototipo que valide todos los planteamientos que se han llevado a cabo. Para ello es necesario fabricar un sistema de actuación basado en IPMCs.
- **Miniaturización:** Las dimensiones del microrrobot pueden tratar de reducirse más. Cabe la posibilidad de que el diseño y las dimensiones aplicadas no sean válidas para ciertas aplicaciones. El diseño, a pesar de haber tenido en cuenta esta posibilidad, tanto para los elementos como para los materiales empleados, puede necesitar en el futuro de una revisión que permitadiminuir todo a una dimensión más pequeña.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson I., Gisby T., McKay T., O'Brien B., Calius E. (2012) "Multifunctional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines" J. Appl. Phys. 112(4), 041101.
- Anton M., Punning A., Aabloo A., Kruusmaa M., (2008) "A Mechanical Model of a Non-uniform Ionomeric Polymer Metal Composite (IPMC) Actuator," Smart Materials and Structures Volume 17, Number 2
- Bar-Cohen, Y., (2004) "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles – Reality, Potential and Challenges" vol. PM136, 2nd edn, pp. 1-765. SPIE Press, Bellingham ISBN 0-8194-5297-1.
- Bar-Cohen, Y., Xue T., Lih, S.S., (2021) "Polymer Piezoelectric Transducers for Ultrasonic NDE: <http://www.ndt.net/article/yosi/yosi.htm> 1st International Internet Workshop on Ultrasonic NDE, Subject: Transducers, organized by R. Diederichs, UOnline J., Germany (1996). Accedido el 21 de julio de 2021.
- Beasley R., (2012) "Medical robots: current systems and research directions" J. Robot. 2012:401613.
- Blausen, 2014, (Visitado: 2021) Medical gallery of BlausenMedical WikiJ., www.blausen.com, Med. 1 1-79.
- Cabezas G., (2019) "Modelado dinámico de robot BHRM mediante la herramienta Simscape de Matlab. Trabajo de fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Cardona S., Clos D., (2011) "Teoría de máquinas" Edicions UPC, 2ª Ed.
- Carrozza M., Dario P., Jay LPS., (2003) "Micromechatronics in surgery" Trans. Inst. Meas. Control 25(4):309–27.
- Changsheng B. et al., (2021), "Highly efficient structure design of bending stacking actuators based on IPMC with large output force", Smart Mater. Struct. 30, 075033.
- Chen H., Wang Y., Liu J., et al., (2015), "Aided manufacturing techniques and applications in optics and manipulation for ionic polymer-metal composites as soft sensors and actuators", Journal of Polymer Engineering.
- Chumillas M., (2019) "Diseño y desarrollo de un prototipo de BHRM", Trabajo fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Cotton and Williams P. C.; Haycock A.; Cohen J.; Saunders B.P.; et al., (2014), "Practical Gastrointestinal Endoscopy, the fundamentals", Wiley Blackwell, 7th ed.
- De Volder M., Tawfick S., Baughman R., Hart A., (2013) "Carbon nanotubes: present and future commercial applications", Science, 339 (6119), 535-539.
- Diana M., Marescaux J., (2015) "Robotic Surgery" British Journal of Surgery, Vol. 102, No. 2, pp. 15-28.
- Gaudenzi P., (2009) "Smart structures: physical behavior mathematical modelling and applications", John Wiley & Sons, ISBN 987–0-470-05982-1.

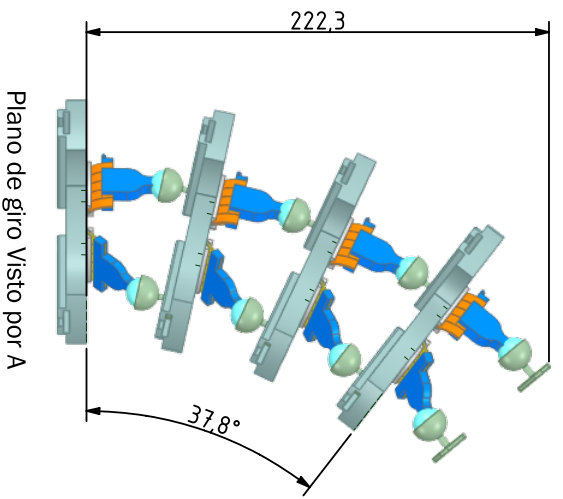
- Gidaro S., et al., (2014), “Vesicourethral anastomosis using a novel telesurgical system with haptic sensation, the Telelap Alf-X: a pilot study”, *Surgical Technology International*, Vol. 24, pp. 35-40.
- Gisby T.A., Xie S., Calius S., Anderson E.P., Anderson I.A., (2009) “Integrated sensing and actuation of muscle-like actuators”, *Proc. SPIE Proc. SPIE 7287*, 728707.
- González-Jiménez A., Romasanta L., Alvino G., Bernal O., Valentin P., (2015), “Elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales”, *Revista Plásticos Modernos*, 109, 14-17.
- Hernando R., (2018) “Diseño y construcción de un prototipo de Robot Ápodo Modular e Hiper-redundante”, Trabajo de fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Hontiyuelo E., (2018) “Planificación de movimientos de un robot ápodo, modular e hiper-redundante aplicando algoritmos de seguimiento”. Trabajo de fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Hontiyuelo E., (2021) “Modelado dinámico de un robot ápodo, modular e hiper-redundante (BHRM) aplicando la formulación recursiva de Newton-Euler”, Trabajo de fin de máster, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Hsien-I, Lin, George Lee C.S., (2013) “Measurement of the robot motor capability of a robot motor system: A fitts’s-Law-Inspired Approach” 8412-8430.
- Huaultmé A., Voros S., Riffaud L., Forestier G., Moreau-Gaudry A., Jannin P.; (2017) “Distinguishing surgical behavior by sequential pattern discovery” *J. Biomed. Inform.* 67:34–41.
- Jain, R. et al. (2010), “IPMC based micro gripper for miniature part handling.” 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation: 1414-1419.
- Kruusmaa M., Hunt A., Punning A., Anton M. and Aabloo A., (2008) "A linked manipulator with ion-polymer metal composite (IPMC) joints for soft- and micromanipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3588-3593.
- Leonardo D., Vizsnyiczai G., Frangipane G., Maggi C., Saglimbeni F., Bianchi S., (2017) “Light controlled 3D micromotors powered by bacteria”, *Nature Communications*.
- Loeve A., Plettenburg D., (2012), “Endoscope Shaft-Rigidity Control Mechanism: FORGUIDE”, *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 59. 542-51.
- Lovinger A.J., (1983) “*Science*” Vol 220, 4602, 1115.
- Ma S., Zhang Y., Liang Y., Ren L., Tian W. and Ren L., (2020), “High-performance ionic-polymer-metal composite: toward large-deformation fast-response artificial muscles”, *Adv.Funct. Mater.* 30 7.
- Martínez C., (2021) “Modelado cinemático inverso y seguimiento de trayectorias de un manipulador BHR”, Trabajo de fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

