

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGIA  
INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

## *DISEÑO Y ANÁLISIS DE MECANISMOS MEDIANTE EL SOFTWARE GIM*

**Alumna:** Landaluce Blanco, Leire

**Directora:** Urizar Arana, Mónica

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** 8, julio, 2019

## ÍNDICE

---

RESUMEN TRILINGÜE.....	4
FIGURAS, ILUSTRACIONES Y TABLAS.....	6
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	9
1.MEMORIA .....	10
1.1. Introducción .....	10
1.1.1. Conceptos básicos sobre mecanismos y máquinas.....	10
1.1.2. Tipos de mecanismos y sus aplicaciones.....	11
1.2. Contexto .....	12
1.3. Objetivos y alcance del trabajo .....	12
1.4. Beneficios que aporta el trabajo .....	13
1.4.1. Beneficios técnicos .....	13
1.4.2. Beneficios económicos .....	13
1.4.3. Beneficios sociales.....	14
1.4.4. Plan de difusión y explotación.....	14
1.5. Análisis del estado del arte .....	15
1.6. Selección / Descripción de la solución propuesta.....	17
1.6.1. Análisis en GIM .....	20
2. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO .....	51
2.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos.....	51
2.1.1. Definición de tareas.....	51
2.2. Diagrama de Gantt .....	53
2.3. Cálculos, algoritmos .....	55
2.3.1 Tipos de problemas y diseños .....	55
2.3.2 Cálculo de grados de libertad .....	56
2.3.3 Obtención de las ecuaciones del movimiento para el mecanismo limador	56
2.3.4. Obtención de medidas y/o posiciones particulares y ecuaciones de movimiento para el mecanismo de tren de aterrizaje.....	59
3. ASPECTOS ECONÓMICOS.....	65
3.1. Descripción del presupuesto y/o del presupuesto ejecutado .....	65
3.2. Descargo de gastos.....	68

3.3. Análisis de riesgos .....	69
4. CONCLUSIONES .....	71
5. BIBLIOGRAFÍA.....	72
6. ANEXO I: Diseño de detalle o de bajo nivel .....	74
7. ANEXO II: Manual de usuario.....	80

## RESUMEN TRILINGÜE

---

En este documento se describe el Trabajo de Fin de Grado que se ha llevado a cabo con el objetivo de simular, mediante el software GIM, dos modelos de mecanismos planos de un grado de libertad.

El principal objetivo es la implementación de mecanismos en el software GIM para su siguiente estudio, con el fin de demostrar la gran utilidad de esta novedosa técnica no solo en simulación, sino también el avance didáctico que supone para estudiantes universitarios. Se realizará el diseño del mecanismo bajo estudio, llevando a cabo tanto el análisis cinemático como dinámico, pudiendo obtener los valores de la entrada actuante como las reacciones en los pares. Un buen modelo de un mecanismo es ventajoso para las empresas que llevan a cabo los proyectos de ingeniería, puede ahorrar tiempo en experimentos prácticos que se desarrollen durante horas o días, así como predecir la vida útil del mecanismo o ser de gran importancia para la elección del material.

Dokumentu honetan, GIM softwarearen bitartez, mekanismo lauko askatasun gradu bakarreko bi modeloren analisisa egiteko burutu den Gradu Amaiera Lana deskribatzen da.

Helburu nagusia, teknika berri honen erabilgarritasun handiak azaltzea da. Alde batetik, GIM softwarea ikerketarako mekanismoen inplementazioak egiteko; bestetik, unibertsitateko ikasleentzat ekartzen duen aurrerapen didaktikoak frogatzeko. Proiektuaren barnean jorratutako atalen artean hurrengo atalak lortu dira: sartutako jardulearen balioak lortu, ikerketaren azpian mekanismoaren diseinua bai pareetako erreakzioak diseinatu, edota, analisi zinematikoko zein dinamikoak burutu dira. Mekanismo baten modelo on bat lortzea onuragarria da ingeniari-tza-proiektuak burutzen dituzten enpresentzat, bertan, orduetan edo egunetan zehar garatzen diren esperimenduak softwarearen bitartez eginez, aurrezten duten denborarengatik, zein, mekanismoaren bizitza baliagarria iragarri edo materialaren aukerarako garrantzi handia izan ahal dutelako.

This document describes the end-of bachelor degree work that has been carried out with the aim of simulating, using the GIM software, two models of planar mechanisms of one degree of freedom.

The main objective is the implementation of mechanisms in the GIM software for its next study, in order to demonstrate the great usefulness of this novel technique not only in simulation but also the didactic advance that supposes for university students. The design of the mechanism under study will be carried out, executing both kinematic and dynamic analysis, being able to obtain the values of the acting input as well as the reactions in the pairs. A good model of a mechanism is advantageous for companies that perform engineering projects, it can save time in practical experiments that take place over hours or days, as well as predict the useful life of the mechanism or be of great importance for the choice of material.

## FIGURAS, ILUSTRACIONES Y TABLAS

---

Figura 1. Relaciones funcionales en un mecanismo .....	11
Figura 2. Módulo Geometry.....	21
Figura 3. Valores del actuador .....	27
Figura 4. Posición del punto de limado .....	28
Figura 5. Velocidad del punto de limado .....	28
Figura 6. Opción "Query" .....	29
Figura 7. Opción "Reference element" .....	29
Figura 8. Aceleración punto limado.....	30
Figura 9. Aceleración normal punto de limado .....	30
Figura 10. Aceleración tangencial punto limado .....	30
Figura 11. Fases del diseño de un mecanismo .....	55
Fotografía 1. Limadora mecánica .....	18
Fotografía 2. Guía de milano .....	20
Fotografía 3. Tren de aterrizaje del Douglas DC-2.....	38
Fotografía 4. Tren de aterrizaje del Boeing 247 D.....	38
Ilustración 1. Limadora mecánica .....	19
Ilustración 2. Mecanismo de limadora .....	20
Ilustración 3. Mecanismo limador implementado en GIM.....	21
Ilustración 4. Representación significativa de la lijadora en GIM (I) .....	21
Ilustración 5. Distintas posiciones del mecanismo en movimiento .....	23
Ilustración 6. Espacio de trabajo del mecanismo limador.....	23
Ilustración 7. Comandos para la obtención del Workspace .....	24
Ilustración 8. Trayectorias siendo el punto fijo la referencia .....	25
Ilustración 9. Distintas representaciones de trayectorias siendo el elemento 2 la referencia.....	26
Ilustración 10. Comandos para la obtención de la trayectoria. ....	26
Ilustración 11. Masa e inercia del elemento 2.....	31
Ilustración 12. Masa e inercia del elemento 4.....	31
Ilustración 13. Fuerza externa aplicada en la cabeza de la limadora .....	33
Ilustración 14. Diagrama de sólido rígido de la cabeza de la limadora .....	34
Ilustración 15. Diagrama de sólido rígido del elemento actuante .....	34
Ilustración 16. Diagrama de esfuerzos internos biela. ....	35
Ilustración 17. Esfuerzo interno N de la biela.....	36
Ilustración 18. Esfuerzo interno V de la biela .....	36
Ilustración 19. Esfuerzo interno M de la biela con distintas visualizaciones.....	36

Ilustración 20. Diagrama cromático de esfuerzos internos M de la biela .....	37
Ilustración 21. Grafico del valor de la fuerza .....	37
Ilustración 22. Mecanismo de tren de aterrizaje simulado en GIM .....	39
Ilustración 23. Nomenclatura del mecanismo de tren de aterrizaje simulado .....	39
Ilustración 24. Secuencia de distintas posiciones del movimiento del mecanismo de tren de aterrizaje .....	40
Ilustración 25. Actuador en el tren de aterrizaje.....	40
Ilustración 26. Trayectoria de los puntos de unión entre elementos .....	41
Ilustración 27. Campo de trabajo del mecanismo de tren de aterrizaje .....	42
Ilustración 28. Vectores de aceleración en el mecanismo .....	42
Ilustración 29. Graficas de velocidad y aceleración angular del elemento representativo .....	43
Ilustración 30. Posición del punto R del mecanismo .....	43
Ilustración 31. Velocidad y aceleración del punto R.....	44
Ilustración 32. Construcciones gráficas geométricas del elemento 4 .....	45
Ilustración 33. Representación de la fuerza .....	46
Ilustración 34. Zoom del diagrama de representación de la fuerza .....	46
Ilustración 35. Secuencia del movimiento del análisis dinámico .....	47
Ilustración 36. Diagramas de esfuerzo de la barra 5 .....	48
Ilustración 37. Esfuerzo V de la barra 2 .....	49
Ilustración 38. Esfuerzo N de la barra 2 .....	49
Ilustración 39. Esfuerzo M de la barra 2 .....	50
Ilustración 40. Diagrama Gantt.....	54
Ilustración 41. Representación significativa de la lijadora en GIM (II) .....	56
Ilustración 42. Parámetros cinemáticos del mecanismo 1º .....	57
Ilustración 43. Representación significativa del tren de aterrizaje en GIM .....	59
Ilustración 44. Parámetros cinemáticos del mecanismo 2º .....	60
Ilustración 45. Lazo 1 tren de aterrizaje .....	61
Ilustración 46. Lazo 2 tren de aterrizaje .....	61
Ilustración 47. Distintas representaciones de las trayectorias siendo el elemento 4 la referencia.....	74
Ilustración 48. Masa e inercia del elemento 6 (I) .....	75
Ilustración 49. Masa e inercia del elemento 6 (II) .....	75
Ilustración 50. Masa e inercia del elemento 6 (III) .....	75
Ilustración 51. Masa e inercia del elemento 6 (IV) .....	76
Ilustración 52. Información dinámica de distintos elementos. (masa / gravedad).....	77
Ilustración 53. Comandos verticales dynamics.....	78
Ilustración 54. Diagrama de esfuerzos internos biela 2 .....	79
Tabla 1. Información sobre el diagrama Gantt.....	53
Tabla 2. Costes unitarios de los recursos humanos.....	65

Tabla 3. Costes semanales debido a las amortizaciones .....	66
Tabla 4. Costes totales en materiales .....	66
Tabla 5. Costes desglosados de los recursos humanos .....	67
Tabla 6. Costes desglosados de las amortizaciones .....	67
Tabla 7. Costes exhaustivos desglosados y coste final del trabajo .....	67
Tabla 8. Costes desglosados y coste final del trabajo .....	68
Tabla 9. Descargos exhaustivos desglosados y coste final del trabajo.....	68
Tabla 10. Matriz de priorización de riesgos.....	70



## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

TFG	Trabajo de Fin de Grado
UPV	Universidad del País Vasco
EHU	Euskal Herriko Unibertsitatea
IFTToMM	International Federation for the Theory of Machines and Mechanisms
COMPMECH	Computational Mechanics Research Group
GDL	Grado de Libertad
CIR	Centro Instantáneo de Rotación
XML	Extensible Markup Language
EDT	Estructura de Descomposición del Trabajo

# 1.MEMORIA

---

## 1.1. Introducción

Por medio de este Trabajo de fin de Grado con título: “Diseño y análisis de mecanismos mediante el software GIM” se presenta un estudio analítico, cinemático y dinámico de dos modelos de mecanismos planos de gran utilidad en la industria.

En primer lugar, se contextualizará el proyecto, se explicará la intención de este estudio, así como las posibilidades existentes para llevar a cabo el mismo. Entre todas las alternativas, se detallará la utilidad de cada una, asimismo, se describirán en ambos modelos las conclusiones alcanzadas.

En cuanto a la metodología, se describirán de forma exhaustiva ambos modelos de análisis, en ambos casos siendo modelos de 1 Gdl. Primero de forma matemática y a continuación de forma experimental mediante el software GIM.

En la última sección del trabajo se realizará una descripción de todas las tareas cronológicamente ordenadas, así como el estudio económico del proyecto mediante el descargo de gastos, el presupuesto y el análisis de riesgo.

Se han propuesto dos mecanismos distintos de un grado de libertad, una lijadora y un tren de aterrizaje, se analizará la cinética y la dinámica de los mismos, se analizarán para terminar el trabajo posibles cambios o mejoras en los mismos mediante el análisis en el software GIM, quedan expuestas las distintas posibilidades de este software.

### 1.1.1. Conceptos básicos sobre mecanismos y máquinas

Una primera definición de mecanismos y máquinas que hay que tratar es la reconocida por IFToMM, International Federation for the Theory of Machines and Mechanisms, “dispositivos que transfieren movimiento y acciones (fuerzas y momentos) desde un elemento de entrada a un elemento de salida. La diferenciación elemental entre máquina y mecanismos, es que en los elementos con la categoría de máquina la fuerza desempeña el papel predominante, mientras en los mecanismos predomina el movimiento. La definición precisa de mecanismo sería la siguiente:

“Conjunto de elementos mecánicos, uno de los cuales fijo, en contacto unos con otros mediante uniones imperfectas de forma que puede haber movimiento

relativo entre ellos y con el objetivo de transmitir movimiento desde un elemento de entrada hasta otro de salida” [1].

