

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***DESARROLLO DE UN MODELO DE
SISTEMATIZACIÓN PARA EL PROCESO
DE DISEÑO DE MECANISMOS
RECONFIGURABLES***

Alumno: Rodríguez, Prado, Andoni

Directora: Urizar, Arana, Mónica

Curso: 2018-2019

Fecha: lunes, 24, junio, 2019

Índice

1. Resumen trilingüe.....	3
Resumen.....	3
Laburpena.....	4
Abstract.....	5
2. Lista de figuras, tablas y acrónimos	6
2.1 Lista de figuras	6
2.2 Lista de tablas	7
2.3 Lista de acrónimos	7
3. Introducción	8
4. Contexto	10
5. Objetivos y alcance.....	11
6. Beneficios del proyecto.....	13
6.1 Beneficios de divulgación	13
6.2 Beneficios técnicos.....	13
7. Estado del Arte	15
7.1 Robots en el sector industrial	15
7.1.1 Robots serie.....	15
7.1.1.1 Robots lineales.....	16
7.1.1.2 Robots SCARA.....	17
7.1.1.3 Robots articulados.....	17
7.1.2 Manipuladores paralelos	18
7.1.2.1 Manipulador Gough-Stewart.....	19
7.1.2.2 Robot Delta	19
7.2 Mecanismos reconfigurables	20
7.2.1 Conceptos básicos.....	20
7.2.3 Mecanismos reconfigurables en el sector industrial	21
7.2.3 Mecanismos reconfigurables en el sector espacial	22
7.3 Crítica del Estado del Arte	23
8. Metodología	24
8.1 Bloque I.....	27
8.1.1 Definición de las configuraciones.....	27
8.1.1.1 Planteamiento teórico.....	27

8.1.1.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA	28
8.1.2 Análisis cinemático	30
8.1.2.1 Planteamiento teórico.....	30
8.1.2.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA – Configuración 1.....	31
8.1.3 Análisis dinámico	38
8.1.3.1 Planteamiento teórico.....	38
8.1.3.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA – Configuración 1.....	38
8.2 Bloque II.....	41
8.2.1 Diseño de junta reconfigurable.....	41
8.2.1.1 Planteamiento teórico.....	41
8.2.1.2 Ejemplo de aplicación de junta activa: Robot SCARA	42
8.2.1.3 Ejemplo de aplicación de junta pasiva: Manipulador paralelo de 3 gdl..	47
8.2.2 Determinación de las restricciones geométricas	53
8.2.2.1 Planteamiento teórico.....	53
8.2.2.2 Ejemplo de aplicación: Robot con juntas prismáticas bloqueables	53
8.3 Bloque III.....	57
8.3.1 Planteamiento teórico	57
9. Planificación.....	59
9.1 Tareas.....	59
9.2 Hitos.....	63
9.3 Diagrama de Gantt	63
10. Aspectos económicos	65
10.1 Presupuesto	65
10.2 Descargo de gastos.....	66
11. Análisis de riesgos	68
12. Conclusiones	70
Bibliografía.....	72
Anexo I: Normativa aplicable	74
Anexo II: Planos.....	75
Anexo III: Planificación.....	78

1. Resumen trilingüe

Resumen

En la presente memoria se desarrolla un trabajo sobre mecanismos reconfigurables, los cuales consisten en mecanismos capaces de alcanzar diferentes configuraciones a partir de la modificación del número, características y/o de la disposición relativa de sus elementos y/o pares cinemáticos con objeto de desempeñar diversas funciones. Debido a las ventajas que ofrece su polivalencia, estos mecanismos resultan muy interesantes para diferentes sectores, entre los cuales destacan la industria y el sector espacial. Con el fin de sistematizar el proceso de diseño de los mismos, se propone una metodología, dividida en tres bloques: en el primer bloque, se plantea la definición y análisis cinemático y dinámico de las configuraciones; en el segundo, el desarrollo del mecanismo de reconfiguración; y, en el tercero, la determinación del modo de activación de dicha reconfiguración. Junto a la descripción de los bloques propuestos, se proporcionan y desarrollan ejemplos de aplicación que sirvan para facilitar la comprensión de los conceptos expuestos.

Laburpena

Dokumentu honetan mekanismo birkonfiguragarriei buruzko lana garatzen da, bere elementu edota junta zinematikoen kopurua, ezaugarriak edota antolaketa erlatiboa eraldatuz konfigurazioz alda daitezkeen eta, ondorioz, hainbat funtzio burutu ditzaketen mekanismoei buruz, hain zuzen ere. Haien balio-aniztasunak eskaintzen dituen abantailak direla eta, mekanismo hauek oso interesgarriak dira zenbait arlotarako, industria eta sektore espazialerako, batez ere. Diseinu prozesua sistematizatzeko xedez, metodologia bat proposatzen da, hiru bloketan banatuta: lehenengo blokean, konfigurazioen definizioa eta analisi zinematikoa eta dinamikoa planteatzen da; bigarrenean, birkonfigurazio mekanismoaren garapena; eta, hirugarrenean, birkonfigurazio horren aktibazio moduaren zehaztapena. Proposatutako blokeen deskribapenarekin batera, azaldutako kontzeptuen ulermena errazteko asmoz gauzatutako adibideak aurkezten dira.

Abstract

In this document a project about reconfigurable mechanisms is developed, which consist of a particular kind of mechanism capable of reaching different configurations by changing the number, characteristics and/or the relative disposition of their elements and/or kinematic joints in order to perform several functions. Due to the advantages offered by the polyvalence of these mechanisms, they are very interesting for different sectors, among which the industry and the space sector stand out. Aiming for the systematization of the design process of this type of mechanism, a methodology is proposed, divided in three main blocks: in the first block, the definition and study of the kinematics and dynamics of the configurations is set out; in the second one, the development of the reconfiguration mechanism; and, in the third one, the determination of the reconfiguration trigger. Along with the description of the blocks suggested, developed examples of application are provided, so as to help the understanding of the concepts involved.

2. Lista de figuras, tablas y acrónimos

2.1 Lista de figuras

Figura 1. Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT).....	12
Figura 2. Robot Cartesiano	16
Figura 3. Robot Gantry	16
Figura 4. Robot SCARA.....	17
Figura 5. Robot articulado 6 gdl	18
Figura 6. Robot articulado redundante.....	18
Figura 7. Plataforma Gough-Stewart.....	19
Figura 8. Manipulador paralelo Delta	19
Figura 9. Manipulador paralelo reconfigurable con 3 gdl.....	21
Figura 10. Configuraciones de la junta reconfigurable	22
Figura 11. Proceso de reconfiguración de manipulador con juntas cilíndricas pasivas	23
Figura 12. Diagrama del modelo de sistematización	25
Figura 13. Esquema Robot SCARA	28
Figura 14. Configuración 1.....	29
Figura 15. Configuración 2.....	29
Figura 16. Esquema cinemático configuración 1	31
Figura 17. Esquema robot 2 gdl.....	33
Figura 18. Representación de las distintas alternativas	35
Figura 19. Singularidades de la configuración 1.....	37
Figura 20. Esquema para el análisis dinámico	38
Figura 21. Junta reconfigurable para robot SCARA	42
Figura 22. Chavetero de los ejes acoplados a los engranajes	43
Figura 23. Junta esférica y acoplamientos	43
Figura 24. Funcionamiento de la configuración 1	44
Figura 25. Conexión de C y desconexión de A	44
Figura 26. Colocación del eslabón 3 a 90°.....	45
Figura 27. Conexión de B y desconexión de C	45
Figura 28. Funcionamiento de la configuración 2.....	46
Figura 29. Manipulador paralelo de 3 gdl.....	47
Figura 30. Ejes de rotación de junta esférica	48
Figura 31. Junta reconfigurable para manipulador paralelo.....	48
Figura 32. Sección de junta reconfigurable 1: configuración de traslación pura.	49
Figura 33. Sección de junta reconfigurable 2: configuración de transición.	50
Figura 34. Sección de junta reconfigurable 3: configuración de rotación pura.....	51
Figura 35. Manipulador paralelo con juntas reconfigurables	52
Figura 36. Configuración de traslación pura.....	52
Figura 37. Configuración de rotación pura	52
Figura 38. Configuración principal.....	54
Figura 39. Configuración auxiliar	54
Figura 40. Maniobra de conexión de los brazos robóticos	55
Figura 41. Alargamiento de los brazos robóticos	56
Figura 42. Desconexión de efectores finales. Configuración final.	56
Figura 43. Sistema de control para la reconfiguración	58
Figura 44. Diagrama de Gantt.....	64
Figura 45. Vistas de la junta reconfigurable para el robot SCARA	75

Figura 46. Vistas de la junta reconfigurable del manipulador paralelo del Bloque II	76
Figura 47. Vistas del manipulador paralelo reconfigurable del Bloque II	77

2.2 Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros D-H configuración 1	31
Tabla 2. Desplazamientos angulares	55
Tabla 3. Presupuesto.....	65
Tabla 4. Descargo de gastos	66
Tabla 5. Matriz probabilidad-impacto	69
Tabla 6. Organización de tareas	78

2.3 Lista de acrónimos

TFG	8
GDL..... 14, 15, 17, 17, 19, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 38, 41, 47, 53, 54, 55	
EDT	8, 12, 68
WBS	12, 59
D-H.....	22, 31, 32

3. Introducción

El presente TFG (Trabajo de Fin de Grado) se titula: “Desarrollo de un modelo de sistematización para el proceso de diseño de mecanismos reconfigurables”. Como indica dicho título, el proyecto recogido en esta memoria se fundamenta en una propuesta relativa al proceso de diseño de mecanismos reconfigurables, los cuales se basan en mecanismos capaces de alcanzar diferentes configuraciones a partir de la modificación del número, características y/o de la disposición relativa de sus elementos y/o pares cinemáticos con objeto de desempeñar diversas funciones.

En primer lugar, se presenta el contexto del trabajo con el fin de ubicar el mismo dentro del ámbito de la ingeniería. Acto seguido, se exponen los objetivos que persigue este proyecto, así como el alcance del mismo, el cual se basa en el conjunto de tareas requeridas para la consecución de los objetivos propuestos y se complementa con un esquema EDT (Estructura de Descomposición de Trabajo). Posteriormente, se realiza una reflexión sobre los beneficios que aporta la elaboración de este trabajo en diferentes ámbitos.

A continuación, se realiza el análisis del Estado del Arte en base al proceso de investigación realizado, en el que se describen algunos de los avances tecnológicos y conceptos más relevantes en la materia. Este apartado se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta una clasificación y descripción de los robots industriales más utilizados actualmente, diferenciando entre robots serie y manipuladores paralelos; en siguiente lugar, se definen y describen algunos conceptos técnicos importantes sobre los mecanismos reconfigurables y se citan algunos desarrollos destacables en aquellos orientados al sector industrial y al sector espacial; finalmente, se realiza una crítica del Estado del Arte en base al análisis realizado.

Una vez introducidos los antecedentes del proyecto, se prosigue con la descripción de la metodología propuesta, la cual se basa en explicar y detallar las características del modelo de sistematización propuesto. Para dicho fin, la metodología se estructura en tres bloques de contenido y en cada uno de ellos se realiza un planteamiento teórico seguido de ejemplos desarrollados y representativos del objeto del bloque en cuestión. En el primer bloque, se plantea la definición de las configuraciones a alcanzar por el mecanismo a diseñar, las cuales se conciben en base a la aplicación a la que vaya a ser destinado. Tras ello, en el mismo apartado, se propone el estudio del comportamiento del mecanismo reconfigurable mediante el análisis cinemático y dinámico para cada una de las configuraciones definidas. El objeto del segundo bloque consiste en determinar el mecanismo de reconfiguración, lo cual se sugiere efectuar mediante el diseño de una junta reconfigurable o la imposición de restricciones geométricas. Por último, el tercer bloque trata sobre la necesidad de determinar el modo de activación del mecanismo de reconfiguración.

Tras exponer la metodología, se presenta la planificación del proyecto, describiendo las diferentes tareas e hitos que abarca y realizando su representación gráfica en un diagrama de Gantt en base a su disposición cronológica. Seguidamente, se detallan y comentan los aspectos económicos, proporcionando tanto el presupuesto como el descargo de gastos relativos a la ejecución del trabajo. Por último, se recogen las principales conclusiones extraídas del proyecto.

Asimismo, al final del presente documento se incluye, por una parte, la bibliografía de las fuentes de las cuales se ha obtenido la información necesaria para la elaboración del proyecto y, por otra parte, anexos en los que se recogen varias vistas de mecanismos y algunos de sus componentes y la normativa vigente aplicable al campo de los mecanismos reconfigurables.

4. Contexto

El diseño de mecanismos reconfigurables es un tema ubicado dentro del ámbito de la ingeniería mecánica, concretamente dentro de la Teoría de Máquinas y Mecanismos. Se trata de un campo que, si bien comenzó a investigarse hace más de dos décadas, aún sigue siendo objeto de estudio debido a la gran variedad de posibilidades que ofrece y a los beneficios que la proliferación de su conocimiento acarrea. La importancia de los mecanismos queda patente en multitud de sectores, particularmente en la industria, y la idea de dotar a dichos mecanismos de la capacidad de reconfiguración despierta el interés de numerosas empresas.

Es importante entender que el diseño de mecanismos reconfigurables comparte determinados aspectos comunes al diseño de cualquier tipo de mecanismo. El principal factor diferenciador de los mecanismos reconfigurables es que cuentan con una estrategia de reconfiguración, que les permite alterar el número, características y/o la disposición relativa de sus elementos y/o pares cinemáticos y, por tanto, reproducir nuevos movimientos. De ese modo, podría decirse que un mecanismo reconfigurable es un derivado de un mecanismo convencional, al que se le ha proporcionado la posibilidad de permutar entre unas determinadas configuraciones.

Asimismo, el tema en cuestión constituye una relevante línea de investigación del grupo CompMech, grupo de investigación perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV-EHU). CompMech es un grupo dedicado al estudio del campo de la Teoría de Mecanismos y Máquinas, Robótica y Mecánica Computacional y, hoy en día, su trabajo está enfocado en el diseño de manipuladores paralelos. Los miembros que lo componen desarrollaron un software denominado GIM, el cual consiste en una herramienta para el análisis cinemático y simulación de movimiento de mecanismos planos y espaciales, síntesis de mecanismos planos y análisis estáticos de estructuras planas. Cabe destacar que en la realización de este trabajo se ha empleado, entre otros, el citado software, con objeto de facilitar el estudio de la cinemática de los mecanismos planteados en la metodología.

5. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar y proponer una metodología base que permita sistematizar el proceso de diseño de mecanismos reconfigurables. La idea se basa en identificar y describir las diferentes fases que componen el diseño, proporcionando, para ello, ejemplos de aplicación desarrollados que permitan facilitar su comprensión, así como establecer una secuencia lógica de las mismas. Con dicha metodología se persiguen los siguientes objetivos:

- Por una parte, el modelo de sistematización propuesto pretende facilitar en gran medida el proceso de diseño y constituir una herramienta útil para concebir cualquier tipo de mecanismo reconfigurable. De esa manera, se trata de promover la creación de nuevos mecanismos reconfigurables y su implementación en diferentes sectores en los que podrían suponer un avance tecnológico de gran valor, especialmente en la industria y el sector espacial.
- Por otra parte, el procedimiento sistemático planteado busca constituir una introducción a los fundamentos de los mecanismos reconfigurables, así como un medio de proliferación de conocimiento técnico de este ámbito. Asimismo, generando este contenido se pretende facilitar y fomentar la realización de trabajos de investigación que permitan innovar y desarrollar nuevos avances en el campo de los mecanismos reconfigurables.

A continuación, se debe definir el alcance del proyecto, es decir, el conjunto de tareas que han de llevarse a cabo con el fin de elaborar un trabajo que reúna las características y requisitos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos anteriormente.

En primer lugar, se debe realizar una labor de investigación que permita adquirir los conocimientos técnicos relativos a la materia necesarios para poder asentar una base sobre la que proceder con el desarrollo del trabajo. Para ello, el primer paso consiste en buscar y recopilar información del mayor número de fuentes posible y contrastarla para poder así identificar la información de calidad. Tras haberse documentado, se requiere realizar un análisis del estado del arte en base a la información procesada, así como reflexionar sobre las oportunidades de mejora en el campo en cuestión.

Posteriormente, se han de establecer y definir las diferentes etapas, divididas en bloques, que constituirán la metodología propuesta en este trabajo. Para dicho fin, se debe realizar, por un lado, un planteamiento teórico general de cada uno de los bloques establecidos. Por otro lado, se han de desarrollar en profundidad ejemplos de aplicación que sirvan como apoyo para la comprensión y visualización de los conceptos expuestos en dichos bloques.

Asimismo, se deben abordar los aspectos relativos a la gestión y administración del proyecto. Se deben determinar, por tanto, el alcance y planificación de las distintas tareas y realizar un análisis de riesgos y aspectos económicos del proyecto. Finalmente, todo el contenido del proyecto deberá ser organizado y redactado en los apartados correspondientes de la memoria del proyecto.

El siguiente esquema muestra la Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT), también conocida por su nombre en inglés, Work Breakdown Structure (WBS), la cual se ha empleado para organizar y representar gráficamente el alcance del proyecto definido. En dicho esquema puede apreciarse la composición y jerarquía de las diferentes etapas y tareas que conforman el proceso de elaboración del presente trabajo.

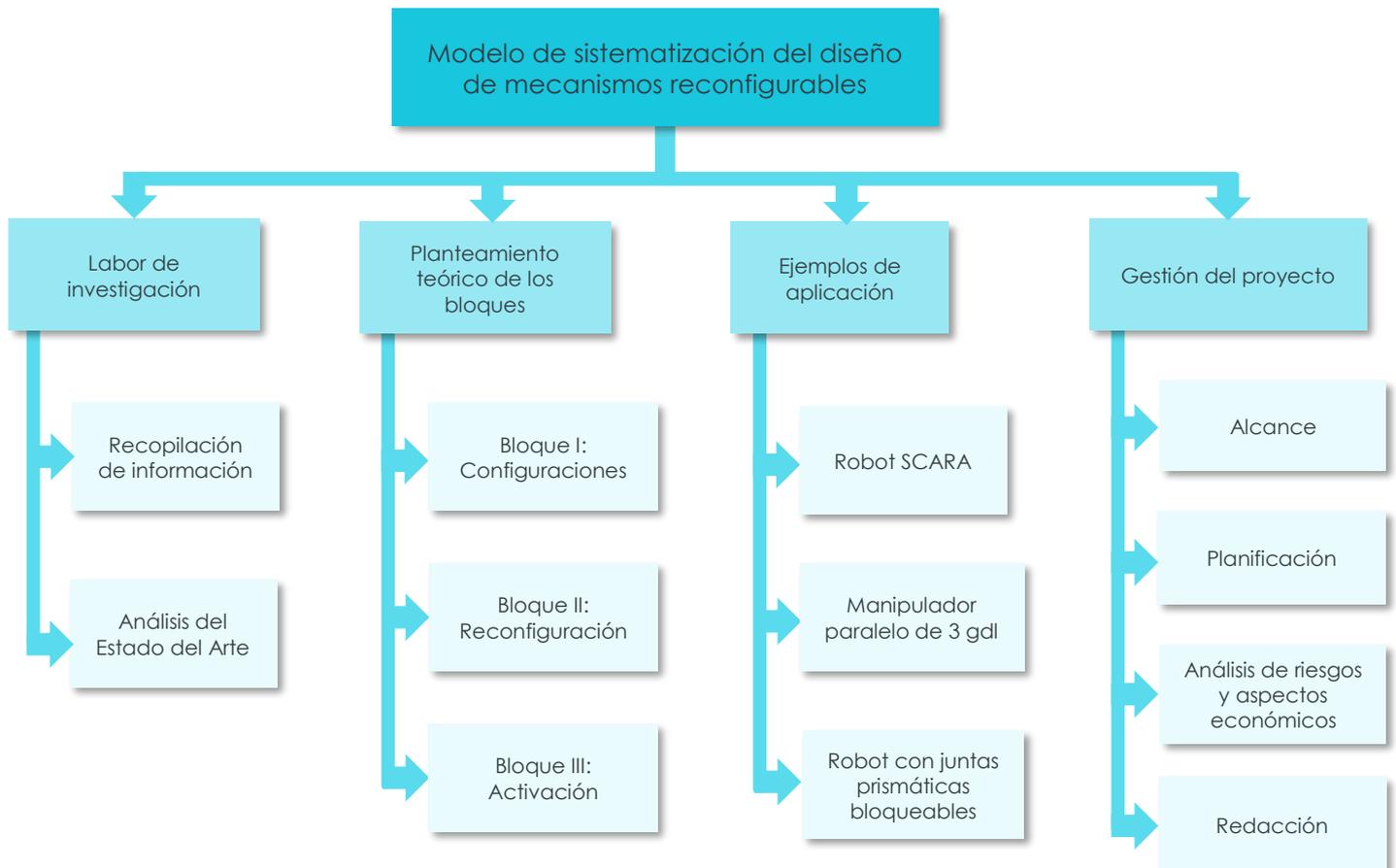


Figura 1. Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT)

6. Beneficios del proyecto

En este apartado se contemplan los beneficios que aporta el proyecto, los cuales se han clasificado en dos categorías: beneficios asociados a la divulgación de conocimiento y beneficios que ofrece el uso de mecanismos reconfigurables.

6.1 Beneficios de divulgación

En cuanto a los beneficios relativos a la divulgación, principalmente se debe destacar que este trabajo compone un instrumento que, al ofrecer un procedimiento sistemático y ordenado, facilita y orienta el proceso de diseño de mecanismos reconfigurables, por lo que favorece la creación de los mismos para desempeñar funciones en diferentes ámbitos de la sociedad. Del mismo modo, los diferentes ejemplos de aplicación desarrollados en los bloques de la metodología propuesta, no solo sirven para ilustrar las diferentes etapas del procedimiento, sino que también pueden ser fuente de inspiración para nuevas invenciones. Asimismo, el contenido de este trabajo resulta interesante como introducción a las bases de los mecanismos reconfigurables y como medio de difusión de conocimiento sobre la materia, y también promueve y sirve como apoyo a futuras investigaciones.

6.2 Beneficios técnicos

Al favorecer la creación e integración de mecanismos reconfigurables en diferentes sectores, gran parte de los beneficios que aporta este proyecto radica en el conjunto de utilidades que ofrece el uso de estos mecanismos. Cabe decir que, al igual que el diseño de los mecanismos tradicionales, el diseño de los mecanismos reconfigurables se aborda en función de las necesidades y particularidades de la aplicación a la que deban ser destinados, por lo que las características deseadas en dichos mecanismos variarán en base a las funciones que deban desempeñar y, por tanto, conviene identificar los beneficios que aportan según el ámbito y las condiciones en las que operarán.

Unas de las principales aplicaciones de los mecanismos reconfigurables previstas para el futuro residen en los procesos industriales, donde su implementación ofrece, entre otras, las siguientes ventajas: se consigue mayor polivalencia, ya que un único mecanismo es capaz de desempeñar diversas tareas y operaciones, y se dota al sistema productivo de una mayor capacidad de adaptación y flexibilidad ante las demandas; suponen una reducción en costes y espacio, puesto que se requieren menos mecanismos o mecanismos más sencillos para ejecutar un determinado conjunto de tareas; en el caso de ser auto-reconfigurables, la autonomía de estos mecanismos permite prescindir de la necesidad de la intervención de un operario para cambiar la disposición relativa de sus elementos o juntas cinemáticas para alcanzar una nueva configuración, reduciendo, por tanto, posibles imprecisiones de montaje y tiempos de parada de la cadena productiva.