- McMahan W., Chitrakaran V., Csencsits M., Dawson D., Walker I., Jones B., Pritts M., Dienno D., Grissom M., Rahn C., (2006), "Field trials and testing of the octarm continuum manipulator", en Robotics and Automation, ICRA, Proceedings IEEE International Conference on. IEEE, pp. 2336-2341.
- Mirfakhrai, T., Oh, J., Kozlov, M., Fok, E.C.W., Zhang, M., Fang, S., Baughman, R.H., Madden, J.D., (2008), "Carbon nanotube yarns as high loadactuators and sensors", Adv. Sci. Technol. 61, 65–74.
- Muñoz M., Moreno L., Garrido S., Blanco D., (2008) "Materiales inteligentes: aleaciones con memoria de forma (SMA)", Dpto. Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.
- Nemat-Nasser S., Wu Y., "Comparative experimental study of the ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cations forms.", J. Appl. Phys., 93, 5255-5267.
- Noguera J, Moreno C, Cuadrado JM, Olea M, otros, (2010) "NOTES". Historia y situación actual de la cirugía endoscópica por orificios naturales en nuestro país", Cirugía Española, Vol 88, No. 4, pp. 222-227.
- Nordqvist, Christian, Abril (2017), "Muscles: Why are they important?" Medicalnewstoday.com, <https://www.medicalnewstoday.com/articles/249192>
- Olympus, Sistemas medicos, visitado (2021): <https://www.olympus.es/medical/es/Home/>.
- Opris, D.M. (2018) "Polar elastomers as novel materials for electromechanical actuator applications. Adv. Mater. 30(5), 1703678.
- Paul HA, Bargar WL, Middlestadt B, Musits B, Taylor RH, Kazanzides P, Zuhars J, Williamson B, Hanson W. (1992) "Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty" Clin. Orthop. Relat. Res. (285):57-66. PMID: 1446455.
- Pedrejón E., (2016) "Estudio dinámico del comportamiento de un robot ápedo modular e hiper-redundante" Trabajo de fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Przekop, R.E.; Kujawa, M.; Pawlak, W.; Dobrosielska, M.; Sztorch, B.; Wieleba, W. (2020), "Graphite Modified Polylactide (PLA) for 3D Printed (FDM/FFF) Sliding Elements" Polymers, 12, 1250.
- Punning A., (2007) "Electromechanical Characterization of Ion Polymer Metal Composite Sensing Actuators," Ph.D. dissertation, Dept. of Physics, Tartu University, Estonia.
- Raman JD, Cadeddu JA, Rao P, Rane A, (2008) "Single-incision laparoscopic surgery: initial urological experience and comparison with natural-orifice transluminal endoscopic surgery", BJU International, Vol. 101, No. 12, pp. 1493-1496.
- Rassmussen, L., Erickson C.J., Meixler L.D. (2009) "The development of electrically driven mechanochemical actuators that act as artificial muscle" Proceedings of the SPIE Electroactive Polymers and Devices (EAPAD), vol. 7287, pp. 7287E-13.