El estudio de máquinas y mecanismos se puede dividir en dos grandes grupos: la cinemática y la dinámica. El objetivo de la cinemática es estudiar el movimiento independiente de las causas que lo producen, entendiéndose el estudio de las posiciones, desplazamientos, rotaciones, velocidades y aceleraciones de todas las partes en movimiento de un mecanismo; la dinámica incluye el estudio en su estudio las acciones que provocan el movimiento [2].

### 1.1.2. Tipos de mecanismos y sus aplicaciones

El mecanismo establece una relación funcional de movimiento y fuerza entre el elemento de entrada y de salida.



Figura 1. Relaciones funcionales en un mecanismo

Los actuadores o fuentes de potencia pueden ser: rotativos, lineales, manuales y de energía almacenada; siendo las fuentes de potencia rotativas y lineales las principales [3].

Los criterios fundamentales de clasificación son tipología y función.

- Mecanismos de levas. Mecanismos compactos y relativamente fáciles de diseñar. Permiten la transformación de un movimiento circular a uno rectilíneo.
- Mecanismos de engranajes. Pueden trabajar como parejas de ruedas dentadas o trenes de engranajes, tienen una función elemental en la transmisión de potencia entre ejes.
- Mecanismos de tornillo. Permite modificar un movimiento giratorio en otro lineal, o viceversa, muy útil para la transmisión de potencia y bloqueo.
- Mecanismos con elementos flexibles. Aquellos con cables y cadenas.
- Mecanismos con elementos fluidos.
- Mecanismos de barras. Constituyen el grupo más amplio y con mayor número de aplicaciones en la industria.

## 1.2. Contexto

Con el fin de perfeccionar las metodologías de enseñanza tradicionales, que pueden no ser lo suficientemente claras en algunas ocasiones, y las cuales, necesitan a menudo el interpretar y calcular de forma manual complicadas fórmulas matemáticas se introduce el uso de softwares para facilitar dichos estudios. Los excesivos cálculos necesitan tiempo adicional e introducen errores humanos y de redondeo que pueden influir en el resultado. El uso de distintos softwares no solo ha sido un avance a la hora de mejorar la eficiencia del trabajo por la rapidez de cálculo y ejecución matemática, sino que se pueden utilizar estas innovaciones tecnológicas en mejorar distintos ámbitos más tradicionales como puede ser el diseño de un producto o en la enseñanza.

La enseñanza en la ingeniería, comienza a caracterizarse por el uso de software como una herramienta didáctica. En este caso el uso del programa GIM, creado por el grupo de investigación COMPMECH del departamento de ingeniería del País Vasco, facilita el análisis de cualquier elemento que pueda ser implementado en él. El programa proporciona datos del análisis cinemático y dinámico, así como, visualizaciones del movimiento del propio mecanismo o de las figuras y/o puntos de interés mecánico; como pueden ser las polodias [4].

El primer diseño es el de una limadora de tipo industrial. La limadora mecánica es una máquina herramienta para el mecanizado de piezas por arranque de viruta, mediante el movimiento lineal alternativo de la herramienta o movimiento de corte, permite el mecanizado de piezas pequeñas y medianas y, por su fácil manejo y bajo consumo energético, es preferible su uso al de otras máquinas herramienta para la generación de superficies planas.

El segundo diseño es el tren de aterrizaje de una aeronave, por su utilidad necesita ser un mecanismo de dos posiciones, posteriormente señaladas. El mecanismo debe ser robusto para soportar no solo el peso propio de la nave sino las fuerzas de inercia en el aterrizaje.

## 1.3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo de este proyecto es el diseño y simulación de un conjunto de mecanismos planos para el análisis dinámico y cinemático de los mecanismos, así como de los elementos que lo constituyen. Se ha procedido a obtener todos los datos necesarios para el dimensionamiento de cada mecanismo para el aprovechamiento

óptimo de espacio y capacidad de cada elemento en el supuesto de que los mecanismos se quieran utilizar en un proyecto real, realizándose para ello los cálculos pertinentes. Si fuera necesario se podrían variar estas medidas para la adaptación de las mismas a distintos proyectos: el software GIM permite cambios continuos en el diseño para poder simular distintas situaciones y estudiar cada una de ellas.

Primero, se diseña el mecanismo y se realiza el cálculo de las dimensiones de cada elemento, por una parte, de manera directa, es decir teniendo en cuenta la naturaleza y valor del constituyente generador para después obtener las reacciones que pueda causar en otros elementos el movimiento, este primer paso se hace en el módulo "Geometry" del programa GIM en cual se explicara a continuación con más detalle. Después de manera inversa, de forma que conociendo las reacciones se obtiene el valor de la fuerza o momento generador, este segundo paso se efectuara en el apartado "Kinematics".

Con la ayuda de este software se podrá analizar detalladamente las variables dinámicas y cinemáticas del mecanismo, así como de cada elemento. Mediante el análisis cinemático se obtendrá información sobre las distintas aceleraciones y velocidades, asimismo se obtendrán los valores y formas de circunferencias y/o puntos de gran interés mecánico, así como el análisis de GDL. En el análisis dinámico se podrá investigar las consecuencias que tiene el aplicar distintas fuerzas en el mecanismo. Así como obtener las posiciones de bloqueo que puedan ser de importancia debido a su excepcionalidad.

## 1.4. Beneficios que aporta el trabajo

### 1.4.1. Beneficios técnicos

Tras la simulación, la observación y obtención de datos relevantes de los dos mecanismos que se han analizado, se espera tener un mayor rango de información para posibles futuras proyecciones de este proyecto en el ámbito real ingenieril, teniendo así un mayor conocimiento de los posibles parámetros que pudieran generar problemas, como pueden ser las aceleraciones o inercias.

### 1.4.2. Beneficios económicos

La experiencia en la definición de mecanismos ha mostrado que un óptimo diseño en los mismos alarga el tiempo de vida de los sistemas mecánicos, ya que muchos de los posibles fallos son detectados en la implementación de los mecanismos

en softwares de diseño. Por tanto, el uso de programas como GIM puede ser de gran importancia para la optimizar la eficiencia de un proyecto.

#### 1.4.3. Beneficios sociales

El efecto nocivo de una mala implementación de un sistema mecánico puede traducirse en pérdidas económicas por falta de eficiencia o fallo para las empresas de ingeniería, así como fallos de seguridad que pueden afectar a operarios o usuarios del sistema implementado.

#### 1.4.4. Plan de difusión y explotación

La difusión de los conocimientos y resultados obtenidos en este trabajo se pueden expandir por dos medios distintos.

El primero de ellos es mediante la publicación de artículos en alguna revista especializada en la materia del campo de la mecánica y de los mecanismos; como pueden ser: IEEE Transactions on Robotics, Journal of Mechanisms and Robotics, Journal of Mechanical Design o International Journal of Machine Tools and Manufacture.

La segunda vía es mediante el carácter docente del trabajo, esto es, tanto a nivel particular como ingeniera como a nivel del grupo CompMech todos los conocimientos se pueden utilizar para la docencia tanto en el grado como en el master, de esta forma se podría ilustrar a los alumnos con ejemplos visuales de las ideas expuestas en las aulas, así como animar a otros estudiantes a investigar con softwares de especialización mecánica.

Otro de los usos es el comercial, mediante empresas públicas o privadas, las ideas expuestas en este trabajo podrían tener un uso real y podrían dar pie a proyectos reales. Tendrían que estudiarse las distintas opciones de material para los diseños de cada pieza y la viabilidad de los proyectos, así como la jurisprudencia de las licencias del programa.

## 1.5. Análisis del estado del arte

Desde un inicio se pensó en la simulación movimientos mediante un software para la observación de los fenómenos que se pudieran crear, así como las reacciones generadas. Al tener acceso a diferentes herramientas de simulación se han de barajar las más relevantes para determinar cuál será la más adecuada para la construcción del modelo. Dentro de las posibilidades que nos ofrecía el ámbito de la ingeniería mecánica las más usuales son las siguientes:

- **Geonext**  
La interfase es simple, es una alternativa interesante para construcciones geométricas, destaca la posibilidad de graficar funciones y marcar distintos puntos sobre ellas en cambio no tiene la opción de trabajar con las cónicas ni los elementos asociados a estas, para trabajar con este software hay que tener un conocimiento básico en lenguaje XML estándar [5].
- **Geogebra**  
Es un procesador geométrico y algebraico, está enfocado a las matemáticas, calculo, algebra o física. Dando distintos tratamientos al cálculo de funciones particulares como lo pueden ser las derivadas o integrales. En él es muy útil la disposición de las diferentes vistas del proyecto, algebraica, grafica 3D, hoja de cálculo, calculo simbólico y vista de probabilidad y estadística [6].
- **SAM**  
Es un software para el diseño y análisis de mecanismos y transmisiones, creado por Artas Engineering. En él se pueden trabajar componentes básicos incluyendo barras, muelles y deslizaderas también se pueden trabajar el modelamiento con muelles no lineales, correas o engranajes. No es un software libre por lo que sería necesaria una licencia para su descarga [7].
- **Cinderella**  
Es un programa que necesita licencia para su uso, es muy útil para análisis físicos, es muy útil para hacer gráficas de funciones o conjuntos de funciones. Uno de su uso principal es hacer simulaciones de estados físicos, cargas másicas y eléctricas, por ejemplo. [8]
- **Ansys**  
Es un software con licencias gratuitas para estudiantes, tiene múltiples módulos que abarcan estructuras, electromagnetismo o modelaje 3D. Es muy utilizado para hacer simulaciones.[9]

Se pueden encontrar en el Mercado otros muchos programas con características similares, entre ellos Catia [10] y Solid Works [11].

Por otro lado, en cuanto a los propios mecanismos, ambos son mecanismos más o menos complejos de un grado de libertad. Desde épocas muy remotas el hombre siempre ha intentado fabricar objetos para facilitar o aumentar su poder o también para defenderse, pero no es hasta la época helénica que la mecánica es considerada ciencia.

Arquímedes (287-212 a.C.) desarrolla las leyes de la palanca y discute el problema de encontrar el centro de gravedad de un cuerpo dado. Descubre el principio de la hidrostática que lleva su nombre, y construye diversos ingenios mecánicos, siendo el más conocido el llamado tornillo de Arquímedes empleado para elevar agua [12].

Como explica el experto consultor en tecnología educativa por la universidad Complutense de Madrid Pedro Torres Ruiz, el software educativo tiene sus comienzos en Europa. Específicamente, en España en los años sesenta con el desarrollo de los medios audiovisuales en el mundo, por ejemplo, el proyector de diapositivas, acetatos, fotografías de prototipos, entre otros coincidiendo, además, con la propuesta de la Ley General de Educación en España en los años setenta pero, no fue sino hasta en los años ochenta cuando varios expertos en el campo de la educación habían puesto sus ojos en el Internet como tecnología de la información para su análisis, creación, desarrollo, difusión y divulgación de la enseñanza en cualquier nivel educativo [13].

Dado el gran uso del software GIM en el ámbito docente a continuación se presenta la opinión de varios investigadores en ciencia pedagógica

Viviana Duro Novoa profesora en la universidad Jesuita de Guadalajara (Méjico) explica en una de sus publicaciones cómo el concepto de software educativo ha sido abordado por diferentes autores, atribuyéndole disímiles definiciones a pesar de las cuales se imponen las potencialidades y su absoluto basamento en los principios de la enseñanza para su vinculación en el proceso de enseñanza aprendizaje. Es un programa creado con la finalidad específica de ser utilizado como medio didáctico, es decir para facilitar el proceso de enseñanza aprendizaje.

En las ciencias pedagógicas cuenta Sánchez J y Rodríguez Lamas; ambos científicos pedagógicos, que han abordado desde sus investigaciones el concepto, las características y potencialidades de los softwares educativos.

Sánchez J. define el concepto genérico de Software Educativo como cualquier programa computacional cuyas características estructurales y funcionales sirvan de apoyo al proceso de enseñar, aprender y administrar.



Según Rodríguez Lamas es una aplicación informática, que soportada sobre una bien definida estrategia pedagógica, apoya directamente el proceso de enseñanza aprendizaje constituyendo un efectivo instrumento para el desarrollo educacional del hombre del próximo siglo.

El Dr. en ciencias pedagógicas Vicente González Castro a partir de sus funciones educativas planteó “Los medios de enseñanza son los medios de objetivación del trabajo, que están vinculados a los objetos materiales que sirven de apoyo al proceso de enseñanza y contribuyen decisivamente al logro de su objetivo... Teoría y Práctica de los medios de enseñanza son todos los componentes del proceso docente-educativo que actúan como soporte material de los métodos (instructivos o educativos), con el propósito de lograr los objetivos planteados [14].

