

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

*MANIPULADORES  
RECONFIGURABLES: ANÁLISIS  
CINEMÁTICO DE CADENAS*

**Alumno:** Martín, Revilla, Daniel

**Directora:** Urizar, Arana, Mónica

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** 28/06/2018

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
1. Resumen Trilingüe.....	3
2. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos.....	4
2.1. Ilustraciones .....	4
2.2. Tablas .....	5
2.3. Acrónimos .....	5
3. Introducción .....	6
4. Contexto.....	7
4.1. ¿Qué son los manipuladores paralelos? .....	7
4.2. ¿Qué es un manipulador reconfigurable?.....	7
5. Objetivos y alcance.....	8
5.1. Diagrama WBS.....	9
6. Beneficios que aporta el trabajo.....	11
6.1. Beneficios técnicos.....	11
6.2. Beneficios didácticos.....	12
7. Análisis de alternativas.....	13
8. Estado del arte .....	15
8.1. Introducción a los manipuladores paralelos.....	15
8.2. Manipuladores paralelos reconfigurables .....	19
8.3. Crítica al estado de arte .....	23
8.4. Propuesta .....	23
9. Descripción de la propuesta.....	24
9.2. Mecanismo 5R.....	24
9.3. Mecanismo 3Gdl .....	30
9.4. Mecanismo 6 Gdl.....	37
9.5. Propuesta de aplicación .....	45
10. Cálculos y algoritmos.....	48
10.2. Estudio cinemático .....	48
10.3. Análisis dinámico inverso .....	51

11.	Descripción de tareas .....	54
11.2.	Diagrama Gantt .....	57
12.	Datos económicos .....	59
12.2.	Presupuesto.....	59
12.3.	Descargo de Gastos .....	60
13.	Conclusiones.....	63
14.	Bibliografía .....	65
Anexo I: Normativa aplicable .....		66
Anexo II: Resultados .....		67

# 1. Resumen Trilingüe

## Resumen:

En este trabajo se diseñan y analizan tres manipuladores paralelos reconfigurables. El estudio se realizará con el software GIM con el que en primer lugar se abordarán los estudios cinemáticos y dinámicos. A su vez, se propondrán diferentes reconfiguraciones para cada uno de los mecanismos y se realizará un ejemplo de aplicación de uno de los mecanismos estudiados.

Un manipulador paralelo reconfigurable consiste en la unión de numerosas cadenas cinemáticas a una base fija y a otra móvil. Como consecuencia, se obtiene unos mecanismos más rápidos y precisos, además sus reconfiguraciones dan posibilidades adicionales, modificando sus estructuras y pudiendo realizar acciones distintas al mecanismo original.

## Abstract:

This project introduces the design and analysis of three reconfigurable parallel manipulators. The investigation will be performed with a software called GIM, which will enable the kinematic and dynamic analysis to be carried out. Furthermore, various reconfigurations will be studied for each mechanism and an application example will be implemented for one of the mechanisms.

A reconfigurable parallel manipulator consists of numerous kinematic chains connected to both a fixed and mobile platform. Consequently, faster and more accurate mechanism are obtained and, in addition, the different reconfigurations allow additional possibilities to modify their structures and enable to carry out different activities to the original mechanism.

## Laburpena:

Lan honetan hiru maneigailu paralelo birkonfiguragarriak diseinatu eta aztertu egin dira. Azterlana GIM softwarez baliatuko da. Hasieran ikerketa zinematiko eta dinamikoak egingo dira. Era berean, mekanismo bakoitzarentzako birkonfigurazio ezberdin batzuk proposatuko dira, eta aztertutako mekanismo baten aplikazio-adibide bat eratuko da.

Maneigailu paralelo birkonfiguragarriaren funtsa, kate zinematiko ugarien eta oinarri finko batekin eta beste mugikor batekiko batuketan datza. Horren ondorioz, lortzen diren mekanismoak azkarragoak eta zehatzagoak dira. Gainera, bere birkonfigurazioek aukera anitzago ematen dituzte. Haien egiturak aldatzen, jatorrizko mekanismoak egiten dituen eragin ezberdinak sortuko dituzte.

## 2. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos

### 2.1. Ilustraciones

Ilustración 1. Work Breakdown Structure.....	10
Ilustración 2. Manipulador en serie .....	16
Ilustración 3. A) Manipulador Stewart (izquierda); B) Manipulador Gough (derecha) [2] .....	17
Ilustración 4. Manipulador Delta .....	18
Ilustración 5. Estudio dinámico inverso .....	19
Ilustración 6. Mecanismo 5R. Fuerzas en un eslabón .....	28
Ilustración 7. Mecanismo 5R. Elemento (1) bloqueado.....	28
Ilustración 8. Mecanismo 5R. Nudo (B) desacoplado .....	29
Ilustración 9. Mecanismo 5R. Nudo (A) desacoplado .....	29
Ilustración 10. Mecanismo de 3gdl .....	30
Ilustración 11. Mecanismo de 3gdl (2).....	31
Ilustración 12. Mecanismo 3R. Posición punto (3.1).....	32
Ilustración 13. Mecanismo 3RRR. Velocidad punto (3.1).....	33
Ilustración 14. Mecanismo 3gdl. Aceleración del punto (3.1) .....	33
Ilustración 15. Momentos de los actuadores.....	34
Ilustración 16. Análisis cinemático eslabón .....	35
Ilustración 17. Reconfiguración mecanismo de 3gdl. ....	35
Ilustración 18. Desacople de la barra (1).....	36
Ilustración 19. Mecanismo 6gdl .....	37
Ilustración 20. Trayectorias.....	38
Ilustración 21. Posición punto (3.1) .....	39
Ilustración 22. A) Velocidad punto (3.1) (izq.) B) Aceleración punto (3.1) (drch.).....	40
Ilustración 23. Trayectoria tras modificar las velocidades de entrada (I).....	41
Ilustración 24. Junta esférica (izq.) Junta de rotación (drch.) .....	42
Ilustración 25. Mecanismo totalmente desacoplado.....	42
Ilustración 26. Plataforma con 4gdl y dos cadenas cinemáticas.....	43
Ilustración 27. Aproximación a la recogida de un cuerpo.....	45
Ilustración 28. Traslación del cuerpo .....	46
Ilustración 29. Brazo 2-RR [12].....	48
Ilustración 30. Mecanismo paralelo 5-R.....	50
Ilustración 31. Fuerzas actuantes.....	53
Ilustración 32. Trayectoria mecanismo 5R (1).....	67
Ilustración 33. Trayectoria mecanismo 5R (2).....	67
Ilustración 34. Trayectoria mecanismo 3R (1).....	68
Ilustración 35. Trayectoria mecanismo 3R (2).....	68
Ilustración 36. Trayectoria mecanismo 6gdl (1).....	68
Ilustración 37. Trayectoria mecanismo 6gdl (2).....	69
Ilustración 38. Trayectoria reconfiguración 3gdl (1).....	69

## 2.2. Tablas

Tabla 1. Desacoplamientos de 5R .....	29
Tabla 2. Configuraciones del manipulador de 6gdl.....	44
Tabla 3. Presupuesto. Horas internas .....	59
Tabla 4. Presupuesto. Amortizaciones.....	59
Tabla 5. Presupuesto. Gastos .....	59
Tabla 6. Presupuesto por partidas .....	60
Tabla 7. Descargo. Horas internas.....	61
Tabla 8. Descargo. Amortizaciones .....	61
Tabla 9. Descargo. Gastos .....	61
Tabla 10. Descargo por partidas.....	61

## 2.3. Acrónimos

MP: Manipulador Paralelo.....	8, 22, 54, 62
MPR: Manipulador Paralelo Reconfigurable. ....	7, 65
Gdl: Grados de libertad.....	16, 17, 16, 21, 30, 37, 42, 47
DOF: Degrees of Freedom.....	23

### 3. Introducción

Por medio de este Trabajo Fin de Grado con título: “Manipuladores reconfigurables: análisis cinemático de cadenas multioperacionales” presenta un estudio sobre esta modalidad de robots cuya reconfigurabilidad permite dar una mayor utilidad, pudiendo ser configurado para realizar distintas acciones con un solo manipulador.

En primer lugar, se contextualizará el proyecto explicando el entorno en el que se encuentra y el desarrollo de estos manipuladores. Seguidamente, se explicarán los objetivos, tanto genéricos como específicos de este estudio, en este apartado también estará incluido el alcance detallando cuáles serán las metas del trabajo. También se hará una descripción de todos los beneficios que este estudio aporta a los ya existentes estudios de esta tecnología.

Posteriormente, en el estado de arte se establecerá una base teórica de estos manipuladores definiendo claramente como son los MP y el fin para el que fueron creados, así como la existencia de reconfiguraciones de estos productos. Primeramente, se describirá el desarrollo histórico de los manipuladores paralelos y su desarrollo actual. Se continuará explicando en que consiste la reconfigurabilidad de estos mecanismos y se citará algún ejemplo. Por último, se realizará una crítica al estado de arte y se hará una propuesta de estudio que se desarrollará en la metodología.

En la propuesta, se han escogido tres mecanismos paralelos en los que se realizará un estudio completo, desglosándolo principalmente en la cinemática que desarrolla cada uno de ellos y en su dinámica posteriormente. También se analizarán posibles reconfiguraciones que se pueden realizar en cada uno y se concluirá con un ejemplo de aplicación industrial que puede tener lugar con el último MPR descrito. A continuación, se detallarán los cálculos y algoritmos empleados por el programa GIM utilizados en el estudio.

En la parte final, se realizará una descripción de todas las tareas desempeñadas para la realización del trabajo y se representarán con un diagrama Gantt. También se detallarán los datos económicos desglosados en el presupuesto y en el descargo de gastos.

Por último, se finalizará el trabajo con las conclusiones más importantes de este estudio y con las citaciones de los recursos bibliográficos utilizados. Se incluirá un anexo en el que se describirá normativas vigentes en el diseño de los robots, que son aplicables a los manipuladores que se estudiarán y otro anexo con distintas trayectorias que pueden tomar los mecanismos estudiados y que podrían haber sido estudiados.

## 4. Contexto

El presente trabajo realiza un análisis cinemático y dinámico de los manipuladores paralelos reconfigurables, el cual está realizado por el alumno y ha utilizado medios proporcionados por la Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, como son los ordenadores situados en las aulas habilitadas para el libre acceso y los libros y revistas de la biblioteca de la universidad. Además de estos recursos, también se ha utilizado un ordenador personal para complementar el estudio de la universidad.

La principal herramienta utilizada es el software GIM que ha sido la herramienta principal utilizada para el estudio de los mecanismos desarrollados en este trabajo. Este está desarrollado por el grupo de investigación COMPMECH formado por profesores del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco (<http://www.ehu.eus/compmech/>). La simulación de los mecanismos con este programa informático proporciona una visión realista del comportamiento de esos mecanismos y sus resultados, siendo todo este previo al trabajo con estos sistemas físicos.

Con el estudio cinemático se investigará los movimientos que tiene el robot sin tener en cuenta las fuerzas actuantes en él. En el estudio dinámico, solo realizado a los mecanismos planos, se obtendrán distintas fuerzas y momentos actuantes en los elementos del mecanismo. Por último, con las reconfiguraciones se mostrarán distintas modificaciones que se pueden realizar y cómo varían los movimientos. Es convenientes definir los mecanismos que van a ser objeto de estudio en este trabajo:

### 4.1. ¿Qué son los manipuladores paralelos?

Una primera definición de los mecanismos paralelos es un robot formado por varios brazos en paralelo que unen el elemento terminal a la base fija formando una o varias cadenas cinemáticas cerradas. Actualmente existen varios manipuladores paralelos que han superado las etapas de estudios y se han asentado en la industria, aunque su grado de implantación en general, es mucho menor que la de los robots tipo serie.

### 4.2. ¿Qué es un manipulador reconfigurable?

Un robot se denomina reconfigurable, cuando tiene la posibilidad de realizar modificaciones en su estructura, y modificar los grados de libertad que contiene, con el fin de alcanzar configuraciones que le permitan realizar diferentes tareas a la del mecanismo original.

## 5. Objetivos y alcance

El objetivo principal del presente trabajo es un primer estudio que habría que realizar para analizar distintos manipuladores paralelos que ofrecen funcionalidades adicionales a los robots series y el análisis de sus posibles reconfiguraciones que proporcionan una gran posibilidad de movimientos del mecanismo diferentes al estándar.

Para ello, se realizará un primer estudio cinemático de cada mecanismo dado y posteriormente uno dinámico de distintos posibles manipuladores paralelos. Por último, el estudio de las posibles reconfiguraciones de cada uno de ellos proporcionará información de las distintas geometrías y movimientos de cada uno de ellos para aportar funcionalidades adicionales a las ya dadas por el mecanismo.

Para cumplir estos objetivos se dividirá ese estudio en tres partes:

- En la primera de ellas, se estudiará la cinemática de todos los mecanismos habiendo establecido anteriormente una geometría adecuada. En el software GIM, tras proponer una geometría querida de cada mecanismo, con el módulo de “*Kinematics*” obtendremos las variables cinemáticas de un punto de estudio, teniendo como punto de partida la velocidad que introducen los actuadores (servomotores eléctricos).
- En cuanto al estudio dinámico, se propondrá un estudio cinemático inverso que nos proporcionará información necesaria para el diseño y la selección de los actuadores indicando el par mínimo que un actuador tiene que ser capaz de realizar para que el manipulador resista unas cargas dadas. También, tendremos la posibilidad de calcular todas las tensiones de los eslabones y las fuerzas actuantes sobre ellos. Con el módulo de “*Dynamics*” de programa GIM, se realizará este estudio con la limitación del programa de la incapacidad de realizar cálculos dinámicos a los mecanismos y por ello, se realizará este estudio a los mecanismos planos de 2 y 3 grados de libertad.
- Por último, se propondrán posibles reconfiguraciones de cada uno de estos mecanismos mediante la modificación de la geometría del manipulador y de sus grados de libertad. Entre éstas, destacan el desacople de cadenas cinemáticas de la estructura principal, estas cadenas podrán realizar un trabajo complementario como si fuesen robots serie.

El alcance de este estudio abarca todo el trabajo necesario para lograr el cumplimiento de los objetivos expuestos anteriormente. Para ello, será necesario realizar una amplia búsqueda de información acerca de los MP y del concepto de reconfigurabilidad de éstos.

Una vez realizada la compresión y síntesis de toda esta información, se procederá a escoger tres mecanismos objeto de estudio. A estos manipuladores se le realiza los tres estudios correspondientes a la cinemática, dinámica y sus reconfiguraciones. Previo a este análisis será necesario la compresión analítica de las ecuaciones que tiene implementadas el software GIM, para así tener una visión más amplia de los resultados obtenidos.

Por tanto, queda exento de este estudio:

- Definir el proceso industrial específico que se realiza.
- El análisis del *Workspace* o espacio de trabajo que necesita cada uno de ellos.
- El estudio de las singularidades que puedan darse.

## 5.1. Diagrama WBS

En el desglose del WBS (work breakdown structure) se va a mostrar de manera gráfica e intuitiva los distintos pasos del estudio que se va a realizar para facilitar el proceso de la planificación del proyecto y para la obtención de los objetivos presentes. Así, se crea una metodología de trabajo que se dividirá en tareas a realizar en el estudio y las subtareas que cada una contiene, abarcando todos los puntos de estudio que van a tener lugar.

Como podemos ver en la estructura de desglose, la primera fase del trabajo es la realización del estado de arte para el que es necesario recopilar gran cantidad de información y realizar una síntesis de ésta. Con ello se procederá a los estudios que se realizarán sobre los manipuladores seleccionados y se finalizará con un ejemplo de aplicación.

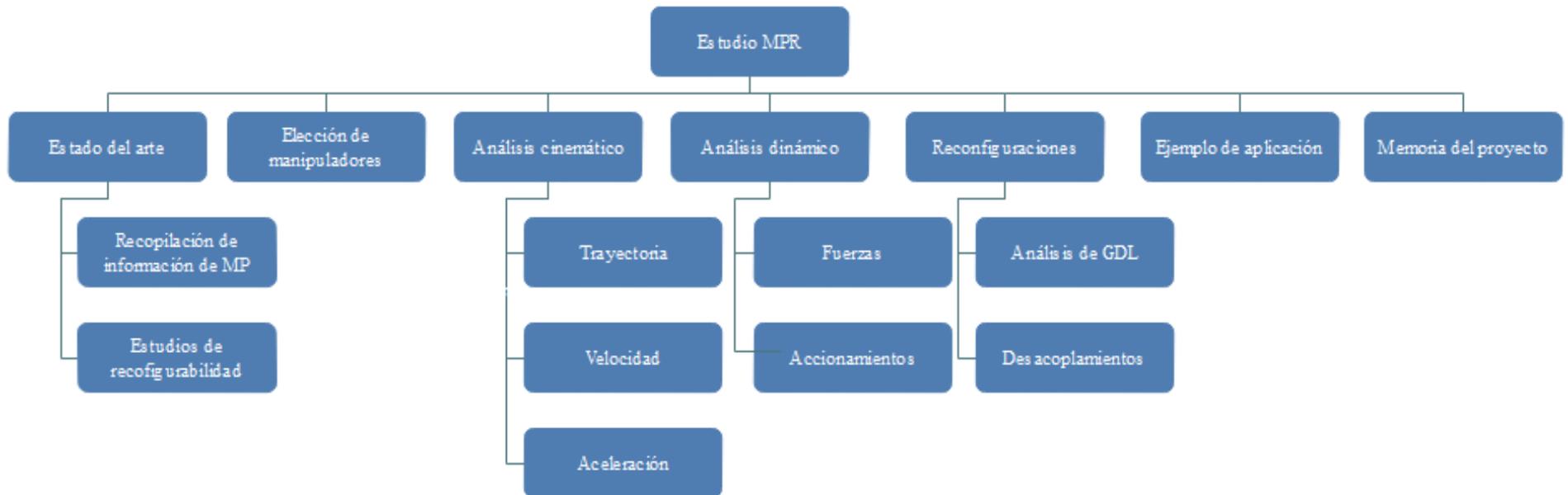


Ilustración 1. Work Breakdown Structure

## 6. Beneficios que aporta el trabajo.

### 6.1. Beneficios técnicos

Los manipuladores paralelos a pesar de su escasa implementación en la industria, los beneficios que aporta con respecto a los robots serie son numerosos y en ocasiones ofrecen funcionalidades distintas a éstos. Vamos a enumerar las ventajas que ofrecen los mecanismos de esta arquitectura:

- El estén formados por más de una cadena cinemática que conecte su base fija con la base móvil proporciona una mayor rigidez global de sistema. Esto se traduce en la posibilidad de transportar cargas mayores, además de disminuir los errores de precisión debido a la deformación de los eslabones.
- Los eslabones son más ligeros y sus actuadores están situados en la base fija, es decir, hay menos masas móviles que tienen que ser movidas. Esta relación de pesos entre la masa transportada y la del robot confiere la capacidad de trabajar con aceleraciones y velocidades mayores.
- La robustez de estos manipuladores dota de una seguridad adicional ya que, dada una hipotética posibilidad de un fallo en una cadena cinemática, ésta se podrá desacoplar, o simplemente dejarla inutilizada y poder trabajar con el resto de la estructura.
- Las cadenas cinemáticas que pueden desacoplarse en las reconfiguraciones de un mecanismo pueden actuar como robots serie. Esto es, tenemos la ventaja de poder combinar más de un robot simultáneamente y combinar las precisiones de los manipuladores paralelos y la versatilidad de los robots serie.
- El cambio de la arquitectura cuando se realiza una reconfiguración, en muchas ocasiones no afecta a las variables cinemáticas del sistema, pudiendo mantener las mismas velocidades y aceleraciones, sin embargo, ha de comprobarse que no se superen los valores límite de los actuadores puesto que la potencia necesaria puede aumentar.
- La reconfiguración de los mecanismos proporciona un mayor abanico de posibilidades de trabajo pudiendo variar sus grados de libertad y pudiendo realizar dos procesos simultáneamente con un solo manipulador.