Otro campo en el que este tipo de mecanismos suscita gran interés es el sector aeroespacial y/o la exploración planetaria, en el cual pueden presentar las siguientes ventajas: ligereza, esencial para el ahorro de combustible en el lanzamiento del vehículo espacial; compacidad, permitiendo reducir el espacio necesario para integrarlo en el vehículo de lanzamiento; en el caso de rovers, mayor capacidad de adaptación a terrenos irregulares de superficies planetarias.

Finalmente, es importante destacar que, independientemente de la aplicación objetivo, un mecanismo reconfigurable de movilidad reducida (menos de 6 gdl (grado(s) de libertad)) presenta, frente a mecanismos de 6 gdl o redundantes, una reducción en costes, la posibilidad de realizar operaciones con mayor grado de precisión y fiabilidad y una notablemente mayor simplicidad del modelo cinemático, lo cual facilita en gran medida el análisis cinemático y dinámico.

7. Estado del Arte

7.1 Robots en el sector industrial

La búsqueda de una alta productividad de los procesos industriales, impulsada por la proliferación de la competencia en las últimas décadas, implica la necesidad de alcanzar un alto grado de automatización, para lo cual resulta fundamental la implementación de robots en el sistema productivo. Según la norma ISO 8373:2012, el robot industrial se define como “Manipulador programable en tres ejes o más, controlado automáticamente, reprogramable, multiusos, que puede ser fijo o móvil para el uso en aplicaciones de automatización industrial” [1]. Por tanto, cualquier robot industrial ha de poseer, como mínimo, tres gdl y debe disponer de un control numérico que permita introducir e interpretar programas de interpolación de movimientos en 3 ejes, permitiendo, de ese modo, realizar un control automático del mecanismo.

En función de la arquitectura que presenten, los robots se pueden clasificar en robots serie o manipuladores paralelos. A continuación, se describe cada uno de ellos.

7.1.1 Robots serie

El robot serie es el tipo de robot industrial más utilizado actualmente y su estructura está generalmente compuesta por una serie de elementos rígidos unidos entre sí mediante juntas o pares cinemáticos (tipo R, P, C, U y/o E), actuados por servomotores, que se extienden desde la base hasta el efector final, formando una cadena cinemática abierta [2]. Los servomotores son motores eléctricos regulados electrónicamente y programables mediante un software, que se emplean para materializar el movimiento de los distintos gdl del mecanismo. La estructura en cadena abierta de los robots serie es frecuentemente similar a la de un brazo antropomórfico, en la que se dispone de articulaciones tipo “hombro”, “codo” y “muñeca”, aunque no todos comparten esta característica. En términos generales, los robots serie poseen las siguientes propiedades:

- Ofrecen amplios espacios de trabajo, que varían, evidentemente, en función de las dimensiones de los elementos que los constituyan.
- Al someter a su elemento terminal a una carga, el conjunto de elementos que forman el robot trabajan como vigas en voladizo que transmiten la carga principalmente mediante esfuerzos internos de flexión hasta la base fija. Esto implica que, para conseguir pequeñas deformaciones y que, de esa manera, se logre una gran precisión del posicionamiento del efector final, es necesario un gran momento de inercia de los elementos, lo cual suele ir ligado a masas elevadas. Como consecuencia de ello, los robots serie suelen tener una relación carga/peso bastante reducida.

- Las grandes masas requeridas para garantizar las prestaciones de carga y precisión implican la necesidad de emplear bajas velocidades y aceleraciones en el movimiento, puesto que, de ese modo, se evita que se produzcan vibraciones y efectos dinámicos indeseables que provoquen la pérdida de precisión.
- Como cada par cinemático ha de contar con un servomotor, éste aumentará el peso del elemento en el que se incorpore y, por la flecha que genere, producirá un error adicional en el posicionamiento de la junta, provocando, a su vez, una imprecisión en el posicionamiento del efector final. De ese modo, cuanto mayor sea el número de gdl del mecanismo, mayor será la cantidad de actuadores necesarios y, por tanto, menor será la precisión que se consiga en el elemento terminal. [2]

En base a su estructura mecánica, los robots serie se pueden clasificar en los siguientes tipos:

7.1.1.1 Robots lineales

Los robots lineales se caracterizan por disponer exclusivamente de pares prismáticos, por lo que el movimiento relativo entre elementos se produce de forma lineal en los ejes ortogonales X, Y y Z, y es, por tanto, puramente traslacional. Dentro de esta categoría, se pueden distinguir, asimismo, dos tipos de robots: los robots Cartesianos y los robots Gantry. La principal diferencia entre ambos reside en que, mientras que el robot Cartesiano posee únicamente un elemento de apoyo sobre la base fija, el de tipo Gantry cuenta con una estructura de apoyo conformado por dos elementos paralelos en dirección de uno de los ejes cartesianos (véase figura 3). Esta característica evita que el elemento que apoya sobre la doble base trabaje en voladizo, por lo que se reduce el valor de las deformaciones generadas y permiten longitudes de trazada y cargas mayores que los Cartesianos. [3]



Figura 2. Robot Cartesiano
Fuente: hteautomation.com



Figura 3. Robot Gantry
Fuente: Fibro Lápplé Technology

7.1.1.2 Robots SCARA

El robot SCARA (*Selective Compliance Assembly/Articulated Robot Arm*) es un tipo de robot de cuatro gdl compuesto por un eslabón interior unido al elemento fijo mediante una articulación de “hombro” que permite su rotación en el eje Z (eje vertical), que está conectado a un eslabón exterior mediante una articulación de “codo” que permite una rotación relativa alrededor del eje Z, el cual está, a su vez, conectado a un eje de “muñeca” mediante un par cilíndrico que posibilita el giro del efector final respecto al eje Z y su desplazamiento lineal a lo largo del mismo eje. Este tipo de robot es frecuentemente empleado en el sector de la automoción, sectores de la electrónica y demás campos de la industria en los que se requiera realizar maniobras verticales como ensamblajes u operaciones de *pick-and-place* [4].

Cabe decir que éste robot será la base del objeto de estudio de algunos de los ejemplos de aplicación que se desarrollarán en la metodología.



Figura 4. Robot SCARA

Fuente: Intech Automazione

7.1.1.3 Robots articulados

La clase de robots más común en los procesos industriales es la de los robots articulados, los cuales se basan en manipuladores cuyos elementos rígidos se unen entre sí mediante pares de rotación, permitiendo un único gdl en el movimiento relativo entre dos elementos adyacentes. Los robots articulados más utilizados en la industria se pueden clasificar, atendiendo al número de gdl, en dos grupos: robots de 6 gdl y robots redundantes (véanse figuras 5 y 6). Los del primer tipo mencionado permiten 3 gdl de traslación y 3 de rotación del efector final, es decir, los necesarios para alcanzar y definir la posición y orientación de cualquier sólido rígido en el espacio. Los robots redundantes, en cambio, poseen más de 6 gdl, principalmente con el fin de, por un lado, evitar posibles obstrucciones del espacio de trabajo originadas por colisiones entre elementos y, por otro lado, con objeto de evadir las posiciones singulares [5], esto es, posiciones particulares alcanzadas durante el movimiento en las que se produce una pérdida de movilidad (gdl) [6].



Figura 5. Robot articulado 6 gdl
Fuente: KUKA Roboter GmbH



Figura 6. Robot articulado redundante
Fuente: Yaskawa Motoman Robotics

7.1.2 Manipuladores paralelos

Los manipuladores paralelos se definen como cadenas cinemáticas cerradas cuyo órgano terminal, o plataforma móvil, está conectado a la base mediante varias cadenas cinemáticas seriales independientes dispuestas en paralelo [7]. Cada una de las cadenas seriales está formada, al igual que los robots serie, por elementos rígidos unidos entre sí mediante juntas cinemáticas (tipo R, P, C, U y/o E). Por lo que respecta a sus características, se pueden destacar los siguientes puntos:

- Debido a su estructura cinemática, ofrecen un espacio de trabajo notablemente más reducido que los robots serie de dimensiones similares.
- Presentan mayor rigidez que los robots serie de iguales dimensiones y para la misma carga soportada por el efector final, puesto que ésta es soportada por varias cadenas simultáneamente en vez de una única y, por tanto, los esfuerzos internos se reparten entre ellas. De esa manera, la relación carga/peso también es mayor en los manipuladores paralelos.
- Al poder manipular grandes cargas con masas relativamente reducidas, las velocidades y aceleraciones del movimiento pueden ser elevadas sin que se produzcan efectos dinámicos importantes que afecten de manera significativa a la precisión del posicionamiento del elemento terminal.
- A diferencia de lo que ocurre en los robots serie, en los manipuladores paralelos generalmente solo uno de los pares de cada cadena serial es actuado, siendo pasivas el resto de juntas cinemáticas.
- Como los pares actuados se encuentran en cadenas cinemáticas diferentes, el error de posicionamiento del efector final originado por la presencia de los servomotores en las juntas no es de carácter acumulativo, sino que se obtiene promediando el error producido en cada cadena. [2]

Dentro del ámbito industrial, los manipuladores paralelos más utilizados son los descritos a continuación.

7.1.2.1 Manipulador Gough-Stewart

El manipulador Gough-Stewart es un robot paralelo de 6 gdl, compuesto por 6 extremidades idénticas que unen la plataforma móvil a la base fija. Cada cadena serie consiste en un actuador prismático y dos juntas esféricas, una junta esférica en la unión de la extremidad con la base fija y otra conectando la extremidad y la plataforma móvil [8]. Los primeros diseños de este manipulador nacieron de las manos de E. Gough y D. Stewart, en la década de los 70 [9] [10]. Desde entonces se han realizado numerosos estudios sobre las posibilidades y variantes que ofrece dicho manipulador paralelo y, hoy en día, además de ser utilizado para simulaciones de vuelo, operaciones quirúrgicas etc., también se emplea en aplicaciones industriales tales como realización de operaciones de soldadura y de mecanizado, entre otras.

7.1.2.2 Robot Delta

El robot Delta es un tipo de manipulador paralelo que consiste en múltiples cadenas cinemáticas que conectan el efector final de la plataforma móvil a la base fija, con la particularidad de que sus extremidades forman estructuras de paralelogramos. La presencia de los paralelogramos hace que la orientación del elemento terminal no varíe durante el movimiento de traslación del mecanismo, en contraste con la plataforma Gough-Stewart, que sí permite el cambio de orientación de su efector final. Actualmente, existen diversos diseños de robots Delta en la industria, los cuales difieren en función de la aplicación a la que se destinen. El tipo de robot Delta más utilizado es el de 3 gdl, el cual está actuado por 3 motores rotativos ubicados en las articulaciones que unen las extremidades a la base fija. Este tipo de robot es frecuentemente empleado en operaciones de *pick and place* en procesos de manufactura, empaquetado, ensamblaje, etc. [11]



Figura 7. Plataforma Gough-Stewart

Fuente: Physik Instrumente



Figura 8. Manipulador paralelo Delta

Fuente: Omron

7.2 Mecanismos reconfigurables

Según expresan los autores C. Kuo, J. S. Dai y H. S. Yan, los mecanismos han sido constantemente considerados como sistemas diseñados con una estructura permanente y funciones invariantes durante su operación. No obstante, promovida por la proliferación de conocimiento en materia de diseño de mecanismos en el último siglo y la aparición nuevas y revolucionarias ideas, la comunidad científica comenzó a percatarse de que un mecanismo podía ser estructurado de manera que pudiese alcanzar diferentes configuraciones durante su operación y que, de esa manera, fuera posible realizar varias tareas distintas basándose en un único mecanismo. Esta línea de investigación nació hacia mediados de los años 90 y, desde entonces, atrajo la atención de numerosos autores que han desarrollado importantes avances y estudios sobre diferentes aspectos relacionados con los mecanismos reconfigurables. Sin embargo, se trata de un campo que todavía no se ha integrado plenamente en la sociedad y que se encuentra aún en fase de desarrollo. [12]

7.2.1 Conceptos básicos

En este apartado se definen y describen algunos conceptos técnicos básicos a tener en cuenta para la adecuada comprensión de la materia en cuestión:

Topología: De acuerdo con el Merriam-Webster Dictionary [13], “topología” se define como “rama de las matemáticas que estudia las propiedades de las configuraciones geométricas (como conjuntos de puntos) que son inalterados por deformaciones elásticas (como un estiramiento o una torsión) que son homeomorfismos”. Otra posible definición, proporcionada por [14] y que quizá sea más cercana al campo de la mecánica, es: “Topología es el estudio de las propiedades cualitativas de determinados objetos que son invariantes ante cierto tipo de transformación...”. Por tanto, la tipología podría considerarse como el estudio de la geometría que describe las relaciones cualitativas entre determinados objetos de un sistema.

Configuración: Tal y como se indica manifiesta en [15], el término “configuración” no hace alusión únicamente a la postura y posición geométrica específica de un mecanismo, sino que abarca todo el estilo estructural del mismo. Según [13], el concepto “configuración” se define como “una determinada disposición relativa de partes o elementos”, lo cual, adaptado al ámbito de los mecanismos, hace referencia a la disposición relativa entre elementos y pares cinemáticos.

Como conclusión, se puede decir que la tipología describe el número y tipo de elementos y pares cinemáticos, así como la adyacencia e incidencia entre ellos, mientras que la configuración de un mecanismo abarca la tipología de su estructura más la disposición relativa entre sus elementos y juntas.

Por lo general, los mecanismos trabajan con una estructura topológica unitaria y única configuración. Sin embargo, en caso de que la configuración sea modificable durante la operación, se considera que el mecanismo es reconfigurable. La configuración de un mecanismo puede ser alterada si se cumple alguna de las siguientes condiciones durante la operación:

- El número efectivo de elementos y/o juntas es modificable
- La clase de alguno de los pares cinemáticos es modificable
- La adyacencia e incidencia de los elementos y juntas es modificable
- La disposición relativa entre juntas y/o elementos es modificable

[12]

7.2.3 Mecanismos reconfigurables en el sector industrial

Por lo que respecta al sector industrial, los mecanismos reconfigurables aún no han sido integrados en sistemas productivos, si bien autores como A. Valente en [16] defienden que la incorporación de éstos en los procesos industriales presentaría significativas ventajas en términos de reducción de costes, precisión, fiabilidad, versatilidad, etc. No obstante, en los últimos años se han desarrollado diversos trabajos de investigación que contemplan diseños de gran interés para el ámbito industrial. Por citar un ejemplo, en [17] se presenta el diseño de un manipulador paralelo 3-SRU que es capaz de reconfigurarse a través de una junta cinemática reconfigurable. La estructura cinemática de cada una de las tres cadenas serie que componen el manipulador está formada por una cadena de juntas de tipo SRU (véase figura 9).

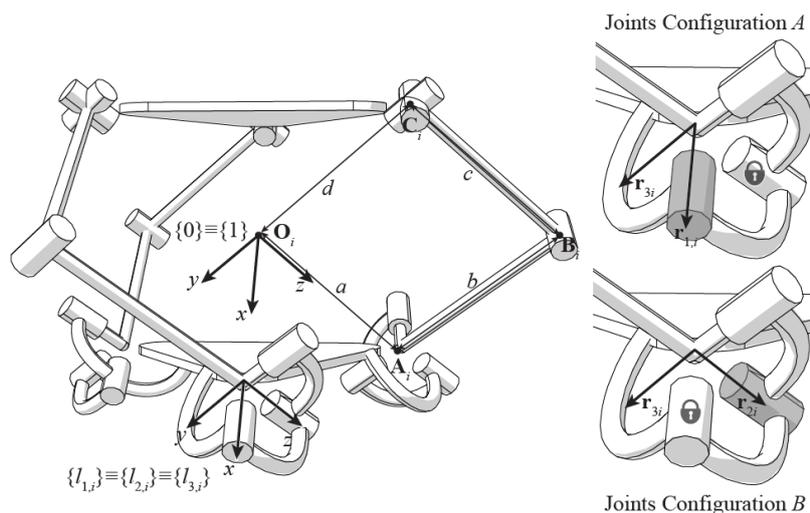


Figura 9. Manipulador paralelo reconfigurable con 3 gdl [17]

El par esférico, el cual debe ser reducido a una junta universal para poder garantizar la funcionalidad de la máquina, conecta el primer elemento barra de cada extremidad a la base. El segundo elemento barra se conecta al primero mediante una articulación. Por último, una junta universal conecta el efector final a la extremidad.

La junta reconfigurable (véase figura 10), ubicada en el par esférico, está provista con un sistema de bloqueo constituido por engranajes y un control electrónico que permite alternativamente bloquear uno de los dos primeros ejes de giro de la propia junta esférica (véase figura 9), dotando al mecanismo de diferentes configuraciones cinemáticas de tipo 3-URU que corresponden a diferentes tipos de movi- lidades. Concretamente, el sistema permite alternar entre una configuración A, en el que el movimiento del elemento terminal es de rotación pura, y una configuración B, en la que el movimiento es de traslación pura.

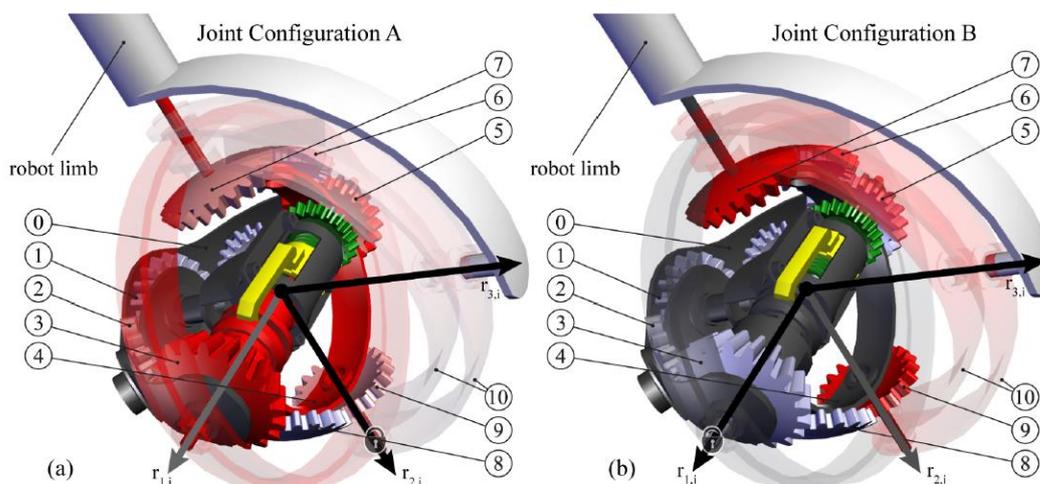


Figura 10. Configuraciones de la junta reconfigurable [17]

7.2.3 Mecanismos reconfigurables en el sector espacial

Diferentes expertos han manifestado la importancia de dotar a los mecanismos empleados en el sector espacial de la capacidad de reconfiguración, debido a las ventajas que éstos ofrecen frente a los mecanismos tradicionales utilizados a día de hoy. Autores como F. Aghili y K. Parsa en [18] defienden la necesidad realizar cambios de configuraciones en manipuladores que trabajan en entornos de condiciones extremas, con objeto de satisfacer las demandas de una determinada tarea dentro de las restricciones impuestas por dicho entorno. Se explica que particularmente en aplicaciones espaciales es deseable y más rentable emplear un único robot versátil que sea capaz de ejecutar operaciones tales como inspección, ensamblaje y carga/descarga de objetos. Por dichos motivos, se exponen alternativas de diseño para manipuladores destinados a aplicaciones espaciales, como el Canadarm II, basadas en el principio de reconfigurabilidad.

A diferencia de lo común en los diseños de mecanismos reconfigurables, en el nuevo diseño conceptual propuesto la reconfigurabilidad no se alcanza empleando juntas reconfigurables, sino que en este caso el mecanismo se equipa con juntas pasivas, es decir, juntas sin actuadores o sensores, que permiten cambiar los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) tales como la longitud de los elementos y el ángulo de giro. La idea en la que se fundamenta este diseño es que el control de las juntas pasivas se hace posible una vez que la cadena cinemática se ha cerrado, para lo cual dichas juntas están equipadas con mecanismos de freno activos, que se liberan en el momento en el que se desea producir el cambio de los parámetros. Asimismo, las juntas pasivas utilizadas en este diseño en particular son de tipo cilíndrico, las cuales, una vez bloqueadas por el freno, se convierten en uniones rígidas entre dos juntas activas adyacentes. En la figura 11, se ilustra el proceso de obtención de una determinada reconfiguración de un manipulador con dos juntas cilíndricas pasivas y tres articulaciones activas:

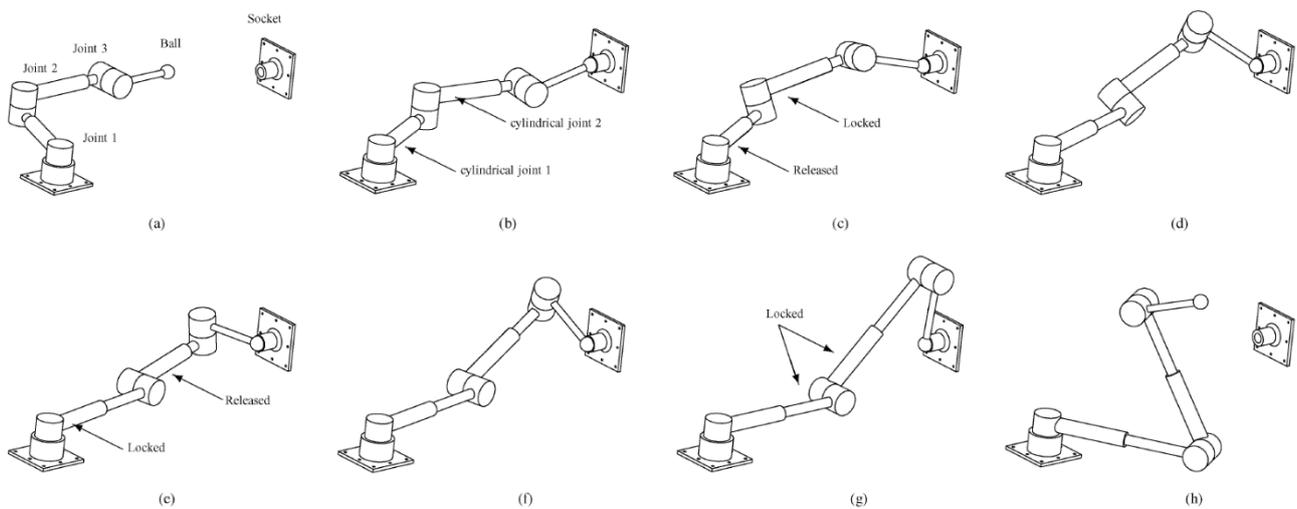


Figura 11. Proceso de reconfiguración de manipulador con juntas cilíndricas pasivas [18]

7.3 Crítica del Estado del Arte

La evolución de los mecanismos en el último siglo ha traído consigo grandes avances y beneficios para el sector industrial, principalmente, puesto que, con la aparición de los robots serie y manipuladores paralelos, los procesos industriales han podido alcanzar un alto nivel de automatización, reducir tiempos de producción, aumentar el grado de precisión de las operaciones, etc. De esa manera, los sistemas productivos han logrado aumentar su productividad y mejorar significativamente su competitividad en el mercado, lo que se traduce en importantes beneficios económicos. Este hecho demuestra la relevancia de la investigación e innovación en el ámbito de los mecanismos, las cuales son actividades que deberían ser impulsadas constantemente. Actualmente, la línea de investigación de los mecanismos reconfigurables se presenta como uno de los campos más interesantes en ese aspecto, debido a las diferentes ventajas que ofrecen, las cuales han sido citadas en apartados anteriores. Sin embargo, esta clase de mecanismos aún no ha sido integrada en la sociedad actual, quizá porque no exista demasiada literatura acerca de cómo abordar el diseño de los mismos. Por tanto, con objeto de facilitar el diseño, se propone un modelo de sistematización para el proceso de diseño de mecanismos reconfigurables, tratando de promover el desarrollo y la implementación de estos mecanismos en sectores como la industria o el ámbito espacial, entre otros.