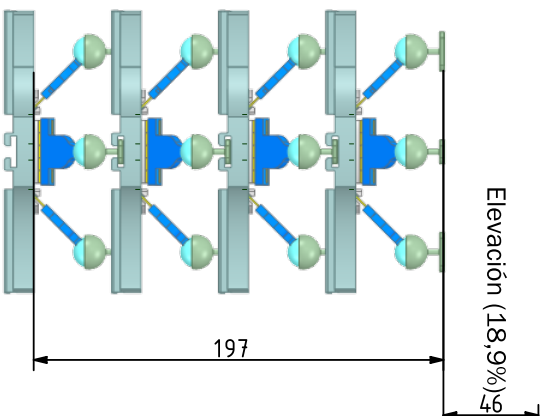
- Ricci P. R, Lema, V., Solà, J., Pardo, E. Guiloff, (2008) “Desarrollo de la cirugía laparoscópica: pasado, presente y futuro. Desde Hipócrates hasta la introducción de la robótica en laparoscopia ginecológica”, Revista chilena de Obstetricia y Ginecología, Vol. 73, No.1, pp. 63-75.
- Romasanta L. J., Leret P., Casaban L., et al., (2012) “Towards materials with enhanced electro-mechanical respons: CaCuTi4012-polydimethylsiloxane composites” Journal of Materials Chemistry 22, 24705-24712.
- Rubinstein L. (2000) “A practical nanorobot for treatment of various medical problems. Presented at Eighth Foresight Conf. Mol. Nanotechnol.” Bethesda, Md.
- Ruiz D. Pérez V., Betancur M., Bustamante J., (2010) “Cirugía robótica mínimamente invasiva: análisis de fuerza y par” Revista Ingeniería Biomédica, Vol. 4, No. 8, pp. 84-92.
- Sackier JM., Wang J., (1994) “Robotically assisted laparoscopic surgery: from concept to development.” Surg. Endosc. 8:63-66.
- Sakar M., Huang Y., Mao A., Petruska J., Qiu F., (2015) “3D Printed Microtransporters: Compound Micromachines for Spatiotemporally Controlled Delivery of Therapeutic Agents”, Advanced Materials 27(42), 6644-6650.
- Samuel M.G., (2013) “Análisis de la cinemática inversa y minimización de errores mediante algoritmos de optimización para un robot hiper-redundante. Trabajo fin de máster, Universidad de Valladolid.
- Shahinpoor M., (2016), “Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs): Smart Multi-Functional Materials and Artificial Muscles Vol.1”, University of Maine, Orono, Maine, USA.
- Shen H., et al., (2007), “Investigation on force characteristic of IPMC artificial muscle”, J. Funct. Mater., 38, 1516.
- Shigley, Joshep E., (2008) “Diseño en la Ingeniería Mecánica”. MacGraw-Hill, 8° Ed.
- Sitti M., Yasa I., Ceylan H. (2017) “3D Chemical Pattering of Micromaterials for Encodad Functionality“ Advanced Materials 29, 1605072.
- Soon M., et al. (2007). “Interpenetrating networks of elastomers exhibiting 300% electrically-induced area strain”. Smart Materials and Structures Volum. 16. S280-287.
- Spinage C., (1994), “Elephants” Princeton University Press, Princenton.
- Stratasys, visitado: (2021), <https://www.stratasys.com/es/polyjet-technology>
- Stuart P., (1991) “Total Design – Integrated Methods for Successful Produc Engineering.
- Su J., Harrison J., Clair T., Bar-Cohen Y., and Leary S., (1999) “Electrostrictive graft elastomers and applications”. MRS Symp. Proceedings, Vol.600, Warrendale, PA, pp. 131–136.
- Swain P., (2003), “Wireless capsule endoscopy”, Gut, vol. 52, pp. iv48-iv50.
- Takagi K., Luo Z. and Asaka K., (2014), “Soft Actuators”, Springer, ISBN 978-981-13-6850-9.

- Taylor R.H., Menciassi A., Fichtinger G., Fiorini P., and Dario P., (2016), “Medical robotics and computer-integrated surgery”, in Handbook of Robotics, Springer. pp 1658.
- Tendick F., Sastry S.S., Fearing R.S., Cohn M.. (1998) “Applications of micromechatronics in minimally invasive surgery” IEEE/ASME Trans. Mechatron. 3(1):34–42.
- Tobergte A, Helmer P., Hagn U., Rouiller P., Thielmann S. et al., (2011), “The sigma 7 haptic interface for MiroSurge: A new bi-manual surgical console”, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, USA.
- Torre L., et al., (2012), “Global cancer statistics”, CA. Cancer J. Clin., 65(2):87-108.
- Twinanda A., Shehata S., Mutter D., Marescaux J., de Mathelin M., Padoy N. (2017) “EndoNet: a deep architecture for recognition tasks on laparoscopic videos” IEEE Trans. Med. Imaging 36:86–97.
- Verger-Kuhnke A.B. et al. (2007) “Actas Urológicas Españolas” 31(5):437/444.
- Viton, Chemours Company, visitado: (2021), <https://www.chemours.com/en>.
- Walker R., (2001) “The First Laparoscopic Cholecystectomy. Journal of The Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons” 5(1):89-94.
- Wang H., Cho J., Song D., Jang J., Jho J., and Par J., (2017), “High-performance electroactive polymer actuators based on ultrathick ionic polymer–metal composites with nanodispersed metal electrodes ACS”, Appl. Mater. Interfaces 9, 21998–2005.
- Wilson Y. J., y otros, (2020) “3D-Printed Micromotors for Biomedical Applications, Adv. Mater. Technol.” 5, 2000435.
- Yang J., Peña E., Potrazt J., Beck S., Abdel-Malek K., (2006), “Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot”, Advanced Robotics, 20:6, 631-659.
- Yang L., Zhang D., Zhang X., Tian A., Miaomiao H., (2020), “Property of ionic polymer metal composite with different thicknesses based on solution casting technique”, Int. J. Mod. Phys. B, 34 2050263.
- Zhang Q.M., (1998) “Giant Electrostriction and Relaxor Ferroelectric Behavior in Electron-Irradiated Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene)Copolymer” Science, 280(5372):2101-4.

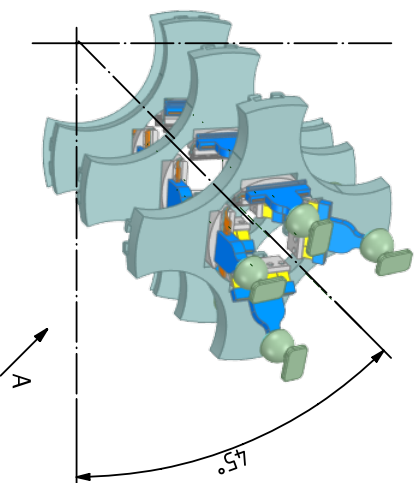
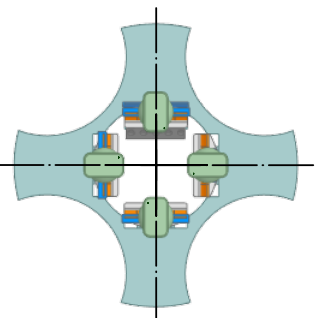
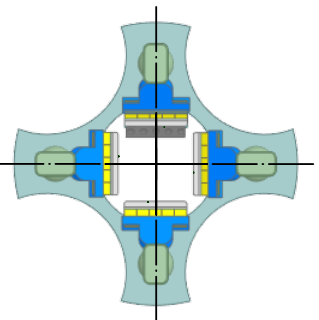
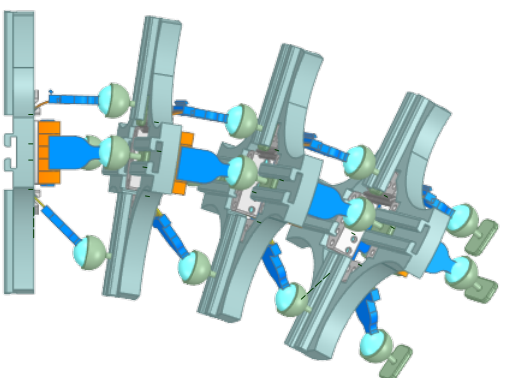
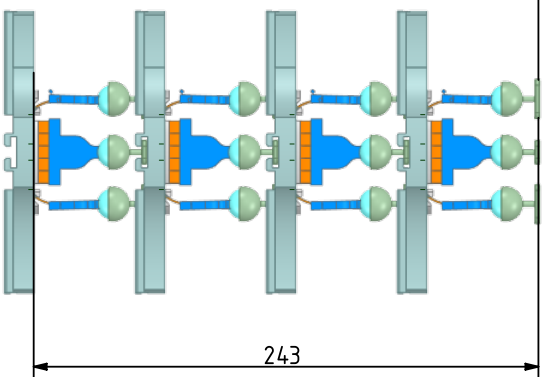
ANEXO I