Como contrapartida su desventaja más importante es la implementación de su control y automatización es más compleja, ya que tienen que estar perfectamente coordinados sus motores para evitar situaciones de bloqueo.

## 6.2. Beneficios didácticos

La síntesis realizada a los diferentes estudios teóricos de este trabajo recoge gran cantidad de información necesaria para realizar un estudio más intensivo tanto de los manipuladores paralelos como de las posibles reconfiguraciones que nos posibilitan. Por ello, este proyecto podría tener un fin didáctico y orientativo sobre las funcionalidades y los beneficios que ofrecen este tipo de productos, puesto que la información acerca de ellos es limitada y su búsqueda es laboriosa. Por ello, se pretende dar a conocer este tipo de mecanismos debido a la necesidad de impulsar su utilización en el sector industrial y a la simplificación de trabajo que ofrecen.

En cuanto al software utilizado, el programa GIM combina su gran sencillez de utilización además de tener una gran cantidad de opciones para el estudio de los mecanismos. Ofrece una gran simplicidad para modificar las geometrías de los manipuladores y proporciona datos sobre la cinemática y la dinámica de éste sin necesidad de recurrir a softwares con elementos finitos y otro tipo de cálculos que implican un gran tiempo de procesado. Por ello, es una herramienta que, aunque tenga un fin didáctico es capaz de realizar un estudio completo de los mecanismos y que tengan una validez para la implementación del manipulador físicamente en un proceso industrial.

## 7. Análisis de alternativas

El estudio realizado está mayormente sostenido por el software GIM con el que se realiza el estudio completo de los mecanismos, sin embargo, hay diferentes softwares que ofrecen otras posibilidades de estudio y ofrecen distintas posibilidades.

- Los softwares que permiten la modelación de robots y de diseño de sus estructuras como ROBCAD o ROBOWORK ofrecen un amplio abanico de posibilidades en los que permiten modelizar manualmente la arquitectura de los mecanismos a utilizar. Entre otras características, se puede destacar que son capaces de crear lay-outs de trabajo con los que se podrían realizar simulaciones no solo del movimiento del robot sino de procesos más dirigidos a la explotación industrial, como podría ser la automatización de un ciclo de soldadura de piezas. Sin embargo, en estos programas es necesario realizar antes un diseño mediante otras herramientas como puede ser CATIA y esto se convierte en un proceso muy laborioso de realizar. Todo esto, se traduce en la necesidad de una formación previa muy extensa, pudiendo sobrepasar el mes de aprendizaje para tener un mínimo control de todos estos softwares. Además, es necesaria una gran inversión económica para la obtención de licencias de todos estos productos.
- El cálculo de las tensiones y fuerzas que actúan sobre los sólidos del sistema podrían realizarse mediante un software de elementos finitos, como puede ser ANSYS WORKBENCH que nos proporcionarían una mayor información de las tensiones puntuales que actúan. Estaría dirigido especialmente al correcto dimensionamiento y diseño de las piezas que conforme el manipulador y este estudio estaría fuera del alcance del proyecto que se está realizando. Además, conllevaría mucho tiempo realizarlo debido a que habría que estudiar todos los sólidos del manipulador que toman lugar en el proceso, además de estudiar los diferentes momentos en los que se encuentra debido a la fluctuación de la tensión a la que están sometidos durante un ciclo de movimiento.
- Programas de cálculo como MATLAB o MATHEMATICA, con los que analíticamente introduciendo las distintas fórmulas teóricas, calcularía las variables objeto de estudio. Mediante iteraciones realizadas con este programa se obtendrían resultados muy exactos tanto de las variables cinemáticas como de las variables dinámicas. Sin embargo, el estudio tan intensivo de estas funciones del sistema puede ser en vano debido a que en la implantación real del manipulador un simple error de montaje o el peso de un elemento distinto al teórico, introducirían un fallo teórico y por tanto las variables calculadas no serán exactas, sino una aproximación a ellas.

El programa GIM comparte gran parte de las características nombradas en todos estos programas en los distintos módulos de trabajo que contiene:

*Geometry*: permite la manipulación de los elementos que conforman el manipulador de forma sencilla e intuitiva.

*Kinematics*: introduciendo la velocidad de los actuadores, el programa nos calcula la trayectoria y las variables cinemáticas de cada punto del manipulador.

*Dynamics*: a partir de la masa de los elementos que componen el manipulador y las cargas a los que está sometido, calcula tanto los esfuerzos a los que está sometido cada elemento en todo momento como la potencia necesaria que debería desarrollar un actuador. Cabe destacar que el programa tan solo tiene la capacidad de realizar el estudio dinámico a mecanismos planos.

Por todo ello, el software GIM elegido es un programa completo que contiene la gran parte de las características que proporcionan los programas mencionados. La utilización de éste es sencilla y el aprendizaje que es necesario realizar para saber utilizarlo es escaso en comparación con los demás softwares. Además, ofrece la ventaja que es un programa gratuito con lo que no es necesaria ninguna inversión en la compra de licencias de otros programas.

## 8. Estado del arte

### 8.1. Introducción a los manipuladores paralelos.

Hoy en día los manipuladores se han integrado en las aplicaciones industriales que toman parte en el día a día de las empresas. Hay diversas razones que justifiquen su uso, la precisión con la que operan, la posibilidad de trabajo en ambientes peligrosos (altas temperaturas y toxicidad) y su repetitividad de acciones son algunas de ellas. Como consecuencia se obtienen productos con menos defectos y su tiempo de producción se reduce considerablemente, aumentando enormemente la productividad.

En la actualidad, se está extendiendo su uso debido al avance en la automatización de los procesos industriales y de los dispositivos electromecánicos. Las principales áreas de utilización son en los sectores como la automoción y la máquina herramienta, además de la farmacéutica y alimentaria. Es por ello que para cada aplicación será necesario buscar el mecanismo que mejor se adapte a cada tipo de tarea, tanto en su arquitectura como en su movimiento.

Estos manipuladores están compuestos por cadenas cinemáticas que conectan entre sí diferentes eslabones dando la posibilidad de realizar movimientos relativos entre elementos mediante pares cinemáticos y definen un movimiento de salida a partir de unos parámetros de entrada determinados. También, son necesarias tecnologías como sensores y un software de programación. Por tanto, la mecánica no es la única ciencia responsable del funcionamiento de estos robots, sino que también intervienen otras como la automatización, la electrónica y la programación.

En la actualidad, la mayoría de los manipuladores existentes son de cadena abierta y presentan características antropomórficas, por lo general, parecidas a un brazo humano. Están constituidos por una sucesión de cuerpos rígidos ( $n+1$ ), cada uno de ellos vinculado a su predecesor y a su sucesor por medio de una articulación permitiendo el movimiento del elemento terminal, las más usuales son el par (P) prismático y el (R) rotacional. Se denomina  $n$  al número de grados de libertad que posee y elemento 0 es aquel que está fijado a tierra. El elemento extremo  $n$  solo está unido por un único par y su cinemática será objeto de estudio en estos robots. Estos manipuladores son ampliamente utilizados en tareas industriales como son soldar o mover diferentes piezas. Sin embargo, presentan diferentes limitaciones como son su baja rigidez que se traduce en una baja precisión de trabajo. También está limitado por el gran espacio que ocupa y su deficiencia operando con elementos pesados.



*Ilustración 2. Manipulador en serie*

Los manipuladores paralelos, también denominados de cadena cerrada, son característicos debido a que todos sus actuadores están apoyados en el elemento fijo y están conectados paralelamente a una plataforma o elemento flotante mediante cadenas cinemáticas cerradas. Las ventajas de los manipuladores paralelos frente a los robots serie son:

- Al estar formado por varias cadenas cinemáticas en paralelo, la rigidez global del robot es mayor. Esto permite trabajar con cargas mayores y disminuir el error provocado por las deformaciones.
- Los eslabones son más ligeros y los motores se ubican en la base fija. Esto hace que haya menos masas móviles, por tanto, permite trabajar con aceleraciones mayores, pudiendo alcanzar velocidades más elevadas en el mismo tiempo.
- Al tener menos masas móviles las fuerzas inerciales son más pequeñas y disminuye el riesgo de sufrir averías.

A pesar de estas ventajas los diseños de estos manipuladores tiene como contrapartida la dificultad de ser programados y controlados por computación [1].

El primer estudio de estos manipuladores paralelos fue en 1947 cuando el Dr. Erik Gough diseño una plataforma compuesta por un octaedro hexápodo con lados de longitud variable. Esta plataforma tuvo gran repercusión ya que permitía controlar el posicionamiento y la orientación de la plataforma móvil. El diseño hizo que pudiese realizar diferentes ensayos simulando el comportamiento de las ruedas de un avión durante su aterrizaje, por ello necesitaba un mecanismo que soportase grandes cargas en los diferentes ejes [2].

Posteriormente fue el manipulador Stewart, que mediante un manipulador de 6 grados de libertad (gdl), obtuvo gran reconocimiento y estableció una tendencia de investigación en este campo y de identificar problemas no resueltos. La plataforma

Stewart es representativa esta clase de manipuladores paralelos, cuyos conceptos tienen relevancia directa para todo este tipo de plataformas.

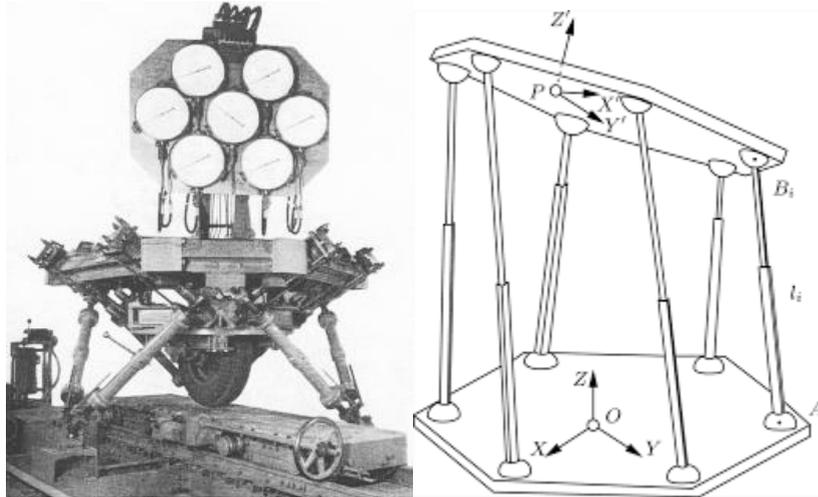
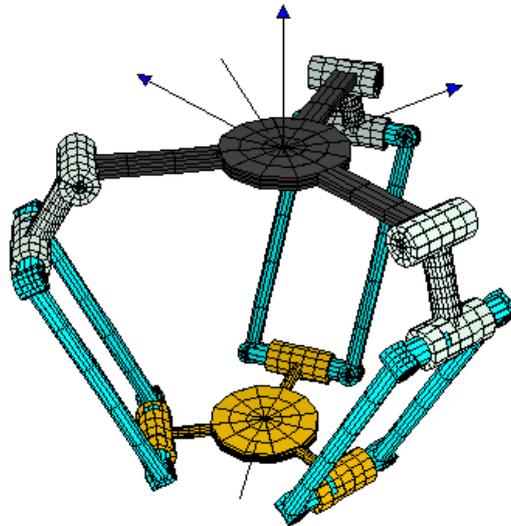


Ilustración 3. A) Manipulador Stewart (izquierda); B) Manipulador Gough (derecha) [2]

Tras obtener toda la información cinemática necesaria para el diseño de estos mecanismos se inicia un estudio dinámico de los elementos móviles de este, prestando especial atención a las holguras que pueda haber en las juntas y como afectan al funcionamiento y a la precisión. También, hay que realizar un estudio del espacio de trabajo ocupado para saber los lugares donde los elementos puedan posicionarse.

Uno de los manipuladores paralelos más utilizados en el sector industrial es el Delta, que en su forma general está compuesto por tres o cuatro grados de libertad. Como podemos observar en la figura 4, el robot delta está compuesta tres cadenas cinemáticas, cada una de estas cadenas debe estar ligada, por un lado, a la tierra y por el otro, a la plataforma móvil. Éste, está actuado mediante tres actuadores que dan movimiento a las juntas de rotaciones posicionadas en la tierra. Para el Delta de 4 gdl, se le añade un giro a la pinza final respecto del eje vertical espacial [2].

Estos manipuladores tienen un uso muy extendido en las diferentes industrias, tanto en la alimenticia y la medicina debido a su rapidez de movimiento para la paletización de los productos, como en el uso de máquina herramienta para realizar soldaduras y otras labores industriales que necesitan cierta precisión.



*Ilustración 4. Manipulador Delta*

El primer paso en el estudio de estos manipuladores se dará con un análisis cinemático que constituye una etapa fundamental en el diseño de estos mecanismos y se compone principalmente del estudio de las trayectorias, las velocidades y las aceleraciones. En primer lugar, ha de realizarse un estudio de los grados de libertad que se quieren dotar al manipulador, para ello existen diferentes métodos. El más extendido es el criterio es “Screw Theory”, pero a nivel académico el más utilizado es el Criterio de Grübler para mecanismos planos.

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II}$$

*Ecuación 1. Criterio de Grübler*

Este criterio tiene en cuenta tanto el número de elementos N (restado el elemento fijo al suelo) que tenga el mecanismo como sus pares cinemáticos y los grados de libertad (gdl) que restringen estos [3].

Pero si se desea obtener el número de grados de libertad de un mecanismo espacial es necesaria una extensión de este criterio conocido como el criterio de Malishev:

$$G = 6(N - 1) - 5P_I - 4P_{II} - 3P_{III} - 2P_{IV} - P_V$$

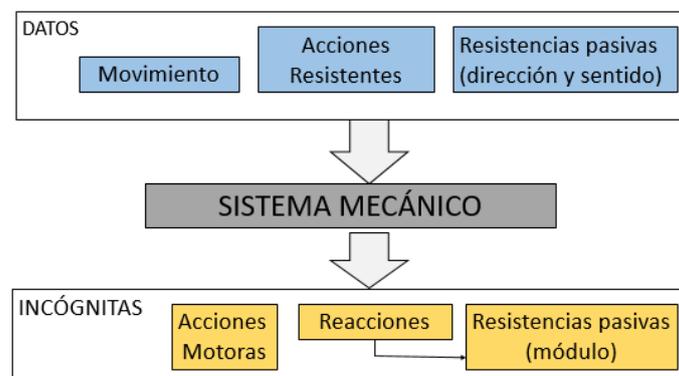
*Ecuación 2. Criterio de Malishev*

Tras el análisis de los grados de libertad se continúa realizando los problemas de posición directo e inverso. En primer lugar, se realiza el estudio de la cinemática inversa, en el que se encuentran las variables de las juntas activas y pasivas en función de las coordenadas del efector final del robot en una posición conocida. En la cinemática directa de robots paralelos el problema es determinar la posición del efector final en función de los resultados cinemáticos de las juntas activas obtenidos en el estudio

indirecto. En general, la solución a este problema no es única, de ahí que la cinemática ha sido objeto de una intensa investigación [4].

Posteriormente a la hora de abordar un estudio de estos mecanismos es necesario hacerlos también desde el punto de vista dinámico, en el que intervienen variables como la fuerzas o momentos generados que en el estudio cinemático no se tienen en cuenta. En este estudio, se incluirán las reacciones que aparecerán en los pares cinemáticos y que serán objeto de estudio para el diseño de los actuadores. Estos actuadores son servomotores eléctricos de corriente continua, cuya característica principal es que pueden controlar en todo momento tanto la posición como la velocidad mediante un sistema de control que proporcional una constante comunicación entre la posición en la que se encuentra y sus variables cinemáticas con la corriente que proporciona el movimiento al manipulador.

Por ello se cree necesario hacer un primer estudio dinámico inverso o cinetostático. Este parte con los datos de inicio del movimiento calculado en el estudio cinemático y las acciones resistentes a las que someteremos el manipulador. Las resistencias pasivas no se conocen a priori sus módulos, pero si la dirección y el sentido ya que son dependientes de la posición en la que se encuentre. Como resultados se obtendrá la magnitud de las fuentes motoras que servirán de punto de partida para la selección de las fuentes de potencia [5].



*Ilustración 5. Estudio dinámico inverso*

Por ello como datos de partida para el estudio serán necesario conocer:

- Las propiedades másicas e inerciales de los elementos.
- El movimiento del sistema dinámico.
- Las acciones resistentes y resistencias pasivas.

## 8.2. Manipuladores paralelos reconfigurables

Desde que los mecanismos reconfigurables se pueden emplear desarrollando manipuladores multifuncionales, dispositivos médicos y dispositivos de fabricación, un

gran número de mecanismos con reconfigurabilidad han sido sintetizados y analizados. En particular, mecanismos paralelos capaces de cambiar su estructura cinemática, movilidad y características de movimiento de la plataforma han generado grandes intereses en los últimos años [6].

Siguiendo la identificación de estructuras cinemáticas con una capacidad peculiar para cambiar su movilidad global y características de movimiento una primera clasificación de estos manipuladores podría ser:

- Robots modulares. Estos robots están compuestos por elementos, juntas o actuadores independientes que pueden ser combinados de múltiples maneras. De esta forma, es posible construir varios robots diferentes a partir de los mismos módulos. A su vez, estos robots pueden modificar su estructura de forma que se adapte lo mejor posible a cada tarea y a cada entorno en el que deben operar.
- Manipulador autoreconfigurable. Son aquellos que tienen autonomía suficiente para realizar cambios en sus grupos de cadenas cinemáticas adaptándose a las necesidades geométricas y cinemáticas requeridas en cada momento.
- Manipulador reconfigurable. Un robot se dice reconfigurable, cuando es posible modificar su estructura con el fin de alcanzar diferentes configuraciones que le permitan realizar diversas tareas. Son los más extendidos y en los que nos centraremos en su estudio de ahora en adelante [7].

La reconfigurabilidad de los robots paralelos ha sido bien reconocida por la comunidad de investigación y se pueden subdividir en tres niveles de reconfiguración, siendo diferenciados por, su geometría, su topología y su geometría y topología simultáneamente. Los capaces de variar su geometría, principalmente son los que varían las dimensiones ajustándose a la tarea. Por ejemplo, para superar el problema del espacio de trabajo. El siguiente nivel son los capaces de cambiar su topología, esto es, donde las estructuras del robot son modificables para lograr diferentes grados de libertad. Por último, los de nivel más alto de reconfigurabilidad, son los capaces de variar su geometría y topología en un mismo proceso. Esta transformación se basa en aprovechar las singularidades de unas juntas o una cadena cinemática para cambiar la tipología del sistema [8].