8. Metodología

En este apartado, se procede a describir en profundidad el modelo de sistematización propuesto para el proceso de diseño de mecanismos reconfigurables, el cual se divide en 3 bloques o etapas principales. No obstante, antes de abordar cada bloque por separado, se realiza un resumen global del procedimiento planteado, representado en el esquema de la figura 12.

Bloque I (Configuraciones)

En este primer bloque, el objetivo es establecer y analizar los movimientos que se quiere reproducir mediante el mecanismo. Para ello, tomando como datos de partida las tareas, aplicaciones u operaciones a las que se destinará, se establecen unas determinadas especificaciones de diseño y se plantean las siguientes fases:

Definición de las configuraciones: En base a la función que se deba desempeñar, se realiza la síntesis del mecanismo, en la que se definen todas las configuraciones que se desea que alcance, especificando en cada caso los parámetros cinemáticos y las características geométricas principales que ha de poseer, tales como los pares cinemáticos y el número, tipo y disposición de los elementos.

Análisis cinemático y dinámico: Tras definir cada una de las configuraciones, se procede a estudiar las características cinemáticas y dinámicas del movimiento de cada configuración de manera independiente, mediante el planteamiento de las cadenas cinemáticas y realizando el procedimiento analítico correspondiente al tipo de mecanismo en cuestión.

Bloque II (Reconfiguración)

En este bloque se procede a determinar y desarrollar el mecanismo de reconfiguración, es decir, el fundamento y medio físico a través del cual se va a materializar el cambio entre las configuraciones definidas. Si bien en esta etapa se puede recurrir a numerosas estrategias distintas, se estudiarán las siguientes:

Diseño de junta reconfigurable: El diseño de una o varias juntas reconfigurables es el modo más común de conseguir la reconfigurabilidad de un mecanismo. La función de este tipo de juntas es alterar las características del par para modificar los parámetros cinemáticos del mecanismo principal, produciendo, de esa manera, la alteración de la posición, orientación relativa y/o movimiento de los elementos que lo conforman.

Determinación de las restricciones geométricas: Una alternativa de diseño de juntas reconfigurables es la de conseguir la reconfiguración valiéndose de las restricciones geométricas que puedan producirse en el movimiento de un mecanismo; es decir, obtener las diferentes configuraciones deseadas a partir de determinadas posiciones y orientaciones relativas de los elementos que conforman el mecanismo alcanzadas durante su trayectoria, así como de las propiedades geométricas de los mismos.

Bloque III (Activación)

Determinación del modo de activación de la reconfiguración: Una vez elegido y diseñado el mecanismo responsable de la permutación entre configuraciones, es necesario establecer bajo qué condiciones se desea que se active dicho mecanismo. Por tanto, en esta última fase, se establece cuál será el desencadenante de la reconfiguración, esto es, el criterio en base al cual se accionará el mecanismo de reconfiguración.

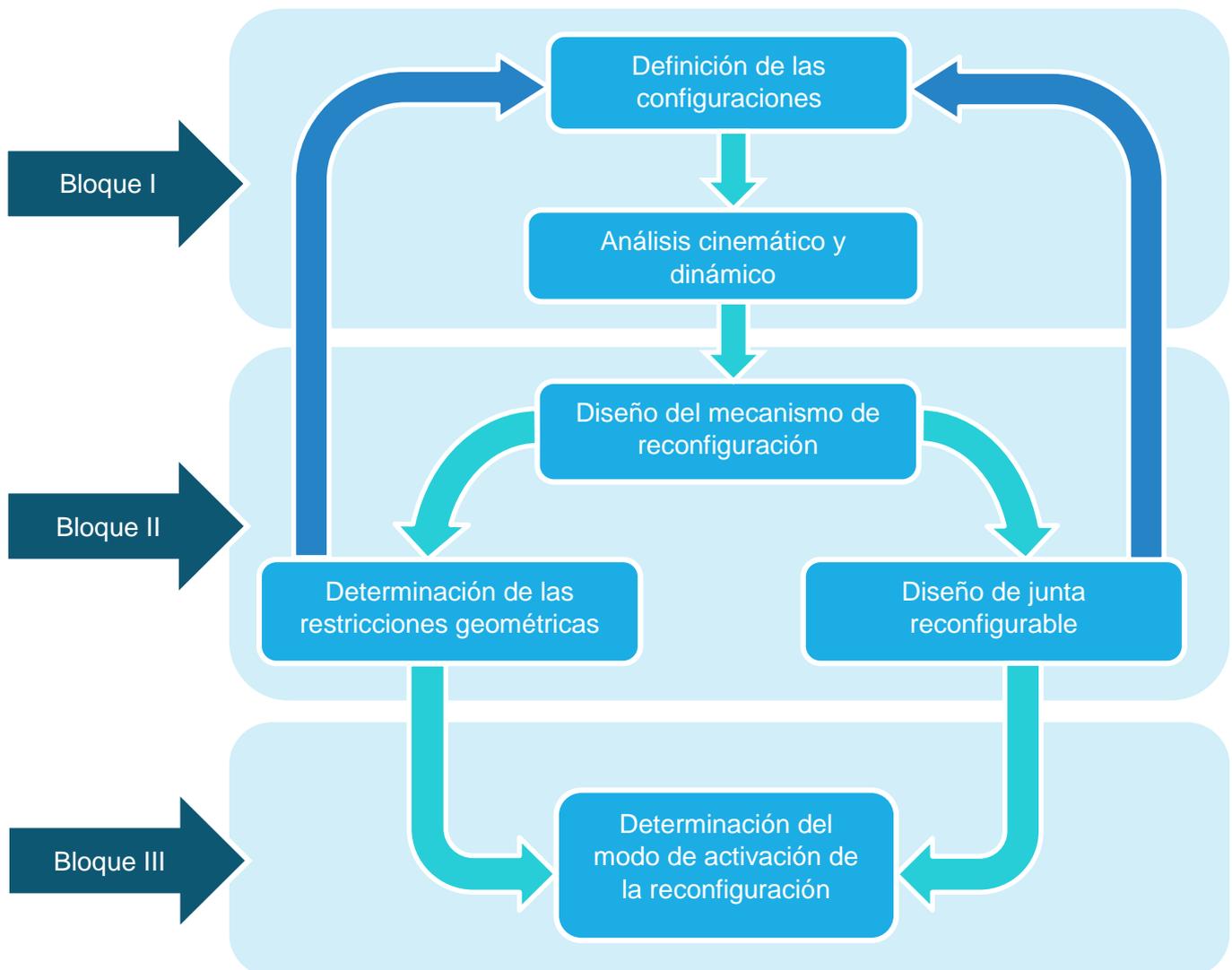


Figura 12. Diagrama del modelo de sistematización

Cabe mencionar que, en la metodología propuesta, una vez definidas las configuraciones deseadas, es posible que, al realizar el análisis cinemático o dinámico del mismo, se dé el caso en el que las especificaciones de diseño establecidas en un principio no se satisfagan, por lo que sería necesario replantear aquella configuración que no cumpliera con los requisitos. De la misma manera, en el desarrollo del mecanismo de reconfiguración es posible encontrarse con el problema de que, debido a la complejidad de las configuraciones o a una gran diferencia entre ellas, entre otras razones, el diseño de una junta reconfigurable o las restricciones geométricas a imponer para materializar la reconfiguración fuesen imposibles o extremadamente complejas de alcanzar, siendo necesario, una vez más, replantear las configuraciones de partida. Se trata, por tanto, de un proceso iterativo en el que en cada iteración se van modificando las características geométricas y cinemáticas de las configuraciones, hasta obtener, finalmente, un diseño válido apto para desempeñar una función objetivo y que cumpla con las restricciones impuestas por su ámbito de trabajo.

Asimismo, conviene tener en cuenta que en este modelo de sistematización no se tienen en cuenta todos los aspectos necesarios para la obtención del mecanismo final, tales como la fabricación del mismo, sino que se abordan las cuestiones más relevantes relativas al proceso de diseño.

Una vez presentadas las ideas principales del proceso, se continuará describiendo en detalle cada una de las etapas que constituyen la metodología, para lo cual se emplearán y desarrollarán ejemplos de aplicación que faciliten la comprensión de los conceptos expuestos. En la elaboración de dichos ejemplos se han utilizado los softwares GIM y SolidWorks, los cuales se han empleado para modelizar los mecanismos planteados y poder visualizar las características del movimiento.

8.1 Bloque I

El proceso de diseño de un mecanismo reconfigurable comienza, al igual que en los mecanismos convencionales, con la identificación de la función que se desea desempeñar por dicho mecanismo. Es esencial conocer y definir con un alto grado de precisión las características de las operaciones que conceptualmente deben ser ejecutadas, puesto que de ello dependerá el nivel de eficacia con el cuál se realizarán las funciones en cuestión. En base a la función establecida, se definen una serie de especificaciones y restricciones de diseño que deberán ser verificadas por el mecanismo resultante del proceso de diseño.

Una vez decidida la función objetivo y determinadas los parámetros de diseño derivados de ella, se procede a establecer y estudiar el conjunto de movimientos a realizar por el mecanismo, para lo cual se procede con las etapas que se describen a continuación.

8.1.1 Definición de las configuraciones

8.1.1.1 Planteamiento teórico

En base a la función objetivo deseada, se definen las diferentes configuraciones que se requieren para reproducir los diversos movimientos solicitados. Para dicho propósito, se ha de realizar la síntesis de cada configuración, al igual que se haría en el diseño de un mecanismo tradicional o no reconfigurable. De esa manera, la síntesis se puede dividir en 2 fases:

- **Síntesis estructural:** Una primera fase denominada síntesis estructural, en la que se ha de decidir qué clase de mecanismo se empleará para la consecución de la función objetivo (tren de engranajes, mecanismo de barras, manipulador paralelo, brazo robótico...) y en la que se ha de desarrollar la estructura cinemática, precisando el número de gdl y el número, clase y disposición aproximada tanto de cada elemento como de cada par cinemático que conforman el mecanismo. En esta fase resulta de gran importancia la experiencia del diseñador en la materia, ya que la obtención de un mecanismo, reconfigurable o no, que realice una función concreta puede ser muy complicada si no se opta por una tipología de mecanismo adecuada.
- **Síntesis dimensional:** Una vez obtenido la estructura cinemática del mecanismo, se procede a abordar la síntesis dimensional, fase cuyo objetivo es obtener las dimensiones principales de los elementos y las posiciones y orientaciones relativas de elementos y pares cinemáticos. Esta síntesis puede realizarse mediante un amplio rango de métodos diferentes, tales como generación de función, generación de trayectorias, guiado de sólido rígido, etc.

Cabe destacar que, si bien al definir las diferentes configuraciones estas pueden diferir entre ellas en algunos parámetros cinemáticos tales como los gdl o los pares cinemáticos, ambas configuraciones deberán poseer propiedades en común (el tipo y número total de elementos, entre otros) y no distar en exceso la una de la otra. De lo contrario, si tras la síntesis se obtienen configuraciones muy diferentes entre sí, al proceder con el diseño del mecanismo de reconfiguración, surgirá el problema de que la transición entre configuraciones no es posible realizarla.

8.1.1.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA

Con el fin de ilustrar el objetivo de esta etapa, se expone un ejemplo de aplicación basado en el Robot SCARA, el cual también se empleará como apoyo en la explicación de etapas posteriores. El robot SCARA (*Selective Compliant Assembly Robot Arm* o *Selective Compliant Articulated Robot Arm*) es un robot de cuatro gdl con posicionamiento horizontal. Estos robots son conocidos, entre otras cualidades, por su agilidad y rapidez de operación, lo cual los hace idóneos para aplicaciones industriales, tales como tareas destinadas al ensamblaje de componentes, soldadura, atornillamiento, selección y separación de objetos etc.

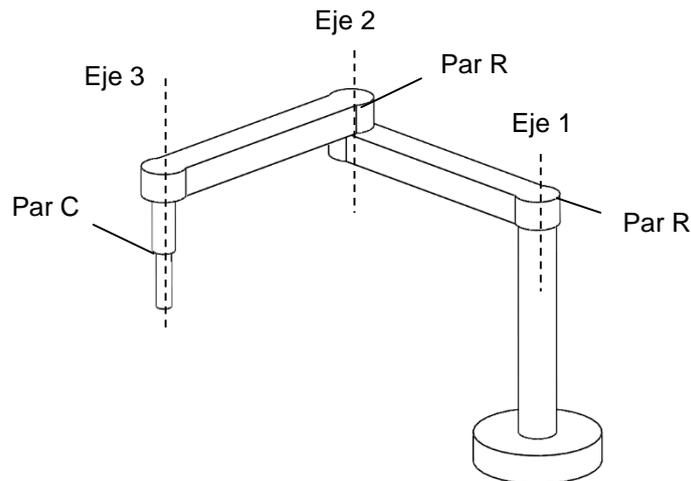


Figura 13. Esquema Robot SCARA

El esquema cinemático de un robot SCARA sería como el indicado en la figura 13, en la cual se pueden observar los distintos gdl. Estos constan de un gdl de rotación respecto al eje 1, otro respecto al eje paralelo número 2 y, finalmente, una rotación alrededor del eje 3 y una traslación a lo largo del mismo eje, derivados de la presencia de un par cilíndrico, siendo ésta la última junta previa al efector final.

Los robots SCARA son generalmente más veloces que una de las principales alternativas en cuanto a robots industriales se refiere: los denominados robots de coordenadas cartesianas, ya comentados en el análisis del Estado del Arte. Sin embargo, las operaciones a realizar por un manipulador SCARA están limitadas al plano horizontal, lo cual supone una restricción notable para abordar determinados procesos de producción industriales, limitando sus aplicaciones a un ámbito relativamente reducido. Por lo tanto, con objeto de aumentar la versatilidad del robot y permitir un mayor espacio de actuación, se opta por realizar modificaciones en el diseño basados en el principio de reconfigurabilidad.

Por tanto, el primer paso del procedimiento propuesto en este caso particular sería definir la configuración inicial de posicionamiento horizontal y una segunda configuración que permita un espacio de operación perpendicular al plano vertical. De esa manera, para la segunda configuración se plantea que, partiendo de la configuración original del SCARA, el eje 3 de rotación se oriente en dirección perpendicular a los ejes 2 y 3. Si bien esta modificación del diseño permite la actuación del efector final en dirección perpendicular al plano vertical, un breve análisis del movimiento pone de

manifiesto la necesidad de un par prismático a lo largo del eje 1 (o el eje 2) para disponer de una segunda configuración con funcionalidad completa, es decir, una configuración que garantice que las operaciones del efector final se puedan realizar a alturas diferentes. Dicho par prismático será actuado en ambas configuraciones, de manera que el robot resultante en la configuración inicial será diferente a la configuración original del robot SCARA, pero la modificación le proporcionaría mayor movilidad en dirección vertical, reduciendo las limitaciones de actuación en dicha dirección originadas por las restricciones impuestas por las dimensiones geométricas del manipulador. Por tanto, el mecanismo poseerá 5 gdl en ambas configuraciones, así como el mismo número y clase de elementos y pares cinemáticos, pero con distinta orientación y posición relativa de algunos de ellos. En las siguientes figuras se muestran las 2 configuraciones definidas (denominadas configuración 1 y configuración 2 en adelante), las cuales se han modelizado mediante el software CAD SolidWorks.



Figura 14. Configuración 1



Figura 15. Configuración 2

8.1.2 Análisis cinemático

8.1.2.1 Planteamiento teórico

Definidas las configuraciones del mecanismo, se procede a estudiar la cinemática que se consigue mediante cada una de ellas de manera independiente. El análisis cinemático de cada configuración se puede dividir en 3 fases principales:

- **Problema de posición:** el cual se divide, asimismo, en un problema directo y un problema inverso. El problema de posición directo consiste en obtener la posición de todos los elementos del mecanismo, a partir de sus dimensiones, posición del elemento fijo y las posiciones de los elementos de entrada. El problema de posición inverso, en cambio, se basa en obtener la posición de todos los elementos a partir de sus dimensiones, posición del elemento fijo y posición del elemento de salida.
- **Cálculo de velocidades y aceleraciones:** esta etapa requiere la resolución previa del problema de posición, puesto que la obtención del campo de velocidades se realiza al derivar las ecuaciones de posición y el campo de aceleraciones se calcula mediante la derivación de las velocidades. Una vez obtenido el campo de velocidades es posible analizar las singularidades del mecanismo. Asimismo, realizar este paso es imprescindible para poder realizar el análisis dinámico.
- **Análisis en posiciones sucesivas:** finalmente, se pueden calcular las posiciones, velocidades y aceleraciones para unos determinados desplazamientos de los elementos de entrada, lo cuales vienen definidos por los gdl el mecanismo.

Conviene mencionar que este estudio se aborda de manera distinta en función del tipo de mecanismo objeto de estudio, especialmente entre mecanismos planos y espaciales, por lo que el método de análisis será distinto en cada caso, aunque con similitudes entre ambos.

El ejemplo de aplicación de esta fase, desarrollado a continuación, consistirá en realizar el análisis cinemático de la primera de las dos configuraciones propuestas anteriormente para el manipulador SCARA.

8.1.2.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA – Configuración 1

Para comenzar con la resolución del problema de posición del manipulador se plantea el esquema cinemático de la configuración a estudiar (véase figura 16), indicando en él los 5 pares cinemáticos que definen cada uno de los gdl del robot en dicha configuración. En dicho esquema se numeran los ejes de los pares y se representa un sistema de referencia en cada elemento del robot (elemento fijo inclusive), en base a unos determinados criterios, con objeto de poder representar la localización de cada elemento respecto a su contiguo anterior y poder, de esa manera, aplicar el método matricial basado en la notación de Denavit-Hartenberg.

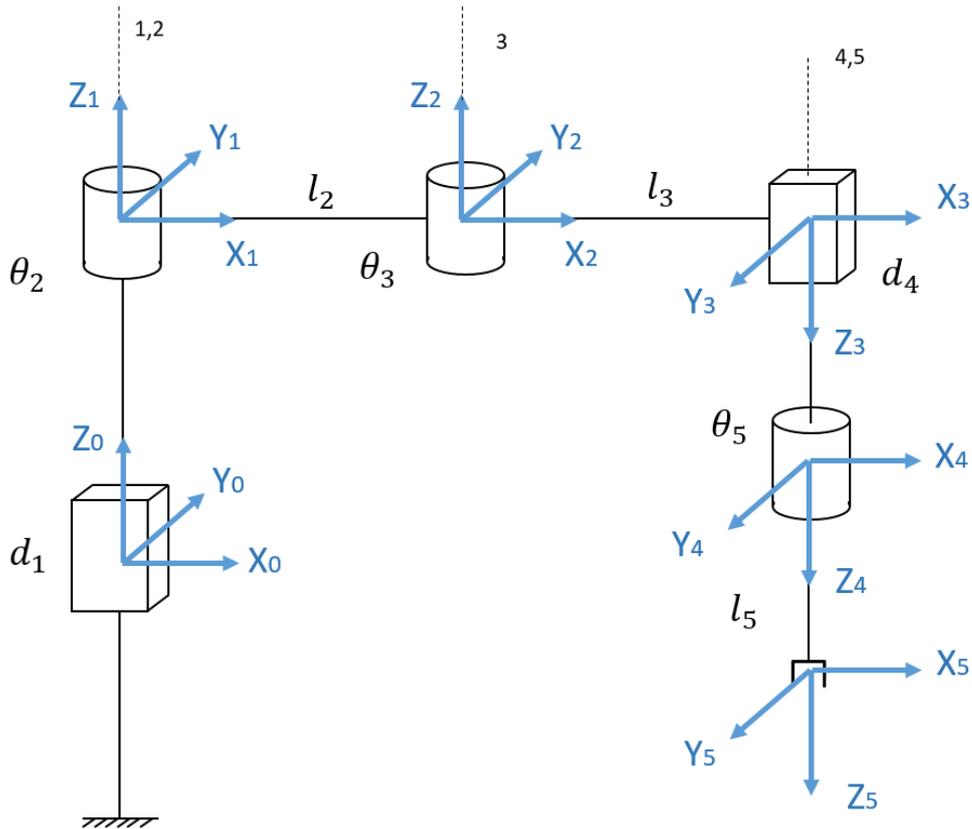


Figura 16. Esquema cinemático configuración 1

Una vez establecidos todos los sistemas de referencia, se obtienen los parámetros de D-H, recogidos en la siguiente tabla:

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	d_1	0	0
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	180°
4	0	d_4	0	0
5	θ_5	l_5	0	0

Tabla 1. Parámetros D-H configuración 1

Se plantea la matriz de transformación homogénea ${}_{i-1}^i T$ que relaciona el sistema de coordenadas $(OXYZ)_i$ con el sistema de coordenadas $(OXYZ)_{i-1}$:

$${}_{i-1}^i T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo los parámetros de D-H en la expresión genérica de la matriz de transformación homogénea de $i = 1$ a 5 se obtienen las siguientes matrices de transformación:

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2 T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2)l_2 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2)l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3)l_3 \\ \sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3)l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4 T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Multiplicando las matrices previas se obtiene la matriz ${}^0_5 T$ que representa la localización de la garra respecto de la base del robot:

$${}^0_5 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T$$

$${}^0_5 T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & \cos(\theta_2)l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & -\cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & 0 & \sin(\theta_2)l_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)l_3 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_4 - l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta manera, planteando las ecuaciones extraídas de la matriz 0_5T , queda resuelto el problema de posición directo.

$$\begin{aligned}
 u_x &= \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & w_x &= 0 \\
 u_y &= \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & w_y &= 0 \\
 u_z &= 0 & w_z &= -1 \\
 v_x &= \sin(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & d_x &= \cos(\theta_2)l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3 \\
 v_y &= -\cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_5) & d_y &= \sin(\theta_2)l_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)l_3 \\
 v_z &= 0 & d_z &= d_1 - d_4 - l_5
 \end{aligned}$$

A continuación, se procede resolver el problema de posición inverso, con objeto de poder calcular el valor de desplazamiento necesario en los actuadores de las juntas cinemáticas para que el efector final alcance una determinada posición. Para ello, dada la relativa sencillez geométrica de la configuración en cuestión, se aplicará el método geométrico, para lo cual se realizará la simplificación de considerar el robot como un manipulador plano de 2 gdl (véase figura 17). Esta simplificación es adecuada debido a que los dos eslabones del robot se mueven siempre en el plano horizontal definido entre ambos en cada instante, y permite hallar los valores de desplazamiento angular de los gdl correspondientes a θ_2 y θ_3 , como se mostrará.