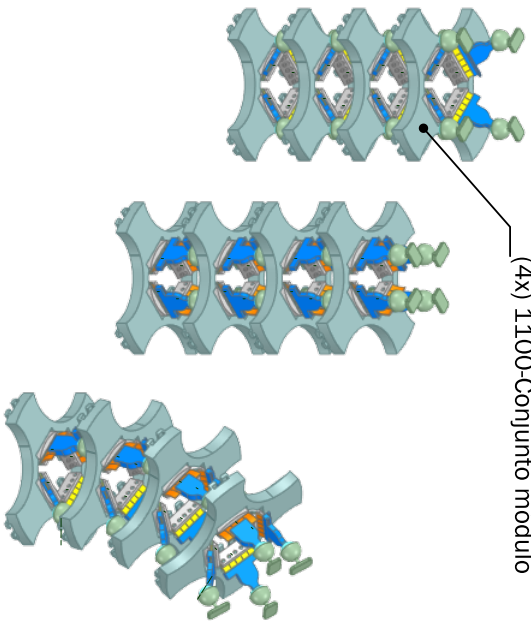
Plano de giro Visto por A



Elevación (18,9%)₉₆



(4x) 1100-Conjunto módulo

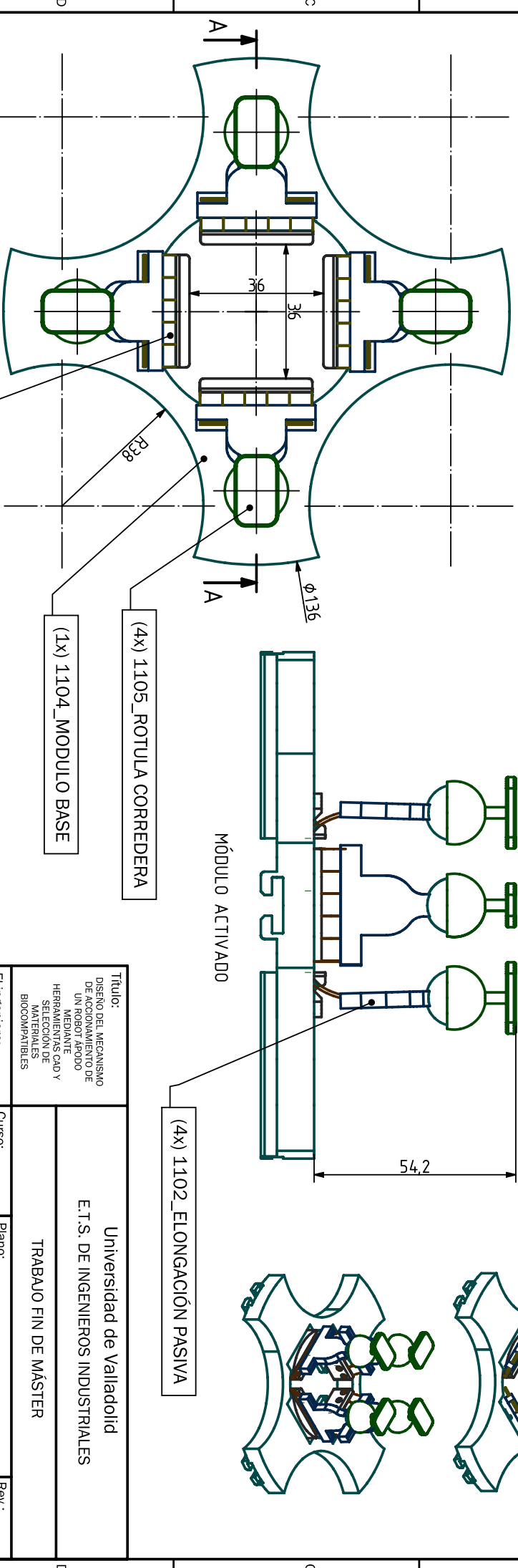
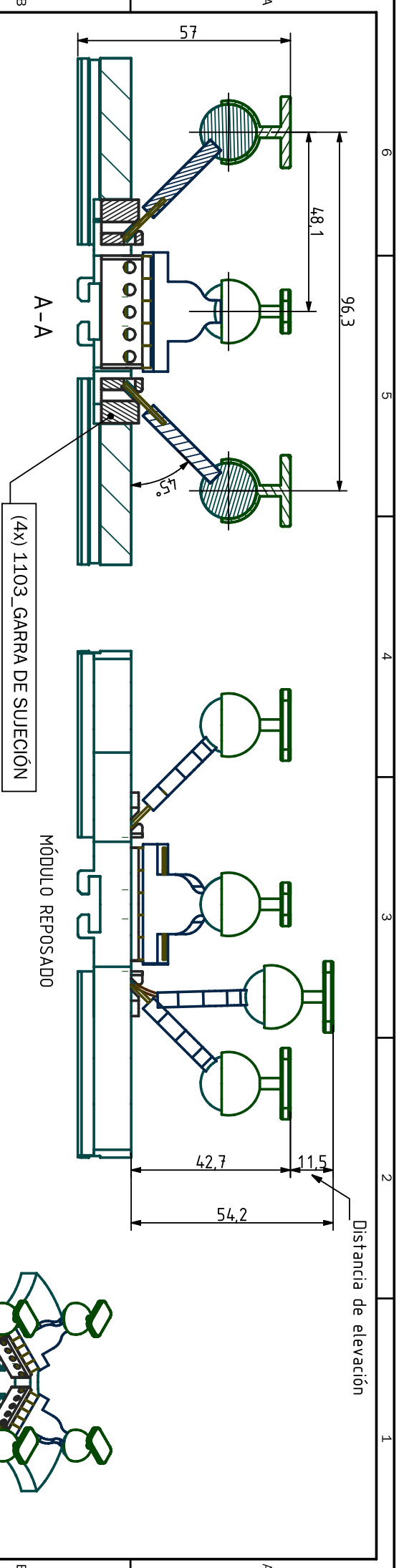