## 1.6. Selección / Descripción de la solución propuesta

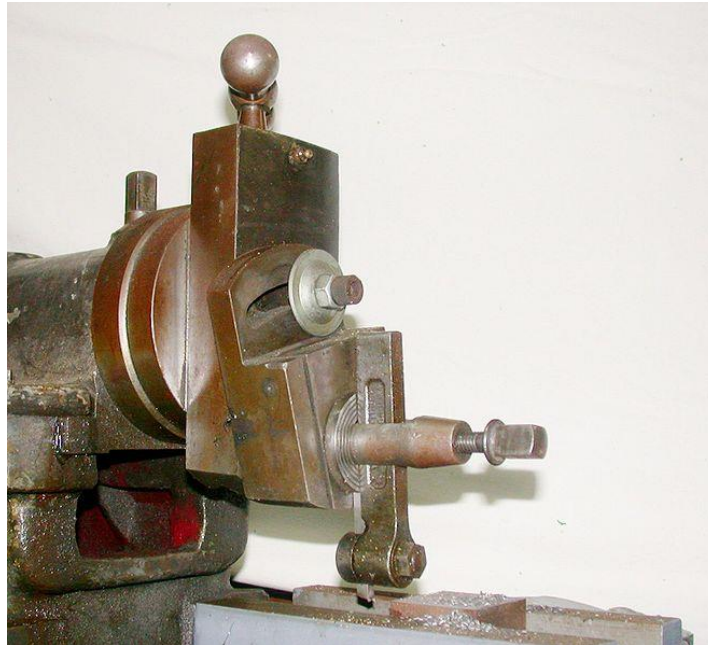
Desde un inicio se pensó en la simulación mediante un software para la observación y análisis de los fenómenos en los movimientos de dos mecanismos. La precisión que ofrecen los softwares de hoy en día es óptima, por lo que se decidió que a priori los modelos serían simulados a ordenador. Al tener acceso a diferentes herramientas de simulación se barajaron las más relevantes para determinar cuál sería la más adecuada para la construcción del modelo. Dentro de las posibilidades que se ofrecían en el ámbito de la ingeniería y teniendo en cuenta tanto la familiaridad y el coste como la accesibilidad proporcionada por el centro docente, la herramienta utilizada para llevar a cabo este Trabajo de Fin de grado ha sido el software GIM.

El software GIM es un software libre de descarga gratuita, creado por el grupo COMPMECH, grupo de investigación perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, universidad del País Vasco (UPV/EHU).

El software anteriormente mencionado se divide en cinco módulos diferentes, cada uno de ellos tiene un propósito distinto, pero todos están relacionados, por lo que podemos alternar la forma de trabajo entre ellos; los módulos son los siguientes: Geometry, Kinematics, Dynamics, Synthesis y Workspace.

La explicación exhaustiva de cada módulo se encuentra en el Anexo I.

En primer lugar, se va a analizar un mecanismo con movimiento alternativo horizontal de retorno rápido, conocido como limadora y representado en la fotografía 1.



Fotografía 1. Limadora mecánica

La limadora mecánica es una máquina herramienta para el mecanizado de piezas por arranque por viruta, mediante el movimiento lineal alternativo de la herramienta o movimiento de corte.

Mediante el movimiento de la lima, se van arrancando finas capas de viruta, hasta obtener bien el grosor deseado de la pieza o la planitud que es necesaria en el proceso de fabricación. La mesa que sujeta la pieza a mecanizar realiza un movimiento de avance transversal, que puede ser intermitente para realizar determinados trabajos, como la generación de una superficie plana o de ranuras equidistantes. Asimismo, es posible desplazar verticalmente la herramienta o la mesa, manual o automáticamente, para aumentar la profundidad de pasada.

En la siguiente figura se muestra a modo de ilustración, el arranque de viruta de una piza en un limado horizontal, indicándose la forma de sujeción de la herramienta de la limadora al cabezal, siendo en la misma “A” el tornillo de apriete, “B” manivela de desplazamiento vertical, “C” traba de ajuste, “D” suplemento, “E” tornillo de desplazamiento angular, “F” placa sujeta herramienta, “G” herramienta, “H” pieza trabajada, “I” desplazamiento del cabezal porta herramienta y “H” desplazamiento lateral de la pieza [15].

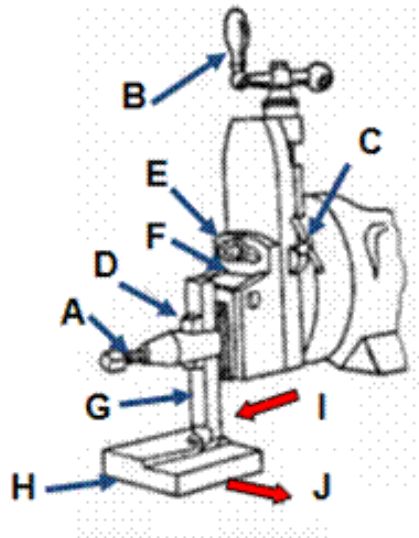


Ilustración 1. Limadora mecánica

Para el correcto diseño y análisis en el software, una vez seleccionado el mecanismo es la implantación del mismo en el programa.

Se hace de la forma más simple posible para evitar elementos o uniones innecesarias que puedan ser perjudiciales en el proceso de análisis.

Los componentes de la limadora mecánica son los siguientes:

- Bancada: Es el elemento encargado de darle estabilidad y soporte a la máquina. Tiene dos barras horizontales sobre las que se desliza el carnero y dos verticales sobre las que se desliza la mesa. Este elemento no tiene representación en el software, pero es imprescindible para el correcto funcionamiento del mecanismo.
- Mesa: sobre las guías verticales, se apoya un carro que tiene guías horizontales, por donde se desplaza la mesa, haciendo que pueda moverse verticalmente por el movimiento del carro. No tiene representación en el software.
- Carnero o carro: es la parte móvil de la máquina. Se desliza sobre barras horizontales que se encuentran en la parte superior de la bancada. Este posee una torreta, cuya función es fijar la herramienta de corte.
- Mecanismo de accionamiento del carnero: puede ser por distintos métodos. Cremallera, palanca oscilante, plato-manivela o hidráulico. Es lo que se estudiará de aquí en adelante.

El uso de esta máquina es muy dispar, lo más común es el uso para realizar ranuras en materiales que no son fabricados por extrusión. Por otro lado, se pueden utilizar

para mejorar o dar planeidad a los perfiles prismáticos. Son muy utilizados también en la operación de desbaste o en la creación de las guías de milano, los cuales se utilizan en la industria óptica o en mecánica de precisión por lo que las guías deben ser lo más perfectas posible para evitar el fallo en el producto o estudio final.



Fotografía 2. Guía de milano

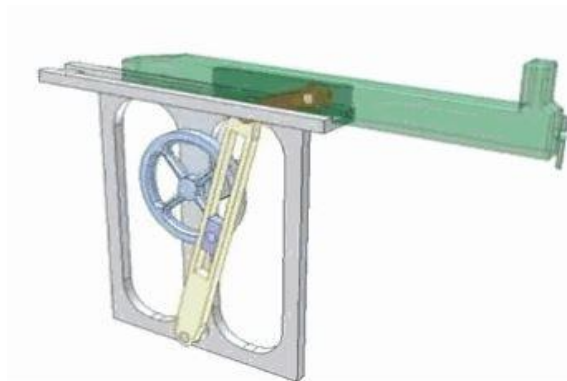


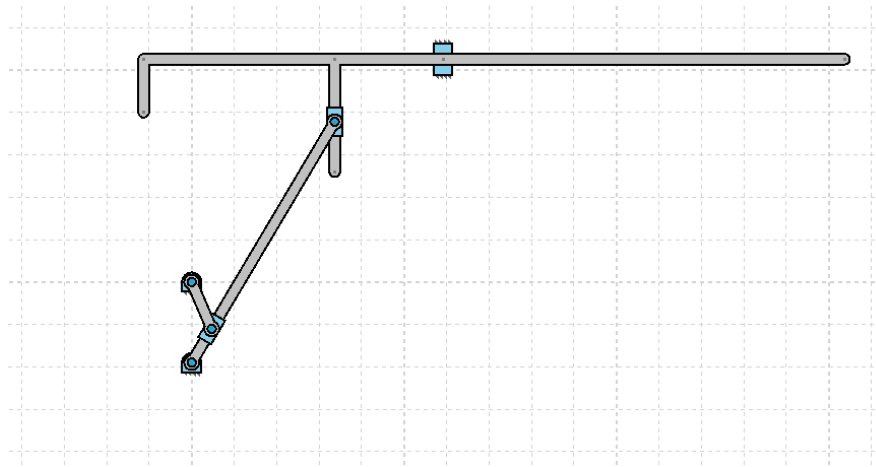
Ilustración 2. Mecanismo de limadora

[16]

### 1.6.1. Análisis en GIM

#### 1.6.1.1. Análisis geométrico

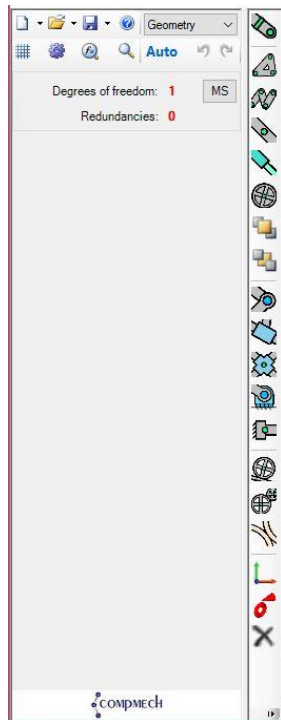
El primer paso como bien se ha mencionado con anterioridad es la simplificación del mecanismo. El mecanismo inicial simplificado es el señalado en la ilustración anterior, que con los cambios pertinentes se ve implementado en el software en la ilustración siguiente.



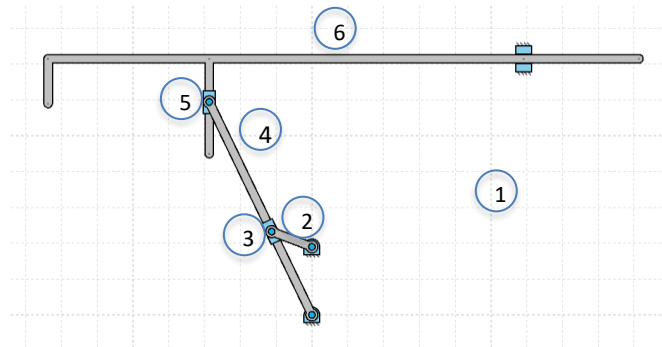
**Ilustración 3. Mecanismo lijador implementado en GIM**

Una vez se consigue obtener un modelo adecuado en el software de reproducción se llevará a cabo el análisis de los resultados del modelo.

Para implantar el mecanismo en el GIM se ha utilizado el módulo Geometry, en el utilizando los controles verticales que aparecen en la Figura 2. Mediante la unión de punto, barras y deslizaderas fijas y móviles, para obtener información más detallada sobre cómo implantar un mecanismo en GIM queda el Anexo I. Manual de usuario, como documento de consulta.



**Figura 2. Módulo Geometry**



**Ilustración 4. Representación significativa de la lijadora en GIM (I)**

El mecanismo de 6 elementos solo tiene un grado de libertad como se calculará en la sección 2.3. La actuación del mecanismo se realizará a través del elemento 2 mediante un par que puede haber sido creado mediante un motor eléctrico o en las limadoras más antiguas con la ayuda de un mecanismo auxiliar multiplicador de fuerza de forma manual, o poco automatizada. El extremo del elemento 6, en el cual nos centraremos será el punto más izquierdo del elemento 6 que será la posición donde se colocaran las cabezas de la herramienta para la ejecución del trabajo deseado. Desde ahora se hará referencia a este punto como punto de limado.

Cabe destacar que el mecanismo que se ha implementado en esta demostración no es más que un ejemplo de aplicación de este proceso de análisis, cualquier mecanismo se podría sintetizar para poder analizar los resultados, o elegir la opción más acertada entre varios mecanismos semejantes dependiendo de múltiples variables.

#### 1.6.1.2. Análisis cinemático

Una vez el mecanismo plano está implantado en el software, se ha de cambiar de módulo, en este caso para el análisis cinemático se utilizará el módulo Kinematics.

En las siguientes ilustraciones quedan expuestos tres momentos en el movimiento del mecanismo dos de ellos posiciones límite y una intermedia.

Las líneas azules representan el movimiento que hace cada uno de los elementos del mecanismo durante el giro de 360° del elemento de entrada antes mencionado.