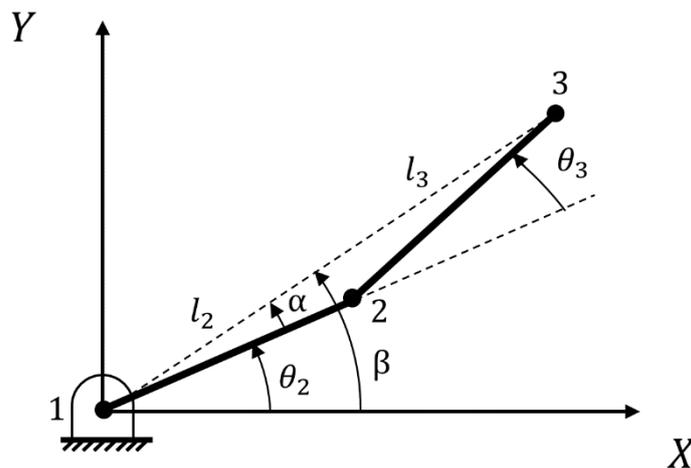


Figura 17. Esquema robot 2 gdl

En primer lugar, se plantea la expresión de la distancia d_{13} , aplicando el Teorema de Pitágoras al triángulo rectángulo que forman las coordenadas d_x y d_y que definen la posición en el plano del punto 3. Dichas coordenadas son equivalentes a las coordenadas x e y de la posición del efector final, por lo que es posible expresarlo en función de éstas últimas.

$$d_{13} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Aplicando ahora el teorema del coseno al triángulo $\widehat{123}$, operando y despejando, se halla el valor del ángulo θ_3 (en radianes).

$$\begin{aligned}
 (\sqrt{x^2 + y^2})^2 &= l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3(-\cos(\theta_3)) \\
 \theta_3 &= \arctan \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right)^2}}{\frac{x^2 + y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}} \right)
 \end{aligned}$$

Se observa que la expresión a la que se llega es función de las dimensiones geométricas de los eslabones l_2 y l_3 y de las coordenadas x e y que definen la posición del plano que se desea que alcance el efector final. Sin embargo, dado que l_2 y l_3 son constantes, se considera que θ_3 es función exclusiva de x e y .

Para el cálculo de θ_2 se plantea que dicha variable angular es la diferencia entre unos ángulos auxiliares α y β , representados en la figura 17.

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \arctan \left(\frac{l_3 \sin(\theta_3)}{l_2 + l_3 \cos(\theta_3)} \right) \\
 \beta &= \arctan \left(\frac{d_y}{d_x} \right) = \arctan \left(\frac{y}{x} \right)
 \end{aligned} \right\} \theta_2 = \beta - \alpha = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) - \arctan \left(\frac{l_3 \sin(\theta_3)}{l_2 + l_3 \cos(\theta_3)} \right)$$

Por tanto, la expresión obtenida indica que el ángulo θ_2 es función de las coordenadas x e y y del ángulo θ_3 , el cual, asimismo, depende de dichas coordenadas y cuya expresión ya se ha deducido anteriormente.

De esa manera, partiendo de una posición deseada del efector final en un plano paralelo al plano XY, es posible calcular los valores angulares θ_2 y θ_3 a aplicar en los actuadores de los pares de rotación 1 y 2. No obstante, es necesario tener en consideración que, para unas determinadas coordenadas x e y existen dos valores posibles de θ_3 y, en consecuencia, de θ_2 . Este concepto se ilustra en la figura 18, donde se observan las dos alternativas posibles (valiéndose de los superíndices 1 y 2 para representar los diferentes casos), en las que el par de rotación 2 se ubica a un lado u otro de la línea d_{13} .

Nota: a la hora de calcular los ángulos θ_2 y θ_3 se ha de utilizar la función arcotangente de doble argumento $\text{Atan2}(y,x)$ para garantizar que éstas se encuentran correctamente situadas en su cuadrante.

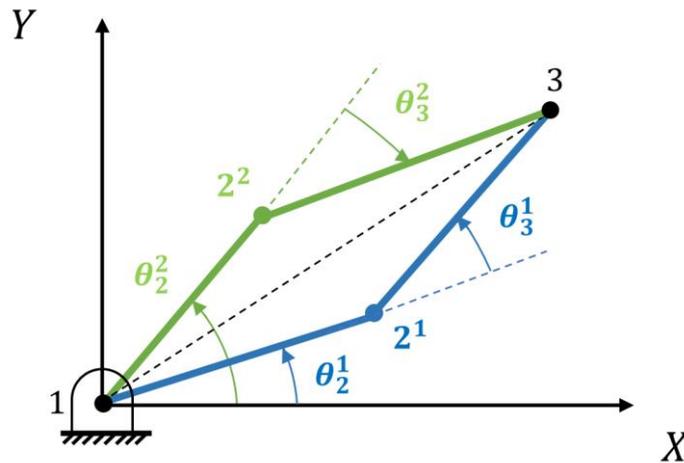


Figura 18. Representación de las distintas alternativas

Para finalizar el problema de posición inverso, se ha de hallar el valor de los desplazamientos lineales de los pares prismáticos d_1 y d_4 , a partir de la coordenada z del efector final. Empleando la expresión de d_z , obtenida del estudio del problema directo, y teniendo en cuenta la equivalencia entre z y d_z :

$$z = d_z = d_1 - d_4 - l_5 \rightarrow d_1 - d_4 = z + l_5$$

Se observa que, teóricamente, para cada valor de z existen infinitas combinaciones de d_1 y d_4 , lo que podría inducir a pensar que una de las juntas prismáticas es redundante y, por tanto, prescindible. Sin embargo, la existencia de ambas juntas está justificada, en base a que cada una de ellas posee una función concreta en la aplicación a la que será destinado el robot. Por un lado, como la componente prismática del par cilíndrico del robot tiene una limitación geométrica considerable debido a que no es conveniente colocar guías demasiado largas en el extremo del robot que causen una excesiva flexión en los eslabones en voladizo, el desplazamiento de dicho par será empleado para realizar aquellas operaciones que no requieran una extensión muy grande del efector final (tales como taladros, pequeños desplazamientos para coger objetos, etc.). Por otro lado, el par prismático del eje 1 no presenta las limitaciones geométricas que el anterior, puesto que las guías de éste están directamente apoyadas sobre el elemento fijo y no se genera flexión debido a las mismas, por lo que se empleará para producir los desplazamientos más significativos, permitiendo operar en piezas o alturas mucho mayores que lo que se podría únicamente con la junta cilíndrica. Asimismo, la razón por la cual no se emplea únicamente el par prismático del eje 1 deriva de que para realizar hasta el más mínimo movimiento vertical sería necesario mover toda la estructura, para lo cual habría que proporcionar la fuerza necesaria para vencer la resistencia que presentan todos los elementos, lo cual no es lo más óptimo en términos de potencia consumida, velocidad y precisión de operación.

Continuando con el análisis cinemático, se procede a calcular el campo de velocidades derivando respecto al tiempo las ecuaciones obtenidas en el problema de posición (teniendo en cuenta, una vez más, que $x = d_x$, $y = d_y$ y $z = d_z$).

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = (-\sin(\theta_2)l_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3)l_3)\dot{\theta}_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3)l_3\dot{\theta}_3$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = (\cos(\theta_2)l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3)\dot{\theta}_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3\dot{\theta}_3$$

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = \dot{d}_1 - \dot{d}_4$$

El campo de velocidades puede expresarse de forma matricial del modo:

$$\{\dot{s}\} = [J]\{\dot{q}\}$$

Donde $\{\dot{s}\}$ es el vector de velocidades (lineales y rotacionales) del efector final, $\{\dot{q}\}$ es el vector de las velocidades de entrada de las juntas cinemáticas y $[J]$ es la matriz jacobiana. Para calcular la matriz jacobiana se tiene en cuenta que:

$$[J] = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5]$$

Donde:

Para un par de rotación: $J_i = \begin{Bmatrix} z_{i-1} \wedge \overline{O_i O_5} \\ z_{i-1} \end{Bmatrix}$

Para un par de prismático: $J_i = \begin{Bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{Bmatrix}$

Calculando el jacobiano y expresando matricialmente el campo de velocidades:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(\theta_2)l_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3)l_3 & -\sin(\theta_2 + \theta_3)l_3 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_2)l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3 & \cos(\theta_2 + \theta_3)l_3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{d}_4 \\ \dot{\theta}_5 \end{Bmatrix}$$

Tras calcular el campo de velocidades, es posible analizar las singularidades del mecanismo, para lo cual se estudia en qué posición rango de la matriz jacobiana es inferior a 3. Igualando a cero los correspondientes determinantes, se obtiene la siguiente condición:

$$\sin(\theta_3)l_2l_3 = 0 \rightarrow \begin{cases} \sin(\theta_3) = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta_3 = 0 \\ \theta_3 = \pi \end{cases} \\ l_2l_3 = 0 \text{ (Imposible)} \end{cases}$$

Por tanto, como las longitudes l_2 y l_3 nunca serán nulas, las singularidades se producen para los valores angulares $\theta_3 = 0$ y $\theta_3 = \pi$ (radianes), correspondientes a la posición de eslabones totalmente extendidos y eslabones plegados, respectivamente. Dichas posiciones singulares se representan en la figura 19.



Figura 19. Singularidades de la configuración 1

Por último, derivando las expresiones de las velocidades lineales con respecto al tiempo, se obtiene el campo de aceleraciones:

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \left(-\cos(\theta_2) l_2 \dot{\theta}_2 - \cos(\theta_2 + \theta_3) l_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \right) \ddot{\theta}_2 + \left(-\sin(\theta_2) l_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3) l_3 \right) \ddot{\theta}_2 - \cos(\theta_2 + \theta_3) l_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \ddot{\theta}_3 - \sin(\theta_2 + \theta_3) l_3 \ddot{\theta}_3$$

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt} = \left(-\sin(\theta_2) l_2 \dot{\theta}_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3) l_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \right) \ddot{\theta}_2 + \left(\cos(\theta_2) l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3) l_3 \right) \ddot{\theta}_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3) l_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \ddot{\theta}_3 + \cos(\theta_2 + \theta_3) l_3 \ddot{\theta}_3$$

$$\ddot{z} = \frac{d\dot{z}}{dt} = \ddot{d}_1 - \ddot{d}_4$$

8.1.3 Análisis dinámico

8.1.3.1 Planteamiento teórico

La última fase del bloque I consiste en realizar el análisis dinámico de las configuraciones, el cual permite establecer las relaciones entre las fuerzas y pares aplicados en los actuadores y el movimiento del mecanismo. El problema dinámico se basa en obtener el conjunto de ecuaciones diferenciales, denominadas ecuaciones de movimiento, que expresan matemáticamente dichas relaciones y que definen el comportamiento del mecanismo bajo la hipótesis de sólido rígido. Éste análisis es imprescindible para poder realizar la simulación real del movimiento del robot, dimensionar los actuadores y diseñar y evaluar la estructura mecánica y el control dinámico del mecanismo.

Los métodos principales para obtener las ecuaciones de movimiento son los de Lagrange-Euler, Newton-Euler y los derivados del principio de D'Alembert, siendo cada uno más adecuado que los demás en función del caso a estudiar.

A continuación, se procede a realizar el análisis dinámico de la primera configuración del robot SCARA empleando, para ello, el método Lagrange-Euler. *Nota: no se realizará el análisis dinámico de la segunda configuración, para el cual se aplicaría el mismo procedimiento que se utiliza para la primera configuración.*

8.1.3.2 Ejemplo de aplicación: Robot SCARA – Configuración 1

El primer paso para resolver el problema dinámico mediante el método Lagrange-Euler es calcular la función Lagrangiana L , que se define como la energía cinética del T menos la energía potencial V del sistema. Con objeto de simplificar el análisis, para realizar el planteamiento dinámico se utiliza de nuevo el modelo de 2 gdl empleado previamente en el análisis cinemático, en el que son dato las masas, las inercias y las longitudes de las barras, así como las distancias a sus centros de gravedad.

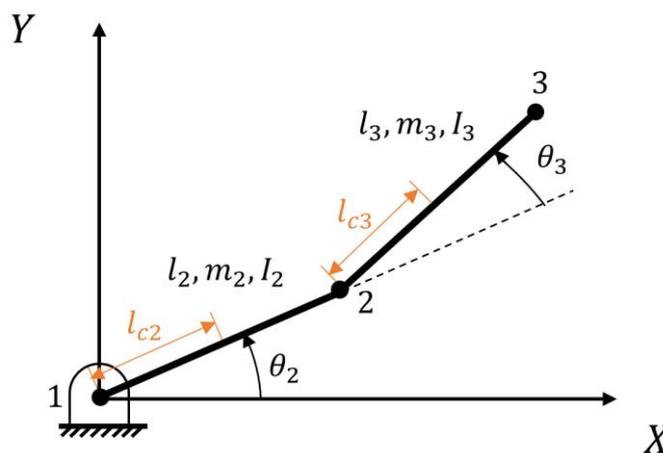


Figura 20. Esquema para el análisis dinámico

Planteando la función Lagrangiana:

$$L = T - V$$

La energía cinética del sistema es la suma de las energías cinéticas de los elementos 2 y 3:

$$T = T_2 + T_3$$

Las energías cinéticas de los elementos 2 y 3 son:

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}I_2\omega_2^2 = \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2}I_2\omega_2^2$$

$$T_3 = \frac{1}{2}m_3v_3^2 + \frac{1}{2}I_3\omega_3^2 = \frac{1}{2}m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2}I_3\omega_3^2$$

Sustituyendo las expresiones de las velocidades lineales, teniendo en cuenta que $\omega_2 = \dot{\theta}_2$ y que $\omega_3 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3$ y simplificando:

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2(\dot{\theta}_2l_{c2})^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_2^2$$

$$T_3 = \frac{1}{2}m_3(\dot{\theta}_3^2l_{c3}^2 + 2\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3l_{c3}(\cos(\theta_3)l_2 + l_{c3}) + \dot{\theta}_2^2(l_2^2 + 2\cos(\theta_3)l_2l_{c3} + l_{c3}^2)) + \frac{1}{2}I_3(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2$$

Por tanto, la energía cinética total del sistema es:

$$\begin{aligned} T &= T_2 + T_3 = \\ &= \frac{1}{2}m_2(\dot{\theta}_2l_{c2})^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_3(\dot{\theta}_3^2l_{c3}^2 + 2\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3l_{c3}(\cos(\theta_3)l_2 + l_{c3}) + \\ &\quad + \dot{\theta}_2^2(l_2^2 + 2\cos(\theta_3)l_2l_{c3} + l_{c3}^2)) + \frac{1}{2}I_3(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \end{aligned}$$

La energía potencial del sistema, a su vez, es la suma de las energías potenciales de los eslabones:

$$V = V_2 + V_3$$

Las energías potenciales de los elementos 2 y 3 son:

$$V_2 = m_2gl_{c2}\sin(\theta_2)$$

$$V_3 = m_3g(l_2\sin(\theta_2) + l_{c3}\sin(\theta_2 + \theta_3))$$

Sustituyendo, se obtiene la energía potencial del sistema:

$$V = m_2gl_{c2}\sin(\theta_2) + m_3g(l_2\sin(\theta_2) + l_{c3}\sin(\theta_2 + \theta_3))$$

Por tanto, una vez obtenidas las expresiones de la energía cinética y potencial del sistema se puede expresar la función Lagrangiana.

A continuación, valiéndose de la función Lagrangiana, se prosigue calculando las expresiones de las fuerzas y pares aplicados en las juntas, dadas por la siguiente ecuación:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}$$

Para ello, se calculan las derivadas de dicha expresión para $i = 2$ e $i = 3$:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -g \cos(\theta_2) l_{c2} m_2 - g (\cos(\theta_2) l_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3) l_{c3}) m_3$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_3} = -g \cos(\theta_2 + \theta_3) m_3 l_{c3} + \frac{1}{2} m_3 (-2\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_3) l_2 l_{c3} - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \sin(\theta_3) l_2 l_{c3})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \dot{\theta}_2 I_2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) I_3 + \dot{\theta}_2 l_{c2}^2 m_2 + \frac{1}{2} (2\dot{\theta}_3 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3}) + 2\dot{\theta}_2 (l_2^2 + 2\cos(\theta_3) l_2 l_{c3} + l_{c3}^2)) m_3$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) I_3 + \frac{1}{2} (2\dot{\theta}_3 l_{c3}^2 + 2\dot{\theta}_2 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3})) m_3$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \ddot{\theta}_2 I_2 + (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) I_3 + \ddot{\theta}_2 l_{c2}^2 m_2 + \frac{1}{2} m_3 (2\ddot{\theta}_3 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3}) - 2\dot{\theta}_3^2 l_{c3} \sin(\theta_3) l_2 + 2\ddot{\theta}_2 (l_2^2 + 2\cos(\theta_3) l_2 l_{c3} + l_{c3}^2) - 4\dot{\theta}_2 \sin(\theta_3) l_2 l_{c3} \dot{\theta}_3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) I_3 + \frac{1}{2} m_3 (2\ddot{\theta}_3 l_{c3}^2 + 2\ddot{\theta}_2 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3}) - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 l_{c3} l_2 \sin(\theta_3))$$

Tras calcular las derivadas, se obtienen los valores de las fuerzas y pares aplicados en las juntas 2 y 3, τ_2 y τ_3 , respectivamente. Estos vectores se pueden expresar en la forma matricial siguiente:

$$\{\tau\} = [M(\theta)]\{\ddot{\theta}\} + \{c(\theta, \dot{\theta})\} + \{g(\theta)\}$$

Donde $\{\tau\}$ es el vector de fuerzas y pares aplicados en las juntas, $[M(\theta)]$ es la matriz de inercias, $\{\ddot{\theta}\}$ es el vector de aceleraciones angulares, $\{c(\theta, \dot{\theta})\}$ el vector del producto de velocidades y $\{g(\theta)\}$ el vector de gravedad (ya que no hay muelles).

Por tanto, expresando en dicha forma matricial las ecuaciones del movimiento, se consiguen los siguientes términos:

$$[M(\theta)] = \begin{bmatrix} I_2 + I_3 + m_2 l_{c2}^2 + m_3 (l_2^2 + 2\cos(\theta_3) l_2 l_{c3} + l_{c3}^2) & I_3 + m_3 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3}) \\ I_3 + m_3 l_{c3} (\cos(\theta_3) l_2 + l_{c3}) & I_3 + m_3 l_{c3}^2 \end{bmatrix}$$

$$\{c(\theta, \dot{\theta})\} = \begin{Bmatrix} -m_3 l_2 l_{c3} \sin(\theta_3) (2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \\ m_3 l_2 l_{c3} \sin(\theta_3) \dot{\theta}_2^2 \end{Bmatrix}$$

$$\{g(\theta)\} = \begin{Bmatrix} m_2 g l_{c2} \cos(\theta_2) + m_3 g (l_2 \cos(\theta_2) + l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ m_3 g l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{Bmatrix}$$

8.2 Bloque II

El segundo bloque del modelo de sistematización propuesto consiste en determinar y desarrollar el mecanismo de reconfiguración, es decir, el medio físico a través del cual se va a producir la transición entre las configuraciones diseñadas. Si bien hasta ahora se ha establecido y estudiado la cinemática y dinámica del mecanismo de manera prácticamente independiente para cada configuración, el objetivo de este apartado es crear una conexión entre las configuraciones estudiadas, de manera que el mecanismo pueda alternar entre ellas y, de ese modo, sea capaz de reproducir los diferentes movimientos permitidos por cada configuración. Esta es, por tanto, una fase clave del proceso de diseño y que marca la diferencia entre los mecanismos tradicionales y los reconfigurables, puesto que se le dota al mecanismo de la cualidad de reconfigurabilidad.

A pesar de que existe una gran variedad de estrategias para materializar la reconfigurabilidad de un mecanismo, se estudiarán los métodos que engloban la mayoría de ellas y que se han considerado los más representativos y destacables. Dichos métodos son, por un lado, la reconfiguración a través de juntas reconfigurables y, por otro, la reconfiguración mediante restricciones geométricas.

8.2.1 Diseño de junta reconfigurable

8.2.1.1 Planteamiento teórico

De las estrategias de reconfiguración que se estudiarán en este bloque, el diseño de una o varias juntas reconfigurables es el método más frecuentemente empleado, debido al gran número de posibilidades de diseño que ofrecen. La función de este tipo de juntas es aumentar o reducir el número y/o alterar el tipo de gdl de la misma mediante un motor (o más) independiente de los actuadores del mecanismo principal, con objeto de modificar los parámetros del mecanismo, así como su movimiento, generalmente. Se puede realizar la siguiente clasificación de juntas reconfigurables en función de su tipología:

- **Juntas activas:** al menos uno de los gdl que posibilita la junta es actuado mediante un motor (el cual puede coincidir o no con el motor necesario para maniobrar la reconfiguración), de manera que en el par cinemático se actúa, como mínimo, uno de los gdl del mecanismo principal.
- **Juntas pasivas:** ninguno de los gdl que posibilitan los pares cinemáticos reconfigurables están actuados por un motor (lo cual no implica que la junta no necesite ser actuado por un motor para efectuar la maniobra de reconfiguración).

En los siguientes subapartados se desarrollarán dos ejemplos de aplicación relativos a las juntas reconfigurables, uno para cada tipo de junta expuesto.

8.2.1.2 Ejemplo de aplicación de junta activa: Robot SCARA

El ejemplo de aplicación de una junta reconfigurable activa se realizará, una vez más, en base al nuevo modelo de robot SCARA planteado, cuya cinemática y dinámica ya se han estudiado en apartados anteriores. En este apartado se describirán las características y el funcionamiento de una junta desarrollada para lograr la transición entre ambas configuraciones propuestas.

La junta reconfigurable desarrollada se ha modelado mediante el software CAD SolidWorks y se muestra en la figura 21. La junta reconfigurable está diseñada para ubicarse en el par de rotación identificado previamente con el número 3 y es, por tanto, solidaria al eslabón 2 del mecanismo.