Escala (1:4)

NOTA: Cotas en unidades de medida

Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT APDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCIÓN DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES TRABAJO FIN DE MÁSTER	
El Ingeniero: Alvaro Campo Arias	Curso: 2020-2021	Plano: 1000	Rev.: 1

Escala 2:5	Denominación CONJUNTO-4 MÓDULOS COMPLETOS	Fecha: Septiembre-2021
----------------------	---	----------------------------------



Título:
DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT APDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCIÓN DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES

Universidad de Valladolid
E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

El ingeniero:
Álvaro Campo Arias

Curso:
2020-2021

Plano:
1100

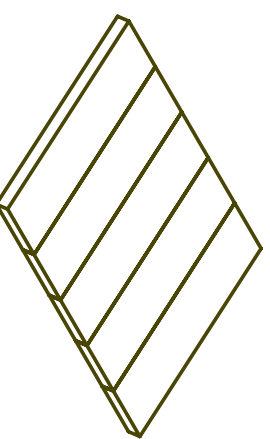
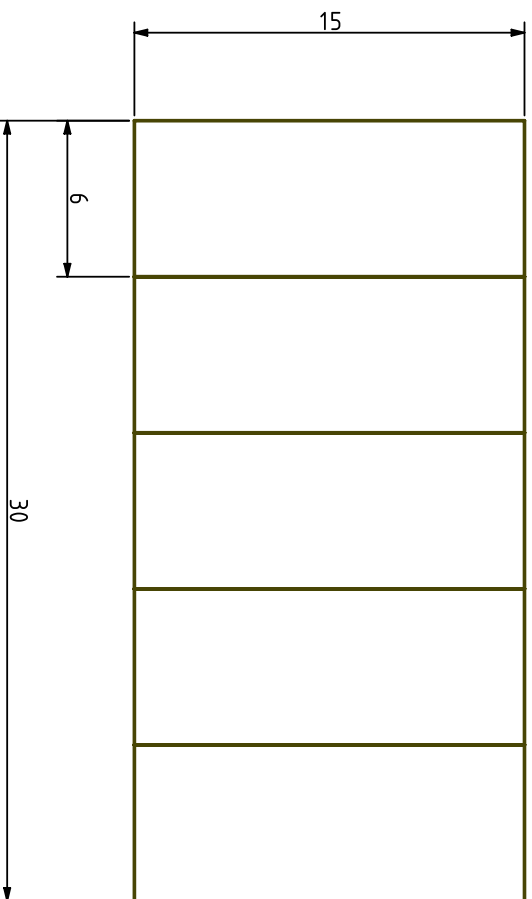
Rev.:
1

Escala:
1:1

Denominación:
CONJUNTO-MÓDULO

Fecha:
Septiembre-2021

NOTA: Cotas en unidades de medida



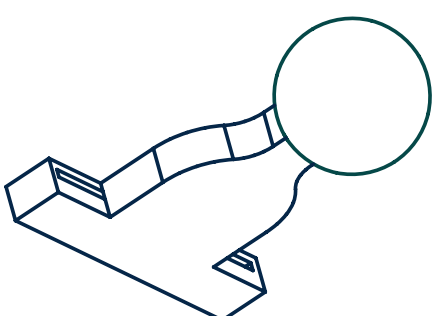
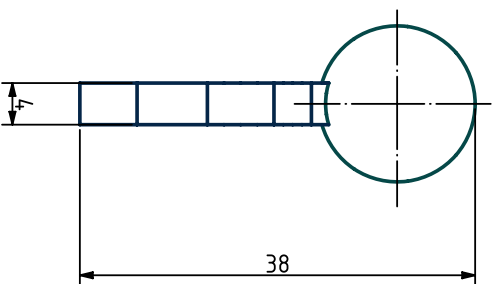
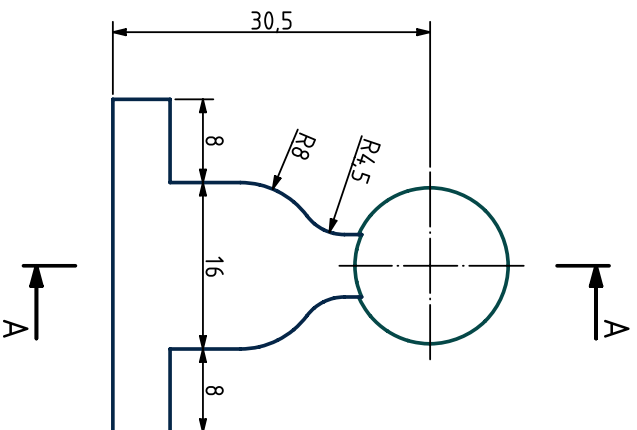
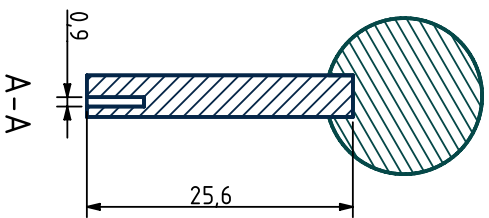
6 5 4 3 2 1