El espacio de trabajo que se genera en la totalidad del movimiento es el representado en la Ilustración 6, en inglés toma el nombre de *swept* este gráfico es de gran importancia para el cálculo del volumen o área necesaria para el diseño, y para el dimensionamiento del mismo, ya que el área de barrido del mecanismo tiene que estar libre de obstáculos. Por otra parte, también sirve para confirmar el movimiento de cada elemento por ejemplo en nuestro caso se ve el barrido de vuelta completa del elemento 2 y en barrido de un arco de circunferencia concreto para el elemento 3., se puede confirmar también que la cabeza de la herramienta limadora solo tiene movimiento rectilíneo, se define como análisis de rotabilidad.

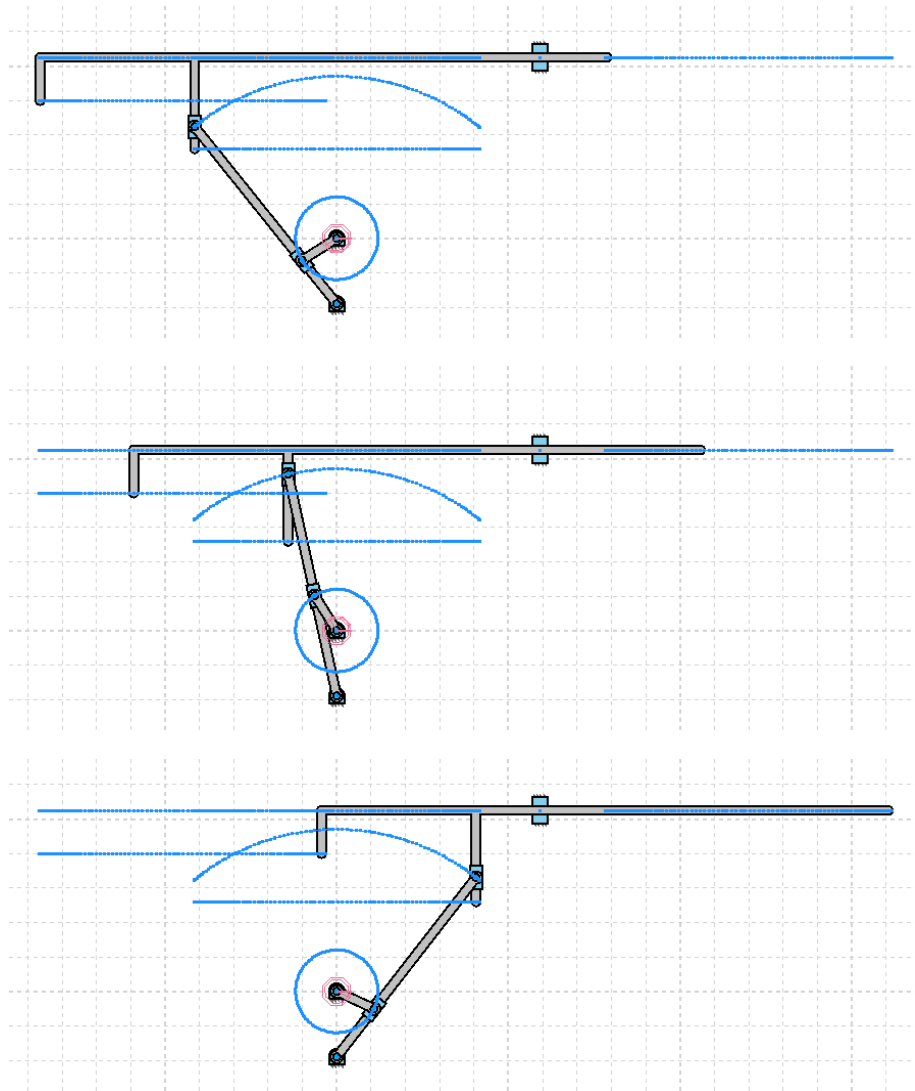


Ilustración 5. Distintas posiciones del mecanismo en movimiento

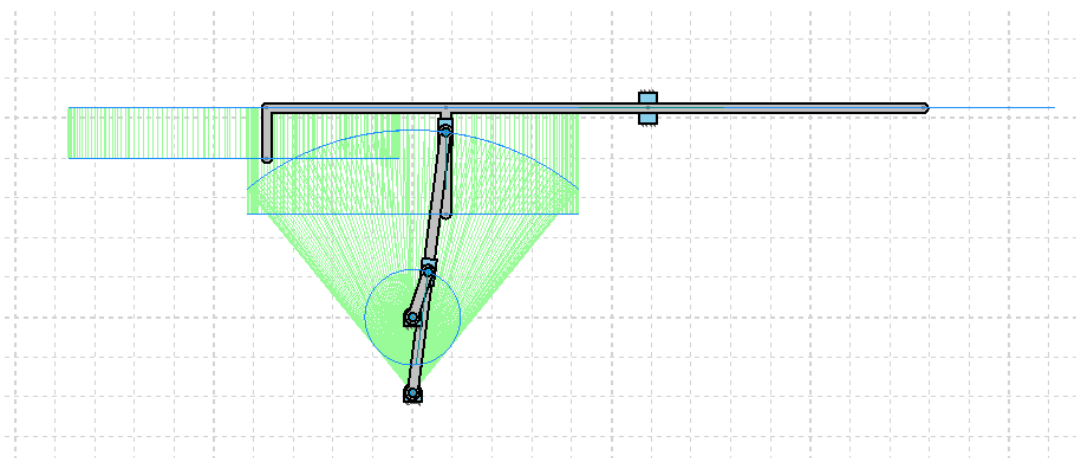


Ilustración 6. Espacio de trabajo del mecanismo limador

Para conseguir el swept, se deberán activar los siguientes comandos:

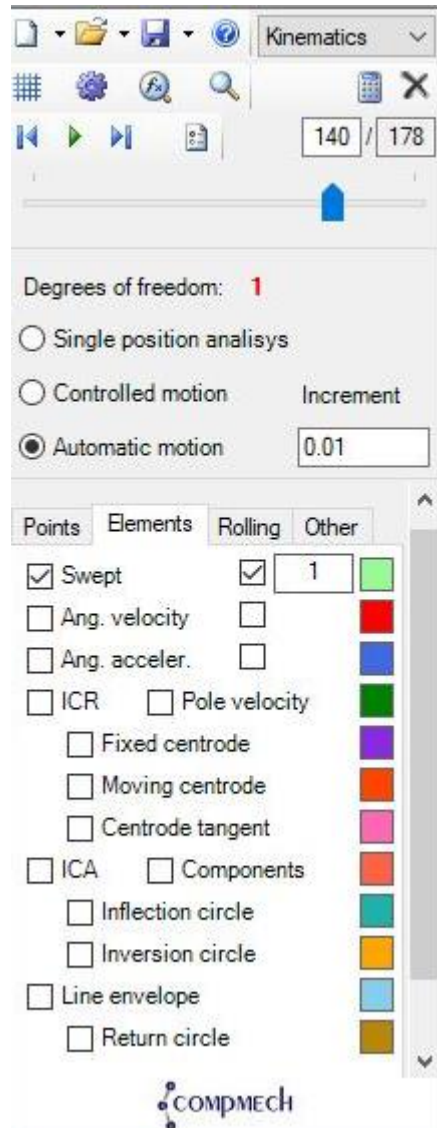
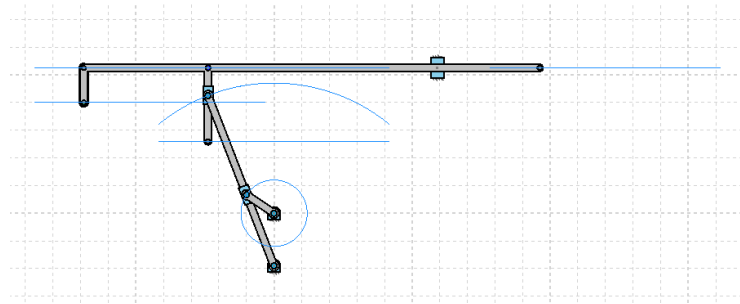


Ilustración 7. Comandos para la obtención del Workspace

Se puede observar que hay dos opciones seleccionadas, si únicamente se quisiera ver el espacio de trabajo de un elemento tendríamos que seleccionar la casilla izquierda y después elegir el elemento, si queremos ver el Workspace del conjunto se tendría que seleccionar la casilla derecha, si seleccionamos las dos, la orden de mostrar el campo de trabajo de todos los elementos prevalece.

Respecto a las representaciones de las trayectorias de cada uno de los elementos, varían dependiendo el observador que se elija en el software. Se van a exponer varias opciones siendo la primera la más útil en este análisis ya que será la que mejor prevea el movimiento para el momento de construcción real del mecanismo.



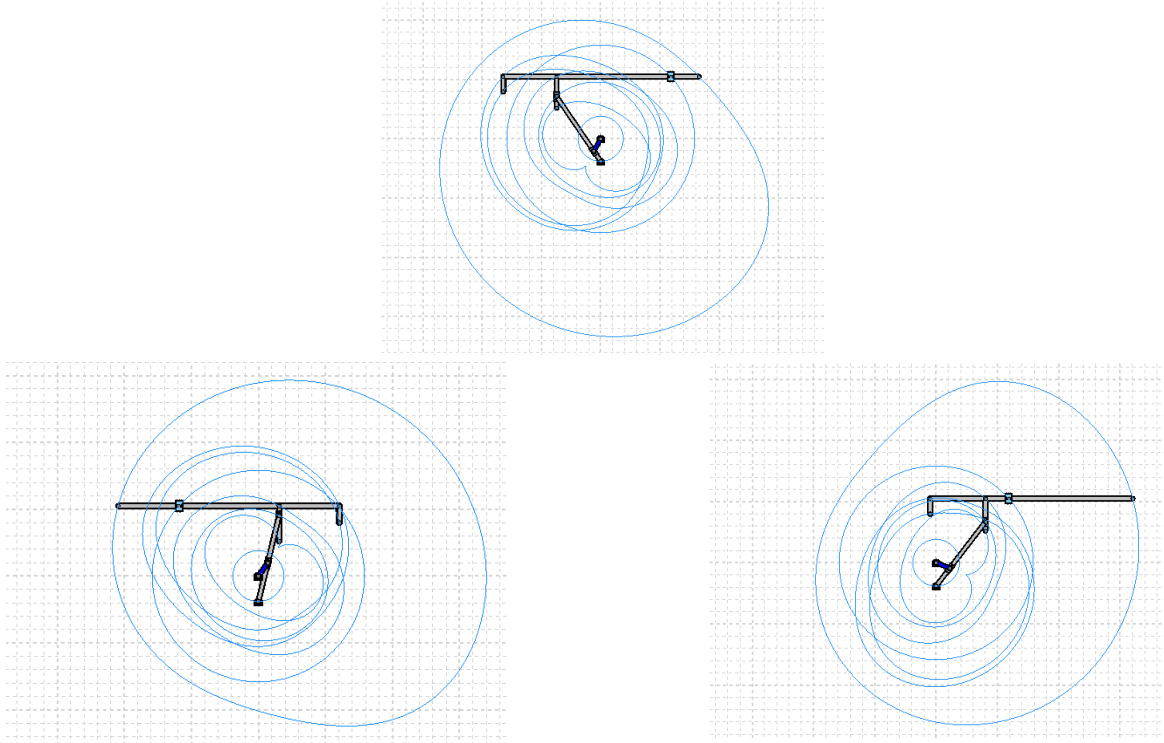


**Ilustración 8. Trayectorias siendo el punto fijo la referencia**

En la Ilustración 8, se observa las trayectorias teniendo como referencia el elemento fijo, como se ha comentado con anterioridad es el más útil ya que es muy útil en el dimensionamiento de otros elementos de la propia máquina en la que trabaje el mecanismo, así como para previsión de espacios de uso.

En la ilustración 9 se observa como al ser el elemento 2 un elemento móvil cuando se dibujan las trayectorias de los distintos mecanismos respecto a este surgen distintas trayectorias que no solo se trasladan, sino que también rotan, este movimiento relativo complica el análisis.

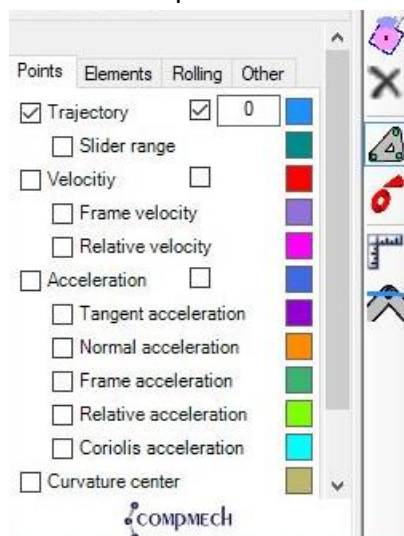
Si se elige el elemento 4 como observador, ocurre algo similar a el caso anterior cuando el elemento de referencia era el elemento 2, las curvas que se aprecian cuando no se elige un elemento fijo como observador no son demasiado útiles para el diseño de otros elementos de la máquina en la que funcione este elemento ya que como ha quedado dicho con anterioridad se utilizan puntos de referencia fijos en la mayoría de los casos. Otros momentos del movimiento de las representaciones de las trayectorias se encuentran disponibles en el Anexo I.