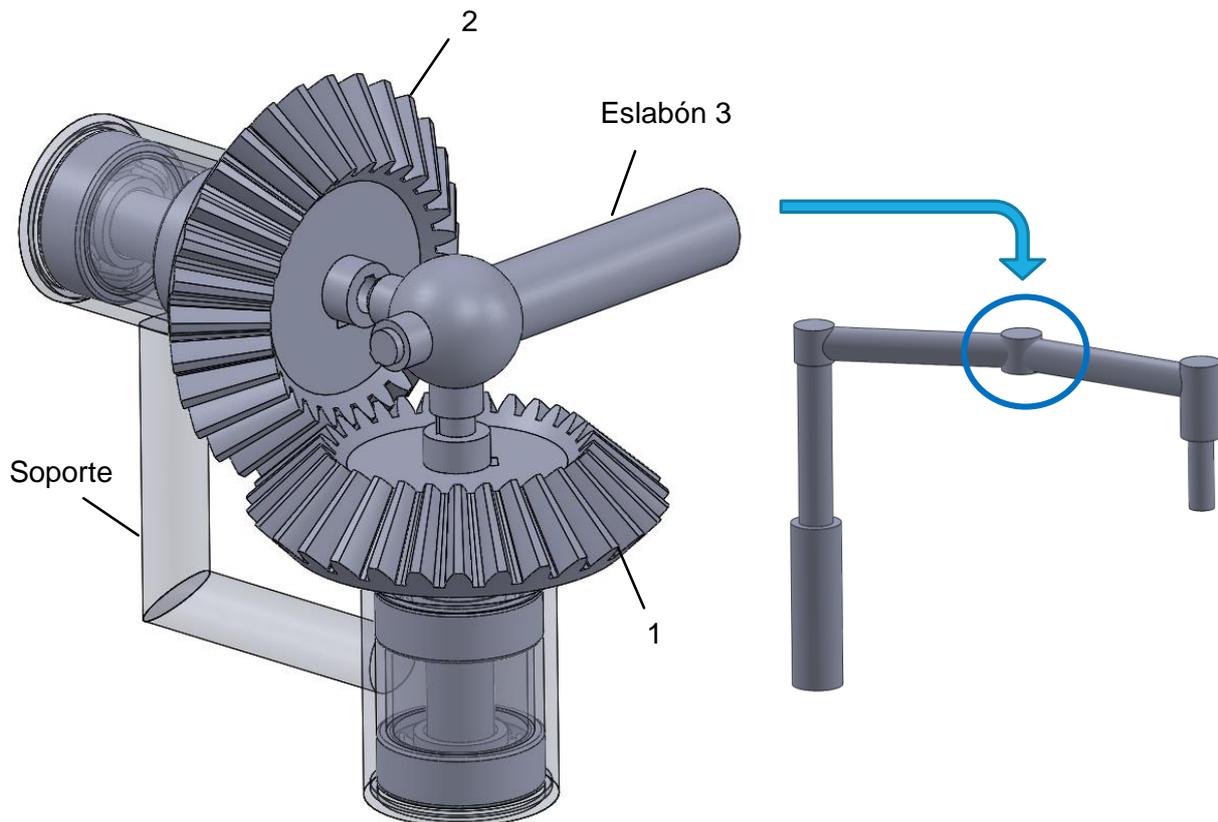


Figura 21. Junta reconfigurable para robot SCARA

Como se observa en la figura 18, ésta consiste básicamente una junta esférica y en un par de engranajes cónicos, etiquetados con los números 1 y 2 según se indica, y cuyos ejes de rotación se disponen a 90° entre sí, siendo el eje de rotación del engranaje cónico 1 perpendicular al plano horizontal XY y el del engranaje 2 normal al vertical YZ. Cada eje está unido a su engranaje mediante una conexión chaveta-chavetero y gira sobre un par de rodamientos de bolas separados mediante un casquillo y apoyados en un soporte solidario al eslabón 2, siendo el eje solidario al engranaje 1 el único que es actuado por un motor, concretamente el correspondiente al par de rotación 2. Asimismo, estos ejes sobresalen ligeramente del engranaje y poseen un chavetero en su interior que permite la conexión de los acoplamientos móviles del eslabón 3 (véase figura 22, en la que se ha ocultado la junta esférica y el eslabón 3).

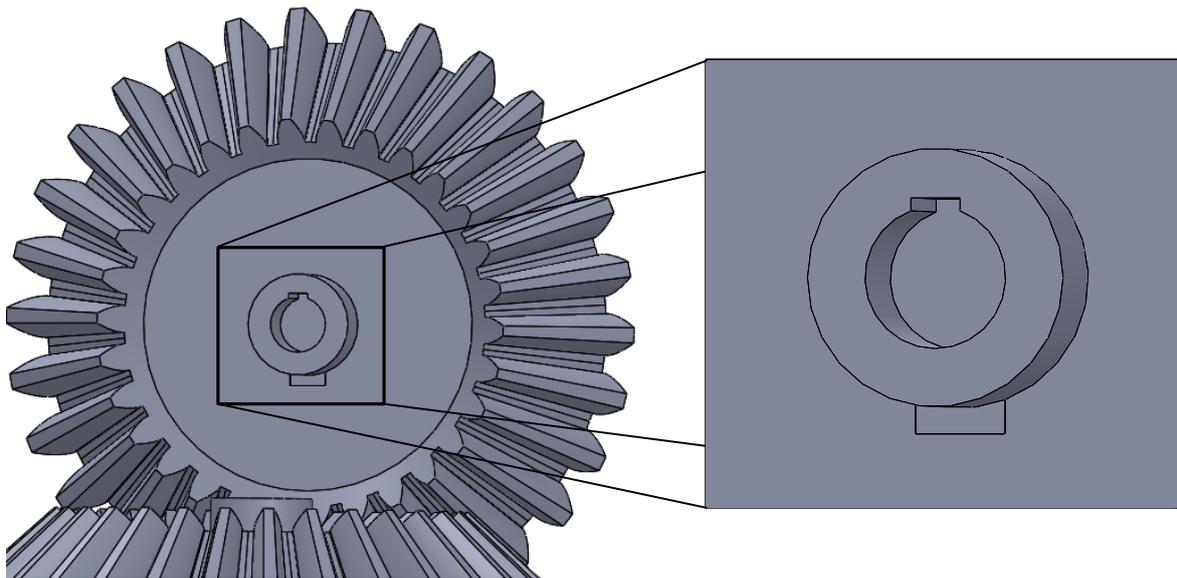


Figura 22. Chavetero de los ejes acoplados a los engranajes

En cuanto a la junta esférica, ésta es solidaria al eslabón 3, el cual ha sido modelizado mediante la barra cilíndrica de la figura 21, y posee unos chaveteros en los que se ubican los mencionados acoplamientos móviles, los cuales se basan en unos ejes con chavetas que permiten conectar el eslabón 3 a los ejes de los engranajes (véase figura 23).

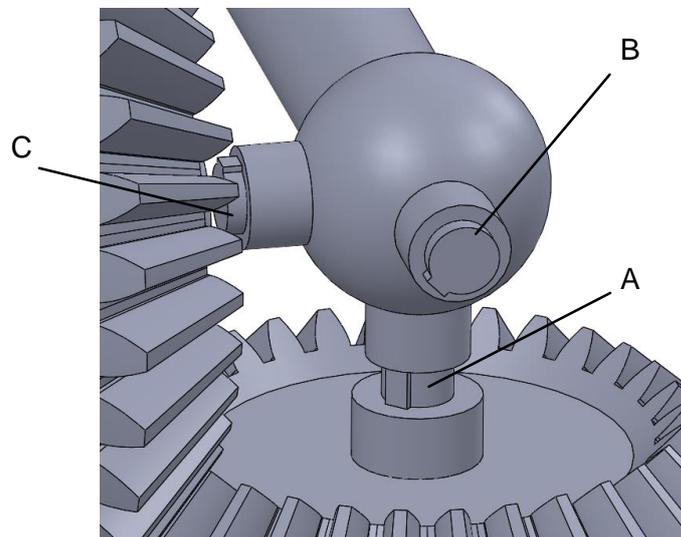


Figura 23. Junta esférica y acoplamientos

Tras presentar los componentes que conforman el mecanismo de la junta reconfigurable, se procede a describir su funcionamiento. Las figuras 21, 23 y 24 muestran el estado de la junta en la configuración 1, en la cual el único acoplamiento activo es el A, el cual está unido al engranaje 1, de manera que el eslabón 3 tiene permitido el giro respecto al eje 2, movimiento el cual es inducido por el motor del par de rotación.

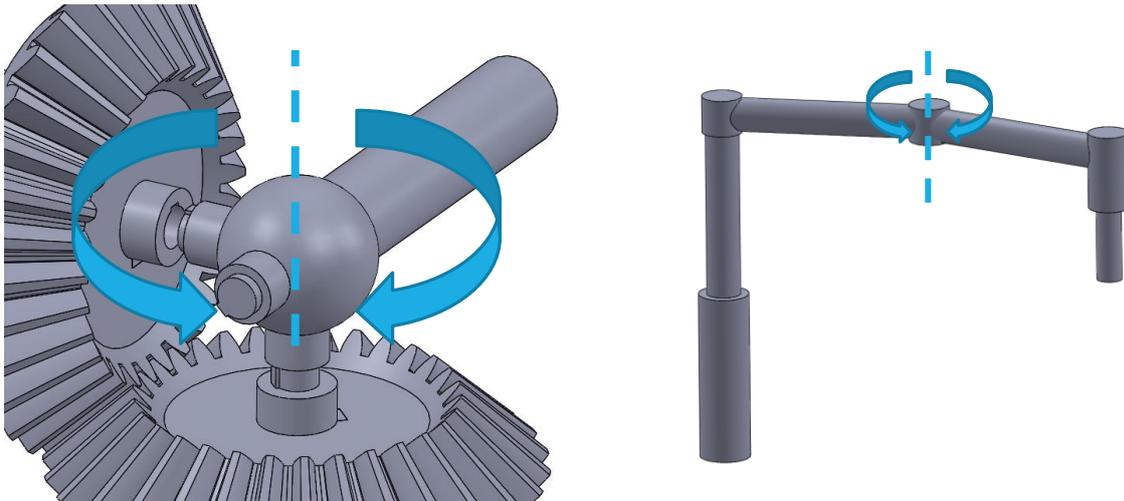


Figura 24. Funcionamiento de la configuración 1

En el instante en el que se requiera la transición a la configuración 2, el eslabón 3 se colocará en la posición en la que las chavetas de los acoplamientos estén alineadas con los chaveteros correspondientes (véase figura 25). Una vez en esa posición, el acoplamiento C se desliza hasta conectarse con el chavetero del eje solidario al engranaje 2 y, acto seguido, el acoplamiento A se desconecta.

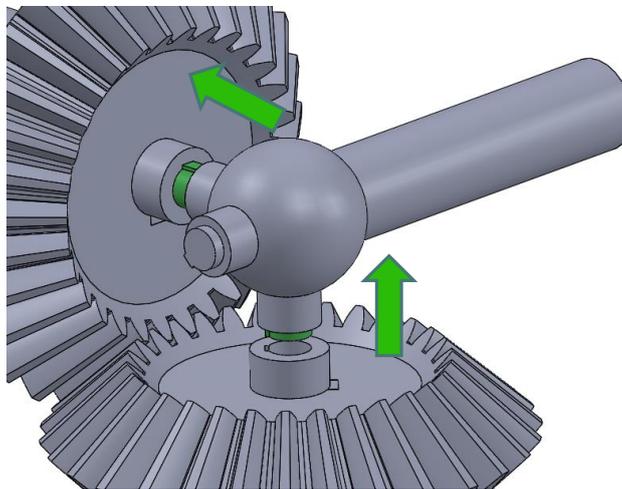


Figura 25. Conexión de C y desconexión de A

Una vez realizada la conexión y desconexión mencionadas, el eslabón es libre de girar respecto al eje del engranaje 2. Valiéndose de ese giro, el actuador hace girar al engranaje 1, que, a su vez, hace girar al 2, hasta colocar el eslabón a 90° con respecto a la horizontal (véase figura 26).

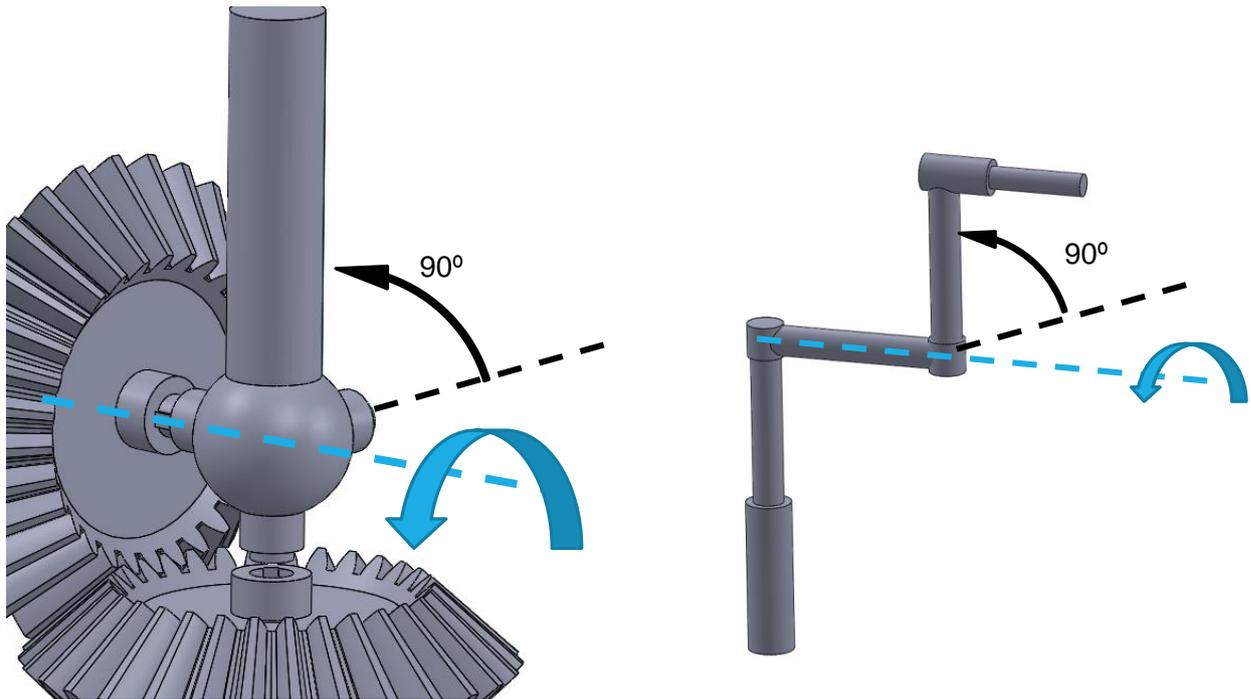


Figura 26. Colocación del eslabón 3 a 90°

Tras colocar el eslabón a 90° , se procede a realizar la conexión del acoplamiento B y, acto seguido, la desconexión del C, como se muestra en la figura 27.

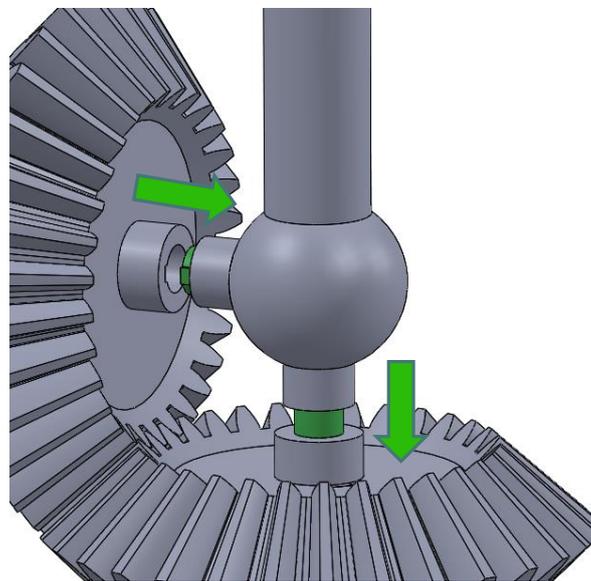


Figura 27. Conexión de B y desconexión de C

Una vez ejecutada dicha operación, el mecanismo habría alcanzado la configuración 2 (véase figura 28), en la que el giro alrededor del eje 2 sigue estando permitido, pero con la diferencia de que dicho eje coincide con el eje del eslabón 3, dando como resultado la posibilidad de un movimiento descrito en apartado anteriores. Nótese que el par cinemático 2 siempre se actúa mediante el mismo motor, tanto en las

configuraciones 1 y 2 como en la maniobra de reconfiguración. Asimismo, el hecho de que la junta se ubique en un par de rotación actuado determina la condición de “activa” de la junta reconfigurable.

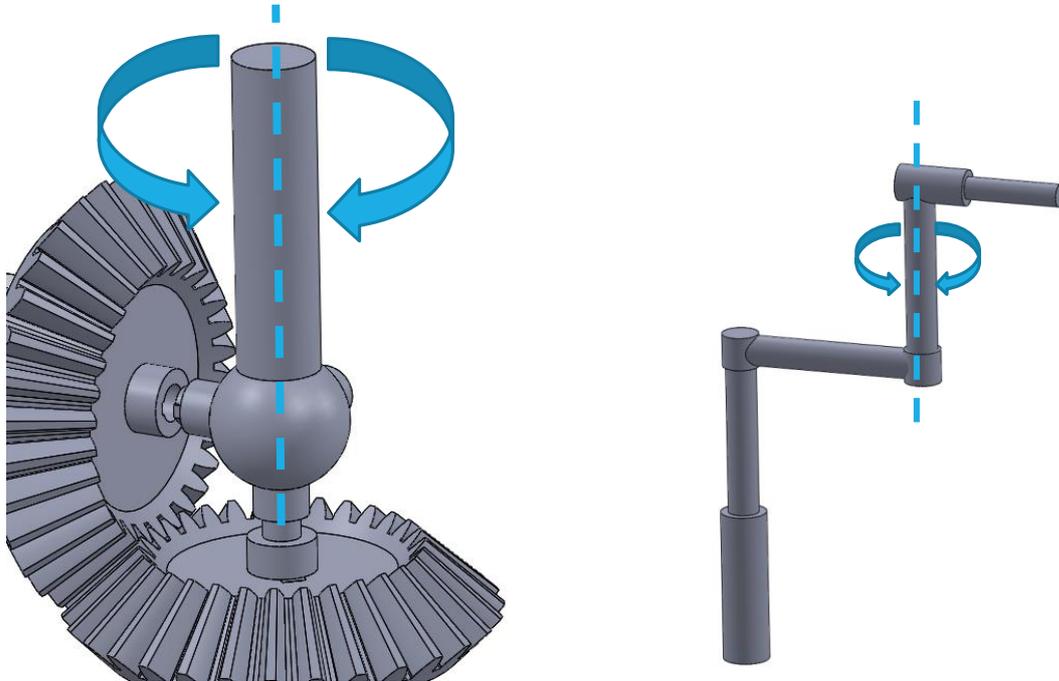


Figura 28. Funcionamiento de la configuración 2

8.2.1.3 Ejemplo de aplicación de junta pasiva: Manipulador paralelo de 3 gdl

El ejemplo de aplicación de una junta reconfigurable pasiva, en cambio, se desarrollará en base a un manipulador paralelo de 3 gdl, cuyo esquema cinemático se ha realizado mediante el software GIM y se muestra en la figura 29. El manipulador consiste en una plataforma móvil a la cual se conectan tres extremidades idénticas CPU, las cuales están constituidas, por tanto, por un par cilíndrico, un par prismático y una junta universal, siendo el universal la conexión a la plataforma y el cilíndrico el único par actuado en cada brazo. Los tres gdl del mecanismo se corresponden a cada uno de los movimientos traslacionales de los pares cilíndricos de las extremidades.

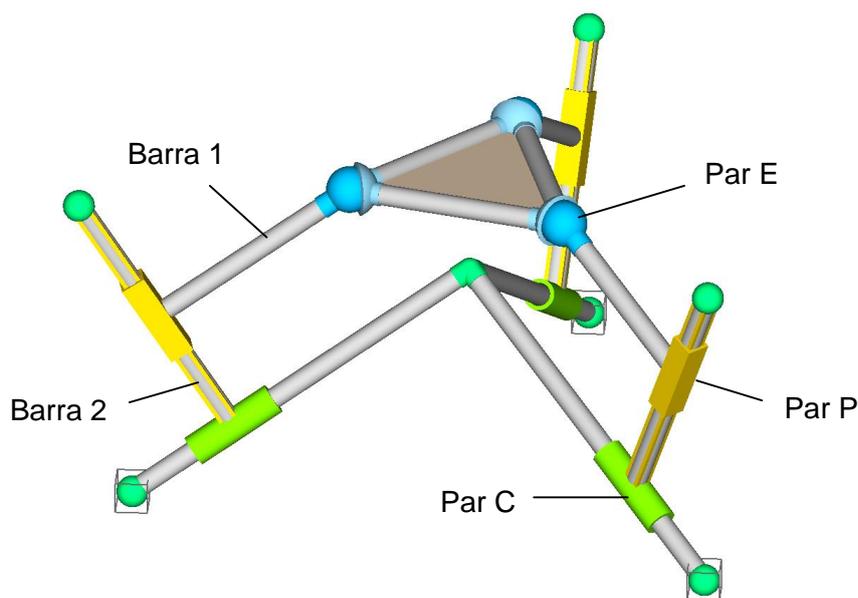


Figura 29. Manipulador paralelo de 3 gdl

Como se observa en el esquema de la figura 29, los pares cilíndricos se pueden trasladar por unas guías que confluyen en un punto P. Los pares prismáticos se mueven siempre en un plano perpendicular a la dirección de la guía de su pata y las barras solidarias a los pares P, en cambio, se mueven paralelas a la misma.

Se pretende conseguir 2 configuraciones distintas del mecanismo, en las cuales, si bien no se produce un cambio en la disposición de los elementos o juntas cinemáticas ni una alteración de los gdl del mecanismo principal, se consigue un movimiento distinto de la plataforma móvil. Concretamente se busca conseguir una configuración en la que la plataforma posea un movimiento de traslación pura y otra en la que el movimiento sea de rotación pura. Para ello, se plantea el diseño de una junta reconfigurable, concretamente el de una junta universal reconfigurable. Como se aprecia en la figura anterior, dicha junta universal se ha representado mediante una rótula esférica, puesto que, en realidad, consiste en una junta esférica bloqueable. Esta junta posee tres ejes de rotación (numerados como se muestra en la figura 30): el eje número 1 es colineal a la barra 1; el eje 2 pertenece al plano perpendicular al que definen las barras 1 y 2 y es, por tanto, ortogonal al eje 1; el eje 3 es ortogonal a los ejes 1 y 2 en la configuración de traslación y de dirección variable en la configuración de rotación.

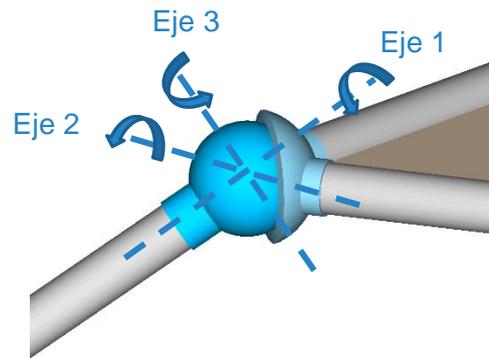


Figura 30. Ejes de rotación de junta esférica

La configuración de traslación pura se consigue cuando la rotación está permitida alrededor de los ejes 1 y 3, pero el eje 2 está bloqueado. La configuración de rotación pura, en cambio, se logra cuando el eje bloqueado es el 1 y la rotación de la junta es libre en los ejes 2 y 3. Para materializar una junta que cumpla con dichos requisitos, se propone la siguiente modelización de junta reconfigurable, la cual se ha desarrollado mediante el software SolidWorks:

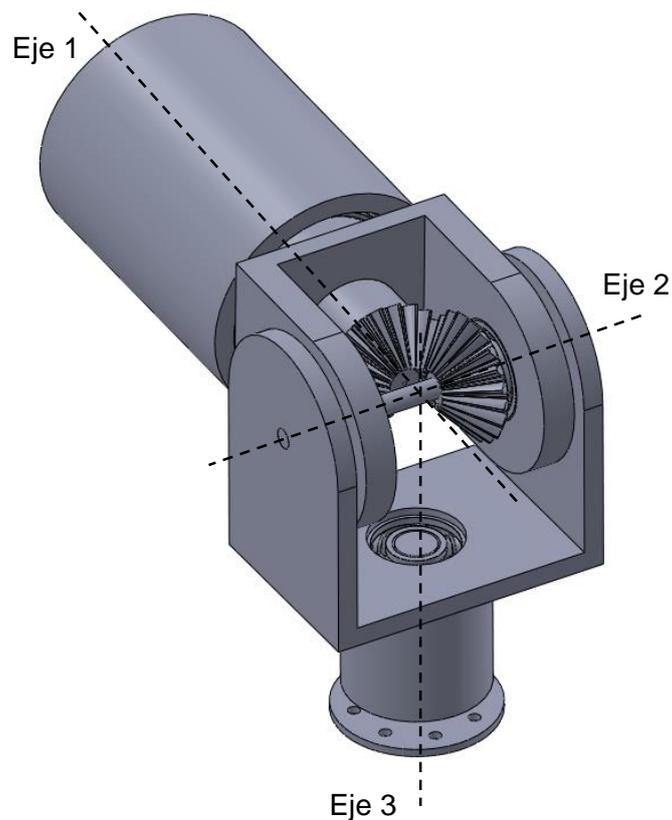


Figura 31. Junta reconfigurable para manipulador paralelo

En cuanto al fundamento de funcionamiento de la junta, se pueden distinguir 3 estados distintos en función de la disposición de los elementos que la conforman: dos de ellos relativos a las configuraciones deseadas y otro correspondiente a un estado de transición entre ambas. A continuación, se procede, en primer lugar, a detallar las características de los componentes que constituyen la junta reconfigurable y, seguidamente, a describir las situaciones de funcionamiento y transición de manera individualizada.