NOTA: Cotas en unidades de medida

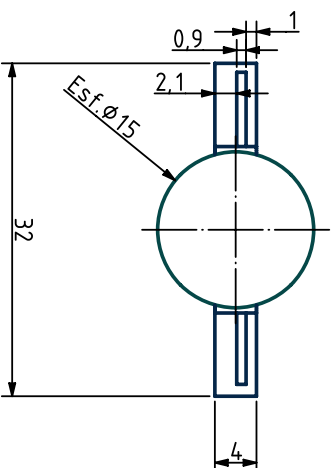
Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ARDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCION DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES	
El Ingeniero: Alvaro Campo Añas		TRABAJO FIN DE MÁSTER	

Curso:	2020-2021	Plano:	1101	Rev.:	1
Escala:	5:1	Denominación:	ACTUADOR DE IPMC	Fecha:	Septiembre-2021

D C B A

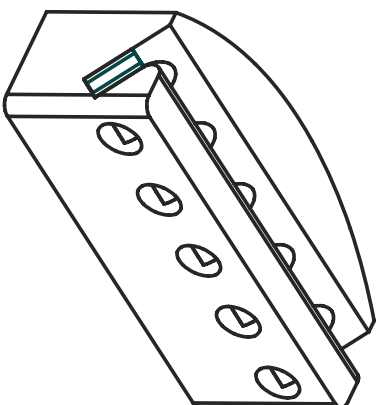
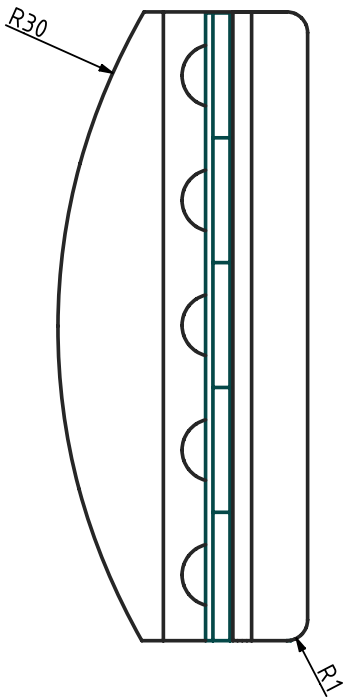
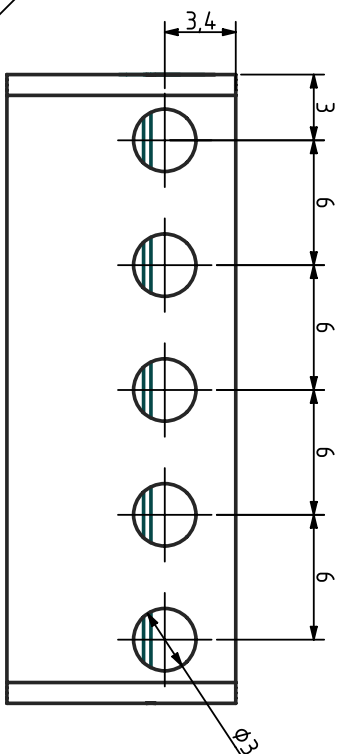
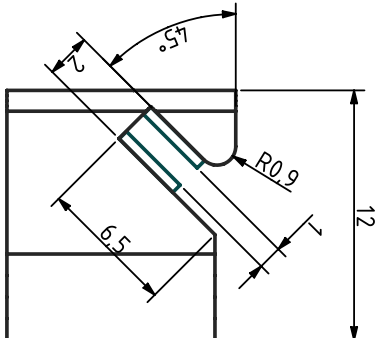
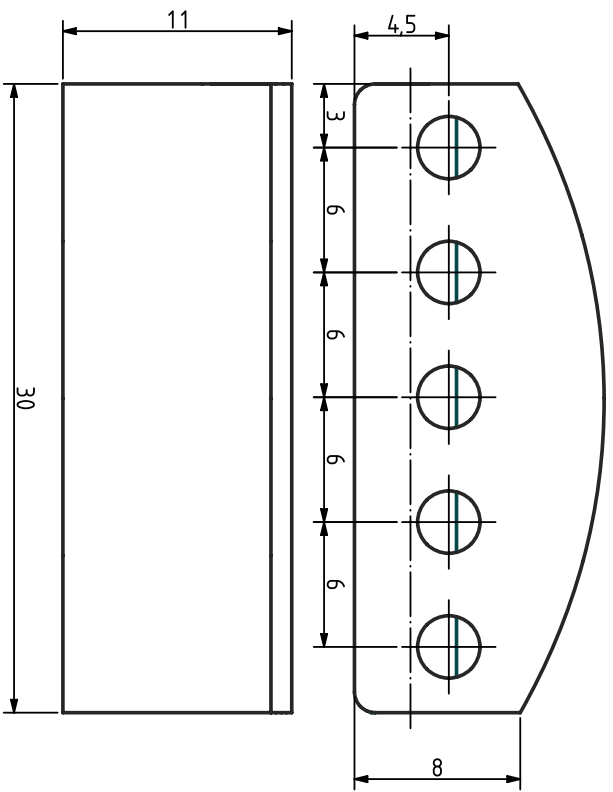


(2:1)