**Ilustración 9. Distintas representaciones de trayectorias siendo el elemento 2 la referencia**

Para elegir el elemento de referencia se debe primero seleccionar la décima opción de la columna de comandos vertical, la opción con forma triangular; una vez seleccionado se elegirá con el ratón el elemento deseado, éste se podrá variar en cualquier momento del proceso.

La opción de visualización de las trayectorias funciona de la misma forma que la opción de visualización del Workspace.



**Ilustración 10. Comandos para la obtención de la trayectoria.**

Primero se analizará la cinemática del punto de limado o punto de referencia, (en las gráficas tendrá el nombre de punto X) con los siguientes valores del actuador:

Será un actuador con velocidad estacionaria como bien hemos dicho antes la de un motor eléctrico, por ejemplo; no tendrá aceleración en ningún punto del recorrido, como se representa en la Figura 3.

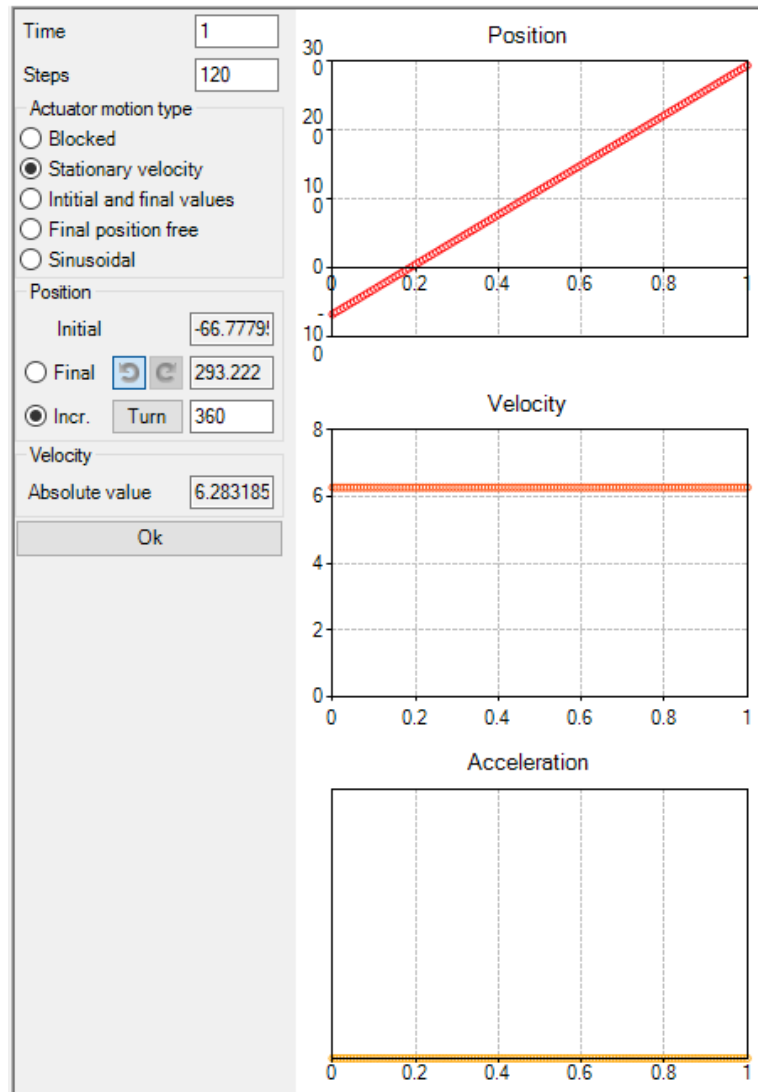


Figura 3. Valores del actuador

Cabe mencionar antes de seguir adelante que la referencia para la obtención de estas gráficas se ha situado en el punto fijo del elemento actuador.

Para analizar la posición del punto de limado tenemos la Figura 4. En ella se presentan las distintas localizaciones en el eje X que tiene el punto citado, todas ellas están en el rango negativo, esto es debido a que el movimiento completo de la limadora ocurre en la parte izquierda del punto de referencia seleccionado. Los picos que se ven son los máximos alcances del punto de limado a  $-0.86$  y  $-0.03$  aproximadamente. Los valores numéricos que aparecen son un ejemplo, pero se podría variar en cualquier momento el valor o la forma del actuador. Se puede observar la forma sinusoidal de la figura, en el mecanismo no conseguimos un movimiento uniforme en el punto de limado es por esto que no se consigue una combinación de formas rectas en el gráfico. La fona con mayor pendiente es la situación de retroceso, es decir la parte de recuperación, cuyo movimiento normalmente no es útil.

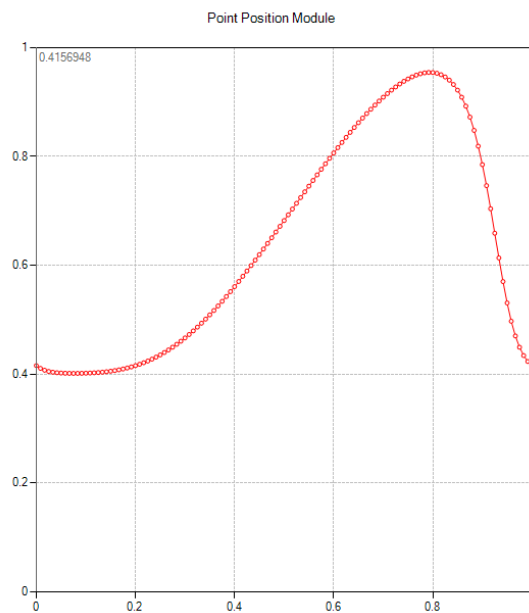


Figura 4. Posición del punto de limado

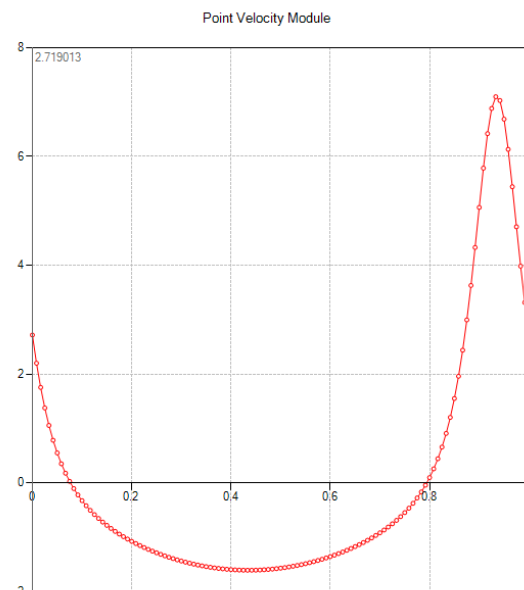


Figura 5. Velocidad del punto de limado

Para el análisis de la velocidad utilizaremos la representación de la Figura 4., en ella se ven dos situaciones diferenciadas; las zonas con valle ancho, y la zona de pico más notorio. La primera zona se corresponde al arranque de viruta, en ella el material necesita grandes fuerzas para conseguir el citado arranque, pero a su vez, la velocidad no puede ser muy elevada para no ser descontrolado. El pico corresponde al retorno, la alta velocidad y aceleración facilitan la economización del tiempo en este proceso.

Ambas representaciones se han obtenido en el módulo Kinematics, una vez el actuador está definido se utiliza el comando Query, en la vertical central de la pantalla, con esa elección saldrá un nuevo menú con el cual podremos graficar distintos parámetros, correspondientes a distintos puntos, elementos u rotulas. Es recomendable utilizar un elemento de referencia fijo para obtener esta información

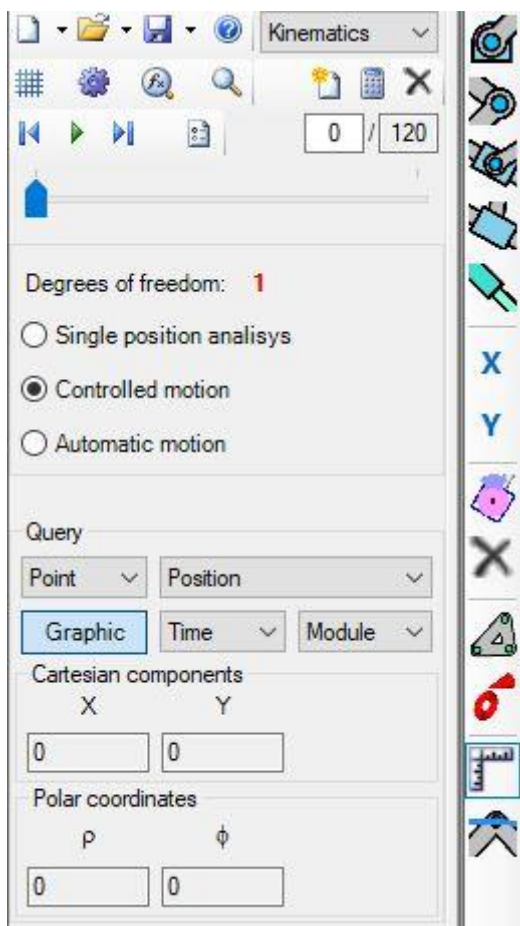


Figura 6. Opción "Query"

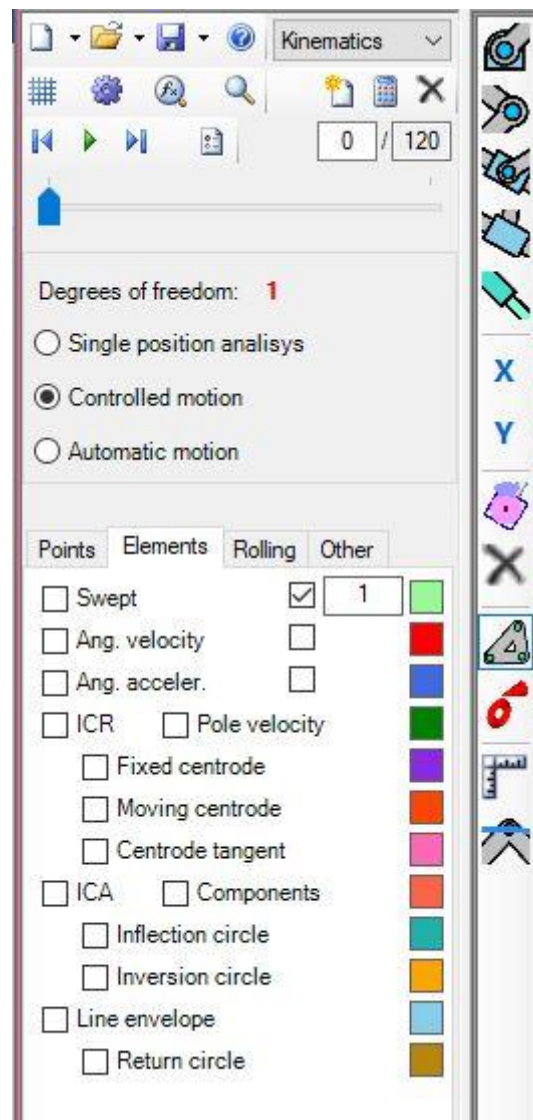
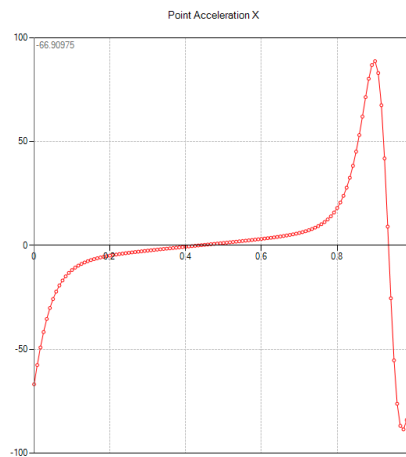


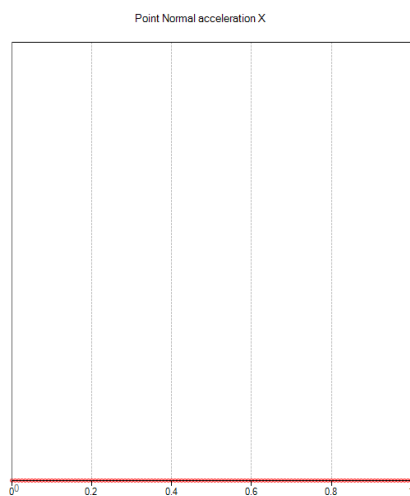
Figura 7. Opción "Reference element"