En las figuras 32, 33 y 34 se muestran vistas seccionadas respecto al plano que forman los ejes 1 y 3, en las cuales se pueden apreciar los distintos componentes de la junta. El elemento A consiste, básicamente, en un cilindro hueco solidario a la barra 1 en el cual se ha tallado un spline interno en el extremo izquierdo, según las figuras. El componente B es una pieza cuya rotación se produce alrededor del eje 1, sobre unos rodamientos apoyados en el elemento A, y el cual también posee un spline interno en el extremo izquierdo, del mismo módulo y radio primitivo que el del A, y adyacente a él. La pieza C es un acoplador móvil colineal al eje 1 y constituido por un spline externo en su izquierda, del mismo módulo y radio primitivo que los splines internos de los elementos A y B, y un spline interno de menores dimensiones en su derecha. En cuanto a la pieza D, ésta es un eje macizo cuya rotación se produce alrededor del eje 1, sobre unos rodamientos apoyados en el componente B. Dicho eje posee un spline externo en su extremo izquierdo, del mismo módulo y radio primitivo que el spline interno del acoplador C, y un engranaje cónico solidario en el extremo derecho. Este último engrana con un engranaje cónico de las mismas dimensiones dispuesto a 90° respecto a él, el cual es solidario al elemento E y cuyo giro se produce alrededor del eje 2 sobre unos rodamientos apoyados en B. Por último, F es el efector final, que se conecta directamente con la plataforma móvil y que tiene permitido el giro respecto al eje 3, sobre unos rodamientos apoyados en el elemento E.

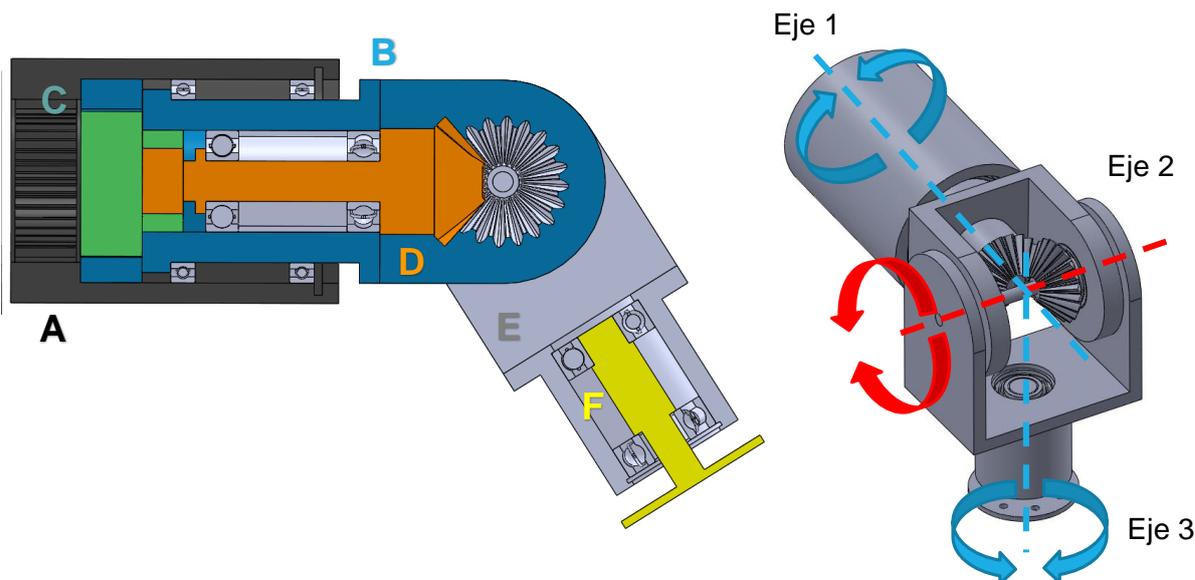


Figura 32. Sección de junta reconfigurable 1: configuración de traslación pura.

La figura 32 muestra la disposición de la junta para la situación de funcionamiento en la configuración de traslación de la plataforma. Se observa que el acoplador móvil C está conectado al spline interno de B y al spline externo de D, por lo que los tres componentes giran conjuntamente como un sólido rígido, y arrastran consigo a los elementos E y F. De esta manera, se comprueba que la rotación está permitida alrededor del eje 1 y del 3, pero restringida en el eje 2.

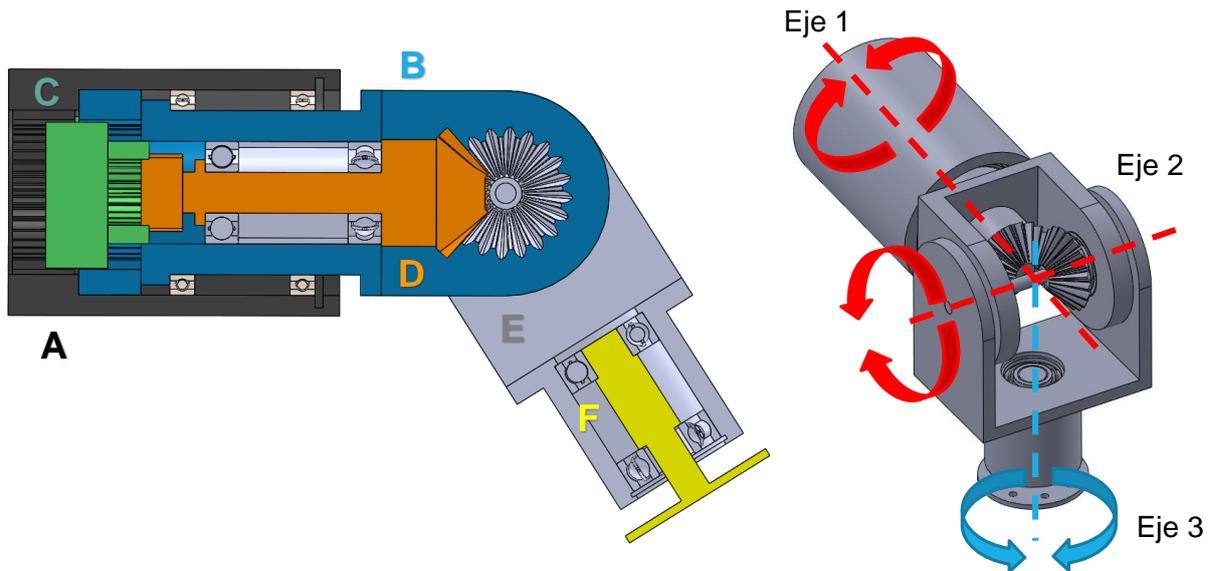


Figura 33. Sección de junta reconfigurable 2: configuración de transición.

Para producir la reconfiguración del mecanismo a la configuración de rotación pura de la plataforma móvil, la junta pasa por un estado de transición, el cual se ilustra en la figura 33. En dicha situación, se observa que el acoplamiento C se ha desplazado hacia la izquierda hasta conectarse con el spline interior del elemento A, pero sin perder el contacto con los splines asociados a B y D. Por lo tanto, los componentes A, B, C y D se comportan como un único sólido rígido, de manera que, como A es solidario a la barra 1, todos quedan fijados ella, sin posibilidad de giro alrededor del eje 1. De ese modo, la junta se comporta como una articulación respecto al eje 3, puesto que tanto el eje 1 como el 2 están bloqueados.

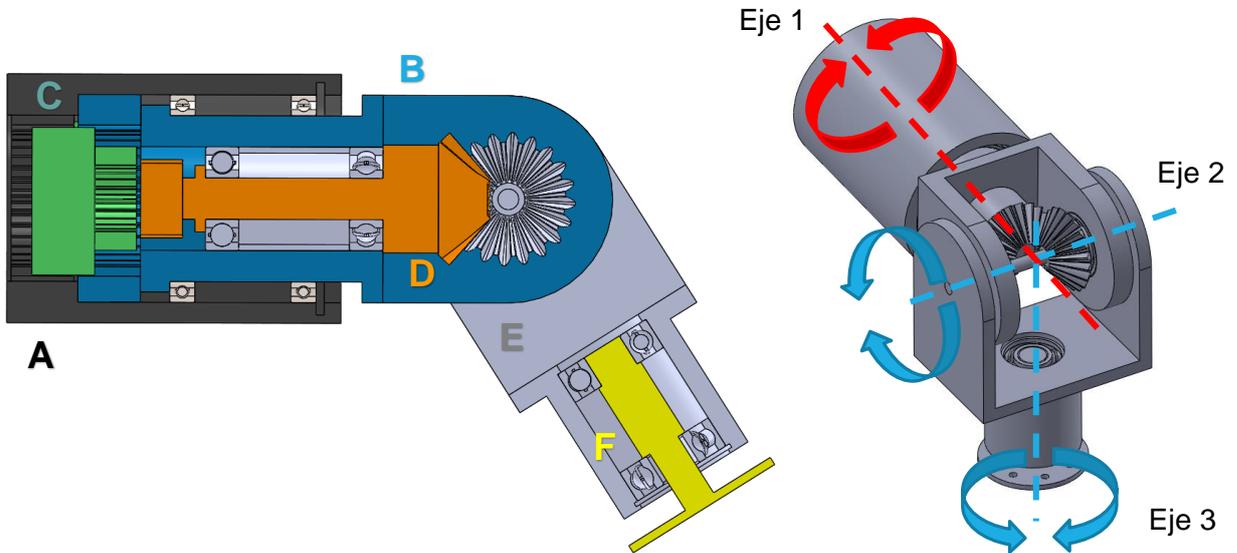


Figura 34. Sección de junta reconfigurable 3: configuración de rotación pura.

Una vez el acoplamiento móvil C se haya desplazado hacia la izquierda hasta haberse desconectado del elemento D, pero sin haber perdido conexión con B, se alcanza la situación de funcionamiento de la junta para la configuración de rotación pura. En esta disposición de la junta los elementos A, B y C están unidos entre sí mediante los splines correspondientes, haciendo que ningún elemento de la junta salvo D pueda girar respecto al eje 1. De esta manera, se deduce que la rotación de la junta es libre en los ejes 2 y 3, pero está restringida en el eje 1.

Asimismo, cabe mencionar que existe otra disposición posible de la junta (no ilustrada), la cual se alcanza cuando el acoplador C se ha desplazado hasta el extremo izquierdo del elemento A, habiéndose liberado de la conexión con B. En esta situación, la junta tiene liberados los 3 ejes de giro y, por tanto, se comporta como una junta esférica pura. Sin embargo, este estado no se ciñe estrictamente al proceso de reconfiguración planteado, por lo que se ha optado por no ilustrarlo.

Para poder producirse la transición entre configuraciones es necesario colocar el mecanismo en una posición concreta, denominada posición de reconfiguración. Ésta se caracteriza por poseer la plataforma móvil centrada y paralela al plano horizontal y los ejes número 3 de las juntas reconfigurables confluyentes en el punto P, de manera que los 3 ejes de la junta se disponen ortogonales entre sí. Esta posición se ha representado en la figura 35, en la cual se muestra una modelización CAD del mecanismo realizado mediante SolidWorks y al cual se le han implementado los modelos las juntas reconfigurables. En dicha figura puede observarse, por tanto, las características de la posición de reconfiguración, así como las juntas reconfigurables integradas en el mecanismo.

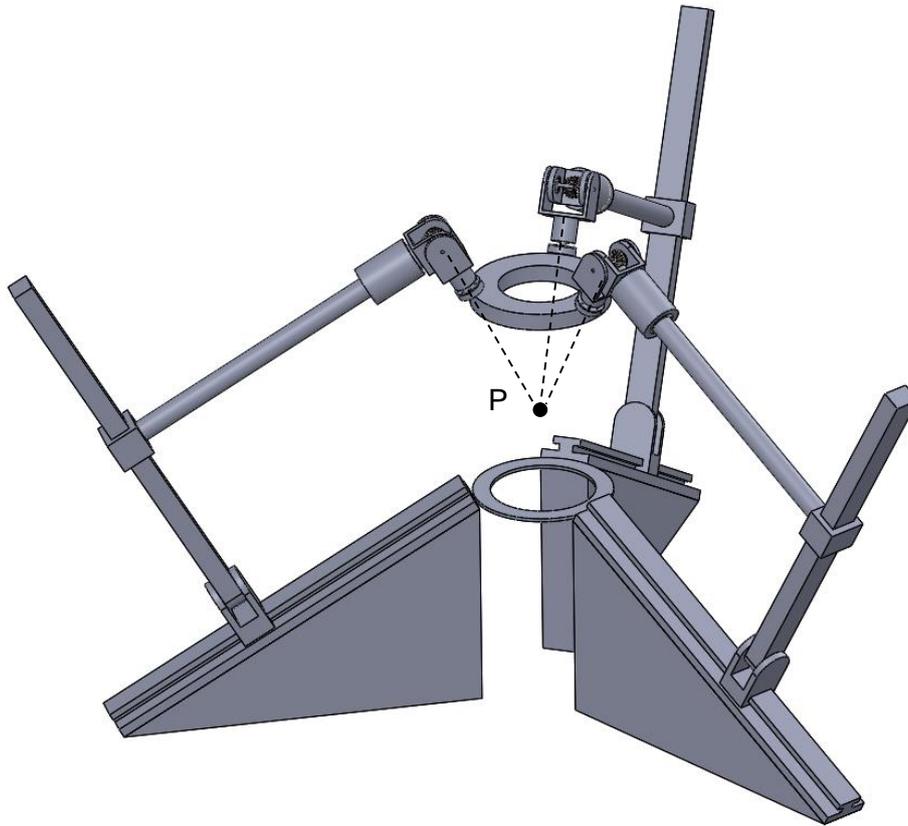


Figura 35. Manipulador paralelo con juntas reconfigurables

Finalmente, en las figuras 36 y 37 se muestran instantes de los movimientos de las dos configuraciones planteadas. Concretamente, en la figura 36 se observa el mecanismo en una posición correspondiente a la configuración de traslación pura, mientras que en la figura 37 se aprecia una posición de la configuración de rotación pura.

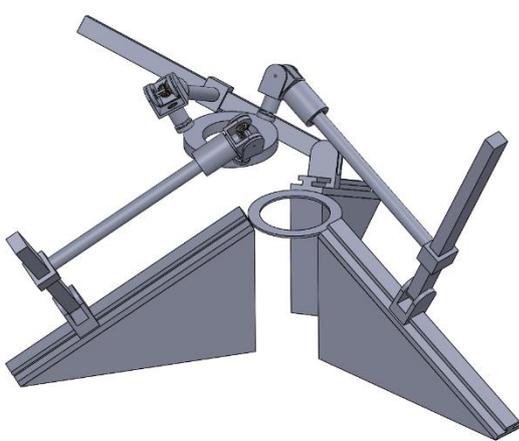


Figura 36. Configuración de traslación pura

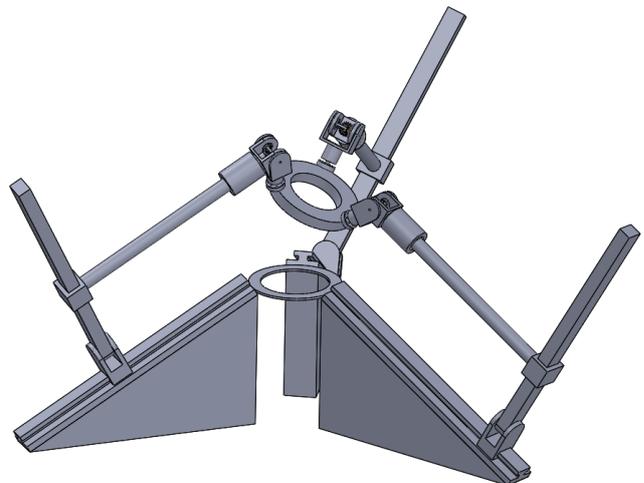


Figura 37. Configuración de rotación pura

8.2.2 Determinación de las restricciones geométricas

8.2.2.1 Planteamiento teórico

El segundo método de reconfiguración propuesto se basa en lograr la transición entre las distintas configuraciones deseadas mediante la imposición de restricciones geométricas alcanzadas durante el movimiento del mecanismo. Generalmente, este tipo de reconfiguración presenta, frente al uso de juntas reconfigurables, las ventajas de que no son necesarios pares cinemáticos especiales o el uso de motores independientes que efectúen la maniobra de reconfiguración, por lo que puede resultar una estrategia interesante en mecanismos orientados a aplicaciones en las que la ligereza sea un factor importante. Sin embargo, posee el inconveniente de que las posibilidades de diseño se ven notablemente más limitadas que las que ofrecen las juntas reconfigurables y el proceso de diseño suele requerir más iteraciones para lograr una conexión posible entre configuraciones.

El objeto de la imposición de restricciones geométricas es la de, valiéndose de la posición y orientación alcanzadas durante el movimiento y características geométricas de los elementos que conforman el mecanismo, modificar los parámetros del mismo, lo cual puede materializarse de distintas maneras. Una opción consiste en que, durante el movimiento del mecanismo, a alguno de los elementos se le restrinja algún gdl y se le permita otro distinto, de modo que pueda generar un tipo de movimiento diferente al que se le permitía originalmente. Otra posible forma de lograrlo, la cual se desarrollará en el ejemplo de aplicación presentado a continuación, es la de formar una cadena cinemática cerrada durante la reconfiguración, es decir, mientras se produce el cambio en los parámetros cinemáticos.

8.2.2.2 Ejemplo de aplicación: Robot con juntas prismáticas bloqueables

En el presente subapartado se expondrá el caso de un robot constituido por dos brazos antropomórficos idénticos de 6 gdl cada uno. Este mecanismo se ha concebido pensando en ser utilizado en aplicaciones espaciales, tales como realizar operaciones a bordo de un satélite en órbita, por lo que la ligereza, simplicidad y compacidad han sido factores determinantes a la hora de desarrollar el diseño. Con objeto de cumplir con dichas limitaciones de diseño, se plantean las siguientes dos configuraciones para el mecanismo:

Por una parte, una configuración principal, de funcionamiento en órbita, en la que los brazos poseen 6 gdl, que corresponden a los 6 pares de rotación del mecanismo, y una longitud de los elementos 1 y 2 determinada (véase figura 38).

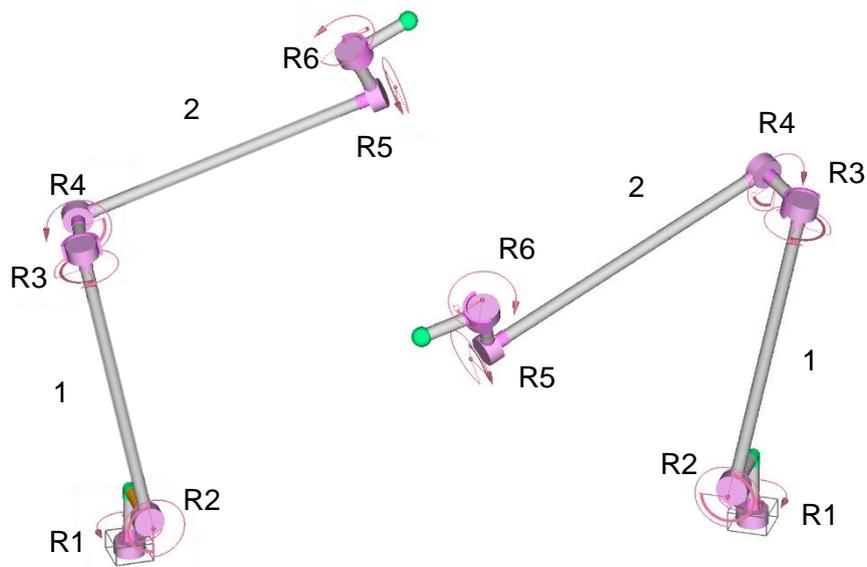


Figura 38. Configuración principal

Por otra parte, una configuración auxiliar con los mismos 6 gdl, pero con una longitud de los elementos más reducida (véase figura 39), y cuyo fin es el de poder mantener plegado el mecanismo de manera más compacta durante la fase de lanzamiento.

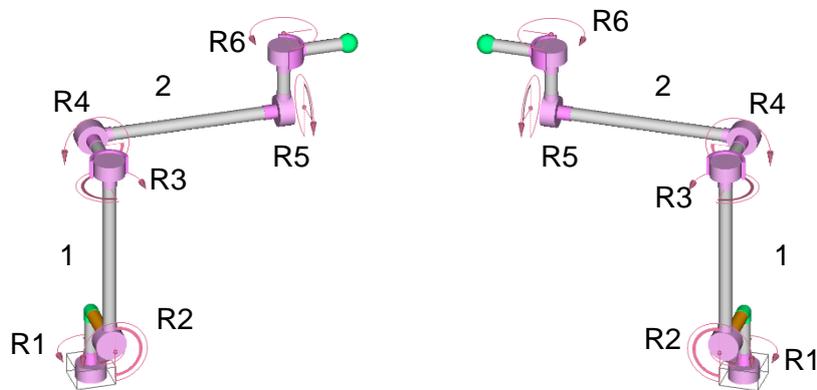


Figura 39. Configuración auxiliar

Por tanto, al ser la correspondiente a la fase de lanzamiento, la configuración auxiliar será la configuración inicial del mecanismo. Una vez en órbita, para conseguir extender las barras 1 y 2 hasta lograr la configuración de funcionamiento, no se emplearán motores adicionales que produzcan el desplazamiento de unos pares prismáticos ubicados en las mismas, sino que se conseguirá mediante unas determinadas restricciones geométricas alcanzadas durante el movimiento de la configuración auxiliar y un mecanismo de freno implantado en las barras, el cual está bloqueado hasta producir la reconfiguración y que puede desbloquearse simplemente activando un solenoide. Las restricciones geométricas mencionadas consistirán en formar una cadena cinemática cerrada al unir entre sí los efectores finales de los brazos, lo cual se produce en una posición determinada de la configuración auxiliar.

A continuación, se presenta la modelización CAD del mecanismo realizado en SolidWorks, a través del cual se muestra, mediante la sucesión de posiciones representadas en la figura 40, el movimiento de la configuración auxiliar desde la posición del mecanismo en su estado plegado hasta la posición en la que comienza la reconfiguración, es decir, hasta que se forma la cadena cinemática cerrada. Para alcanzar esta última posición mencionada, los motores de los pares de rotación se actúan de manera que se produzcan los siguientes desplazamientos angulares en cada brazo (Nota: el sentido de giro se ha definido + si éste coincide con el representado en la figura 39 y – si es el contrario):

Par de rotación	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Desplazamiento angular	90º	90º	180º	90º	90º	180º
Sentido	-	+	-	+	+	-

Tabla 2. Desplazamientos angulares

Conviene destacar que los motores que generan desplazamientos angulares de cada gdl se han actuado simultáneamente, salvo el par de rotación R1 del brazo izquierdo, según la figura 39, el cual se ha retrasado ligeramente en el tiempo con objeto de no producir una colisión entre ambos brazos durante el movimiento.