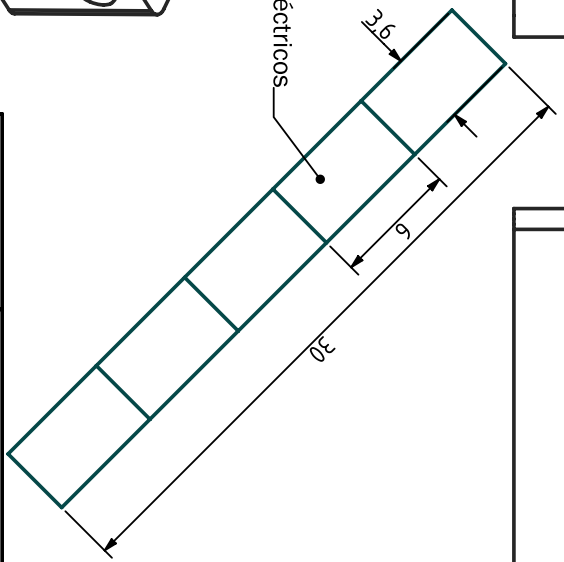


NOTA: Cotas en unidades de medida

Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT APDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCIÓN DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES	
El Ingeniero: Alvaro Campo Arias		TRABAJO FIN DE MÁSTER	
Curso: 2020-2021	Plano: 1102	Rev.: 1	
Escala: 2:1	Denominación: ELONGACIÓN PASIVA	Fecha: Septiembre-2021	



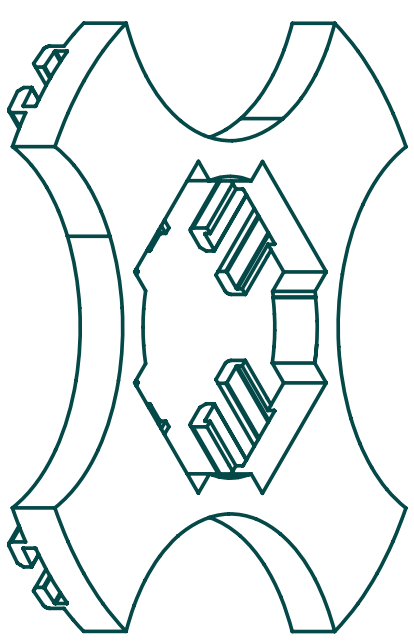
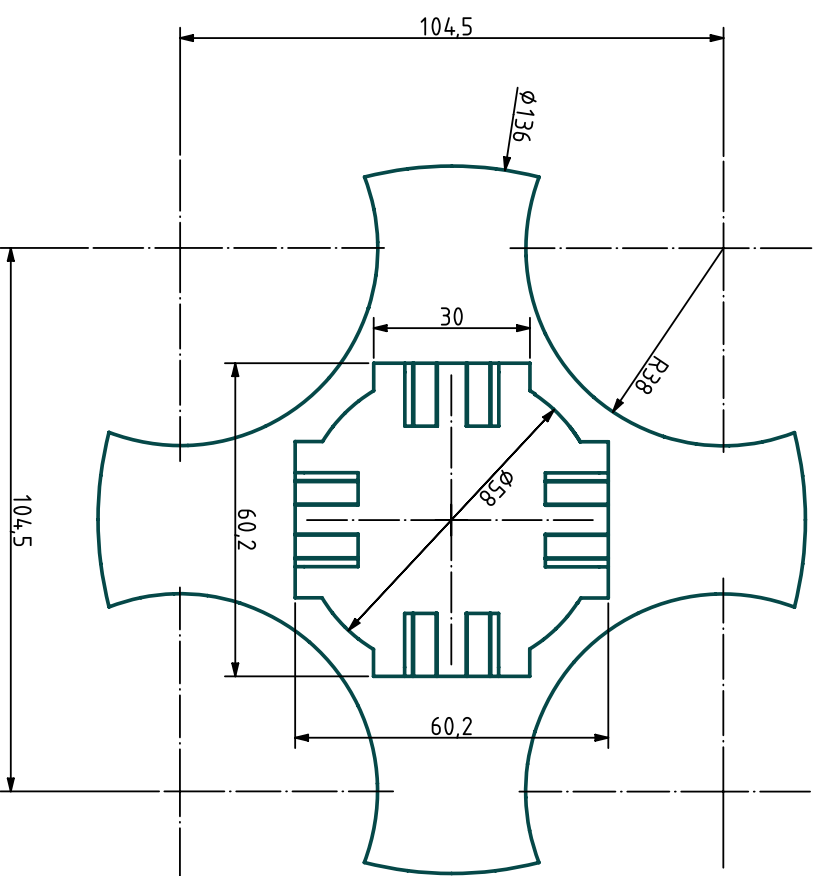
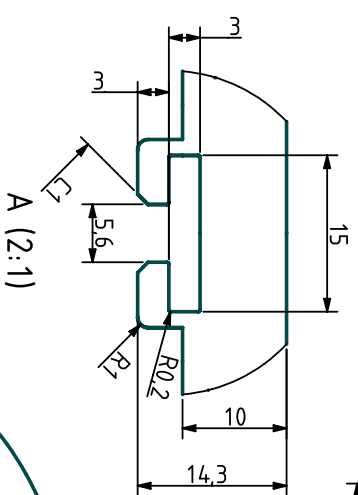
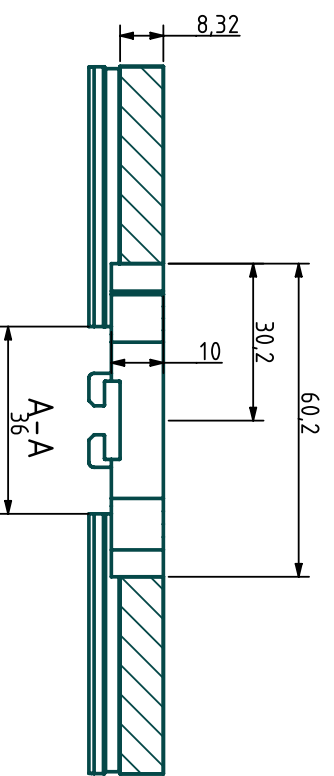
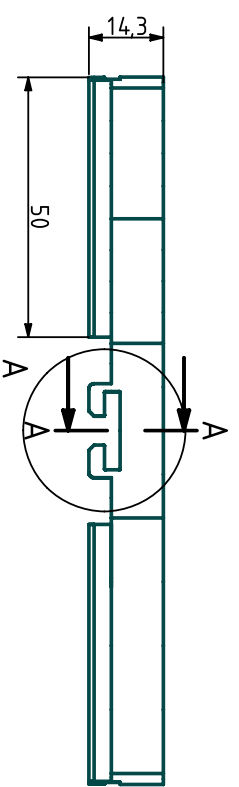
Contactos eléctricos