Estos robots se están extendiendo su uso ya que presentan numerosas ventajas frente a los manipuladores paralelos simples. Las diferentes cadenas cinemáticas que contiene el manipulador le dan una mayor robustez, ya que en determinados procesos si falla una cadena es posible reemplazar su función con otra y por tanto éste no queda inutilizado. En un caso extremo, incluso es posible desprender parte de la estructura (que haya quedado inutilizada por alguna razón), y continuar operando, aunque sea de manera restringida.

Presentan una alta versatilidad y adaptabilidad, pudiendo combinar las diferentes cadenas adaptándose al entorno de la tarea que tiene que realizar, pero esto requiere la necesidad de disponer de antemano la información sobre su entorno y las restricciones que este tiene.

Por último, podemos mencionar los costos que supone diseñar estos manipuladores, puesto que su puesta a punto es muy compleja. El software y hardware necesarios y su automatización hacen que la tarea de la programación de las tareas, los movimientos y las modificaciones de la estructura sean difíciles de incorporar. Sin embargo, las producciones en masa hacen que se pueda rentabilizar éstos debido a los beneficios que generan [7].

A modo de ejemplo, tenemos un manipulador paralelo de 6 DoF, compuesto por dos manipuladores de tres grados de libertad que podrían actuar de forma independiente como se muestra en la ilustración 6. Por tanto, si las juntas que unen la plataforma con las cadenas cinemáticas exteriores pudiesen desacoplarse podríamos obtener distintas configuraciones. Cada cadena desacoplada puede actuar como un robot serie de 2 gdl y quitará un grado de libertad al manipulador principal. Un desacople total correspondería al de la ilustración 5d con una plataforma móvil de 3 gdl y tres cadenas cinemáticas desacopladas que pueden realizar trabajos complementarios. [9]

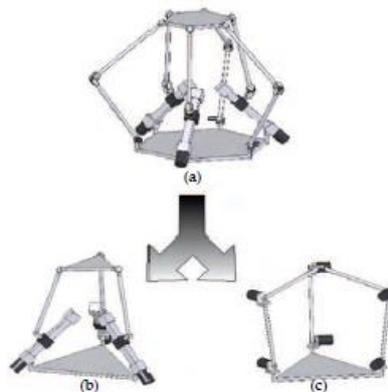


Ilustración 6. Descomposición del mecanismo [9]

El mecanismo siguiente (ilustración 7) se compone de tres patas 5R que están conectados en una plataforma superior cuyo movimiento es reconfigurable. Los ejes de las primeras articulaciones (1) de todas las patas se unen en un punto. Al bloquear una articulación R de la plataforma de movimiento reconfigurable las ubicaciones relativas de la quinta articulación pueden variar en todas las cadenas. Esto lleva a que la plataforma móvil pueda someterse a varios 3-DOF patrones de movimiento, incluida la traslación espacial (figura 2 (b)) y el movimiento esférico (figura 2 (c)). La plataforma

permite que un MP pase de un modo de operación a otro sin pasar por singularidades de restricción [10].

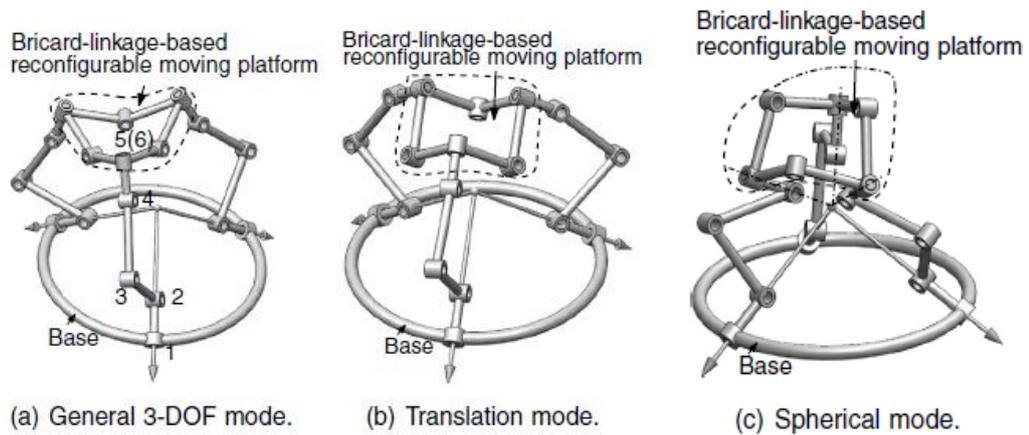


Ilustración 7. Mecanismo reconfigurable 5R [8]

Teniendo un mecanismo 4-RUU que corresponde a un par de rotación y a dos cardan que constituyen sus cuatro cadenas cinemáticas que unen el elemento base con el móvil, en las que podemos distinguir el origen de coordenadas  $O$  y el móvil  $P$  respectivamente en estas bases. Realizando un estudio de sus grados de libertad, tenemos 4 juntas de rotación y ocho juntas cardan que se traduce en 2 gdl en el sistema. Por tanto, éste está sobredimensionado y bastaría con dos actuadores en las juntas de rotación de las bases.

Este MP podemos dividirlo en dos manipuladores 2-RUU cuyas plataformas móviles tengan movimientos distintos. El requisito fundamental para poder desacoplar estos es que la base móvil pueda separarse como vemos en las figuras adjuntas. Este a diferencia del acoplado necesita actuación de los cuatro actuadores de la base para proporcionar este movimiento diferente a las dos plataformas móviles [11].

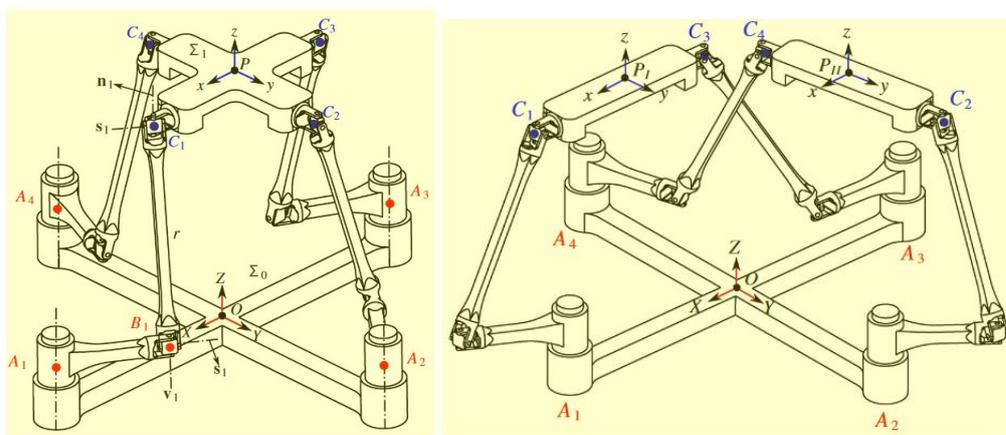


Ilustración 8. Mecanismo Reconfigurable [11]

### 8.3. Crítica al estado de arte

Habiendo descrito numerosos ejemplos de manipuladores reconfigurables, estos son solo unos simples ejemplos de los cambios que se pueden realizar en estos manipuladores. Sin embargo, el estudio de la reconfigurabilidad de los mecanismos es una ciencia todavía sin explotar y que puede aportar diferentes avances en cadenas de producción realizando un mayor aprovechamiento de los robots y viéndose aumentada la su productividad. Esto es debido a la dificultad de diseño de los manipuladores para que con uno se puedan realizar distintas acciones y que sea económicamente rentable. La dificultad tanto de diseño como de programación de un MPR haría reconsiderarse la posibilidad de utilizar robots serie comerciales.

### 8.4. Propuesta

En el trabajo presente se hará uso del software GIM para realizar tanto estudios cinemáticos como dinámicos de diferentes mecanismos, así como también se utilizará para mostrar diferentes reconfiguraciones de estos mecanismos. Dado a las múltiples capacidades de esta herramienta se mostrará de manera sencilla las distintas variables cinemáticas y dinámicas desde unos mecanismos planos más simples, hasta el estudio de tridimensionales más complejos. Se ha escogido realizar un estudio de tres mecanismos diferentes cuyos fundamentos teóricos se podrían extrapolar a otros mecanismos de diferente configuración geométrica y cuya programación en GIM sería análoga.

## 9. Descripción de la propuesta

### 9.2. Mecanismo 5R

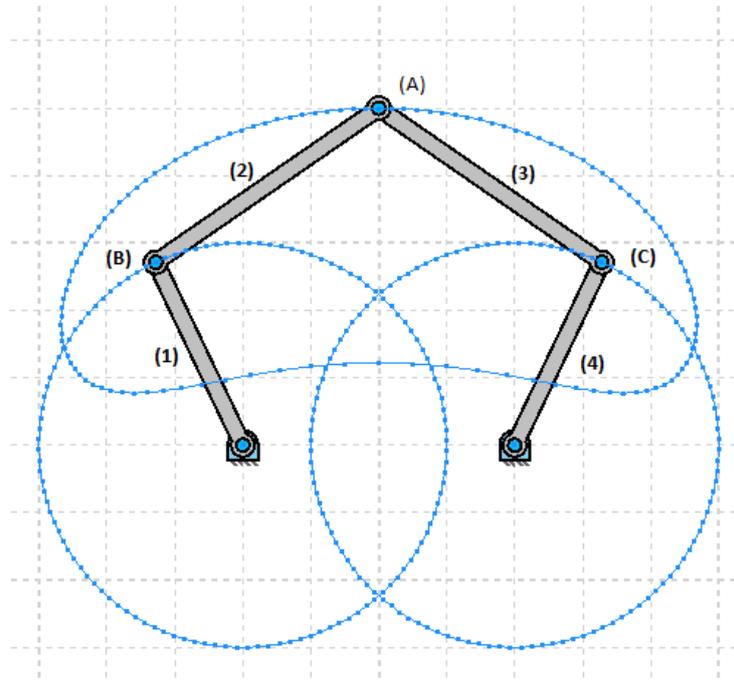


Ilustración 9. Mecanismo 5R y trayectorias

En primer lugar, vamos a estudiar el mecanismo 5R puesto que es el manipulador paralelo más simple que podamos realizar un estudio cinemático. El manipulador tiene una movilidad de dos grados de libertad. El mostrado en la figura está compuesto por 5 elementos unidos entre sí por pares cinemáticos de rotación, permitiendo un movimiento angular entre ellos. Este mecanismo es interpretado como dos cadenas cinemáticas 2RR unidas por sus extremos en el punto (A) creando así un mecanismo paralelo. El movimiento está proporcionado por dos actuadores situados en los extremos del elemento fijado a tierra, así podemos ver que los elementos (1) y (4) realizan el giro completo sobre sí mismos, sin haber ninguna posición de bloqueo.

Gran parte de las aplicaciones de este mecanismo estarán relacionadas con el movimiento del punto (A). Por ejemplo, si acoplásemos una plataforma en el punto (A) (*Ilustración 10*), podría servir para desplazar un objeto a diferentes sitios o alturas. Para ello habría que introducir un actuador que mantuviese un movimiento relativo entre la plataforma y las barras contiguas, la (2) y/o (3) consiguiendo su orientación horizontal en todo momento.

Para realizar un estudio efectivo sobre una determinada acción de este manipulador, habría que realizar un estudio cinemático inverso de posición en primer lugar, y así obtener las velocidades angulares de los actuadores (situados en el par de rotación del

elemento fijado a tierra) a partir del movimiento que queremos realizar. En segundo lugar, habría que hacer el estudio cinemático de posición directo, en el que, a partir de las velocidades de los actuadores obtenidas en el estudio inverso, definiremos la posición del punto (A) a lo largo de todo el movimiento.

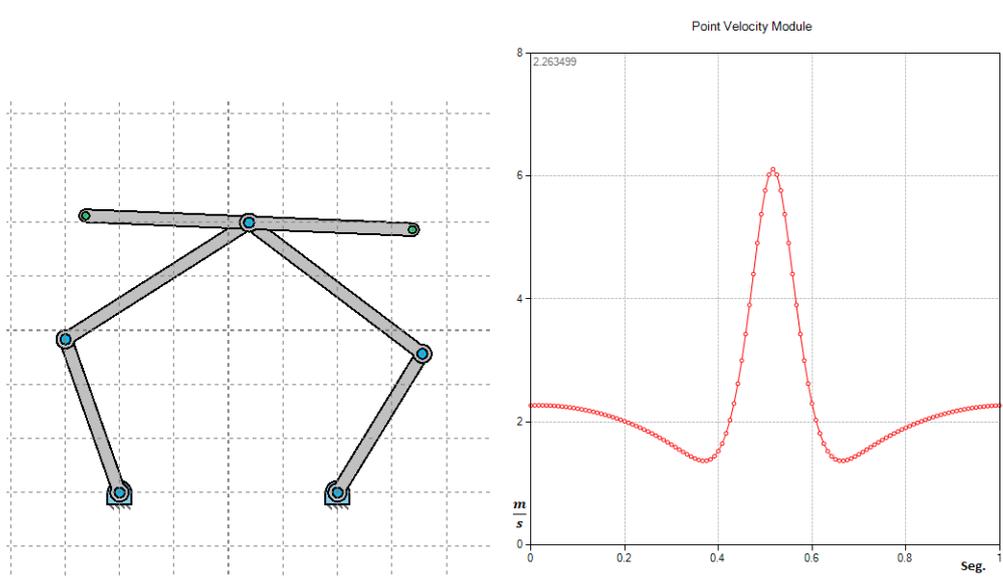


Ilustración 10. A) Mecanismo 5R con plataforma móvil (izq.) B) Velocidad punto A. (drch.)

Para el cálculo de esta velocidad el software GIM tiene implantado distintas funciones en las que a partir del parámetro de entrada (actuador eléctrico) y parámetros pasivos (longitud de eslabones, ángulos relativos...) obtiene tanto la velocidad de un punto como su aceleración. Las ecuaciones implementadas de la cinética son:

$$\frac{\partial x_A}{\partial \theta} = L_1 \cdot w_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + L_2 \cdot w_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial y_A}{\partial \theta} = L_1 \cdot w_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + L_2 \cdot w_2 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2)$$

Ecuación 3. Velocidad punto A

El caso de la aceleración es análogo, puesto que se deriva la Ecuación 3 y así obtener la aceleración de un punto del mecanismo, en este caso del punto A. Aquí interviene la variable de la aceleración angular que puede ser despreciada en el caso que estemos trabajando con un actuador eléctrico de velocidad angular constante.

$$\frac{\partial^2 x_A}{\partial \theta^2} = w_1^2 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + w_2^2 \cdot L_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial^2 y_A}{\partial \theta^2} = w_1^2 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + w_2^2 \cdot L_2 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

Ecuación 4. Aceleración punto A

Con la información cinemática ya disponible de este mecanismo y la ecuación de la aceleración, podemos completar este estudio con el cálculo de la aceleración en el punto A. Como se observa en la siguiente ilustración se alcanzan grandes velocidades en el punto A, entorno a los  $60m/s^2$  lo que es una aceleración muy alta que podría provocar efectos dinámicos negativos en el sistema. Cabe destacar que esta aceleración máxima se da cuando los pares de barras (1) y (2) o (3) y (4) se encuentran en la misma dirección, que como se verá posteriormente tendrá influencia en sus variables dinámicas.

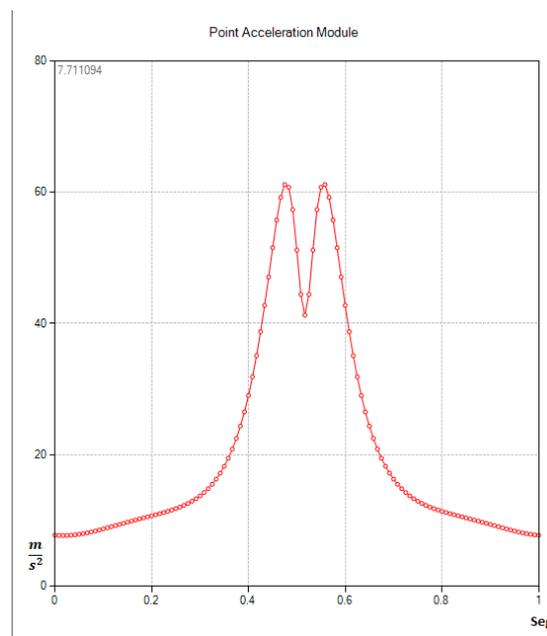


Ilustración 11. Mecanismo 5R. Aceleración A

En este apartado se va a realizar un estudio dinámico inverso del mecanismo denominado 5R, en él tendremos que definir unos parámetros de entrada y obtendremos tanto los momentos necesarios a llevar a cabo por los actuadores como las fuerzas que están sometidas a cada elemento durante el proceso. Para ello, nos situaremos en el módulo de Dynamics del programa GIM, en primer lugar, tendremos que definir la carga exterior que tendrá que soportar, en este caso hemos supuesto una de 10 kilogramos (100 Newtons aproximadamente). Definiendo unas dimensiones del mecanismo cuyos eslabones son de 0,3 y 0,4 metros para los brazos (1) y (2) respectivamente. También en el módulo Kynematics hemos definido una velocidad angular de entrada de  $2\pi$  rad./segundo.

Con estos datos de entrada hemos obtenido un momento máximo de aproximadamente  $47 N*m$  con lo que podemos dimensionar el motor eléctrico multiplicando este momento por su velocidad angular obteniendo una potencia mínima de  $300 W$  por cada

motor. La situación más desfavorable con la que los motores se tendrían que emplear al máximo corresponden a las siguientes configuraciones:

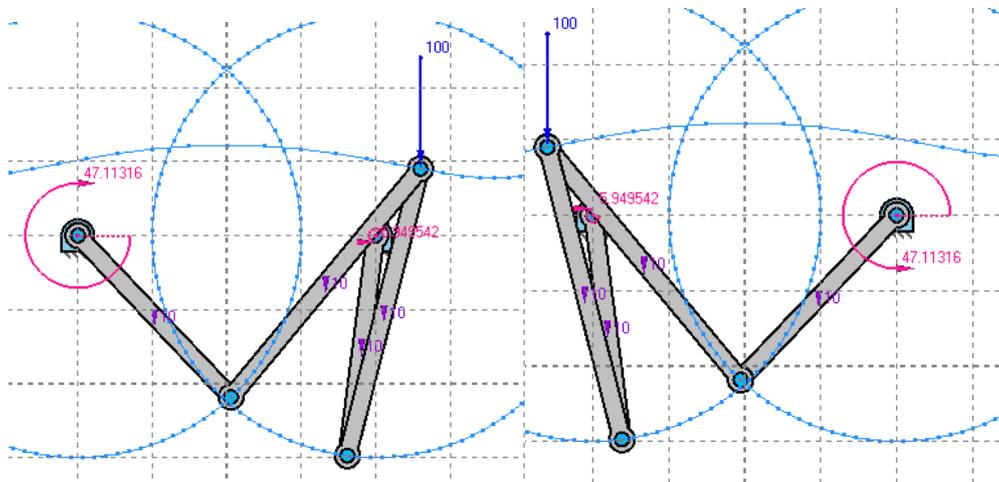


Ilustración 12. Mecanismo 5R. Momentos máximos

Esta situación a su vez corresponde con la situación más crítica para los elementos (1) del mecanismo puesto que las fuerzas que actúan sobre sus nudos es máxima. Ésta es una situación a tener en cuenta para evitar posibles holguras que puedan perjudicar el sistema provocando vibraciones que alteren su rendimiento.