En cuanto a la aceleración, representada en la Figura 8., se ve que la aceleración aumenta paulatinamente en el recorrido de arranque de viruta (zona central que abarca desde la zona  $t=0.2$  a  $t=0.7$  aproximadamente para este ejemplo) a excepción de dos posiciones pico, los dos puntos se corresponden a los dos puntos de cambio de dirección, no hay que olvidar que la aceleración es la derivada respecto al tiempo del

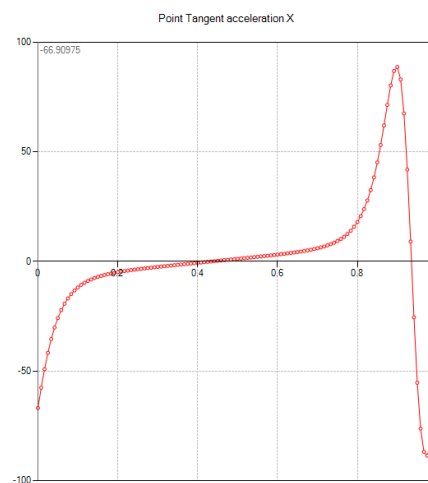
vector velocidad, y en este caso el vector velocidad aunque no cambie de valor absoluto sí que cambia de sentido; por lo que se genera una aceleración puntual en ambos puntos límite. Por otro lado, la zona que une dichos puntos tiene una pendiente notoria, esto es debido a que la velocidad del movimiento es muy elevada y tiene que cambiar el sentido de la marcha en muy poco tiempo. Si se descompone la aceleración en aceleración normal y aceleración tangencial, se observa como la totalidad de la aceleración del punto de limado corresponde con la aceleración tangencial. Cabe remarcar que los valores numéricos son ejemplos ya que dependerán de factores de diseño y distintos datos introducidos por el usuario.



**Figura 8. Aceleración punto limado**

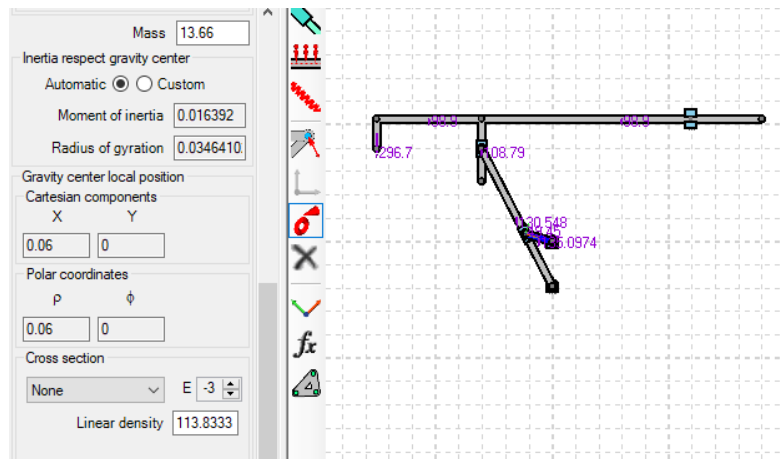


**Figura 9. Aceleración normal punto de limado**

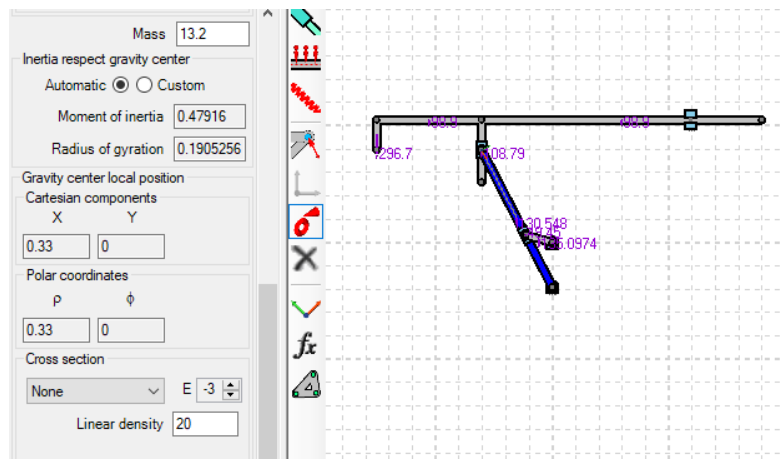


**Figura 10. Aceleración tangencial punto limado**

Para el análisis dinámico de las fuerzas y momentos primero se dotará a cada elemento de masa propia y se tendrá en cuenta el efecto de la gravedad, por motivos ajenos a la planificación del propio mecanismo se ve como el elemento 6 no es único en el reparto de masa, sino que ha tenido que dividirse en sub-elementos para el correcto reparto de masa, a continuación, se presentan las masas de los distintos elementos, así como la inercia de cada uno, otros ejemplos de los mismos están expuestos en el Anexo I.



**Ilustración 11. Masa e inercia del elemento 2**



**Ilustración 12. Masa e inercia del elemento 4**

### 1.6.1.3. Análisis dinámico

Para el análisis dinámico lo primero que se puede hacer es dotar de masa y gravedad a cada uno de los elementos que componen el mecanismo, para ello se utiliza la pestaña “analysis type”, desde ahí se elige el valor de la gravedad, este valor es un número que nosotros elegimos, en el mismo apartado se elige también el valor

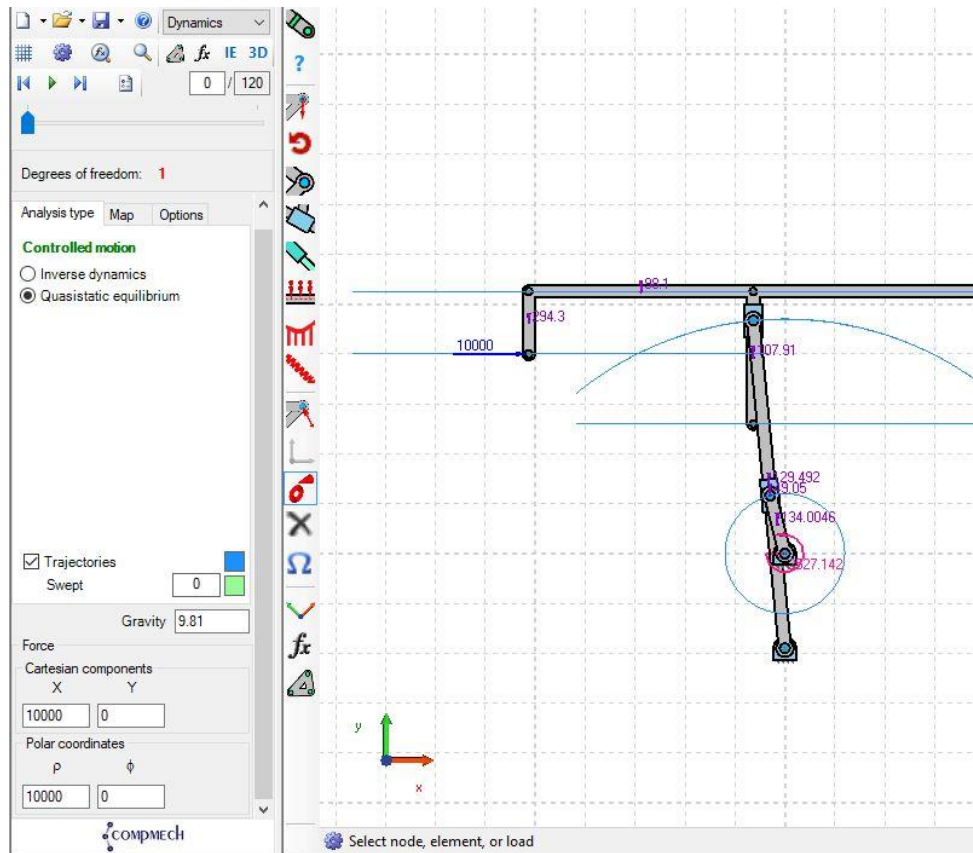
de la masa; una vez estos dos valores son introducidos hay dos opciones, la primera es la generación automática del momento de inercia y radio de giro, mientras la segunda es la opción personalizada donde el usuario es el encargado de introducir el valor. También está a disposición del usuario la posibilidad de elegir la posición del centro de gravedad, mediante coordenadas cartesianas u coordenadas polares.

Para el ejemplo se supone un valor de la gravedad de  $9.81 \text{ m/s}^2$  así como distintas masas dependiendo de la longitud y la supuesta densidad de los materiales. En el Anexo I se encontrarán ilustraciones aclaratorias.

Una vez se tienen bien definidos cada uno de los componentes del mecanismo se procede al análisis. El software posibilita introducir todo tipo de fuerzas, internas o externas en el mecanismo y darles un valor concreto con los comandos en la zona vertical, acudir al Anexo I para visualización de los mismos.

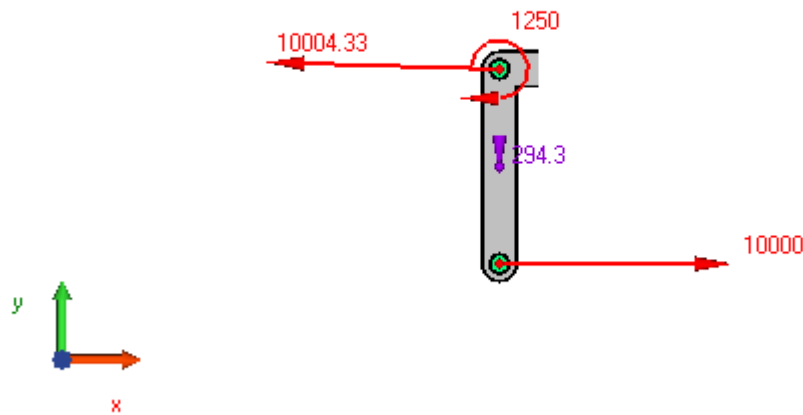
Como ejemplo podemos dar cualquier valor a la fuerza resistente en el extremo de la limadora, como puede ser  $1000\text{N}$  (este valor puede escogerse libremente y ajustarse al valor necesario en cada aplicación) en la cabeza de la limadora, para ello se utiliza la casilla de fuerza lineal y mediante coordenadas cartesianas se le da dirección y sentido a la misma.





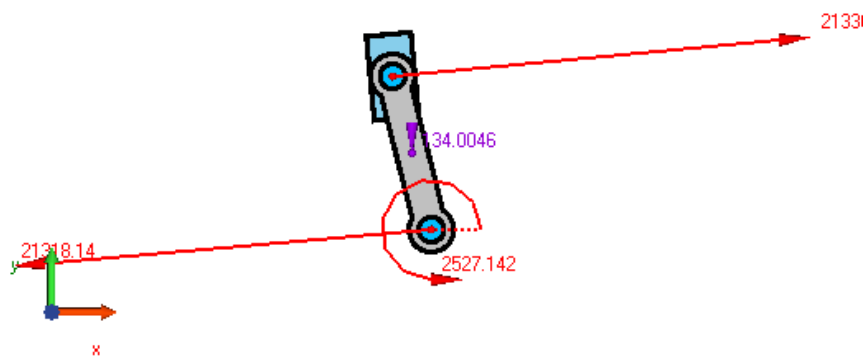
**Ilustración 13. Fuerza externa aplicada en la cabeza de la limadora**

Si fuese necesaria información precisa de las reacciones de cada elemento, el software es capaz de proporcionar los diagramas de sólido rígidos de cada uno de los elementos, así como los diagramas de esfuerzos internos, el valor de los mismos en el tiempo.



**Ilustración 14. Diagrama de sólido rígido de la cabeza de la limadora**

En este caso, por la geometría específica del elemento que soporta la cabeza de la lijadora, el software es capaz de proporcionar esta parte por sí sola. En ella se pueden observar dos fuerzas con color rojo, una, la externa que se ha añadido con anterioridad y otra de reacción del sistema, en morado se ve la fuerza generada por la gravedad debido a la masa y por último se observa un momento, este también de reacción.



**Ilustración 15. Diagrama de sólido rígido del elemento actuante**

De la misma forma se pueden extraer todos los diagramas de sólido rígido para cada uno de los elementos del mecanismo.

Los esfuerzos internos, normales, axiales y tangenciales son representados en el tiempo en el GIM, en este caso se van a exponer los correspondientes a la biela. En el

Anexo I se pueden encontrar otros instantes de los diagramas de esfuerzo interno de la biela si fuese necesario.