NOTA: Cotas en unidades de medida

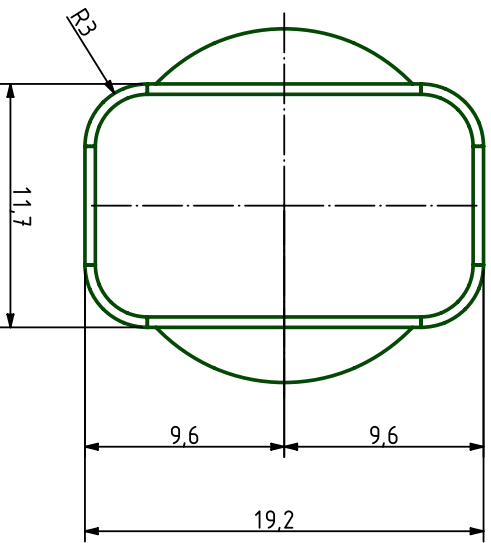
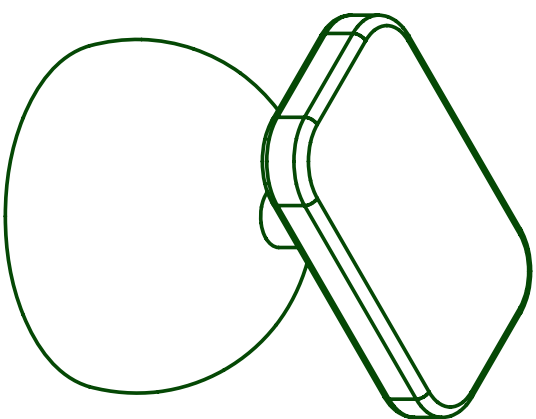
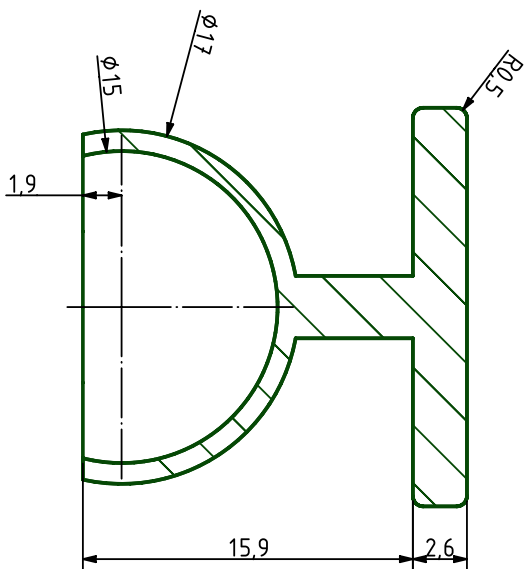
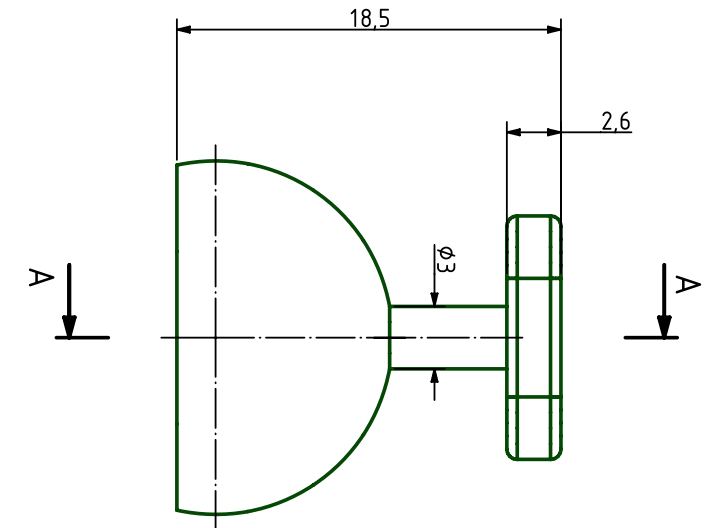
Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ARDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCIÓN DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES	
TRABAJO FIN DE MÁSTER			

El ingeniero: Alvaro Campo Arias	Curso: 2020-2021	Plano: 1103	Rev.: 1
Escala: 4:1	Denominación: GARRA DE SUJECCIÓN	Fecha: Septiembre-2021	



NOTA: Cotas en unidades de medida

Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ARDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCION DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Curso: 2020-2021		Plan: 1104		Rev.: 1	
El Ingeniero: Alvaro Campo Arias		Escala: 1:1		Denominación: MODULO BASE		Fecha: Septiembre-2021	
Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES				TRABAJO FIN DE MÁSTER			



NOTA: Cotas en unidades de medida

Título: DISEÑO DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE UN ROBOT ARDO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD Y SELECCION DE MATERIALES BIOCOMPATIBLES		Universidad de Valladolid E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES	
TRABAJO FIN DE MÁSTER			

El Ingeniero: Alvaro Campo Arias	Curso: 2020-2021	Plano: 1105	Rev.: 1
Escala: 4:1	Denominación: RÓTULA CORREDEERA	Fecha: Septiembre-2021	