Para ello es necesario dimensionar tanto las juntas cinemáticas con las que se acople al actuador eléctrico como la junta de rotación con la que se unirá al eslabón (2).

Para este estudio se han despreciado todos los esfuerzos internos de tracción flexión puesto que la gran parte de los elementos estarán constituidas de acero. Por tanto, sus deformaciones serán mínimas pudiéndose considerar el elemento como un sólido rígido cuyas deformaciones serán despreciables y no afectarán al buen funcionamiento de este mecanismo.

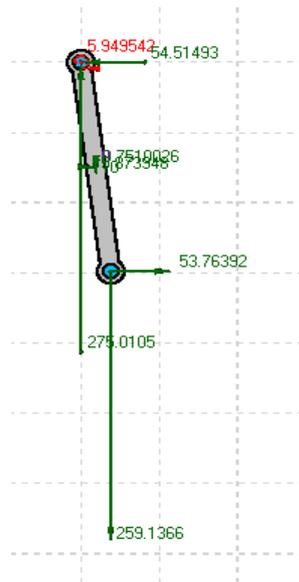


Ilustración 6. Mecanismo 5R. Fuerzas en un eslabón

Con todo este estudio se ha obtenido la información necesaria para obtener los actuadores, imponiendo las condiciones iniciales de la masa que debe soportar y la velocidad angular impuesta en el paso anterior de la cinemática del mecanismo. Además, se ha estudiado la situación más desfavorable en la que se encuentra un elemento y se ha de tener en cuenta para dimensionar las juntas que se utilizarán para aislar vibraciones y otras posibles acciones que perjudiquen el sistema.

Un ejemplo de reconfigurabilidad, de este mecanismo sería bloqueando un actuador y limitando por tanto el mecanismo con un 4R (1 grado de libertad y 4 pares cinemáticos de rotación). De esta manera si bloqueásemos el elemento 1 conseguiríamos un movimiento de arco de circunferencia en el punto (A) y en su contiguo que une los elementos (3) y (4). Si modificásemos su geometría podríamos conseguir que este último punto realizase circunferencias completas pareciéndose a un biela-manivela.

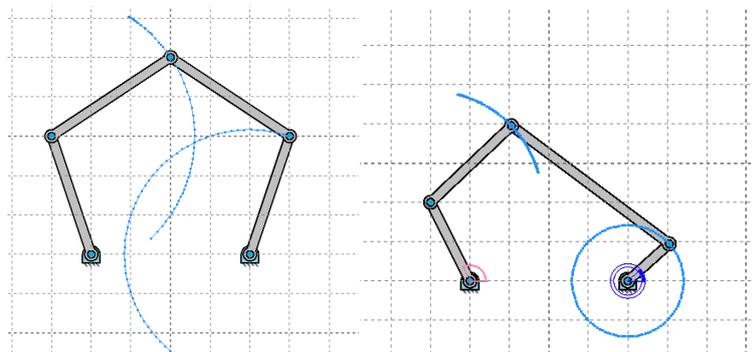


Ilustración 7. Mecanismo 5R. Elemento (1) bloqueado

Otro modo de reconfiguración se podría conseguir desacoplando el mecanismo en dos cadenas cinemáticas diferentes, consiguiendo dos mecanismos en serie con distintos grados de libertad.

Nudo desacoplado	Cadena 1	Cadena 2
(B)	1R	3RRR
(A)	2RR	2RR
(C)	3RRR	1R

Tabla 1. Desacoplamientos de 5R

La configuración si se desacopla el nudo (B) o el (C) es igual. En este caso, se obtendría una barra con un grado de libertad y otra con tres. Para poder realizarse este desacoplamiento las juntas (A) y (B) y/o (C) (depende de cual se desacople), deberían tener actuadores que proporcionasen movimientos relativos de los elementos.

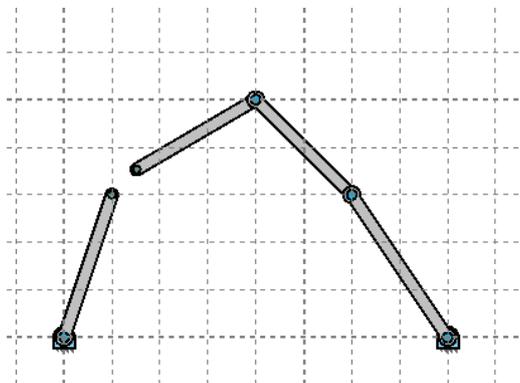


Ilustración 8. Mecanismo 5R. Nudo (B) desacoplado

Si el nudo que se desacopla es el (A) obtenemos dos cadenas cinemáticas independientes de 2 grados de libertad con actuadores tanto en las uniones a tierra como en los elementos (B) y (C). Por tanto, tenemos dos cadenas cinemáticas que tienen la posibilidad de actuar independientemente una de la otra.

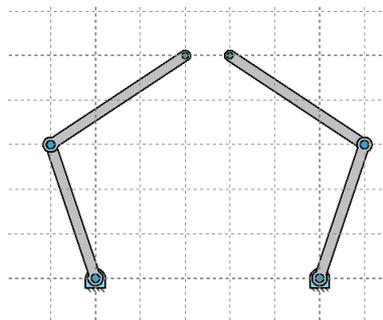


Ilustración 9. Mecanismo 5R. Nudo (A) desacoplado

### 9.3. Mecanismo 3Gdl

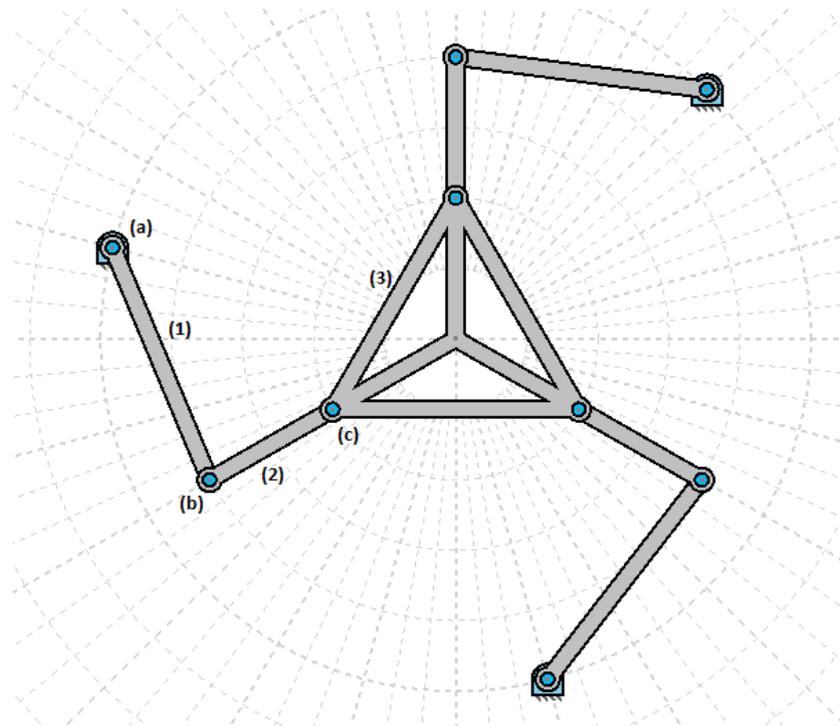


Ilustración 10. Mecanismo de 3gdl

Nos encontramos ante un mecanismo 3Gdl o 3R contiene tres grados de libertad que, por tanto, necesitará tres actuadores para proporcionarle movimiento. El representado en la ilustración 10 es uno genérico en el que podemos observar sus cadenas cinemáticas y enlaces cinemáticos.

Nos encontramos ante tres cadenas cinemáticas que están unidas en un extremo a un elemento fijo y por otro lado al elemento 3, que a partir de ahora le denominaremos plataforma móvil. El elemento fijo en el espacio podría verse como un triángulo conectando los tres puntos (a) del mecanismo y se caracteriza porque está fijado en el espacio sin posibilidad de tener ningún tipo de movimiento, por ello su representación en la figura sería innecesaria. Dos elementos forman las cadenas cinemáticas a parte de los fijados teniendo un movimiento relativo de rotación entre ellas y juntándose las tres cadenas en una plataforma móvil que probablemente será el elemento objeto de estudio y que realizará los movimientos de interés.

En primer lugar, es necesario determinar los grados de libertad que, aunque ya sepamos que son tres, los podemos obtener a partir de la ecuación de Grübler (*Ecuación 1*) para mecanismos planos que depende de los elementos y de los pares cinemáticos del mecanismo.

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II}$$

De esta forma calculamos el número de elementos que hay, en primer lugar, tenemos un elemento que fijo en el espacio, dos elementos en cada cadena cinemática y la plataforma móvil. Esto hace un total de ocho elementos. Ahora tenemos que hay 9 pares cinemáticos de rotación los cuales restringen cinco grados de libertad espaciales y permiten solo uno en el plano.

$$N = 8 ; P_I = 9$$

Si sustituimos estos valores en la ecuación obtenemos tres grados de libertad, el resultado esperado. El objetivo ahora es dar movimiento a este manipulador y necesitaremos tres actuadores. Estos los posicionaremos en los tres puntos (a) del mecanismo y serán pares de rotación. Por desgracia, en el mecanismo de la figura 1, no podemos realizar esta acción puesto que la posición corresponde a un punto singular y no es posible su movimiento, para ello modificaremos la geometría del mecanismo hasta que éste no se encuentre en un punto muerto.

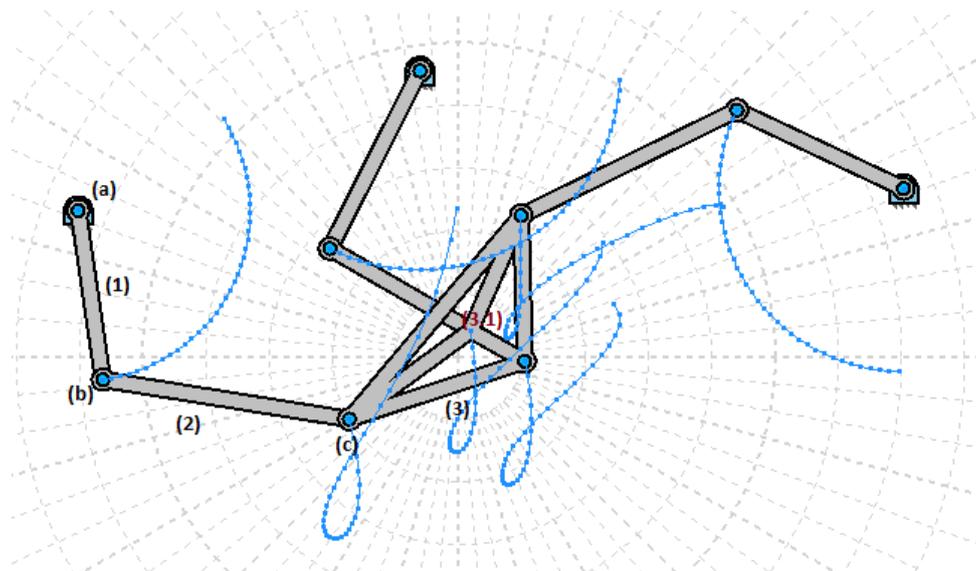


Ilustración 11. Mecanismo de 3gdl (2)

En este ejemplo, un desplazamiento del mecanismo, más en concreto de la plataforma (3), porque en la mayor parte de las aplicaciones industriales en las que se vaya a utilizar este mecanismo el estudio estará centrado en la cinemática de esta estructura. En este caso nos vamos a centrar en el estudio de la cinemática del punto (3.1) para facilitar el estudio. Un mecanismo como este podría utilizarse en la vida real para que la plataforma central realizase una trayectoria para desplazar una pieza de un lugar a otro. Si se quisiese obtener una trayectoria concreta, por ejemplo, desplazarla de una máquina herramienta a otra, habría que realizar un complejo estudio cinemático inverso.

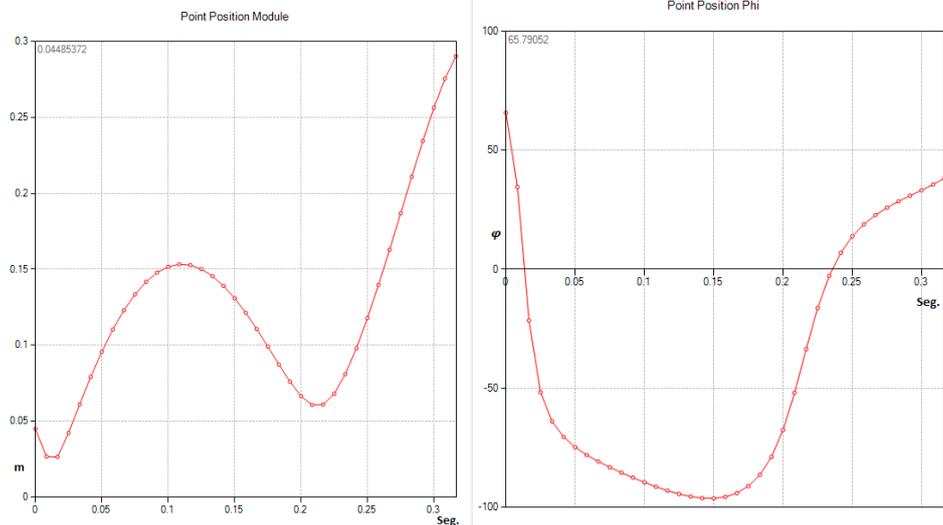
La fórmula empleada para la obtención de su posición a lo largo del tiempo viene dada por el parámetro de entrada (posición angular del actuador) y por las variables pasivas como pueden ser las dimensiones de los eslabones. De esta forma tenemos la ecuación:

$$x = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + L_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

*Ecuación 5. Posición punto A*

Las gráficas representadas vemos representada la posición del punto (3.1), en la gráfica de la izquierda tenemos representado el módulo de la posición del punto con respecto la posición (0,0) que hemos considerado en función del tiempo. La figura de la derecha, nos muestra el ángulo que forma la recta que pasa por el origen de coordenadas con el punto (3.1) y la recta horizontal considerada como origen.



*Ilustración 12. Mecanismo 3R. Posición punto (3.1)*

Ahora podemos observar la velocidad de este punto, también en coordenadas polares. Como observación podemos destacar que mientras el módulo parece aproximarse a una función armónica el ángulo parece tener una simetría impar respecto del punto que pasa por 0 grados observando un cambio abrupto en la dirección de esta velocidad. Para su obtención este software tiene implantado una fórmula semejante a la *Ecuación 3* nombrada anteriormente.

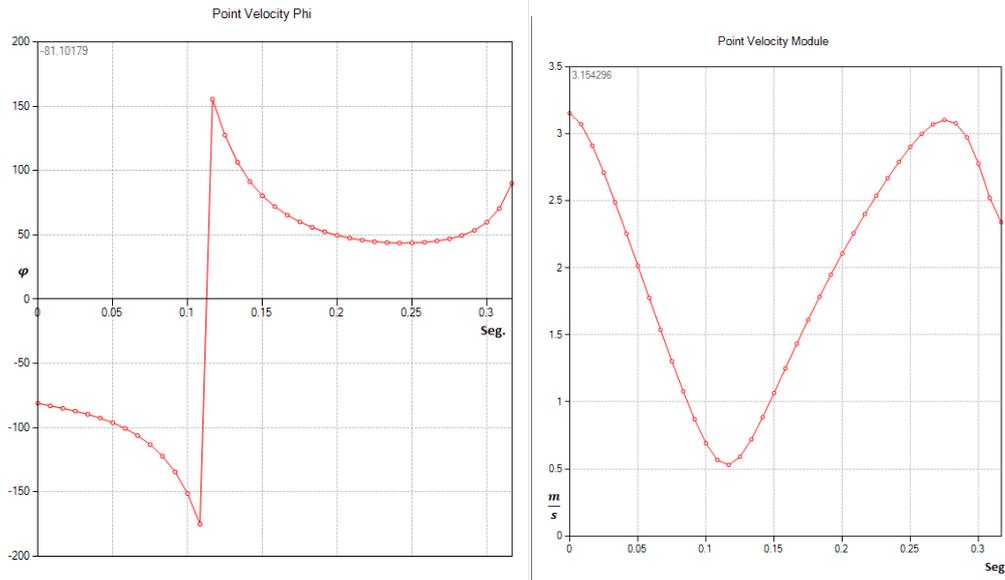


Ilustración 13. Mecanismo 3RRR. Velocidad punto (3.1)

En estas gráficas, podemos observar tanto el módulo como el ángulo de la aceleración total del punto estudiado. Podemos observar una variación del módulo de forma exponencial en el momento que pasa por 0,26 segundos. Este fenómeno se debe a que el mecanismo se acerca a la posición de bloqueo en la que la aceleración tiende a infinito, más en concreto sería la aceleración normal la que tendería a infinito. De la misma forma el módulo y dirección de la aceleración vienen definida por la *Ecuación 4*.

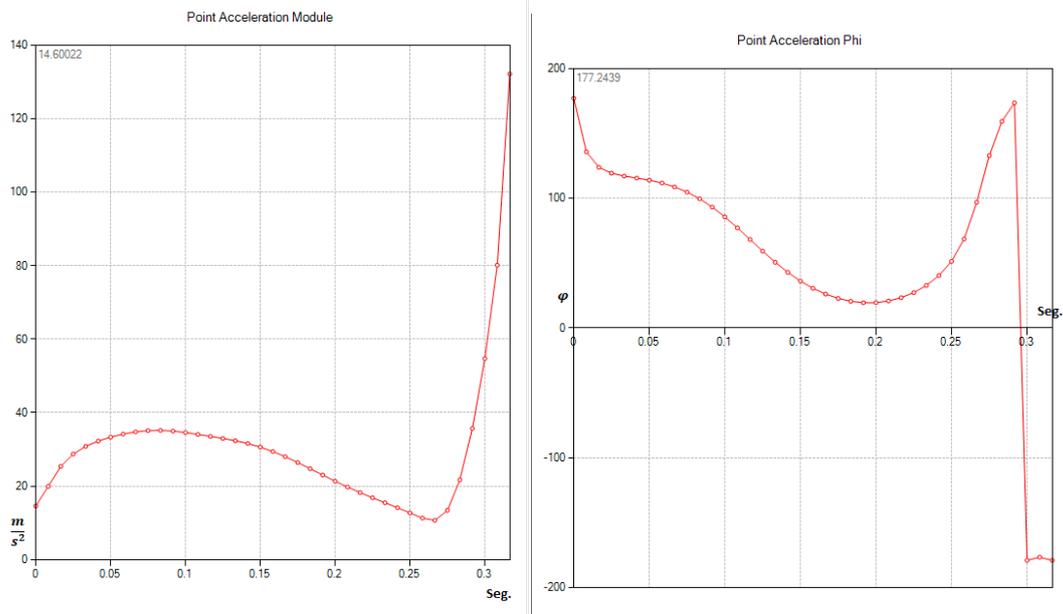


Ilustración 14. Mecanismo 3gdl. Aceleración del punto (3.1)

Ahora, se va a realizar un estudio análogo al realizado con el mecanismo 2R posando introduciendo unos mismos parámetros de entrada en los que la carga soportada es de 10 kg y la velocidad angular impuesta en cada actuador es de  $2\pi$  rad/segund0. La longitud de sus eslabones oscila en torno a los 0,3 y 0,4 metros.