Figura 40. Maniobra de conexión de los brazos robóticos

En el instante en el que se conectan los efectores finales (los cuales en las figuras se han representado en color verde cuando no están conectados entre ellos y en rojo cuando si hay conexión) se cierra la cadena cinemática y es posible realizar la extensión de brazos en la que se basa la reconfiguración en cuestión. Para ello, se desbloquean los mecanismos de freno ubicados dentro de cada barra dotando al mecanismo de unos pares prismáticos pasivos durante el proceso de reconfiguración y produciendo el incremento de longitud de barra deseado. En la figura 41 se muestra dicho proceso de extensión.



Figura 41. Alargamiento de los brazos robóticos

Tras alcanzar la longitud deseada, los efectores finales se desconectan entre ellos, abriendo la cadena cinemática, y dando como resultado una configuración con dos brazos de mayor alcance al inicial (véase figura 42), los cuales ya están listos para realizar las operaciones que se les asignen.

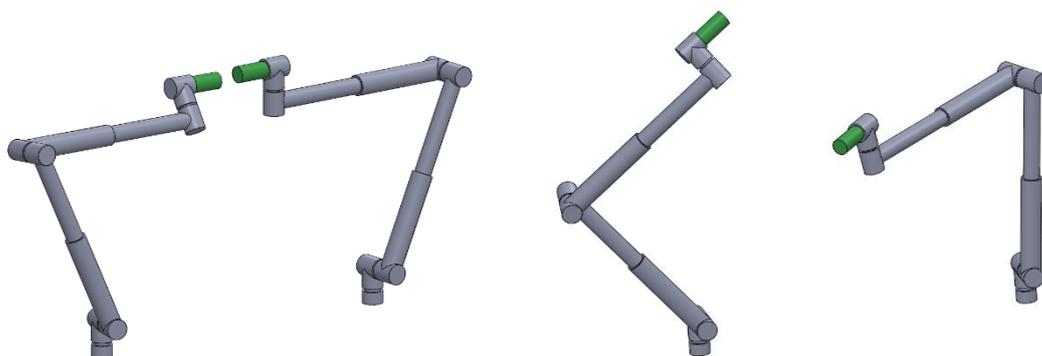


Figura 42. Desconexión de efectores finales. Configuración final.

8.3 Bloque III

8.3.1 Planteamiento teórico

En este tercer bloque se describe la última etapa concerniente a la metodología planteada, el cual se basa en determinar el modo de activación de la reconfiguración del mecanismo que está siendo diseñado. El “modo de activación” hace alusión al criterio en base al cual se desencadena el proceso de permutación entre configuraciones. Dicho criterio puede ser muy distinto de un diseño a otro y depende, fundamentalmente, de las características de la aplicación a la cual vaya a ser destinado el mecanismo reconfigurable. A continuación, se enumeran algunos de los criterios más destacables que pueden emplearse para activar la reconfiguración:

- **Alcanzar una determinada posición y/u orientación del efector final y/o de alguno de los elementos y/o pares cinemáticos.** Este modo de activación se aplicaría, por ejemplo, en el robot con pares prismáticos bloqueables estudiado en el Bloque II, una vez los efectores finales llegaran a la posición de conexión.
- **Medir un determinado valor de fuerza aplicada en el efector final, en alguno de los elementos o en algún par cinemático.** Este criterio podría aplicarse, entre otros, en un robot destinado al *pick and place* con el que, si la fuerza a la que está sometida el efector final en el contacto con los objetos a manipular supera un determinado valor, se requiriese cambiar de configuración.
- **Medir una determinada velocidad o aceleración del efector final, de alguno de los elementos o de alguna de las juntas cinemáticas.** Aplicable, por ejemplo, en un caso en el que haya una configuración más adecuada para realizar el trabajo sin que se produzcan altas velocidades o aceleraciones, como podría ser el caso de un vehículo cuesta abajo que, pudiendo evitar la incorporación de frenos, pudiese adoptar una nueva configuración con la que poder realizar un mejor control de la velocidad.
- **Alcanzar un determinado número de ciclos de operación.** Este criterio podría emplearse, entre otros, en un robot que tuviera que realizar la misma operación de forma ininterrumpida en n piezas y que, seguidamente, tuviera que realizar una operación distinta para las mismas u otras piezas, para lo cual fuera necesario cambiar de configuración.
- **Detectar la presencia de un cuerpo con unas características determinadas al alcance del mecanismo.** Este modo de activación podría usarse, por ejemplo, en un vehículo de exploración de superficies planetarias que, al toparse con un obstáculo en el terreno, tuviera que modificar su configuración para poder sortearlo.

Para poder implementar cualquiera de dichos criterios de activación en un mecanismo reconfigurable, es necesario desarrollar un sistema electrónico que permita realizar las funciones de control de la reconfiguración del sistema mecánico (además del sistema electrónico del que se dispusiera para el control de las propias configuraciones). Para ello, se plantea basarse en un sistema de control como el representado de forma esquemática en la siguiente figura.

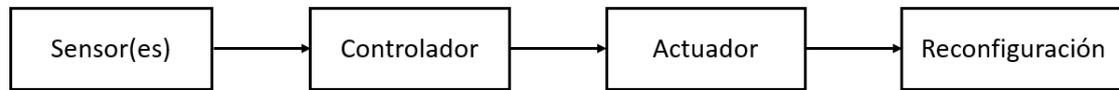


Figura 43. Sistema de control para la reconfiguración

Como se observa en dicho esquema, el sistema de control propuesto está formado por varios elementos. En primer lugar, se dispone de un (o varios) sensor que mide la variable o magnitud (distancia, longitud, ángulo, etc.) a evaluar. Seguidamente, la señal asociada a la variable medida se transmite a un controlador, el cual se encarga de interpretar y evaluar dicha señal en función del criterio que le haya sido programado. En caso de que se supere un umbral predeterminado, se emitirá una señal a un actuador que activará el mecanismo de reconfiguración.

Por último, es importante destacar que esta fase, al igual que las anteriores, es esencial para obtener un diseño óptimo en términos de funcionalidad, ya que de nada sirve disponer de un mecanismo con la aptitud para reconfigurarse si éste no es capaz de accionar dicha reconfiguración.

9. Planificación

A continuación, se presenta la planificación según la cual se ha estructurado el desarrollo de este proyecto de investigación, la cual se ha elaborado con objeto de organizar el trabajo, así como realizar una estimación del tiempo y recursos necesarios para su ejecución. Para dicho fin, se han definido, descrito y relacionado las distintas fases y actividades que comprende el proyecto y se ha establecido una secuencia lógica y coherente de las mismas que permita su desarrollo en condiciones óptimas.

9.1 Tareas

Se procede a exponer un listado de las tareas (T.) del proyecto y de sus características, las cuales se dividen en distintos paquetes de trabajo (P.T.):

P.T.1 Gestión del Proyecto

T.1.1 Alcance y planificación

Descripción de la tarea: al mismo tiempo que se recopila información y se analiza el Estado del Arte, se determina con precisión el conjunto de tareas y actividades necesarias para la consecución de los objetivos propuestos y se planifica por completo la elaboración del trabajo en base a dicho conjunto.

Duración: 90 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (15 horas), Ingeniero Sénior (5 horas).

Recursos técnicos: Ordenador.

Entregable: WBS y Diagrama de Gantt.

T.1.2 Redacción de memoria

Descripción de la tarea: tras fijar el alcance y plantear la planificación, se procede a redactar los diferentes apartados necesarios para la elaboración de la memoria del proyecto, lo cual se realiza a medida que se realizan avances en el trabajo.

Duración: 175 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (50 horas), Ingeniero Sénior (10 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, licencia Microsoft Office.

Entregable: Memoria del proyecto.

P.T.2 Labor de investigación

T.2.1 Recopilación de información

Descripción de la tarea: se busca y recopila la información requerida para el desarrollo del trabajo, tratando de obtenerla de diversas fuentes para poder contrastarla y clasificar la información de calidad.

Duración: 60 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (35 horas), Ingeniero Sénior (8 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, artículos académicos.

Entregable: Información clasificada.

T.2.2 Análisis del Estado del Arte

Descripción de la tarea: tras recopilar suficiente información, se procede a estudiarla y analizar el Estado del Arte de la materia en cuestión.

Duración: 90 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (40 horas), Ingeniero Sénior (6 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, artículos académicos.

Entregable: Apartado del análisis y crítica del Estado del Arte.

P.T.3 Diseño de Bloque I (Configuraciones)

T.3.1 Planteamiento teórico

Descripción de la tarea: se realiza el planteamiento teórico del primer bloque de la metodología, en el que se trata el diseño de configuraciones y el análisis cinemático y dinámico.

Duración: 10 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (10 horas), Ingeniero Sénior (3 horas).

Recursos técnicos: Ordenador.

Entregable: Descripción del planteamiento teórico del bloque.

T.3.2 Ejemplo de aplicación SCARA

Descripción de la tarea: se desarrolla el ejemplo de aplicación del Bloque I, basado en el análisis cinemático y dinámico de la propuesta de reconfiguración para el robot SCARA.

Duración: 50 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (25 horas), Ingeniero Sénior (5 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, licencia SolidWorks.

Entregable: Archivo SolidWorks, descripción de las configuraciones y análisis cinemático y dinámico.

P.T.4 Diseño de Bloque II (Reconfiguración)

T.4.1 Planteamiento teórico

Descripción de la tarea: una vez terminado con el primer bloque, se establecen las bases teóricas del Bloque II, en el que se tratan las estrategias de reconfiguración.

Duración: 10 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (15 horas), Ingeniero Sénior (2 horas).

Recursos técnicos: Ordenador.

Entregable: Descripción del planteamiento teórico del bloque.

T.4.2 Ejemplo de aplicación SCARA

Descripción de la tarea: se desarrolla el primer ejemplo de aplicación del Bloque II, en el que se trata el diseño de la junta reconfigurable propuesta para la reconfiguración de la alternativa de diseño del robot SCARA presentada en el Bloque I.

Duración: 30 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (35 horas), Ingeniero Sénior (5 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, licencia SolidWorks.

Entregable: Archivo SolidWorks, descripción de la junta reconfigurable.

T.4.3 Ejemplo de aplicación Manipulador paralelo

Descripción de la tarea: se desarrolla el segundo ejemplo de aplicación basado en el manipulador paralelo que alcanza la reconfiguración también mediante juntas reconfigurables.

Duración: 40 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (40 horas), Ingeniero Sénior (8 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, software GIM, licencia SolidWorks.

Entregable: Archivo GIM, archivo SolidWorks, descripción del manipulador paralelo reconfigurable.

T.4.4 Ejemplo de aplicación Robot con juntas P bloqueables

Descripción de la tarea: se trabaja en el último ejemplo de aplicación para el Bloque II, en el que se plantea el robot con juntas prismáticas bloqueables que alcanza la reconfiguración a partir de restricciones geométricas impuestas durante el movimiento del mismo.

Duración: 20 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (25 horas), Ingeniero Sénior (6 horas).

Recursos técnicos: Ordenador, software GIM, licencia SolidWorks.

Entregable: Archivo GIM, archivo SolidWorks y descripción del robot reconfigurable con juntas prismáticas bloqueables.

P.T.5 Diseño de Bloque III (Activación)

T.5.1 Planteamiento teórico

Descripción de la tarea: finalizado el Bloque II, se desarrolla el último bloque de la metodología propuesta, en el que se aborda el modo de activación de la reconfiguración de los mecanismos obtenidos.

Duración: 5 días.

Recursos humanos: Ingeniero Júnior (10 horas), Ingeniero Sénior (2 horas).

Recursos técnicos: Ordenador.

Entregable: Descripción del planteamiento teórico del bloque.

9.2 Hitos

Con objeto de realizar un control adecuado del cumplimiento de la planificación del trabajo, se establece una serie de hitos en fechas críticas del proyecto:

H.1 Verificación del alcance y planificación: Tras finalizar la tarea T.1.1.

H.2 Contrastación de la información: Una vez acabada la tarea T.2.1.

H.3 Verificación del Bloque I: Al finalizar la última tarea del Bloque I (tarea T.3.2).

H.4 Verificación del Bloque II: Al finalizar la última tarea del Bloque II (tarea T.4.4)

H.5 Verificación del Bloque III: Con la finalización del Bloque III (tarea T.5.1).

H.6 Entrega del proyecto: Al completar la elaboración de la memoria (tarea T.1.2).

Cabe decir que en el Anexo II se puede observar una tabla en la que se recogen las diferentes características de las tareas e hitos definidos en la planificación.

9.3 Diagrama de Gantt

Se procede a exponer el Diagrama de Gantt relativo a la presente planificación, el cual consiste en una representación gráfica de la secuencia cronológica de las distintas tareas e hitos que comprende el desarrollo del proyecto. El Diagrama de Gantt resulta una herramienta útil para visualizar la organización de las tareas e hitos definidos y permite realizar un control de la planificación y comprobar que los objetivos se están cumpliendo de manera satisfactoria.

Como se puede observar en dicho diagrama, el proyecto comienza el 2 de octubre del año 2018 y finaliza el 24 de junio de 2019, dando lugar, por tanto, a una duración total de 265 días. Es importante resaltar que la causa por la cual la duración de algunas tareas no es proporcional al número de horas invertidas en ellas radica en que, durante unos determinados periodos, la carga de trabajo exigida en otros proyectos que se llevan a cabo de forma simultánea es elevada, por lo cual algunas tareas poseen duraciones mayores a las que les corresponderían a priori, teniendo en cuenta las horas necesarias para su ejecución.

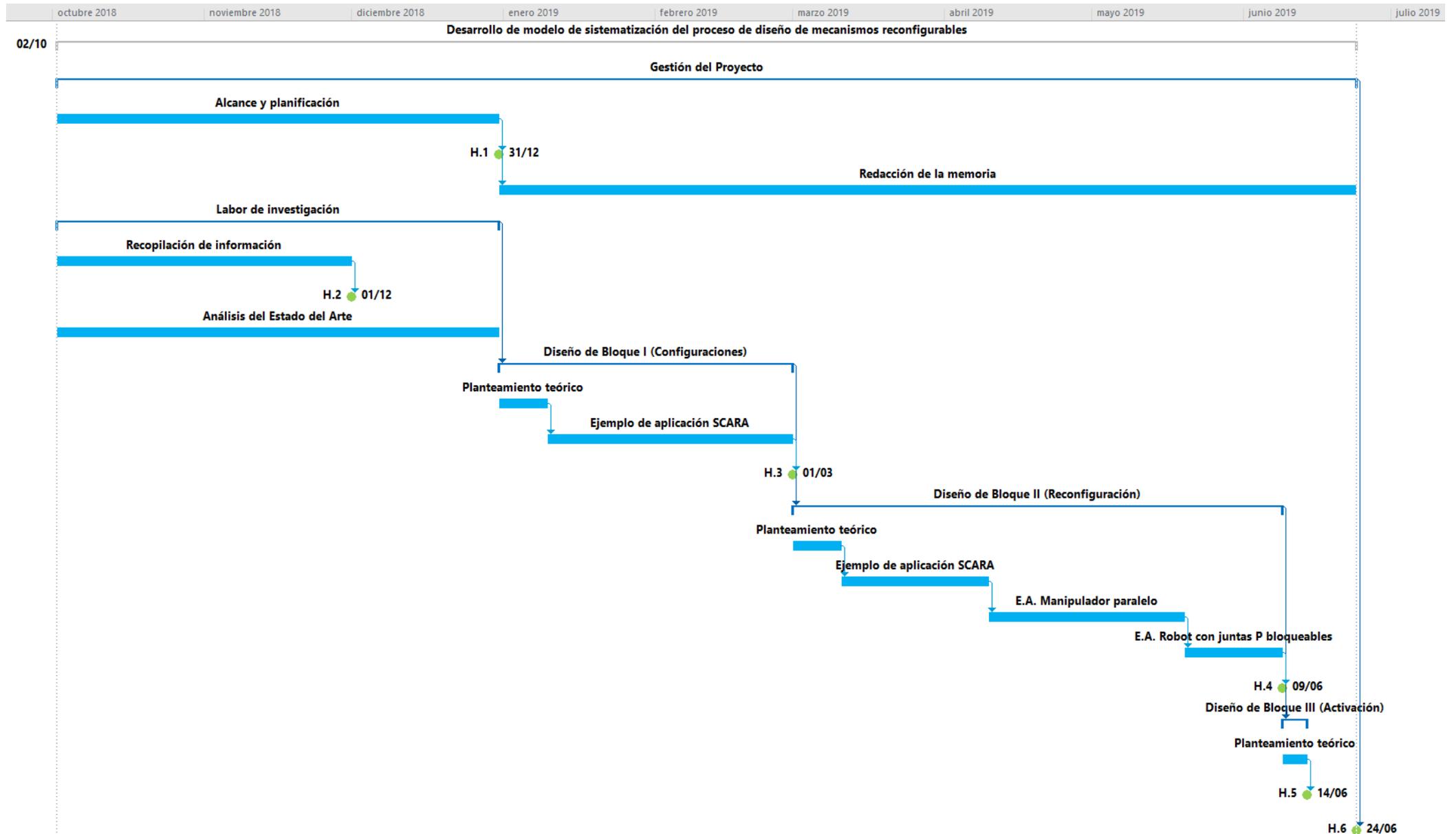


Figura 44. Diagrama de Gantt

10. Aspectos económicos

10.1 Presupuesto

En primer lugar, se presenta el presupuesto del proyecto, el cual consiste en un cálculo anticipado de los costes económicos asociados a la ejecución del trabajo que se realiza con el fin de poder estimarlos en unidades monetarias.

CONCEPTO	UNIDADES	Nº DE UNIDADES	COSTE UNITARIO	COSTE TOTAL
HORAS INTERNAS				9.750 €
Ingeniero Júnior	h	250	25 €	6.250 €
Ingeniero Sénior	h	70	50 €	3.500 €
AMORTIZACIONES				24 €
Ordenador	h	300	0,04 €	13 €
Licencia SolidWorks	h	80	0,11 €	9 €
Licencia GIM	h	20	0 €	0 €
Licencia Microsoft Office	h	200	0,01 €	2 €
GASTOS				650 €
Artículos académicos	uds	30	20 €	600 €
Material de oficina				50 €
COSTES DIRECTOS				10.424 €
Costes Indirectos	6%			625 €
SUBTOTAL				11.050 €
Imprevistos	10%			1.105 €
TOTAL				12.155 €

Tabla 3. Presupuesto

Se realizan algunas apreciaciones sobre el presupuesto calculado:

- El coste económico estimado para el desarrollo total del trabajo, teniendo en consideración todas las partidas, es de 12.155 €.
- Los costes relativos a las horas internas por parte de los ingenieros (júnior y sénior) suponen más del 80% del coste total del proyecto.
- Las amortizaciones incluyen el uso de ordenador y las licencias de los softwares usados, puesto que dichos elementos no se emplean únicamente en este proyecto. El coste unitario en este caso se ha calculado dividiendo el coste de

adquisición del elemento por la vida útil del mismo expresada en las unidades correspondientes (horas).

- Los costes indirectos, en los cuales se introducen costes asociados a la luz y limpieza del espacio de trabajo, entre otros, se estiman como el 6% de los costes directos.
- Se consideran gastos el material de oficina y los artículos académicos de los que se ha obtenido la información, ya que estos últimos se usan, en principio, exclusivamente para este trabajo de investigación.
- Al subtotal obtenido se le suma el 10% del mismo para cubrir posibles imprevistos que se produzcan en la ejecución del proyecto.

10.2 Descargo de gastos

En segundo lugar, se expone el descargo de gastos, el cual consiste en el resumen de todos los gastos generados a lo largo del desarrollo del trabajo. Este resumen, realizado una vez cerrado el proyecto, sirve para determinar el coste económico total en unidades monetarias y se emplea como herramienta de referencia para afinar la precisión de futuros presupuestos.

CONCEPTO	UNIDADES	Nº DE UNIDADES	COSTE UNITARIO	COSTE TOTAL
HORAS INTERNAS				10.500 €
Ingeniero Júnior	h	300	25 €	7.500 €
Ingeniero Sénior	h	60	50 €	3.000 €
AMORTIZACIONES				27 €
Ordenador	h	330	0,04 €	14 €
Licencia SolidWorks	h	90	0,11 €	10 €
Licencia GIM	h	20	0 €	0 €
Licencia Microsoft Office	h	220	0,01 €	3 €
GASTOS				930 €
Artículos académicos	uds	45	20 €	900 €
Material de oficina				30 €
COSTES DIRECTOS				11.457 €
Costes Indirectos	6%			687 €
TOTAL				12.144 €

Tabla 4. Descargo de gastos

En la tabla se observa un coste total de 12.144 €, inferior al coste estimado en el presupuesto, el cual era de 12.155 €. Se puede concluir que la partida de imprevistos (la cual no tiene cabida en el descargo de gastos) ha sido suficiente para cubrir los costes adicionales no contemplados en las diferentes partidas del presupuesto.

11. Análisis de riesgos

En este apartado se estudian los diferentes riesgos que podrían producir desviaciones en la planificación establecida y que podrían comprometer el correcto desarrollo del proyecto. Concretamente se procede a describir cada uno de los riesgos identificados, a evaluar su relevancia en base a su impacto y a su probabilidad de ocurrencia y, en función de ella, a plantear acciones de respuesta que permitan hacer frente a los riesgos y reducir su efecto en la ejecución del trabajo.

- **Pérdida de contenido:** A lo largo del proyecto se va generando contenido digital como documentos de texto, imágenes, tablas, archivos de los softwares utilizados, etc. que es susceptible de perderse total o parcialmente debido a un fallo informático o a un posible extravío. Este suceso implicaría tener que realizar de nuevo el trabajo perdido, lo cual supondría un retraso del plazo de ejecución de determinadas tareas. Su impacto podría llegar a ser muy elevado, aunque afortunadamente su probabilidad de ocurrencia es relativamente pequeña. Como acción de respuesta al riesgo, cada poco tiempo se realizan copias de seguridad, tanto en los ordenadores de trabajo como en la nube, de todo el contenido acumulado hasta el momento.
- **Errores de software:** Durante el desarrollo de los bloques que conforman la metodología, se emplean softwares informáticos (GIM y SolidWorks) para modelizar los mecanismos a estudiar en los ejemplos de aplicación. Al usar cualquiera de los softwares, podría producirse algún error que forzase el cierre repentino e inevitable de la aplicación. De esa manera, todo el progreso no guardado realizado en el archivo que estuviera siendo ejecutado en ese instante se perdería, sin dejar opción a recuperarlo. Por lo tanto, sería necesario reproducir de nuevo el trabajo realizado desde la última versión guardada del archivo, con el consecuente retraso de las fechas de finalización de las tareas asociadas a la modelización en cuestión. El riesgo en cuestión es bastante probable de producirse y su impacto es de nivel moderado. La respuesta adecuada en este caso sería asegurarse de guardar cada poco minutos los avances llevados a cabo en las diferentes modelizaciones.
- **Riesgos externos:** Dentro de este tipo de riesgos se consideran incidencias producidas por fenómenos estocásticos, tales como incendios, terremotos o apagones eléctricos, que no pueden ser predichos o eludidos. El impacto de estos fenómenos, en el caso de dañar de manera irreparable el ordenador en el que se contienen los diferentes archivos del proyecto, sería muy alto, pero su probabilidad de ocurrencia es mínima. No obstante, es necesario desarrollar una acción de respuesta ante tal riesgo. Concretamente se considera adecuado que, al igual que para el primer riesgo comentado, se realicen copias de seguridad en la nube de forma periódica.