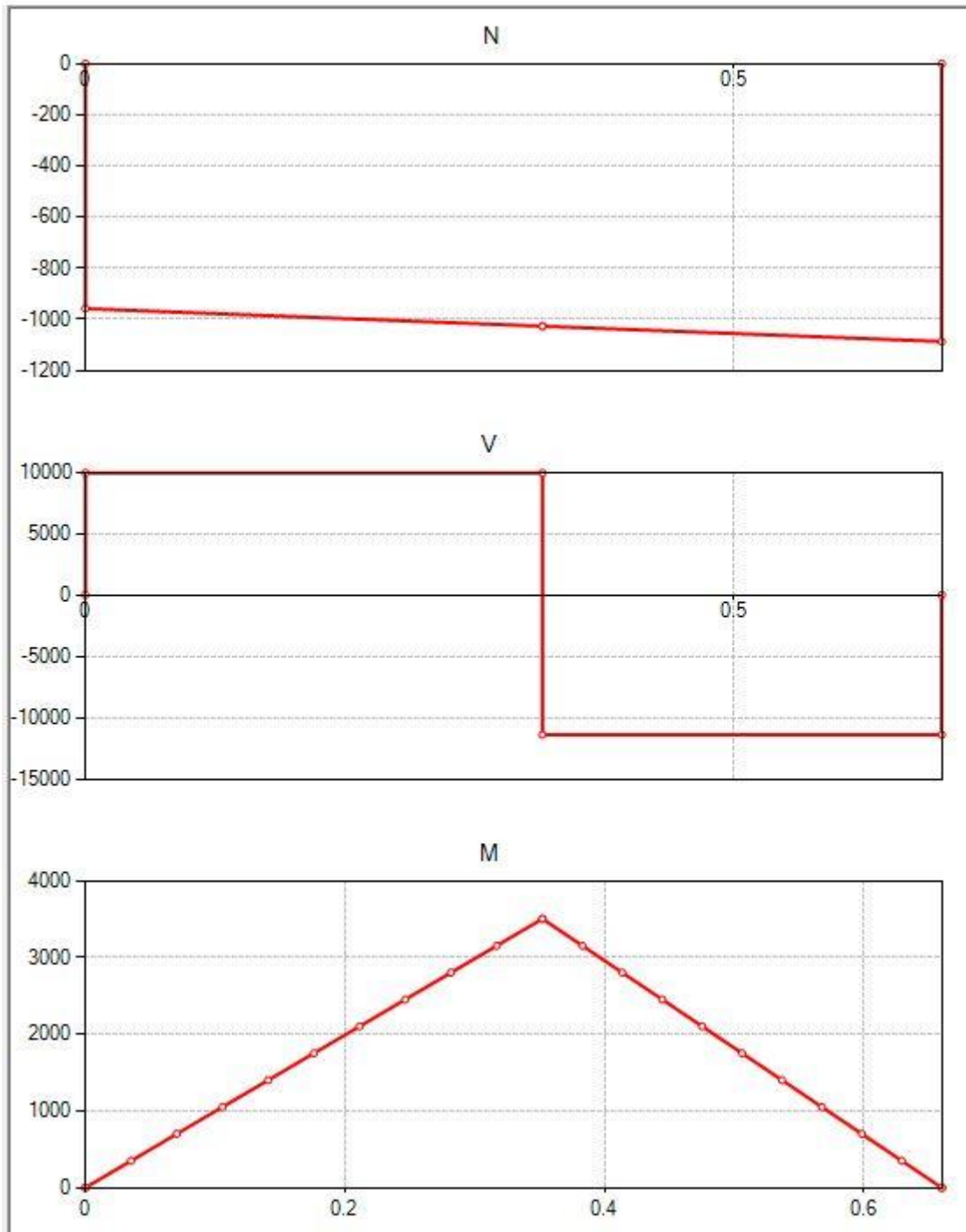


Ilustración 16. Diagrama de esfuerzos internos biela.

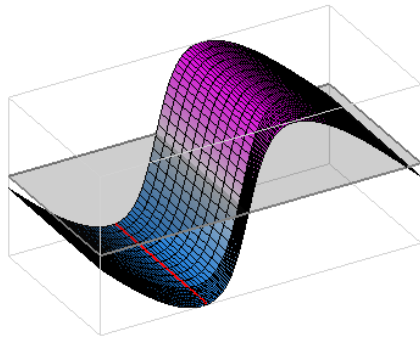


Ilustración 17. Esfuerzo interno N de la biela

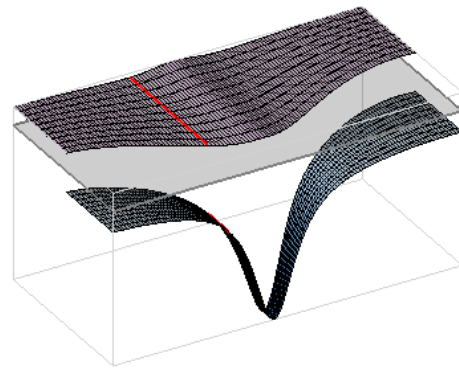


Ilustración 18. Esfuerzo interno V de la biela

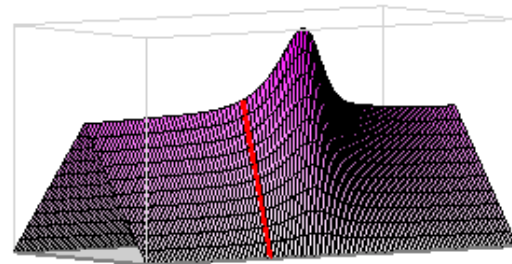
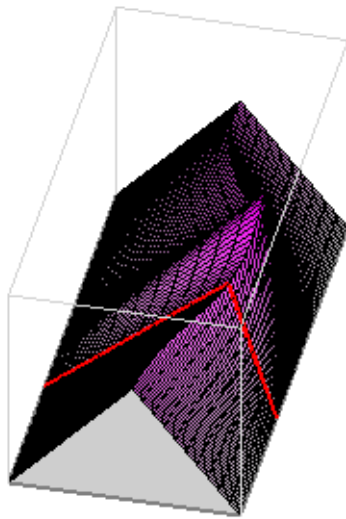


Ilustración 19. Esfuerzo interno M de la biela con distintas visualizaciones

Las figuras que se obtienen se pueden rotar para obtener una visión perfecta del pico o de la parte seleccionada. Estas figuras en tres dimensiones se caracterizan por una serie de paleta cromática la cual cambiará de color e intensidad dependiendo del esfuerzo al que está sometido el elemento.

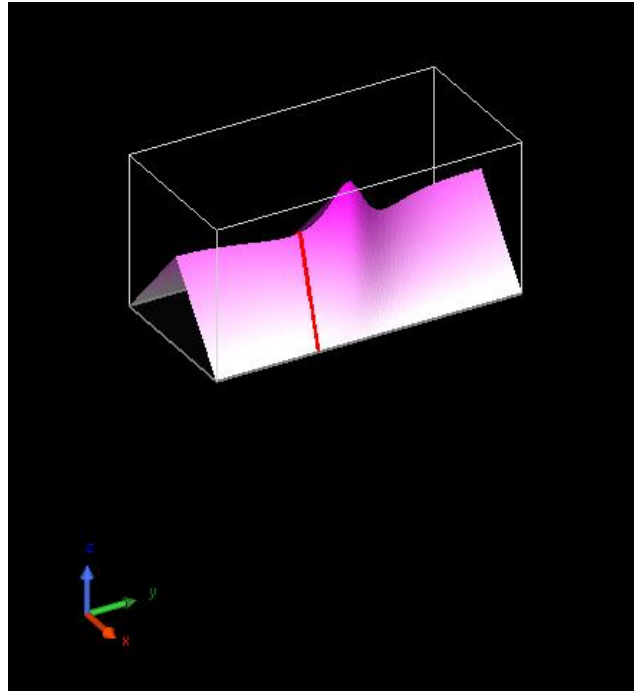


Ilustración 20. Diagrama cromático de esfuerzos internos M de la biela

También se puede trabajar con la fuerza creada anteriormente como incógnita, para ello se utilizará el botón con signo de interrogación y después se representará gráficamente el valor que la fuerza seleccionada toma en todo el recorrido.

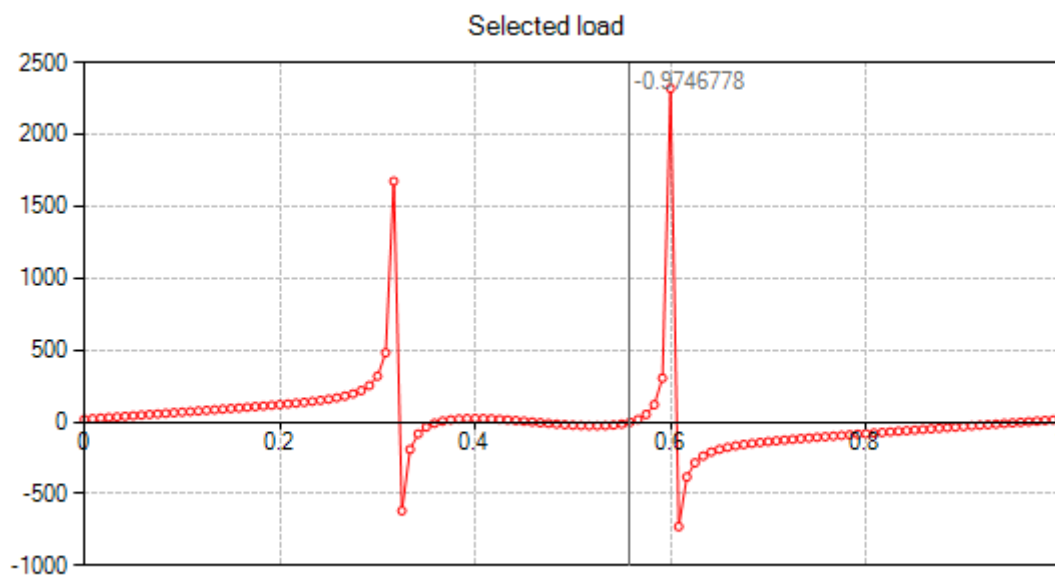


Ilustración 21. Grafico del valor de la fuerza

Dada la versatilidad de este método de análisis del software GIM se presenta a continuación el segundo modelo con el que se va a trabajar, esta vez se presenta un mecanismo simplificado que está dirigido a la divulgación científica, se trata de un modelo de tren de aterrizaje retráctil simplificado.

El tren de aterrizaje es el sistema de una aeronave que le permite llevar a cabo sus operaciones en tierra. Su evolución histórica ha sido considerable a lo largo de los años ya que las funciones exigidas en su diseño han ido aumentando conforme las normas aplicables imponían más y más requisitos en su estructura. No obstante, dicho sistema solamente tiene relevancia cuando el avión se encuentra en contacto con el suelo ya que en el resto de situaciones (el vuelo) constituye un peso muerto. Es por ello que su diseño siempre se ha estudiado con la vista puesta en la minimización de su peso. En la actualidad el tren de aterrizaje debe ser diseñado para absorber la energía cinética vertical del avión durante el aterrizaje hasta niveles tolerables en el resto del aparato y llevar a cabo todas las operaciones de rodadura en tierra (desplazamientos, giros, remolque, aceleraciones y deceleraciones en el despegue y aterrizaje respectivamente...) dentro de unos niveles vibratorios adecuados [17].



Fotografía 3. Tren de aterrizaje del Douglas DC-2



Fotografía 4. Tren de aterrizaje del Boeing 247 D

El sistema real debe absorber el peso de toda la aeronave en caída libre desde 0.5 a 1.5 metros de altura, por lo que los sistemas utilizados en aparatos reales son mucho más robustos y complejos, en este trabajo se presenta una forma simplificada del mecanismo de un grado de libertad que como se verá a continuación tiene varias posiciones de bloqueo para el óptimo funcionamiento del mismo.

A continuación, se presenta el mecanismo modelado en el software GIM.