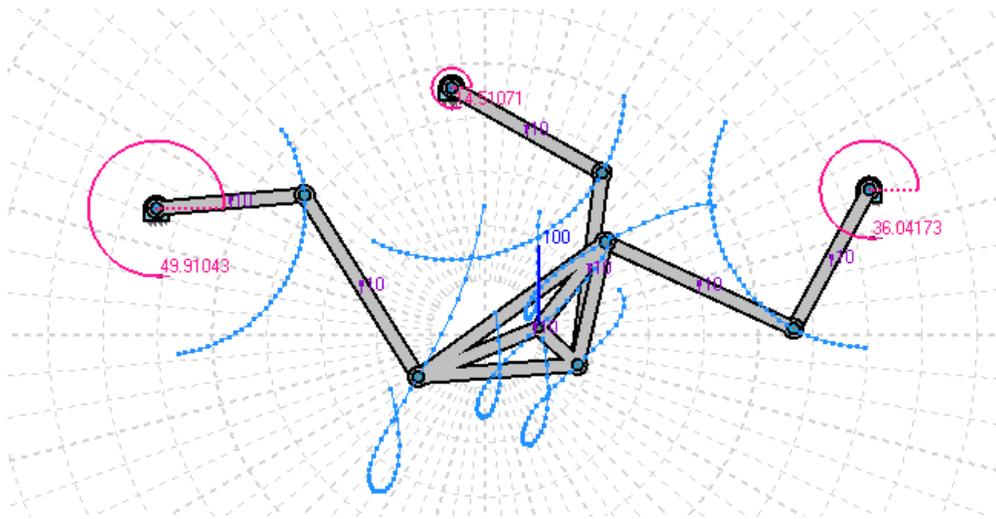


Ilustración 15. Momentos de los actuadores

El estudio dinámico inverso de este mecanismo contiene una dificultad adicional al del mecanismo 5R debido a que hay de tener que dimensionar tres motores eléctricos y sus respectivas potencias. La dificultad adicional es la aparición de posiciones de bloqueo del mecanismo en las que como hemos visto en la cinemática el módulo de la aceleración aumenta exponencialmente y debido a ello en esas posiciones es necesaria una gran potencia de actuación. Para simplificar estas dificultades, se va a suponer que el mecanismo no llega hasta su posición de bloqueo, sino que para en una posición anterior y por tanto la potencia requerida será menor. También dimensionaremos los tres actuadores igualmente, con lo que solo será necesario estudiar aquel que requiera mayor momento para moverse.

Dado que en la situación de arranque el mecanismo necesita un momento de 228 Newton\*metro en la cadena cinemática de la izquierda y vamos a considerar este como el valor límite de los actuadores. A partir de este momento y de su velocidad angular, se obtiene una potencia de 1430 W por lo que implementaremos unos actuadores de 1,5KW para obtener un cierto margen de seguridad. Por tanto, serán necesarios tres motores eléctricos de esta potencia que, aunque las otras cadenas cinemáticas no necesiten uno tan potente es habitual diseñar el conjunto de forma que los tres motores sean iguales. Como posición límite (antes de llegar al punto de bloqueo) supondremos que coincide con aquella en la que un actuador tenga que desarrollar esta potencia. Este punto coincidirá con uno próximo a la situación de bloqueo, pero poco anterior.

En cuanto al elemento que más cargas soporta es el (1) de la cadena cinemática de la izquierda y las fuerzas que actúan sobre sus nudos son las de la siguiente figura. Corresponde a la situación inicial en la que tendrá que soportar unas cargas verticales de unos 870 N, unas nueve veces más que la masa que está desplazando. Esto será muy importante para dimensionar las juntas puesto que es una carga muy alta que puede incluso hacer fallar a las juntas cinemáticas.

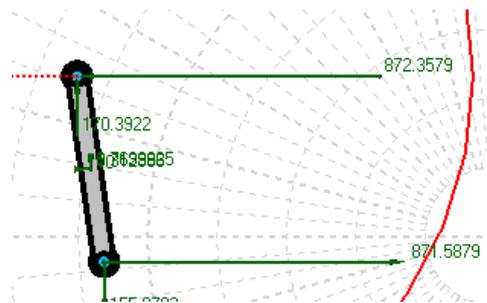


Ilustración 16. Análisis cinemático eslabón

Una de las reconfigurabilidades posibles de este mecanismo y la más sencilla de imponer en el mecanismo es el bloqueo de una entrada convirtiéndose en un mecanismo de 2 grados de libertad. Como podemos observar en la *ilustración 17* hay un mayor recorrido del punto (3.1) lo que dota de mayor posibilidad de movimiento de un cuerpo acoplado en su plataforma.

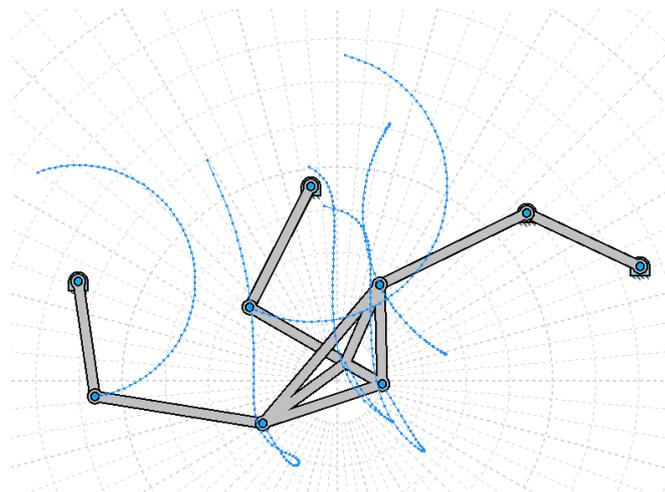
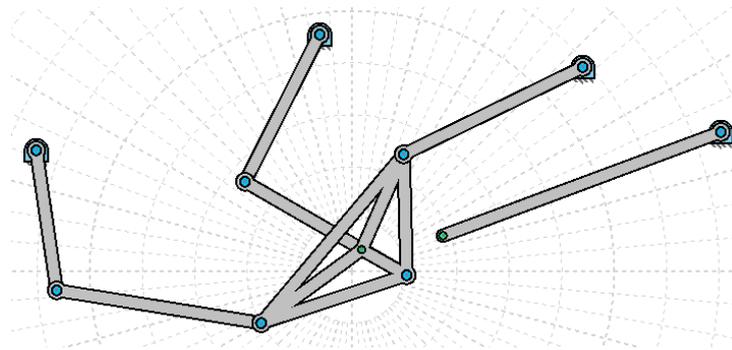


Ilustración 17. Reconfiguración mecanismo de 3gdl.

En lugar de dejar la barra fija en el espacio inutilizada podríamos utilizarla para realizar un trabajo complementario. Para ello tendríamos que fijar tan solo la junta (b) y desacoplar la barra como se observa en la *ilustración 18*.



*Ilustración 18. Desacople de la barra (1).*

A modo de conclusión, podemos decir que este mecanismo estudiado tiene un gran interés didáctico puesto que su estudio cinemático puede mostrarnos su comportamiento ante una posición de bloqueo de la pieza. Sin embargo, en la práctica no es un mecanismo muy utilizado en las industrias puesto que tiene un estudio complejo y no aporta muchas funcionalidades diferentes a otros mecanismos.

## 9.4. Mecanismo 6 Gdl

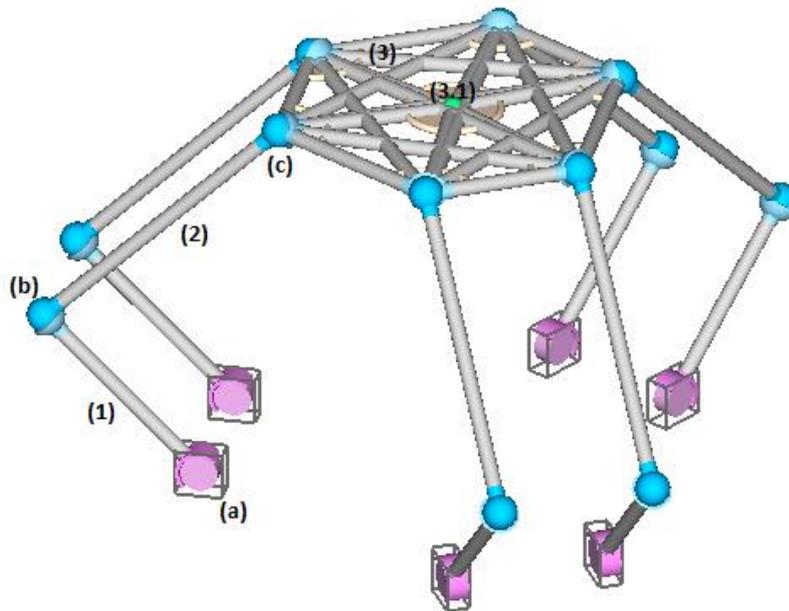


Ilustración 19. Mecanismo 6gdl

Ahora vamos a centrar nuestro estudio en un mecanismo espacial de 6 grados de libertad como el mostrado en la figura. Este está compuesto por seis cadenas cinemáticas cuya función es unir la plataforma (3) con una referencia fija, además éstas serán las encargadas de proporcionar un movimiento relativo de la plataforma. Este movimiento se realizará posicionando actuadores en la estructura y debe haber tantos como grados de libertad tenga el mecanismo.

En primer lugar, vamos a analizar la geometría de este mecanismo, empezando por las 6 cadenas cinemáticas. Éstas, están compuestas por dos elementos que tienen un movimiento relativo entre ellas proporcionado por un par esférico, permitiendo cualquier tipo de rotación entre ellas. A continuación, tenemos otro par cinemático esférico que conecta las cadenas cinemáticas con la plataforma.

Vamos a analizar el número de grados de libertad del mecanismo. Al estar ante un mecanismo espacial el criterio de Grübler es insuficiente y el estudio que realiza no es válido, por tanto, necesitamos una extensión de este criterio que sea capaz de obtener sus grados de libertad. Por ello recurrimos al procedimiento de Malishev (*Ecuación 2*) para obtenerlos y así conocer cuántos actuadores son necesarios para darle movimiento.

La fórmula proporcionada por Malishev para el cálculo es:

$$G = 6(N - 1) - 5P_I - 4P_{II} - 3P_{III} - 2P_{IV} - P_V$$

Donde N es el número de elementos del mecanismo (se le resta uno ya que un elemento es fijado a tierra restringiendo cualquier movimiento de este),  $P_I$  que corresponde a los pares cinemáticos de clase 1 que permite el movimiento relativo de un grado de libertad restringiendo los 5 restantes,  $P_{II}$  que permite dos grados de libertad de movimiento entre los elementos y restringe los otros 4 y así sucesivamente.

Ahora, tenemos seis cadenas cinemáticas con dos elementos cada uno y unidos a ellas está la plataforma superior objeto de estudio y el elemento fijo que en espacio (no representado en la ilustración 19) que estaría unido a todos los pares (a). Por tanto, tenemos 14 elementos en el manipulador. A continuación, observamos que tenemos 6 pares de rotación que son de clase 1 y doce pares esféricos de clase 3. Así, obtenemos 6 grados de libertad como era de esperar.

Atendiendo al software GIM, este nos calcula automáticamente los grados de libertad obteniendo 6 como hemos dicho anteriormente. Así que, analizando sus posibles movimientos, en primer lugar, habría que realizar una actuación por seis entradas independientes, que en ese ensayo van a coincidir con los pares de rotación de la base fija.

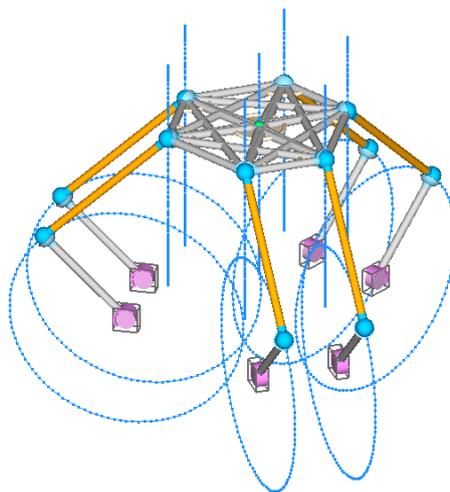


Ilustración 20. Trayectorias

De esta figura podemos destacar dos movimientos, el de la plataforma tiene un movimiento de traslación espacial con trayectoria vertical, por ello el estudio cinemático de cualquiera de sus puntos es suficiente puesto que todos tienen las mismas propiedades. En segundo lugar, el elemento 1 de las cadenas cinemáticas recorren la trayectoria circular completa alrededor del par, esto significa que no hay ningún punto

de bloqueo y que los actuadores proporcionan una velocidad constante sin que el mecanismo ponga oposición por su arquitectura.

Para comenzar el análisis cinemático vamos a definir previamente el sistema de referencia, que tomaremos un triedro cartesiano móvil en el que el punto (3.1) anteriormente definido en la primera figura y otro triedro fijo en el origen de coordenadas (0,0,0), para analizar los movimientos relativos entre estos dos. Al ser un movimiento de traslación vertical solo tendrá sentido estudiar las variables cinemáticas respecto la coordenada Z. Además, solo realizaremos el estudio de ese punto puesto que de cara a aplicaciones reales la plataforma será el objeto de estudio y la que impondremos diferentes exigencias para su movimiento. El programa GIM no nos proporciona las unidades en las que está trabajando por lo tanto supondremos que estamos se refiere a las unidades internacionales.

La ecuación que define la posición de este punto es similar a la *Ecuación 5*, con la diferencia que habría que incorporar el término del brazo de la plataforma (que es nulo puesto que su posición va a ser horizontal en todo momento). Además, solo sería necesario estudiar en este caso la variable y puesto que solo hay desplazamiento vertical.

La trayectoria vertical de la plataforma es próxima a una armónica oscilando continuamente respecto de una superficie media. De cara a un caso real esta plataforma podría ser útil para el desplazamiento de un objeto descansando en el elemento 3 y ser transportado a otro sitio que esté a diferente altura. También, podría ser el caso de una prensa que tenga que deformar un objeto mediante la aplicación de presión, puesto que al ser un robot paralelo son idóneos para este uso debido a su alta rigidez.

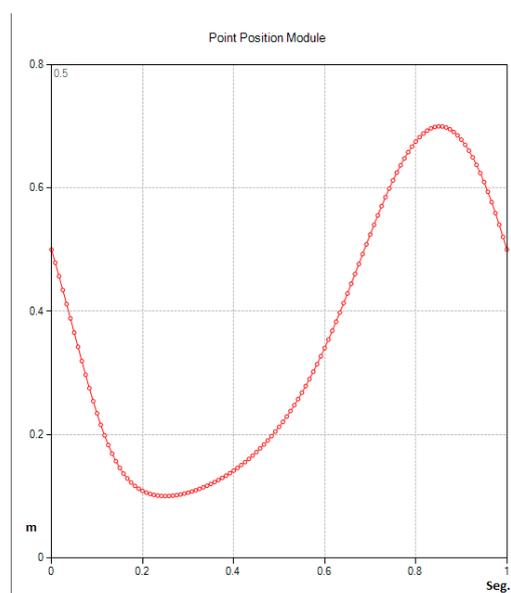


Ilustración 21. Posición punto (3.1)

La implantación de las ecuaciones correspondientes a la velocidad y a la aceleración del punto (3.1) es un proceso similar al de la posición, utilizando las *Ecuaciones 4 y 5*. Esto es debido a que se debería añadir el brazo de la base móvil que conecta el par cinemático con el centro de la plataforma, pero al tener una posición horizontal en este caso estos términos serían nulos. Además, solo será necesario estudiar las variables relacionadas con el eje vertical.

En estas gráficas obtenemos los datos de velocidad y aceleración del punto (3.1) de la plataforma que se puede generalizar a cualquier punto de esta, para la arquitectura dada de este mecanismo y actuadores colocados que proporcionan una velocidad constante de  $2\pi$  (rad/s). Con esta velocidad de los actuadores, como podemos ver en las gráficas, el periodo es de un segundo y su movimiento se repite periódicamente. En cuanto a la velocidad se puede decir que el paso de velocidad positiva a negativa se da cuando alcanza la máxima altura y por tanto cambia su movimiento de ascenso a descenso. El estudio de la aceleración, es importante sobre todo para el estudio dinámico del mecanismo y así obtener las fuerzas de inercia que actúan sobre los elementos. Sirve como punto de partida y habría que realizar un estudio más intenso sobre estas fuerzas si hubiese algún objeto en la plataforma que las fuerzas de inercia fuesen muy grandes debido a que son proporcionales al peso del elemento.

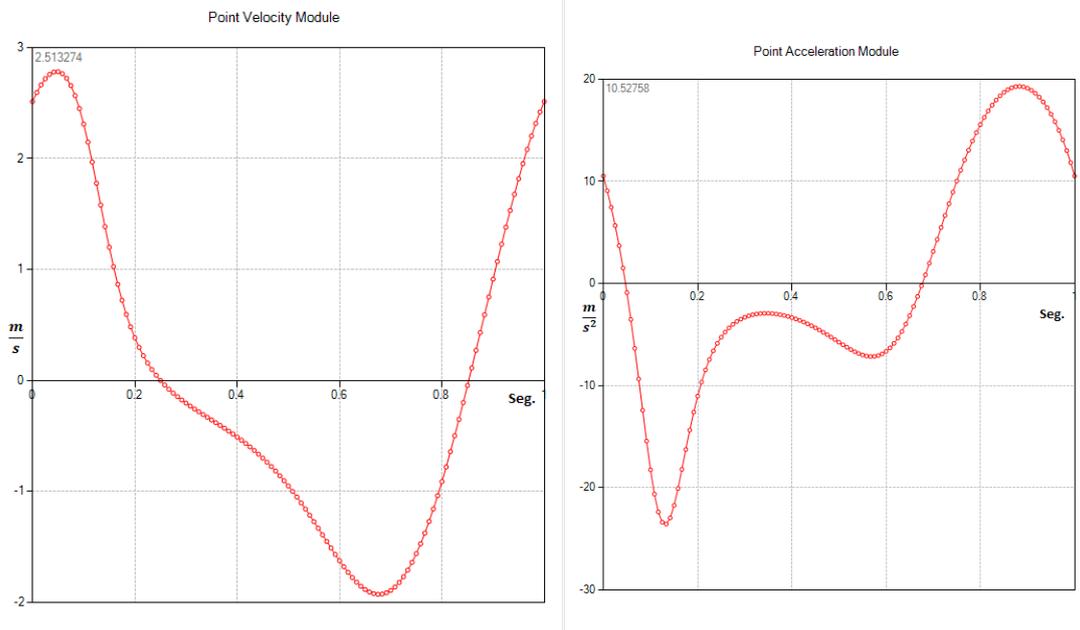
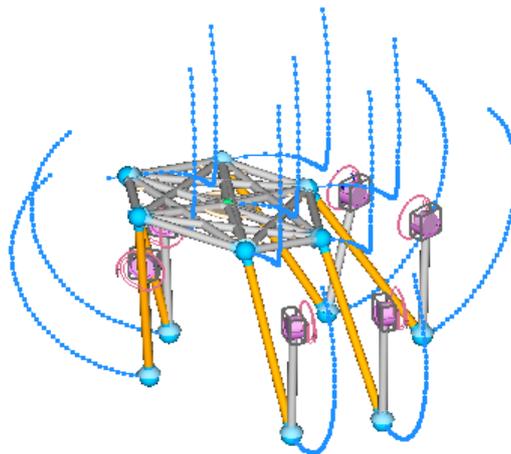


Ilustración 22. A) Velocidad punto (3.1) (izq.) B) Aceleración punto (3.1) (drch.)