Con el fin de priorizar los riesgos identificados, a continuación, se muestra la clasificación de los mismos en función de su impacto y su probabilidad de ocurrencia, empleando, para ello, la matriz probabilidad-impacto:

		IMPACTO				
		Muy bajo (0,05)	Bajo (0,1)	Moderado (0,2)	Alto (0,4)	Muy Alto (0,8)
PROBABILIDAD	Raramente (0,1)	Bajo 0,005	Bajo 0,01	Bajo 0,02	Moderado 0,04	Moderado 0,08 C
	Difícilmente (0,3)	Bajo 0,015	Bajo 0,03	Moderado 0,06	Moderado 0,12	Alto 0,24 A
	Posible (0,5)	Bajo 0,025	Moderado 0,05	Moderado 0,1	Alto 0,2	Alto 0,4
	Probable (0,7)	Bajo 0,035	Moderado 0,07	Moderado 0,14	Alto 0,28	Alto 0,56
	Casi seguro (0,9)	Moderado 0,045	Moderado 0,09	Alto 0,18 B	Alto 0,36	Alto 0,72

A → Riesgo de pérdida de contenido | **B** → Riesgo de errores de software | **C** → Riesgos externos

Tabla 5. Matriz probabilidad-impacto

Según se observa en la matriz, el riesgo de pérdida de información es aquel en el que mayor atención y recursos se han de invertir, seguido del riesgo de errores de software y los riesgos externos en último lugar.

12. Conclusiones

En el Trabajo de Fin de Grado expuesto se desarrolla un modelo de sistematización del proceso de diseño de mecanismos reconfigurables, los cuales consisten en mecanismos capaces de alcanzar distintas configuraciones a partir de la modificación del número, características y/o de la disposición relativa de sus elementos y/o pares cinemáticos con el fin de desempeñar diversas funciones.

La presente memoria, la cual contiene los diferentes aspectos que comprende el proyecto, ha iniciado con un breve resumen y una introducción que sirven para proporcionar unas nociones generales acerca del contenido de los próximos apartados. En siguiente lugar, se ha descrito el contexto del trabajo, mediante el cual se ha ubicado el ámbito del mismo. Asimismo, se han definido y establecido los objetivos que se pretenden alcanzar con la elaboración del trabajo y se ha determinado el alcance del mismo, el cual se ha ilustrado en el esquema EDT. De igual manera, se han presentado los beneficios que aporta el proyecto, diferenciando entre beneficios de divulgación y técnicos. Posteriormente, se ha realizado un exhaustivo análisis y crítica del Estado del Arte, donde se ha descrito la situación actual de la tecnología relativa a este ámbito.

A continuación, se ha descrito, apoyándose en ejemplos de aplicación ilustrativos, la metodología del trabajo, dividida en tres bloques: un primer bloque dedicado a la definición de las configuraciones a alcanzar por el mecanismo reconfigurable, seguido de sus análisis cinemáticos y dinámicos; un segundo bloque en el que se ha planteado la elección y diseño de la estrategia de reconfiguración que permita alternar entre las configuraciones propuestas; finalmente, un último bloque basado en la determinación del modo de activación de la reconfiguración.

Tras finalizar con la metodología, se han tratado aspectos directamente relacionados con la gestión del proyecto, como son la planificación, los aspectos económicos y un análisis de riesgos que podrían potencialmente perjudicar la ejecución del proyecto. Por último, se incluyen anexos donde se recoge la normativa vigente aplicable al proyecto y diferentes vistas de algunos de los mecanismos expuestos y sus componentes.

De la realización de este proyecto pueden destacarse los siguientes puntos. Por una parte, el procedimiento sistemático que se plantea en este trabajo pretende, mediante la descripción de los aspectos principales relativos al diseño y el desarrollo de los diversos ejemplos de aplicación, constituir una herramienta que facilite la concepción de mecanismos reconfigurables. De esa manera, al ofrecer un método que facilite el diseño, se promueve la creación de nuevos mecanismos reconfigurables, así como su implementación en diferentes ámbitos de la sociedad. Estos mecanismos resultan particularmente interesantes en la industria y en el sector espacial, campos en los que, hasta la fecha, no se han integrado, pero en los que ofrecerían multitud de oportunidades e importantes ventajas. En cuanto a los procesos industriales, la polivalencia de los mecanismos reconfigurables se presenta como una característica de gran valor, que puede aportar, entre otros, una gran flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema productivo ante las demandas y una reducción en costes y espacio debido a que se requeriría un menor número de mecanismos para realizar las mismas tareas. En el ámbito espacial, este tipo de mecanismos pueden ofrecer, entre

otras cualidades, gran ligereza y compacidad, propiedades esenciales para el ahorro de combustible y espacio en el vehículo de lanzamiento al que se integren. En dicho ámbito también resulta interesante la capacidad de adaptación de los vehículos de exploración de superficies planetarias a, por ejemplo, terrenos irregulares, propiedad que puede ser obtenida mediante la implementación de mecanismos reconfigurables.

Por otra parte, este trabajo cumple una función de divulgación científica sobre el campo de los mecanismos reconfigurables. Al tratar los diferentes conceptos expuestos, el presente proyecto contribuye a difundir conocimiento relativo a dichos mecanismos y, a raíz de ello, puede servir de apoyo para futuros trabajos de investigación. De esta manera, se fomenta el desarrollo de esta línea de investigación, la cual se presenta como un área de gran futuro y que ofrece multitud de posibilidades para realizar avances tecnológicos significativos que favorezcan la evolución de diferentes ámbitos relacionados con la ingeniería mecánica.

Bibliografía

- [1] ISO 8373:2012, Robots and robotic devices — Vocabulary.
- [2] O. Salgado. "Síntesis, Análisis y Diseño de Manipuladores Paralelos de Baja Movilidad," Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco UPV/EHU, 2008.
- [3] D. Collins, "What is a cartesian robot?," Linear Motion Tips [Online], 2018, Available at: <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>.
- [4] J. Farfan, M. A. Ramírez, H. M. Ramírez, C. Rodríguez, "Robot SCARA de 4 Grados de Libertad con Efecto Mecánico," Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México Ciudad de México, México, 2017.
- [5] J. M. Hollerbach, "Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator," MIT Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, USA, 1990.
- [6] A. Hernández, "Cinemática de Mecanismos: Análisis y Diseño," Madrid: Editorial Síntesis, 2008.
- [7] H. A. Moreno, "Robots Paralelos: Conceptos básicos y Aplicaciones," [Online], Universidad Politécnica de Madrid, 2012, Available at: <https://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>.
- [8] X. Huang, G. He, "Closed-form Direct Position Analysis of the General Stewart-Gough manipulator Robot," International Conference on Mechatronics and Automation, 2009.
- [9] V. E. Gough, "Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance", Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng., pp. 392–394, 1956-1957.
- [10] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 180, pp. 371–386, 1965–1966.
- [11] I. Bonev, "Delta Parallel Robot — the Story of Success" [Online], 2001, Available at: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>.
- [12] C. Kuo, J. S. Dai, H. S. Yan, "Reconfiguration principles and strategies for reconfigurable mechanisms, ASME/IEEE International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009.
- [13] Merriam-Webster On-Line Dictionary [Online], Available at: <http://www.merriam-webster.com/>.
- [14] P. L. Shick, "Topology: Point-Set and Geometric," Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [15] J. Zhao, Z. Ren, Y. Zhang, "Configuration Matching in Self-reconfigurable Process of Modular Self-reconfigurable Robots," International Conference on Mechatronics and Automation, 2006.

-
- [16] A. Valente, "Reconfigurable industrial robots: A stochastic programming approach for designing and assembling robotic arms," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 41, pp. 115-126, 2016.
 - [17] M. Palpacelli, L. Carbonari, G. Palmieri, M. Callegari, "Design of a Lockable Spherical Joint for a Reconfigurable 3-URU Parallel Platform," *Robotics*, 7(3), pp. 42, 2018.
 - [18] F. Aghili, K. Parsa, "A reconfigurable robot with lockable cylindrical joints", *IEEE Trans. Robotics*, vol. 25, pp. 785-797, 2009.
 - [19] M. C. Palpacelli, L. Carbonari, G. Palmieri, M. Callegari, "Analysis and design of a reconfigurable 3-DOF parallel manipulator for multimodal tasks", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, pp. 1975-1985, 2015.
 - [20] V. Petuya, E. Macho, O. Altuzarra, C. Pinto, A. Hernández, "Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms", *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 22, pp. 72-86, 2014.

Anexo I: Normativa aplicable

Actualmente la normativa vigente relativa al presente proyecto es la correspondiente a la norma ISO 9787:2013, titulada “Robots y dispositivos robóticos — Sistemas de coordenadas y nomenclaturas de moción” y publicada en mayo de 2013. En dicha norma se definen y especifican los sistemas de coordenadas para robots. Asimismo, se proporciona nomenclatura, incluyendo notación, para moción básica de robots. También está concebida con objeto de facilitar el alineamiento, ensayo y programación de robots.

La norma ISO 9787:2013 se aplica a todos los robots y dispositivos robóticos definidos en la norma ISO 8373:2012. Dicha norma, titulada “Robots y dispositivos robóticos — Vocabulario” y publicada en marzo de 2012, define los términos usados en relación a los robots y los dispositivos robóticos operando tanto en entornos industriales como no industriales.

Anexo II: Planos

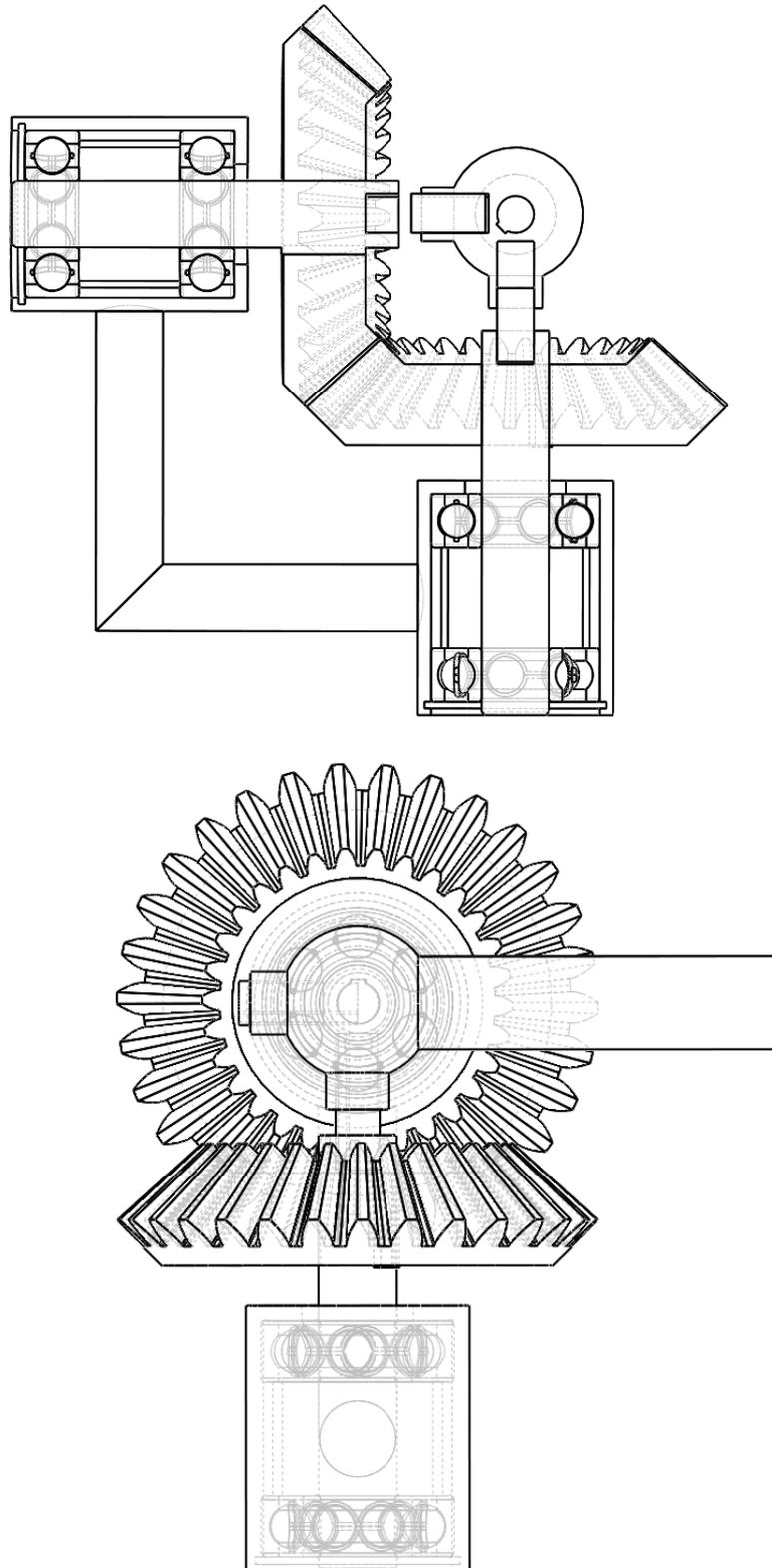


Figura 45. Vistas de la junta reconfigurable para el robot SCARA

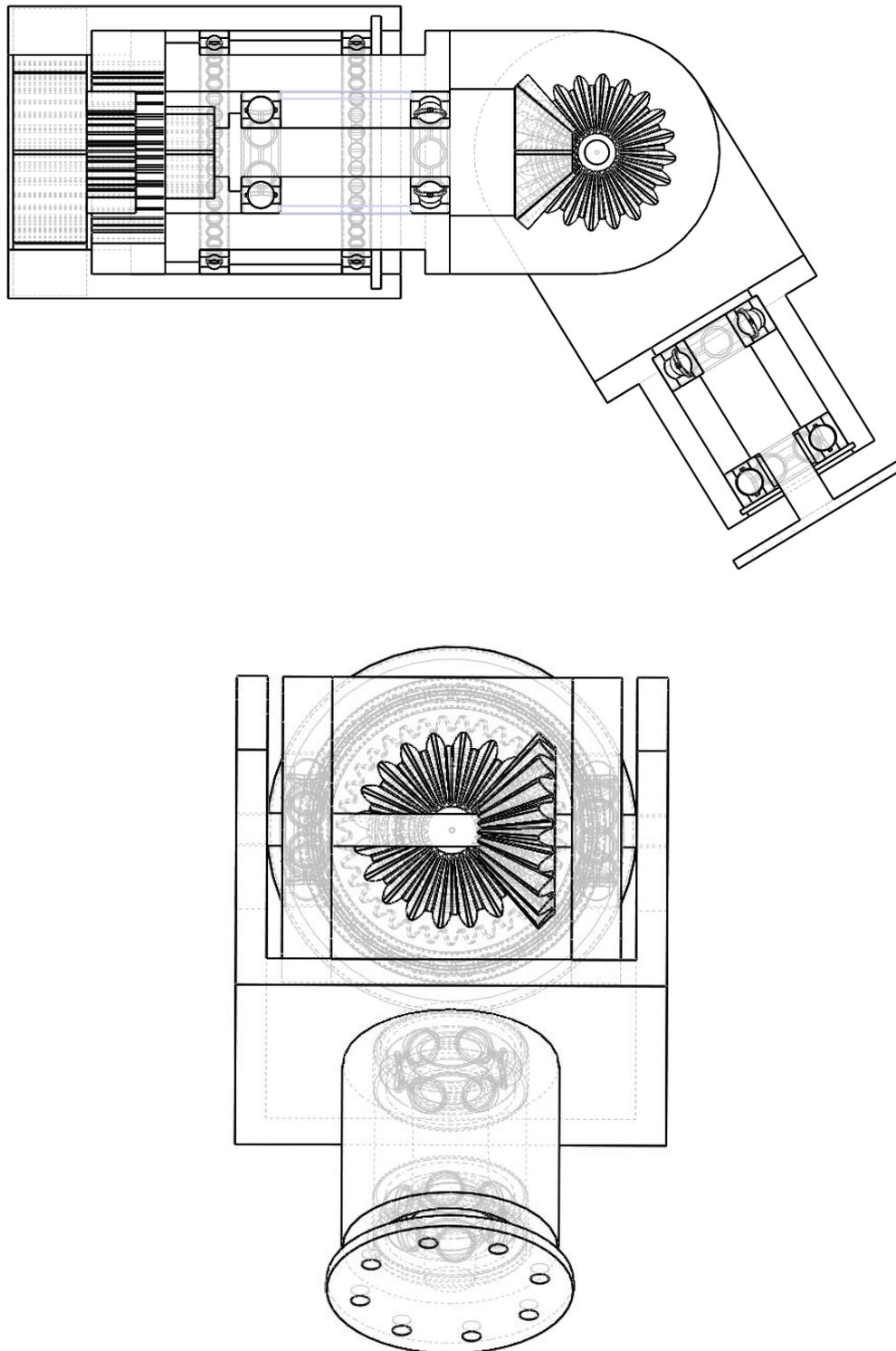


Figura 46. Vistas de la junta reconfigurable del manipulador paralelo del Bloque II

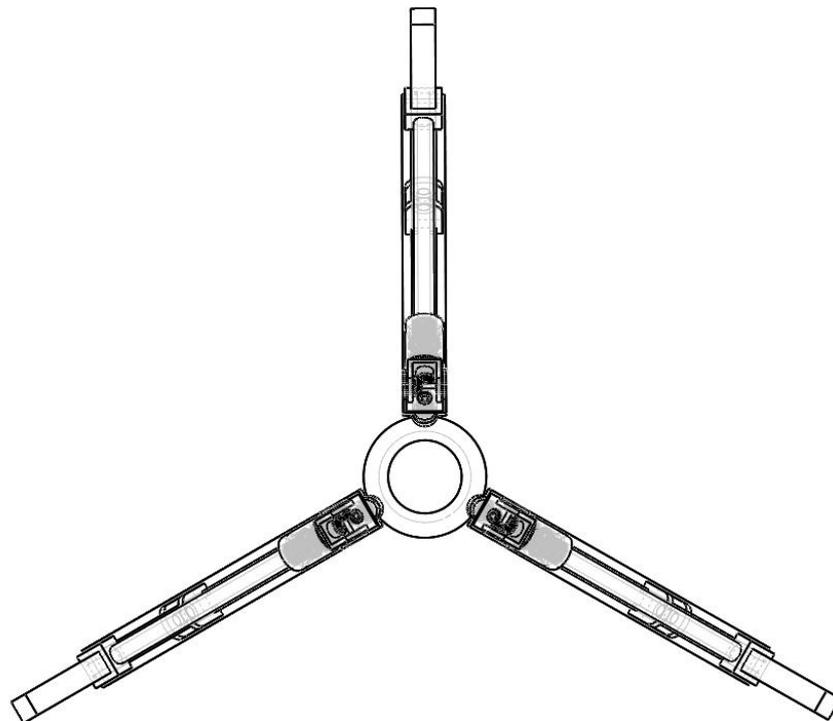
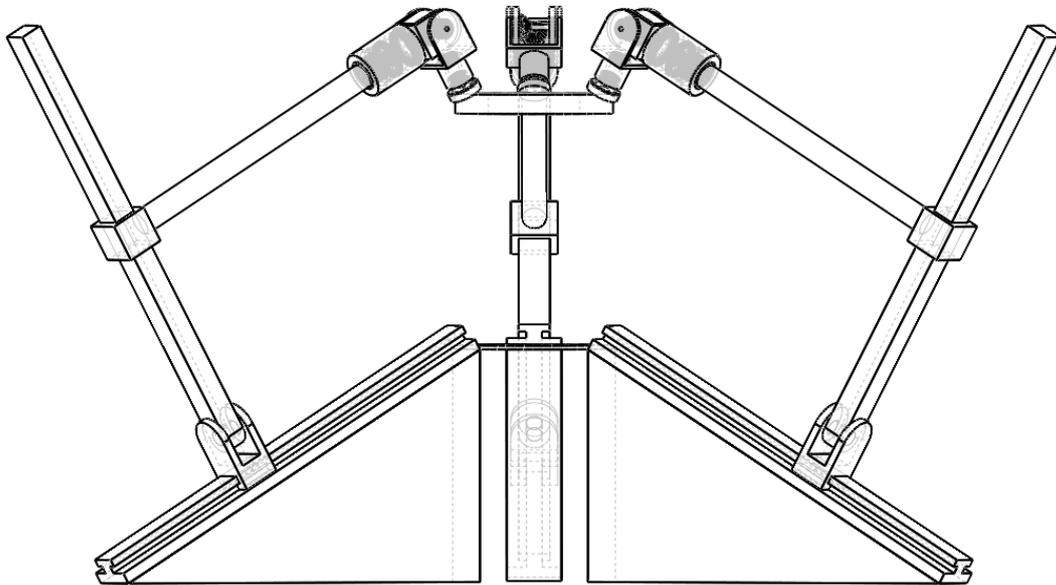


Figura 47. Vistas del manipulador paralelo reconfigurable del Bloque II

Anexo III: Planificación

Código	Nombre de tarea	Comienzo	Duración	Fin
	Desarrollo de modelo de sistematización del proceso de diseño de mecanismos reconfigurables	mar 02/10/18	265 días	lun 24/06/19
P.T.1	Gestión del Proyecto	mar 02/10/18	265 días	lun 24/06/19
T.1.1	Alcance y planificación	mar 02/10/18	90 días	lun 31/12/18
H.1	Verificación alcance y planificación	lun 31/12/18	0 días	lun 31/12/18
T.1.2	Redacción de la memoria	lun 31/12/18	175 días	lun 24/06/19
P.T.2	Labor de investigación	mar 02/10/18	90 días	lun 31/12/18
T.2.1	Recopilación de información	mar 02/10/18	60 días	sáb 01/12/18
H.2	Contrastación de información	sáb 01/12/18	0 días	sáb 01/12/18
T.2.2	Análisis del Estado del Arte	mar 02/10/18	90 días	lun 31/12/18
P.T.3	Diseño de Bloque I (Configuraciones)	lun 31/12/18	60 días	vie 01/03/19
T.3.1	Planteamiento teórico	lun 31/12/18	10 días	jue 10/01/19
T.3.2	Ejemplo de aplicación SCARA	jue 10/01/19	50 días	vie 01/03/19
H.3	Verificación Bloque I	vie 01/03/19	0 días	vie 01/03/19
P.T.4	Diseño de Bloque II (Reconfiguración)	vie 01/03/19	100 días	dom 09/06/19
T.4.1	Planteamiento teórico	vie 01/03/19	10 días	lun 11/03/19
T.4.2	Ejemplo de aplicación SCARA	lun 11/03/19	30 días	mié 10/04/19
T.4.3	Ejemplo de aplicación Manipulador paralelo	mié 10/04/19	40 días	lun 20/05/19
T.4.4	Ejemplo de aplicación Robot con juntas P bloqueables	lun 20/05/19	20 días	dom 09/06/19
H.4	Verificación Bloque II	dom 09/06/19	0 días	dom 09/06/19
P.T.5	Diseño de Bloque III (Activación)	dom 09/06/19	5 días	vie 14/06/19
T.5.1	Planteamiento teórico	dom 09/06/19	5 días	vie 14/06/19
H.5	Verificación Bloque III	vie 14/06/19	0 días	vie 14/06/19
H.6	Entrega del proyecto	lun 24/06/19	0 días	lun 24/06/19

Tabla 6. Organización de tareas