Antes de comenzar el estudio de las distintas reconfiguraciones que podemos obtener con este mecanismo hay que comentar el comportamiento que tiene éste si la velocidad de sus actuadores es modificada. Al cambiar esta velocidad de actuación hay un desequilibrio y la plataforma rota a la vez que se traslada verticalmente.

Un ejemplo se puede dar en el mecanismo de 6 grados de libertad en el que al modificar el módulo de la velocidad de los actuadores llegamos a un punto muerto donde el mecanismo se bloquea y se impide su movimiento completo. Por tanto, podemos obtener más funcionalidades a parte de la traslación vertical. En la *ilustración 23* podemos observar como el movimiento del manipulador se compone de uno de traslación vertical seguido de una traslación horizontal. La posibilidad de poder modificar cada actuador independientemente de los demás nos da posibilidades infinitas de movimientos del manipulador.



*Ilustración 23. Trayectoria tras modificar las velocidades de entrada (I)*

Cabe destacar que el software GIM no está programado para realizar estudios dinámicos a los manipuladores espaciales. Por tanto, se va a prescindir de realizar de este estudio para el manipulador 6R, pero posteriormente se explicará mediante el método de D'Alembert como ha de realizarse.

Ahora vamos a analizar una posible reconfiguración de un mecanismo de 6 gdl como el que hemos estado analizando. Para poder hacerlo en primer lugar, debemos sustituir la articulación esférica (b) por un par de rotación o limitar el movimiento de la articulación esférica para que actúe como una de rotación. Como vemos en la *ilustración 24* esta transformación limita el movimiento de rotación relativa de los dos elementos de tres rotaciones con la esférica (en la figura solo aparecen dos debido a que no está representado en los ejes propios del cuerpo) a la rotación respecto de un solo eje con el par de rotación.

Así podemos conseguir una plataforma de 3 grados de libertad que realizaría la misma función que la que hemos analizado hasta ahora. Este mecanismo está compuesto de tres cadenas cinemáticas separadas simétricamente por 120 grados. En esta figura adjunta podemos verificar todo lo dicho hasta ahora.

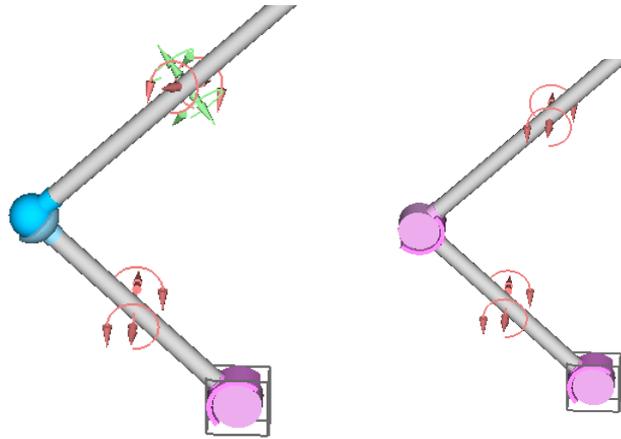


Ilustración 24. Junta esférica (izq.) Junta de rotación (drch.)

Además de poder conseguir las mismas funciones que el de más grados de libertad, si dispusiésemos de pares cinemáticos esféricos separables podríamos tener además tres cadenas cinemáticas independientes de dos grados de libertad que realizarían otras funciones complementarias a las de la plataforma principal. Entonces, obtenemos un conjunto de nueve grados de libertad, habiendo dos en cada una de las cadenas cinemáticas y tres grados de libertad en la plataforma principal.

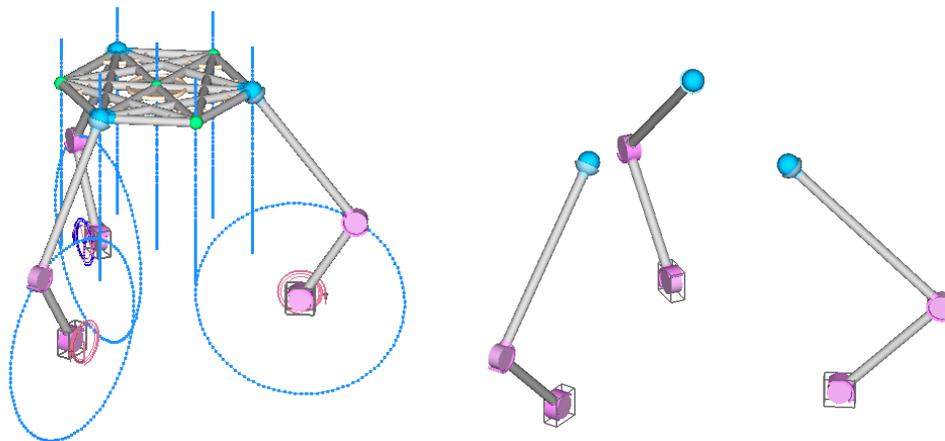


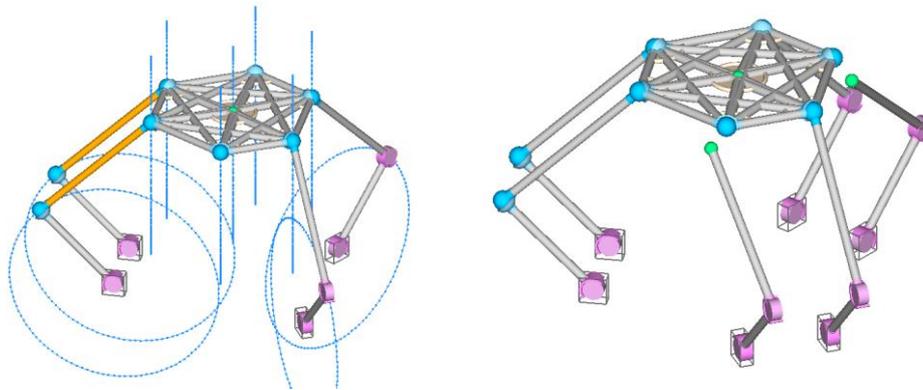
Ilustración 25. Mecanismo totalmente desacoplado

En esta ilustración tenemos mostradas separadamente la plataforma móvil de 3gdl junto con las tres cadenas cinemáticas independientes a las cuales podrían ser automatizadas para realizar un trabajo complementario a la plataforma. Éstas, a su vez su par cinemático esférico debería ser sustituido por uno de rotación o restringir grados de libertad en el esférico si fuese posible. Además, tendrán que tener un actuador que

proporcionase movimiento relativo entre sus dos elementos, puesto que son cadenas cinemáticas de dos grados de libertad.

También podemos obtener reconfiguraciones intermedias acoplando y desacoplando las articulaciones (c) pudiendo controlar en todo momento cuantas cadenas cinemáticas desacopladas hay de la plataforma y obteniendo un máximo de tres de estas cadenas desacopladas (como se ha visto en la *Ilustración 25*).

Por tanto, nos quedan dos configuraciones por analizar, la primera de ellas contiene dos cadenas cinemáticas independientes y desacopladas con 2 gdl cada una de ellas. Así, tenemos cuatro grados de libertad en las cadenas cinemáticas y tres en la plataforma principal y serán necesarios 7 actuadores.



*Ilustración 26. Plataforma con 4gdl y dos cadenas cinemáticas*

En esta configuración puesto que la plataforma está soportada por cuatro cadenas cinemáticas y como se comprobaría con la ecuación Grübler hay 4 gdl y, por ello, bastará con modificar dos pares esféricos (b) por pares de rotación para tener un total de cuatro grados de libertad y así introducir los actuadores en los cuatro pares situados en la plataforma fija. También, podemos observar que las cadenas cinemáticas independientes a la plataforma tienen dos grados de libertad y debería tener actuadores en todos sus pares de rotación para poder realizar un trabajo complementario a la plataforma.

Por último, solo nos queda por nombrar el caso de una cadena cinemática más la plataforma principal habiendo un total de 7 gdl (5 de la plataforma principal más dos de la cadena cinemática), según la ecuación de Grübler, por ello bastaría con modificar solo un par cinemático esférico (b) por uno de rotación.

Con todas las reconfiguraciones mostradas hasta el momento podemos realizar un cuadro resumido mostrando todas las posibilidades con sus respectivos grados de libertad.

<b>Configuración</b>	<b>Plataforma principal</b>	<b>Cadenas desacopladas</b>
<b>Totalmente acoplado</b>	6 gdl	No hay cadenas desacopladas
<b>Una cadena desacoplada</b>	5 gdl	1 cadena (2 gdl)
<b>Dos cadenas desacopladas</b>	4 gdl	2 cadenas (4 gdl)
<b>Totalmente desacoplado (Tres cadenas desacopladas)</b>	3 gdl	3 cadenas (6 gdl)

*Tabla 2. Configuraciones del manipulador de 6gdl.*

## 9.5. Propuesta de aplicación

En este apartado vamos a describir una aplicación del manipulador de 6 gdl con la que cambiando su configuración podremos realizar una traslación de una pieza. Para ello, mediante el módulo GIM con el manipulador descrito en el apartado anterior, vamos a proponer una aplicación productiva utilizando las reconfiguraciones descritas en el punto anterior.

Se considera que la tarea consiste en recoger un cuerpo que se encuentra en un punto espacial cercano al manipulador, para que tenga la posibilidad de llegar a él y recogerlo con sus cadenas cinemáticas. En este caso, hemos considerado que se desacoplan tres cadenas cinemáticas y se aproximan al cuerpo tetraédrico hasta acoplarse a él. Para poder realizar esta acción se deben cumplir algunos requisitos:

- Los pares cinemáticos intermedios entre las todas las cadenas cinemáticas desacopladas, deben tener la posibilidad de poder transformarse de una junta esférica a una de rotación para así tener los grados de libertad que deseamos.
- En las cadenas cinemáticas desacopladas es necesario colocar un actuador en la junta cinemática de rotación intermedia, para poder tener el movimiento de un robot serie de 2 grados de libertad.

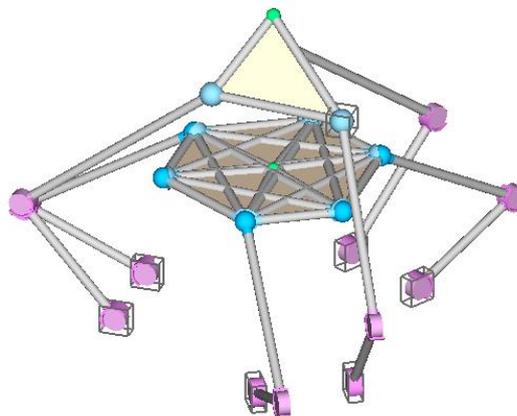


Ilustración 27. Aproximación a la recogida de un cuerpo

Una vez tenemos el cuerpo acoplado a las tres cadenas cinemáticas, como podemos observar en la figura, el mecanismo es análogo a una plataforma de tres grados de libertad y por ello los actuadores intermedios nombrados anteriormente ya no tendrán relevancia y no deberán accionar ningún movimiento relativo entre cuerpos. A continuación, se procede a colocar el cuerpo cuidadosamente encima de la plataforma y a recolocar las cadenas cinemáticas. Es decir, las cadenas cinemáticas tendrán que

desacoplarse del cuerpo y se convierten en un robot serie de 2gdl como el anterior hasta que se vuelva a acoplar a la plataforma.

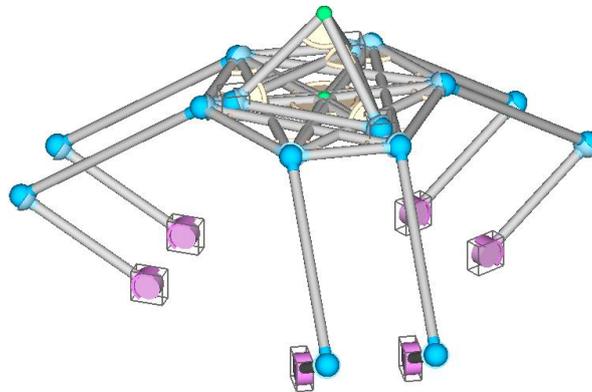


Ilustración 28. Traslación del cuerpo

Como vemos una vez acopladas las cadenas cinemáticas al manipulador principal, el conjunto constituye de nuevo un manipulador paralelo de 6 grados de libertad con el que podremos trasladar la pieza verticalmente. Como hemos visto en el apartado anterior además de la traslación vertical podría darse también una traslación horizontal cambiando la velocidad de actuación de los motores como hemos visto en el apartado anterior.

Una vez tenemos la altura aproximada a la que queremos colocar el cuerpo, pararemos el movimiento de traslación del manipulador y procederemos a dejar el cuerpo en otro lugar. Para ello el procedimiento a seguir es bastante parecido al de la colocación del cuerpo en la plataforma. Teniendo que desacoplar en primer lugar las tres cadenas cinemáticas, convirtiendo todos los pares de rotación intermedios en rotacionales de 1 Gdl y acoplarse al cuerpo. Una vez acoplados será una plataforma de 3gdl con la que desplazaremos el cuerpo al punto deseado.

Este es una ejemplificación de un movimiento repetitivo y automatizado que podría realizar un manipulador reconfigurable que simplifica estructuralmente el proceso, ya que para realizar este proceso con robots serie sería necesario al menos utilizar 2 unidades.

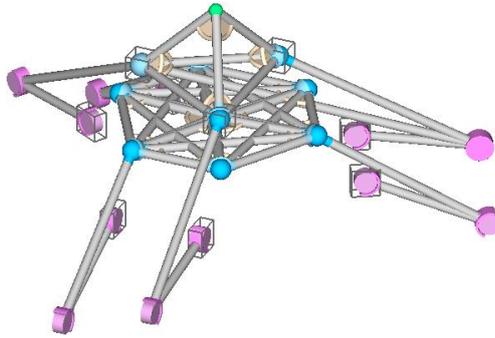


Ilustración 29. Desplazamiento del cuerpo

En esta reconfigurabilidad el acople entre las cadenas cinemáticas y el cuerpo puede resultar difícil puesto que estas cadenas contienen dos juntas cinemáticas de rotación y por tanto solo tendrá movimiento en un plano que tendrá que coincidir con el del punto de acople. Para facilitar esto, existe la posibilidad de colocar un actuador y un par de rotación en la base de la cadena cinemática dotándola de la posibilidad de giro respecto de su eje local z. De esta forma tendremos las cadenas cinemáticas que se desacoplen de 3 gdl. En la siguiente figura se muestra lo dicho:

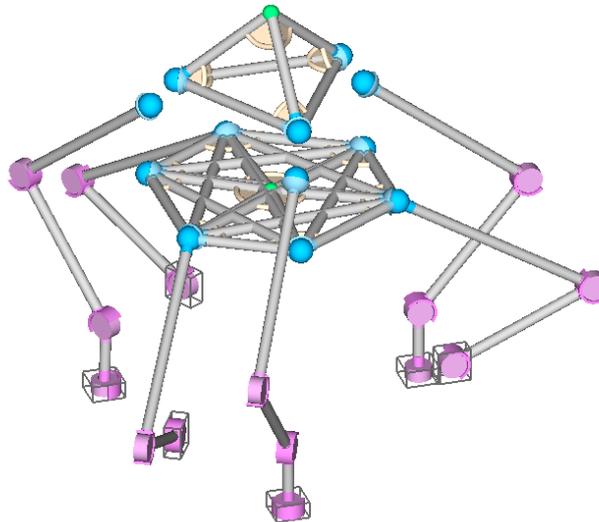


Ilustración 30. Cadenas cinemáticas con 3gdl

## 10. Cálculos y algoritmos

En todo el estudio realizado anteriormente a los tres mecanismos se ha obtenido las gráficas y valores de sus variables cinemáticas y dinámicas mediante el software GIM. En este apartado vamos a modelizar las ecuaciones que este software tiene implementadas para el cálculo y que no están detalladamente explicadas.

### 10.2. Estudio cinemático

Para realiza un estudio del problema cinemático directo de un mecanismo es necesario conocer la geometría de la cadena cinemática que se está estudiando, es decir, las longitudes de sus eslabones y dar nombre a cada una de las variables que intervendrán en el estudio. En nuestro caso, vamos a definir una cadena cinemática 2-RR, es decir, de dos grados de libertad y con dos pares cinemáticos de rotación, como se muestra en la siguiente ilustración. Esta cadena como se verá posteriormente se encontrará implementada en los tres mecanismos que estudiaremos y por tanto es la que mejor define el comportamiento de éstos [12].

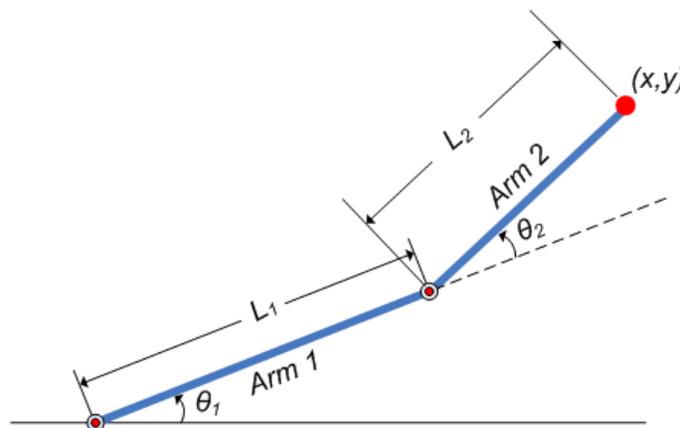


Ilustración 29. Brazo 2-RR [12]

Para realizar un primer estudio de posición directo del punto A(x,y), punto de salida del movimiento, será necesario definir las ecuaciones que relacionen todas las variables y que a partir del parámetro de entrada podemos definir la salida. [10] Las ecuaciones de este problema directo son:

$$x = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + L_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

Por tanto conocidas las dimensiones de los brazos ( $L_1, L_2$ ) y las variables de entrada que vendrán dadas por los actuadores eléctricos ( $\theta_1, \theta_2$ ) podemos obtener los parámetros de salida del manipulador. De esta forma se puede continuar realizando el análisis

cinemático de su velocidades y aceleraciones sin más que derivar las ecuaciones obtenidas. Así, las ecuaciones de velocidad quedan:

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = L_1 \cdot w_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + L_2 \cdot w_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta} = L_1 \cdot w_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + L_2 \cdot w_2 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2)$$

De donde  $(w_1, w_2)$  corresponden con las derivadas de los ángulos y que su ecuación describe la velocidad angular del mecanismo. Si volvemos a derivar la ecuación anterior respecto del ángulo de nuevo obtenemos las ecuaciones que rigen la aceleración del sistema:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial \theta^2} = w_1^2 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + w_2^2 \cdot L_2 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial \theta^2} = w_1^2 \cdot L_1 \cdot \text{cos}(\theta_1) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) + w_2^2 \cdot L_2 \cdot \text{cos}(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_1 \cdot L_1 \cdot \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$$

Si se realizase el estudio cinemático inverso, habría que cambiar totalmente el modo de estudio puesto que en este caso los parámetros de entrada serán las posiciones  $(x,y)$  del sistema y no los parámetros de los actuadores, como era en el caso anteriormente descrito del estudio cinemático directo. Por tanto, las incógnitas de este problema serán los ángulos del brazo  $(\theta, \beta)$ . Como se puede observar en la figura este estudio definirá distintos modos de trabajo. El estudio cinemático inverso es de especial interés cuando se quiere obtener las diferentes singularidades que un mecanismo puede ocasionar durante su ciclo de movimiento.

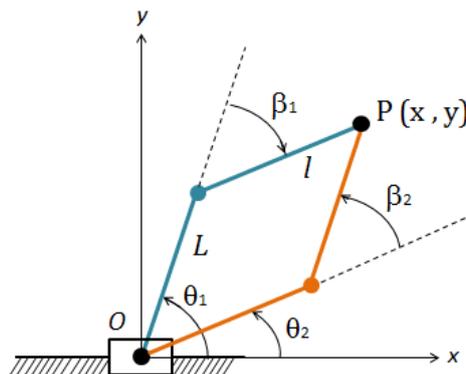


Ilustración 30. Configuraciones problema inverso

Para realizar el estudio partimos con partimos de las ecuaciones de posición del punto P.

$$x = L \cdot \text{cos}(\theta) + l \cdot \text{cos}(\theta + \beta)$$

$$y = L \cdot \text{sin}(\theta) + l \cdot \text{sin}(\theta + \beta)$$

Donde si elevamos al cuadrado ambas ecuaciones, sumamos y realizamos diversos cambios con las propiedades geométricas de la suma de ángulos, se despeja el ángulo  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} \cos(\beta) &= \frac{x^2 + y^2 - L^2 - l^2}{2 \cdot L \cdot l} \\ \text{sen}^2(x) + \text{cos}^2(y) &= 1 \end{aligned} \right\} \text{sen}(\beta) = \pm \sqrt{1 - \cos(\beta)}$$

Donde queda demostrado las dos posibles configuraciones mostradas en la ilustración, debido a los dos senos resultantes, pudiendo ser compatibles para un mismo movimiento. Sin embargo, el estudio cinemático inverso queda exento de ser utilizado en el estudio de los mecanismos [13].

Un ejemplo más específico de este trabajo sería un estudio de la cinemática realizado por lazo debido a que los mecanismos paralelos estudiados están formados por distintos eslabones unidos entre sí por pares cinemáticos formando una cadena cerrada. Este mecanismo consta de 2 grados de libertad que define su movimiento, en este caso los parámetros de entrada son los ángulos situados en la base ( $\varphi_1, \varphi_0$ ) y por tanto las demás variables del problema serán denominadas variables pasivas, las cuales quedan definidas a partir de los parámetros de entrada [14].

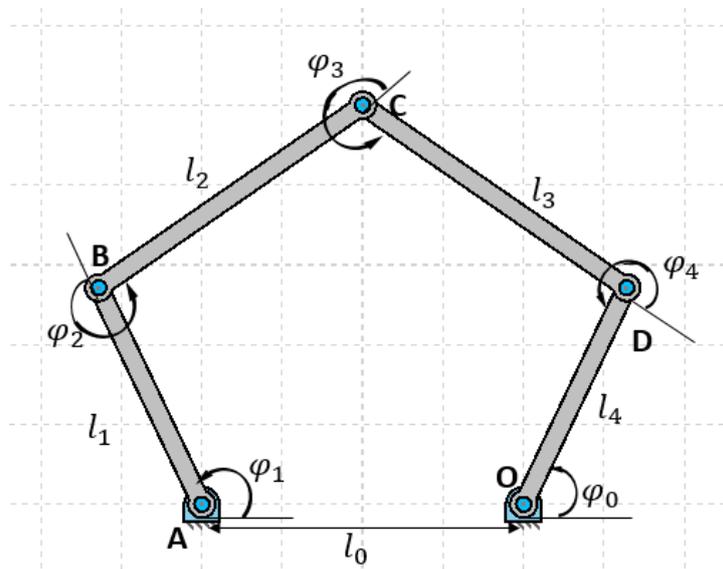


Ilustración 30. Mecanismo paralelo 5-R

Para poder obtener las ecuaciones que rigen este manipulador paralelo, vamos a realizar el estudio cinemático directo utilizando dos lazos que relacionen el origen de coordenadas (A), con el punto de salida (C). Con este estudio se obtendrán las variables de salida (x,y) a partir de las variables de entrada ( $\theta_1, \theta_2$ ) de forma parecida a como hemos realizado anteriormente.

$$\vec{AC} = \vec{AB} + \vec{BC}$$

$$\vec{AC} = \vec{AO} + \vec{OD} + \vec{DC}$$

Lazo 1:

$$\vec{AB} + \vec{BC} \longrightarrow \begin{cases} x = l_1 \cdot \cos(\varphi_1) + l_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \\ y = l_1 \cdot \text{sen}(\varphi_1) + l_2 \cdot \text{sen}(\varphi_1 + \varphi_2) \end{cases}$$

Donde elevando al cuadrado ambas ecuaciones y sumándolas obtenemos la siguiente ecuación:

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\varphi_2)$$

Con estas ecuaciones tenemos la suficiente información para despejar ambos ángulos:

$$\cos(\varphi_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}$$

$$\cos(\varphi_1) = \frac{l_2 \cdot y \cdot \text{sen}(\varphi_2) + x \cdot (l_2 \cdot \cos(\varphi_2) + l_1)}{(l_2 \cdot \cos(\varphi_2) + l_1)^2 + l_2^2 \cdot \text{sen}^2(\varphi_2)}$$

Lazo 2:

$$\vec{AO} + \vec{OD} + \vec{DC} \longrightarrow \begin{cases} x = \vec{AO} + l_4 \cdot \cos(\varphi_0) + l_3 \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_4) \\ y = l_4 \cdot \text{sen}(\varphi_0) + l_3 \cdot \text{sen}(\varphi_0 + \varphi_4) \end{cases}$$

Donde juntando las dos ecuaciones y despejando las variables, como se ha hecho en el apartado anterior podemos obtener las variables finales como hemos hecho en el lazo anterior obtenemos:

$$\cos(\varphi_4) = \frac{(x - AO)^2 + y^2 - l_3^2 - l_4^2}{2 \cdot l_3 \cdot l_4}$$

$$\cos(\varphi_0) = \frac{AO + l_3 \cdot \text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\varphi_4) - x}{l_3 \cdot \cos(\varphi_4) + l_4}$$

### 10.3. Análisis dinámico inverso

El área de estudio de la dinámica inversa o estudio cinetostático consiste en calcular las distintas acciones motoras que necesita un mecanismo para vencer las acciones resistentes a las que se somete su accionamiento y las resistencias pasivas que contiene, como pueden ser el rozamiento en las juntas cinemáticas. Existen distintos principios y

métodos de resolución de este tipo de problemas, entre los cuales destaca el principio de d'Alembert y el principio de las potencias virtuales. El primero de ellos, es especialmente útil para calcular las reacciones que los pares cinemáticos, además de las acciones motoras necesarias. El principio de las potencias virtuales, en cambio obtiene las acciones motoras directamente sin pasar por el cálculo de los pares cinemáticos

Nos vamos a centrar especialmente en el principio de d'Alembert, ya que es el que está implementado en el software GIM con el que se está realizando este trabajo. A su vez, este software solo dispone de la herramienta de la cinemática para los mecanismos planos y tampoco tiene en cuenta los posibles rozamientos que puede haber en las juntas cinemáticas y que disipen energía en el sistema. Podemos estructurar el estudio en distintos pasos para sistematizar el estudio de forma que sea más fácil su aplicación [5].

Estos pasos son:

1. Estudio de los grados de libertad y el número de incógnitas.

Este estudio se realiza con el criterio de Grübler nombrado con anterioridad y cuya fórmula es:

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II}$$

También podemos desglosar esta fórmula y saber de antemano el número de ecuaciones del sistema y el número de incógnitas que tendrá.

$$N_{EC} = 3(N - 1)$$

$$N_{INC} = G + 2P_I + P_{II}$$

A partir de estas tres ecuaciones dadas podemos ver como el número de ecuaciones coincide con el número de incógnitas.

2. Planteamiento de las ecuaciones por cada elemento.

Dado un sistema de referencia global XY, se ha de plantear las tres ecuaciones de la estática por cada elemento que componga el mecanismo. Para ello, tenemos que tener en cuenta todas las fuerzas que intervienen en el sistema como fuerzas o momentos puntuales. Dentro de estas fuerzas están incluidas las aplicadas externamente, las fuerzas de inercia y las reacciones con los pares. Todas ellas las vemos representadas en la siguiente ilustración siendo G el centro de gravedad y A punto de aplicación de una fuerza externa al sistema.

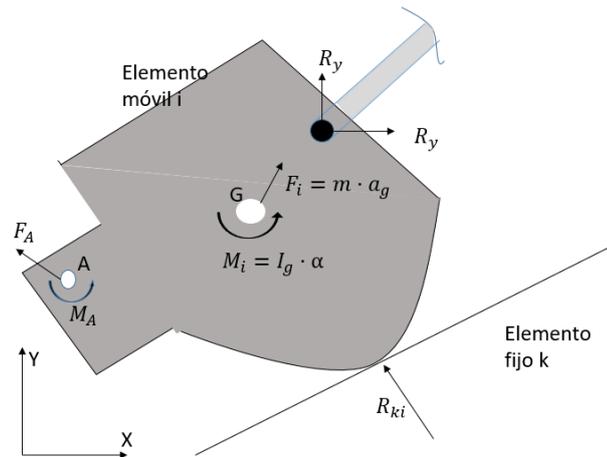


Ilustración 31. Fuerzas actuantes

Una vez tenemos todas las fuerzas planteadas, como se ha dicho, se plantearán las ecuaciones que rigen la estática del sistema. Éstas son:

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M_p = 0$$

### 3. Resolución de las ecuaciones.

Con los pasos anteriormente descritos se comienza a resolver las  $3(N - 1)$  ecuaciones del sistema con los que obtenemos tanto las fuerzas de las resistencias como las de los pares cinemáticos. Con ello, podemos tomar por concluido el estudio cinemático inverso.

### 4. Interpretación de los resultados

Este último apartado se incluye con el objetivo de dimensionar los componentes del sistema a partir de los resultados que hemos obtenido en la resolución de las ecuaciones del paso anterior.

En primer lugar, las reacciones en los nudos de los eslabones del mecanismo nos dan una aproximación de los esfuerzos a los que estará sometido el material, como, por ejemplo, momentos flectores, torsores... Esto es de gran ayuda para la elección del material con el que construirlos y de obtener sus dimensiones.

También tenemos la información suficiente para realizar un dimensionamiento de la potencia que es necesaria en un motor eléctrico. Es decir, tener la potencia necesaria del mecanismo y así poder elegir un producto determinado.

## 11. Descripción de tareas

Tomando como punto de inicio las tareas descritas en el WBS, se va a describir individualmente cada una de las áreas desempeñadas en este estudio, agrupándolas en tareas (T) y subtareas (ST).

### T.1. Estado del Arte

La realización del estado de arte constituye una etapa del trabajo en la que es necesaria obtener, comprender y sintetizar gran cantidad de información relacionada con los estudios tecnológicos.

#### ST.1.1. Recopilación de información de MP

Descripción: Corresponde al primer paso de estudio en el que se recopila de información de revistas y libros acerca de los manipuladores paralelos.

Recursos humanos: Ingeniero Junior (40h), Ingeniero senior (12h).

Recursos materiales: Ordenador, revistas y libros de la biblioteca de la universidad.

Duración: 5 semanas.

Entregables: Información de estudios de manipuladores paralelos.

#### ST.1.1.2. Estudios de reconfigurabilidad

Descripción: Se busca información acerca de los mecanismos reconfigurables ya existentes y se comprende su cinemática y funcionamiento.

Recursos humanos: Ingeniero Junior (35h), Ingeniero senior (7h).

Recursos materiales: Ordenador y revistas.

Duración: 4 semanas.

Entregables: Información sobre la reconfigurabilidad de los manipuladores.

### T.1.2. Elección de mecanismos

Descripción: Se seleccionan tres mecanismos en los que se realizarán los posteriores estudios pertinentes.

Recursos humanos: Ingeniero junior (8h), Ingeniero senior (3h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 2 días.

Entregables: Selección de tres mecanismos.

### T.1.3 Análisis cinemático

Una vez hemos elegido los manipuladores, se comenzará a estudiar sus variables cinemáticas y así tener toda la información acerca de como es el movimiento del mecanismo.

#### ST.1.3.1 Trayectorias

Descripción: Partiendo de los manipuladores y mediante el software GIM se estudia y selecciona las trayectorias que deseamos.

Recursos humanos: Ingeniero junior (20h), Ingeniero senior (5h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 3 semanas.

Entregable: Archivos GIM con la trayectoria de los mecanismos.

#### ST.1.3.2 Velocidades

Descripción: Con las trayectorias resueltas, se procede a seleccionar una velocidad adecuada de los actuadores y estudiar las variaciones que ocurren modificando éstas.

Recursos humanos: Ingeniero junior (15h), Ingeniero senior (3h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 2 semanas.

Entregable: Archivo GIM con la cinemática de las velocidades resuelta.

#### ST.1.3.2 Aceleraciones

Descripción: A partir de las velocidades de los actuadores, se calcula las aceleraciones de los puntos del mecanismo objeto de estudio.

Recursos humanos: Ingeniero junior (15h), Ingeniero senior (3h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 2 semanas.

Entregable: Archivo GIM con las aceleraciones resueltas y sus correspondientes gráficas.

### T.1.4 Análisis dinámico

Una vez obtenida toda la información de la cinemática de los manipuladores, se obtienen los parámetros dinámicos cuando una carga es aplicada en el mecanismo.

#### ST.1.4.1 Elección de actuadores

Descripción: Con la carga soportada por el mecanismo se obtienen los cálculos de la potencia que el actuador eléctrico necesita desarrollar.

Recursos humanos: Ingeniero junior (15h), Ingeniero senior (6h).

Recursos materiales: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 10 días.

Entregable: Documento con las potencias mínimas de los actuadores.

#### ST.1.4.2 Fuerzas máximas

Descripción: Mediante el método de D'Alembert se calculan las fuerzas máximas actuantes durante un ciclo, para dimensionar los eslabones.

Recursos humanos: Ingeniero junior (10h), Ingeniero senior (5h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 1 semana.

Entregables: Lista con las fuerzas actuantes sobre cada eslabón.

#### T.1.5 Reconfiguraciones

Se busca en cada uno de los mecanismos posibles reconfiguraciones con el objetivo de que puedan realizar distintas funciones a la estándar dada.

##### ST.1.5.1 Análisis de GDL

Descripción: Se analiza en cada reconfigurabilidad los grados de libertad que hay y así saber el número de actuadores que se deben implantar.

Recursos humanos: Ingeniero junior (15h), Ingeniero senior (8h).

Recursos técnicos: Ordenador y software GIM.

Duración: 2 semanas.

Entregable: lista de reconfiguraciones con sus respectivos Gdl.

##### ST.1.5.2 Desacoplamientos

Descripción: Se analiza los manipuladores adicionales que se obtienen a partir de la reconfigurabilidad.

Recursos humanos: Ingeniero junior (27h), Ingeniero senior (6h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 2 semanas.

Entregables: Archivos GIM con las reconfiguraciones de cada mecanismo.

#### T.1.6. Ejemplo de aplicación

Descripción: Se ejemplifica una aplicación de un mecanismo paralelo reconfigurable en la vida real.

Recursos humanos: Ingeniero junior (20h), Ingeniero senior (4h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia GIM.

Duración: 1 semana.

Entregable: Documento con el ejemplo explicado y archivo GIM.

#### T.1.7. Memoria del proyecto

Descripción: Se redacta en un documento toda la información obtenida.

Recursos humanos: Ingeniero junior (30h), Ingeniero senior (8h).

Recursos técnicos: Ordenador y licencia Office.

Duración: 8 meses.

Entregable: Trabajo Fin de Grado.

## **11.2. Diagrama Gantt**

En la siguiente ilustración se muestra de forma gráfica un resumen cronológico de todas las tareas descritas en el apartado anterior, mostrando todas las tareas, así como los tiempos que conlleva la realización de cada una y las fechas que ocupan.

Esto permite una mejor organización del trabajo estableciendo fechas límite, las cuales tienen poco margen de retrasos ya que cada una es consecutiva a su anterior y si se pospone puede haber problemas de retrasos que en el presente trabajo son inadmisibles.

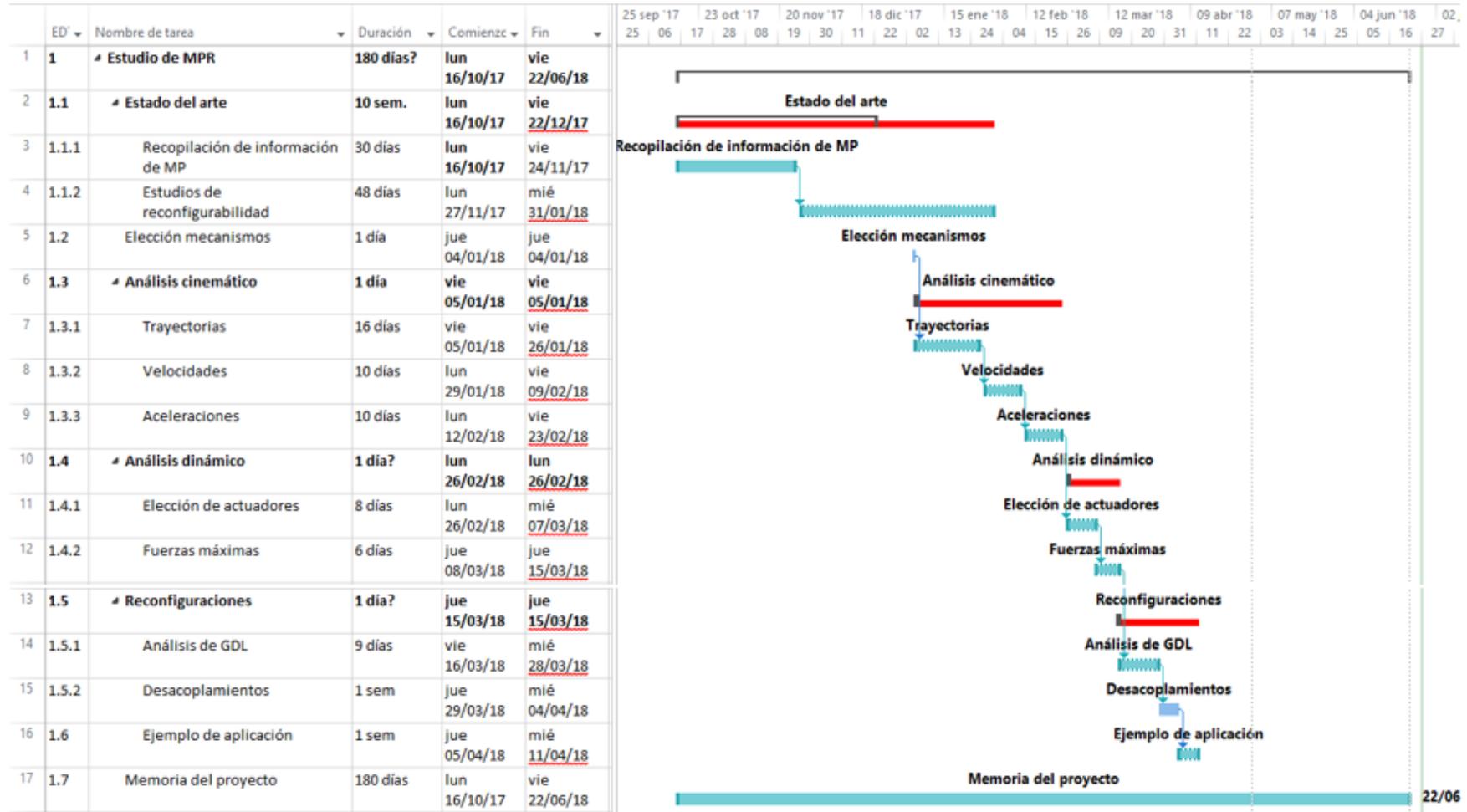


Ilustración 35. Diagrama Gant

## 12. Datos económicos

En este apartado se va a detallar los datos económicos que deben ser tenidos en cuenta a la hora de desarrollar el presente trabajo. Detallando en primer lugar, el presupuesto previo al comienzo del proyecto y posteriormente, el descargo de gastos.

### 12.2. Presupuesto

Se va a valorizar en unidades monetarias el gasto esperado de la ejecución del proyecto. Para ello hay que desglosar todo aquello que genere un coste económico dentro del proyecto incluyendo, entre otros, los gastos y las amortizaciones. A continuación, se va desglosar en distintas tablas todos estos costes.

Horas internas:

Concepto	Número de horas	Coste horario	Coste
Ingeniero Junior	220	25 €	5.500 €
Ingeniero Senior	80	40 €	3.200 €
<b>Subtotal</b>			<b>8.700 €</b>

Tabla 3. Presupuesto. Horas internas

Amortizaciones:

Concepto	Precio de adquisición	Vida útil	Tiempo de uso	Coste
Ordenador	1.200 €	6 año	1 año	200 €
Licencia Office	100 €	1 año	1 año	100 €
Licencia GIM	0 €			0 €
<b>Subtotal</b>				<b>300 €</b>

Tabla 4. Presupuesto. Amortizaciones

Gastos:

Concepto	Coste
Bibliografía	60 €
Material de oficina	150 €
<b>Subtotal</b>	<b>210 €</b>

Tabla 5. Presupuesto. Gastos

Resumen de costes:

Horas internas	8.700 €
Amortizaciones	300 €
Gastos	210 €
<b>Subtotal</b>	<b>9.210 €</b>
Costes indirectos (7%)	645 €
Imprevistos (10%)	921 €
<b>TOTAL</b>	<b>10.776 €</b>

*Tabla 6. Presupuesto por partidas*

Durante la realización de este presupuesto se debe desglosar todos los conceptos con el objetivo de presuponer tanto el tiempo de como la catidad de materiales necesarios y su tiempo de utilización. Con este estudio realizado cabe destacar el coste que suponen las horas internas de estudio en estos manipuladores que realiza tanto el ingeniero junior como el senior, debido a que se trata de un trabajo de investigación y no hay grandes costes enfocados a implementaciones o construcciones de estos manipuladores.

El programa GIM utilizado es un programa de libre acceso para el alumnado de la universidad y por ello no supone un coste añadido al trabajo, puesto que además agrupa distintas funciones que se podrían realizar con softwares de gran coste.

Por último, se asigna el valor del 7% a los costes indirectos que no tienen relación directa con el proyecto y un 10% para posibles gasto ocasionados por imprevisto no incluidos en este presupuesto.

### 12.3. Descargo de Gastos

Ahora se va a realizar un resumen de los gastos generados por el proyecto una vez éste ha sido realizado. El descargo será estructurado de manera similar al de los presupuestos con la excepción de los costes debido a los imprevistos, que no se incluyen debido a que el proyecto ya ha sido realizado. También, cabe destacar que las amortizaciones no varían con respecto a las del presupuesto debido a que el tiempo de uso tanto del ordenador como el de las licencias ha sido el mismo.

Horas internas:

Concepto	Número de horas	Coste horario	Coste
Ingeniero Junior	250	25 €	6.250 €
Ingeniero Senior	70	40 €	2.800 €
<b>Subtotal</b>			<b>9.050</b>

Tabla 7. Descargo. Horas internas

Amortizaciones:

Concepto	Precio de adquisición	Vida útil	Tiempo de uso	Coste
Ordenador	1.200 €	6 año	1 año	200 €
Licencia Office	100 €	1 año	1 año	100 €
Licencia GIM	0 €			0 €
<b>Subtotal</b>				<b>300 €</b>

Tabla 8. Descargo. Amortizaciones

Gastos:

Concepto	Coste
Bibliografía	60 €
Material de oficina	120 €
<b>Subtotal</b>	<b>180 €</b>

Tabla 9. Descargo. Gastos

Resumen de gastos:

Horas internas	9.050 €
Amortizaciones	300 €
Gastos	180 €
<b>Subtotal</b>	<b>9.530 €</b>
Costes indirectos (7%)	667 €
<b>TOTAL</b>	<b>10.197 €</b>

Tabla 10. Descargo por partidas

En los costes del presupuesto estudiado ascendían a 10.776€, pero tras la realización del proyecto, recopilando todos los gastos implicados, éstos suman 10.197€. Por tanto, a pesar de haber sido más horas trabajadas por el ingeniero junior, han sido cubiertas por

los imprevistos incluidos en el presupuesto y ha permitido que el coste total del proyecto quede dentro del presupuesto previsto.

## 13. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha presentado un estudio de las reconfiguraciones de los MPR intentando dar a conocer su potencial. También, se quiere hacer énfasis en la importancia del desarrollo de esta tecnología puesto que podría ser una solución a los límites y necesidades que las industrias actualmente tienen con los robots convencionales.

La memoria comienza con una breve introducción puntualizando los temas que se han desarrollado. Posteriormente, en el contexto se ha situado el ámbito de conocimiento que se ha tratado y se han definido los conceptos básicos que se exponen. Con los objetivos y el alcance han quedado definidas las metas que se pretenden conseguir, desglosando las tareas necesarias para archivar la meta y representándolas en un diagrama Gantt. En el estado de arte, se ha realizado una evaluación histórica y se ha desarrollado un marco teórico de los mecanismos que tienen lugar en el presente estudio y que posteriormente se desarrollan.

En la metodología se ha expuesto un estudio cinemático y dinámico de tres manipuladores en los que cabe destacar tres áreas de estudio que han tenido lugar; la cinemática, la dinámica y las reconfiguraciones de los mecanismos. También se detallan todos los pasos seguidos en el software GIM para la obtención de las variables que definen el trabajo de los mecanismos. Seguidamente, se ha descrito el origen de las ecuaciones utilizadas en la metodología y que el software utilizado tiene implementadas como herramientas de cálculo.

Por último, se ha especificado los aspectos más trascendentes que hay que seguir en cada una de las tareas expuestas anteriormente en el WBS y se han expuesto los datos económicos desglosados en un presupuesto previo al comienzo del trabajo y con un descargo de gastos resumiendo el coste final una vez finalizado.

Por medio de este estudio, se ha destacado todos los beneficios que aportan los MP y la incorporación de reconfiguraciones en su estructura. Entre ellos, cabe destacar la versatilidad de su utilización puesto que pueden adaptarse a una gran cantidad de tareas diferentes y que pueden ser diseñados de forma que sus reconfiguraciones suplan las deficiencias que el mecanismo pueda tener. También, cabe destacar que el paralelismo de las cadenas cinemáticas del manipulador, dotan a éste de una gran rigidez. En otras palabras, los movimientos implantados son más precisos y son realizados más rápidamente, pudiendo reducir así tiempos de producción y defectos relacionados a la producción llevada a cabo con robots. Debe ser mencionado el ahorro económico que supone su implantación, ya que puede abordar el trabajo que simultáneamente realizarían un conjunto de robots independientes entre ellos.

La utilización del software GIM proporciona al estudiante un amplio abanico de funcionalidades necesarias para el estudio de los mecanismos, habiendo sido una herramienta fundamental en el desarrollo del presente trabajo. Los beneficios de este programa son múltiples, puesto que aparte de ser una herramienta que no necesita una gran inversión de tiempo para el aprendizaje de su utilización, es una herramienta gratuita que cumple con las funcionalidades de otros softwares que hay que pagar por su licencia.

Para finalizar, se quiere resaltar la conveniencia de seguir desarrollando estas tecnologías puesto que en el ámbito industrial actual la reducción de tiempos y de costes de producción son dos de los factores más importantes. Por eso, estos manipuladores tienen la aptitud de poder reducir estos dos factores y suponer grandes avances productivos para la empresa que lo posea. Para terminar, se quiere alentar a seguir desarrollando una línea de investigación de estos robots con el objetivo de definir una metodología en su diseño e implantación para así conseguir mayores beneficios técnicos en diversos procesos productivos.

## 14. Bibliografía

- [1] Jon Olza Donazar, *Análisis del error provocado por holguras en las uniones y deformaciones en los eslabones en robots paralelos*, Tesis Doctoral, Universidad Pública de Navarra (2011).
- [2] Darly Babeth P. Saravia, Marlon Jhair H. Lopez, Hector Fabio Q. Rianza, *Review of state of the art of parallel manipulators*, Scientia et Technica Año XV, No 42, (2009).
- [3] A. Hernández (2014), *Cinemática de Mecanismos: Análisis y diseño*. Sección de Publicaciones ETSI de Bilbao (2014).
- [4] Patricio Martínez-Zamudio, Víctor J. González-Villela, Marcelo López-Parra, Alejandro C. Ramírez-Reivich. *Cinemática Diferencial de un Manipulador Paralelo Plano 3RRR-(RRR)v con Actuación Virtual Indirecta*, ISSN: 1665-7381 (2015).
- [5] Alfonso Hernández, Charles Pinto, Josu Agirrebeitia, Vico Petuya *Dinámica de máquinas*. Sección de Publicaciones ETSI de Bilbao (2011).
- [6] K. Zhang, J. S. Dai, *Reconfiguration Analysis of Wren Platform and Its Kinematic Variants Based on Reciprocal Screw Systems*, DOI: 10.6567 (2015).
- [7] Ricardo Martín Kirkner, *Aprendizaje por Refuerzo en Robots Modulares Autoreconfigurables*, Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (2007).
- [8] Fengfeng XI, Yuwen LI, Hongbo WANG, *Module-based method for design and analysis of reconfigurable parallel robots*, DOI: 10.1109/ICMA.2010.5588036 (2010).
- [9] Allan Daniel Finistauri, Fengfeng (Jeff) Xi and Brian Petz, *Architecture Design and optimization of an On-the-Fly Reconfigurable Parallel Robot*, DOI: 10.5772/5440 (2008).
- [10] Xianwen Kong, Yan Jinb, *Type Synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints*, Mechanism and Machine Theory 96 (2016) 323–333.
- [11] Latifah Nurahmi, Stéphane Caro, Philippe Wenger, Josef Schadlbauer, Manfred Husty, *Reconfiguration analysis of a 4-RUU parallel manipulator*, Mechanism and Machine Theory, Elsevier, 2016. (2015).
- [12] *Modeling Inverse Kinematics in a Robotic Arm* (<https://es.mathworks.com/help/fuzzy/examples/modeling-inverse-kinematics-in-a-robotic-arm.html>).
- [13] Dr. Rainer Hessmer, *Kinematics for Lynxmotion Robot Arm* (2009).
- [14] David Tavkheldze, *Geometry of five link mechanism with two degrees of freedom*.

## Anexo I: Normativa aplicable

Los MPR entran dentro del ámbito de estudio y explotación de la robótica, por tanto, toda normativa aplicable a los robots estándar debe ser aplicada a estos manipuladores.

La reciente norma ISO/TS 15066:2016 especifica los requerimientos básicos de seguridad de los robots corporativos y de su espacio de trabajo. Esta norma se presenta como una guía para diseñar las instalaciones donde deben convivir los robots junto con las personas, asegurando la seguridad de las personas. Para ello se ha llevado a cabo una investigación en la que se simulan los impactos en partes específicas del cuerpo con el objetivo de limitar la velocidad y aceleraciones de estos robots y así evitar daños mayores en las personas.

Otra norma vigente es la ISO 9787:2013 que define las coordenadas del robot, proporcionando una nomenclatura para el movimiento de éstos. En ella, trata de ayudar con las tareas de diseño y programación de los movimientos incluyendo principios básicos de la robótica.

## Anexo II: Resultados

En este apartado se va a mostrar distintas trayectorias que realizaría el manipulador cuando las velocidades de alguno de sus actuadores son diferentes al del resto de actuadores. En otras palabras, se produce un cambio en el movimiento de la plataforma móvil pudiendo darse en algunos casos incluso situaciones de bloqueo que cuando los actuadores estaban sincronizados no se daban.

Cada situación, en la que se modifica la trayectoria, es singular ya que las variables tanto dinámicas como cinemáticas deberían ser estudiadas de forma análoga a como se ha realizado en la propuesta, pero obteniendo distintos resultados. A continuación, se muestran distintas ilustraciones con las trayectorias alternativas dichas.

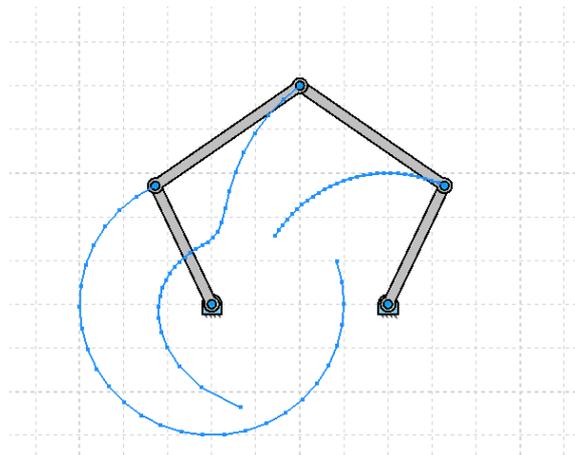


Ilustración 32. Trayectoria mecanismo 5R (1)

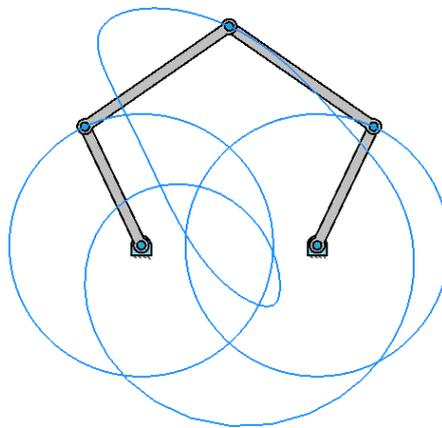


Ilustración 33. Trayectoria mecanismo 5R (2)

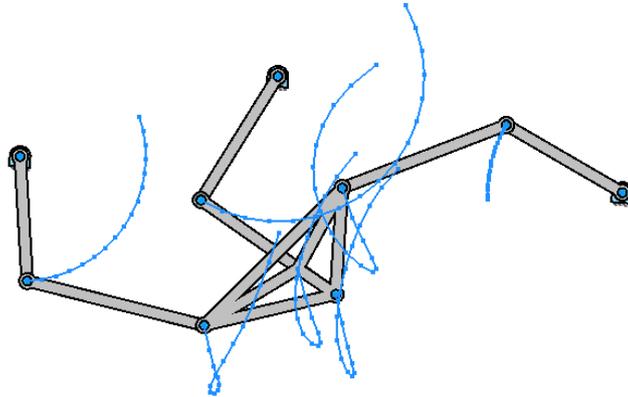


Ilustración 34. Trayectoria mecanismo 3R (1)

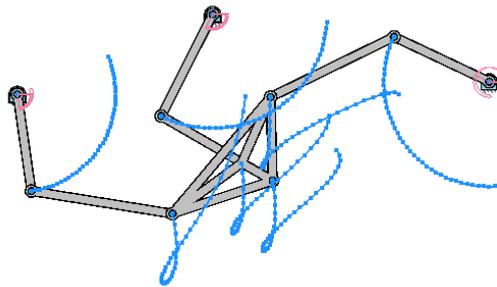


Ilustración 35. Trayectoria mecanismo 3R (2)

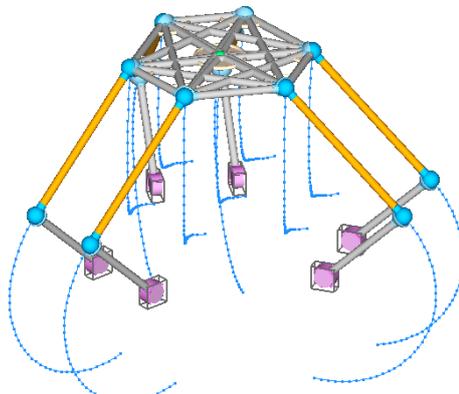


Ilustración 36. Trayectoria mecanismo 6gdl (1)

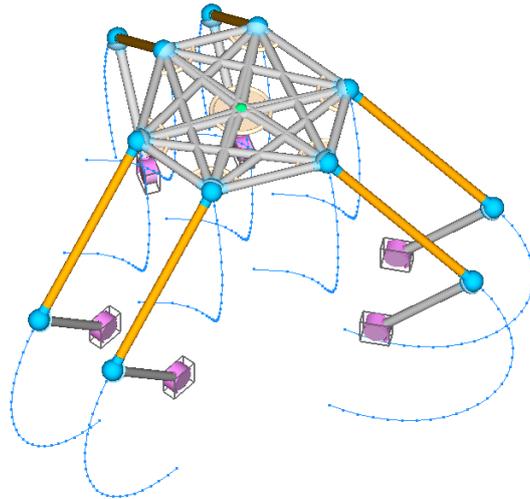


Ilustración 37. Trayectoria mecanismo 6gdl (2)

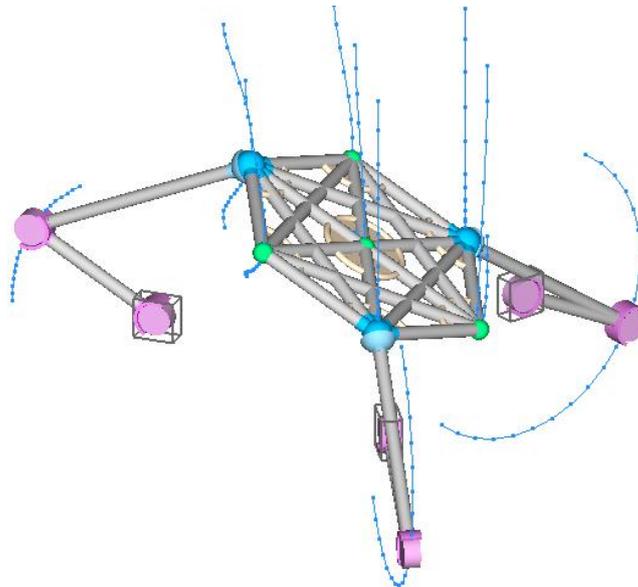


Ilustración 38. Trayectoria reconfiguración 3gdl (1)