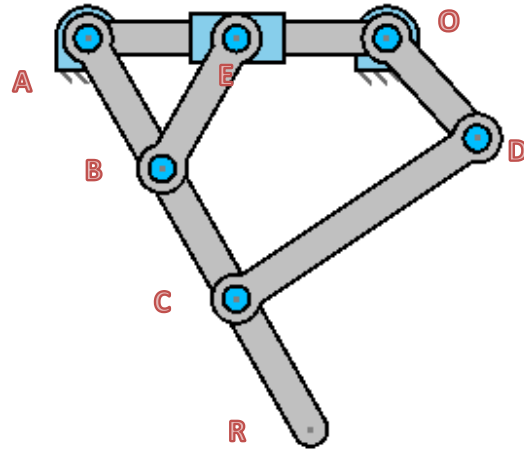


Ilustración 22. Mecanismo de tren de aterrizaje simulado en GIM

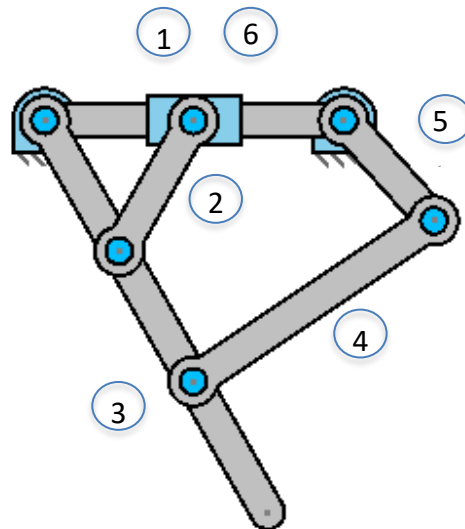


Ilustración 23. Nomenclatura del mecanismo de tren de aterrizaje simulado

La rueda o pares de ruedas que sufrirán el contacto con la superficie de aterrizaje van acopladas en el extremo R mediante un complejo ensamblaje el cual se omite para centrar las explicaciones únicamente en el mecanismo principal. Por otra parte, las uniones fijas A y O van unidas a la aeronave de tal manera que se pueda generar un movimiento relativo entre el tren y la aeronave. A continuación, se presentan un conjunto de ilustraciones que representan el movimiento del tren de aterrizaje a lo largo del tiempo:

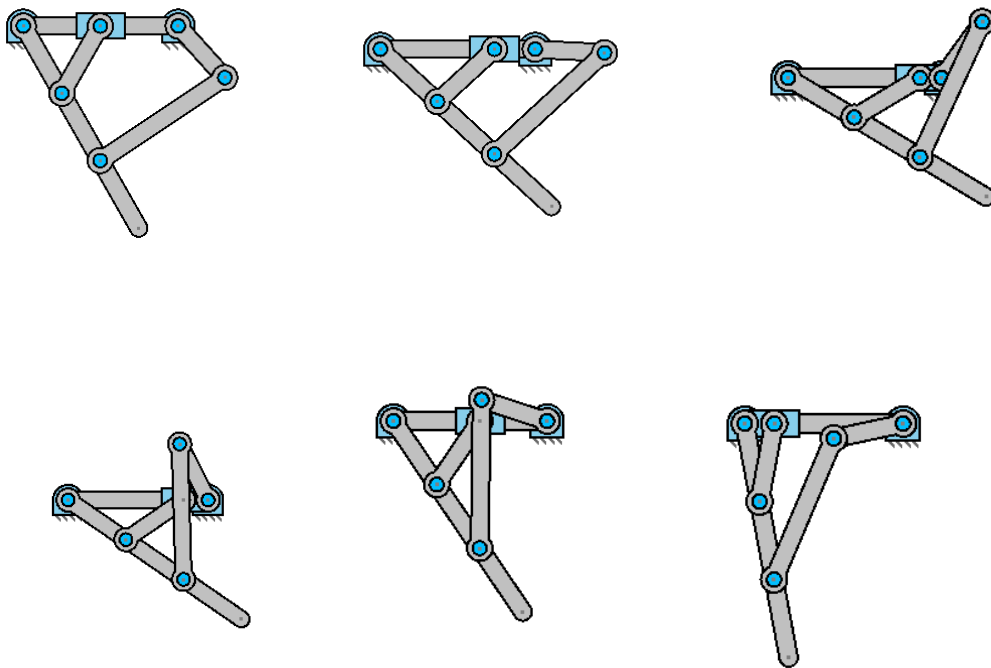


Ilustración 24. Secuencia de distintas posiciones del movimiento del mecanismo de tren de aterrizaje

Para el análisis se dotará al mecanismo de un actuador en la rótula O que genera un movimiento continuo.

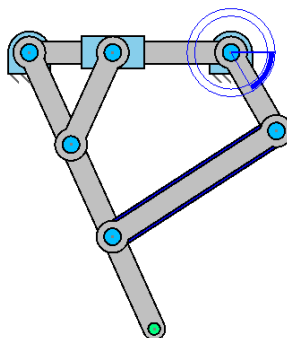


Ilustración 25. Actuador en el tren de aterrizaje



Eligiendo como elemento fijo la propia aeronave se obtienen las trayectorias de los puntos de unión. La selección del elemento fijo queda bajo la decisión del usuario y puede cambiarse durante todo el proceso de análisis.

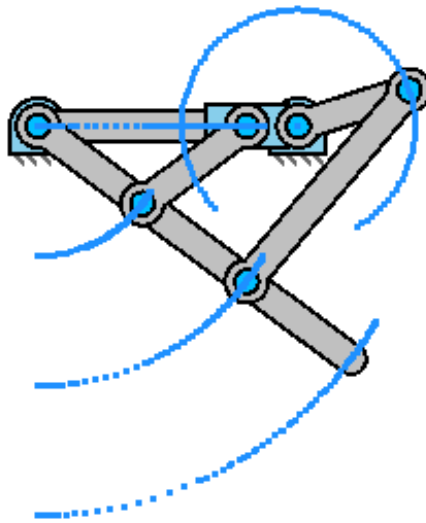
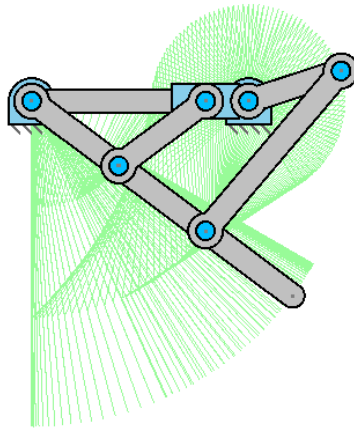


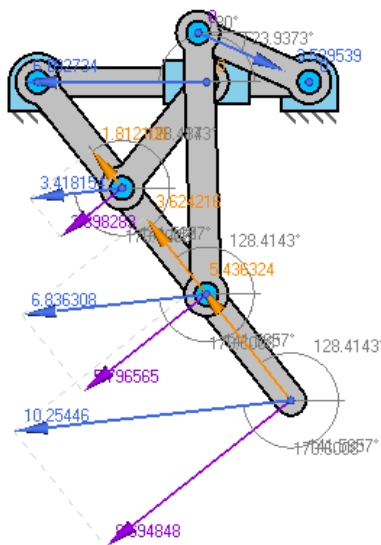
Ilustración 26. Trayectoria de los puntos de unión entre elementos

De la misma forma se obtiene el campo de trabajo o “swept”. Como bien se menciona para el mecanismo anterior; es de gran interés conocer la secuencia completa del movimiento del mecanismo en el tiempo para así poder diseñar los elementos adyacentes y generar los huecos necesarios para el movimiento del propio mecanismo.



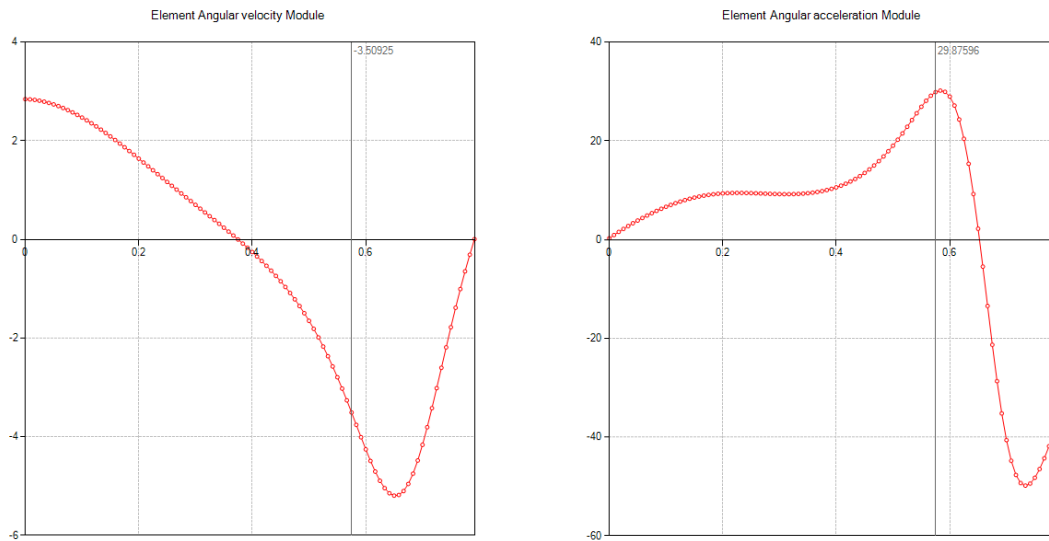
**Ilustración 27. Campo de trabajo del mecanismo de tren de aterrizaje**

En cuanto a la velocidad y aceleración no solo se puede obtener la información en forma de diagrama, sino que se puede visualizar el efecto de las fuerzas mediante vectores en el propio mecanismo en movimiento.



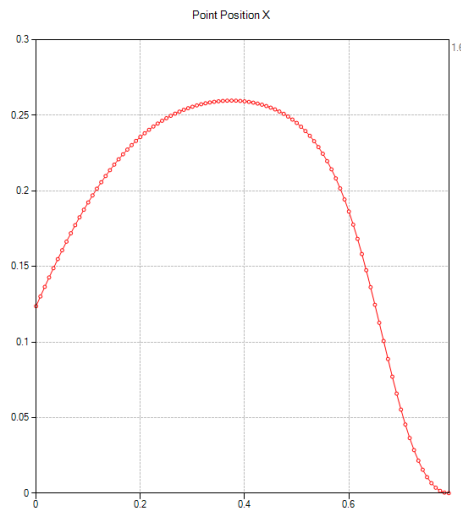
**Ilustración 28. Vectores de aceleración en el mecanismo**

Seleccionando el elemento de unión con la rueda (elemento 6) como elemento representativo del ejemplo se pueden analizar gráficamente la velocidad y aceleración angular.

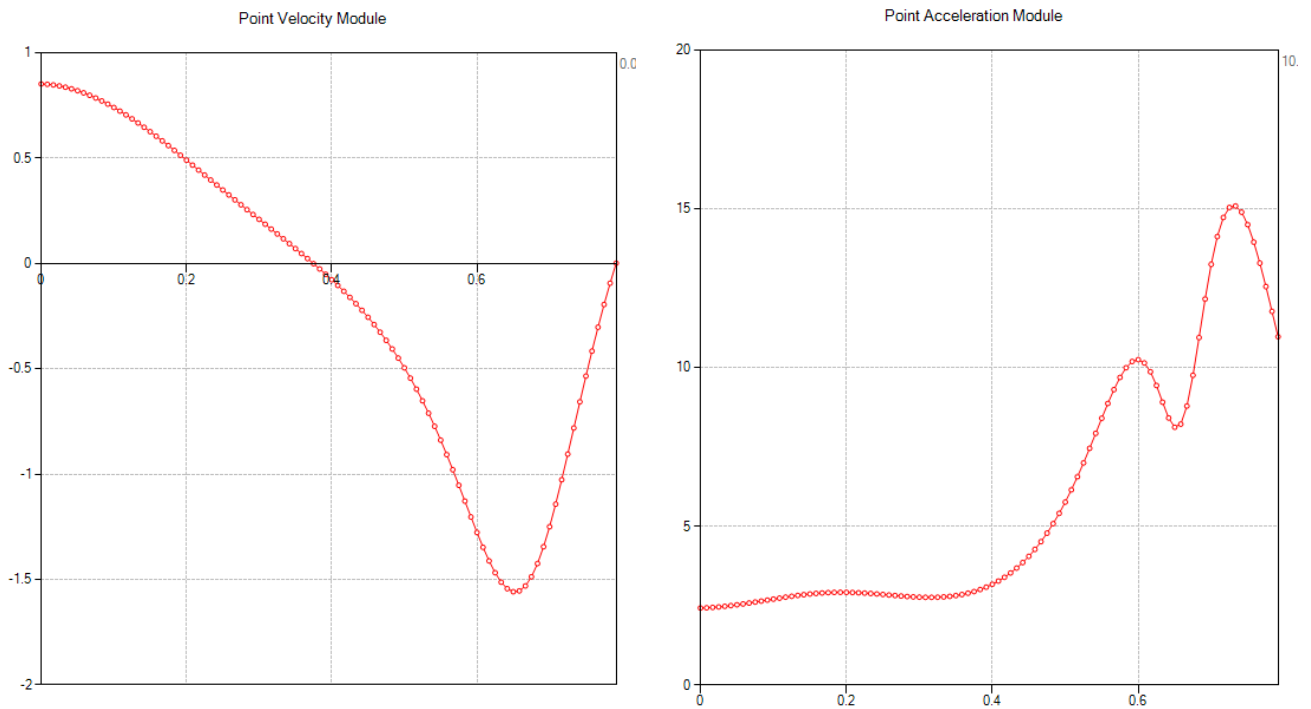


**Ilustración 29. Graficas de velocidad y aceleración angular del elemento representativo**

Si para el análisis se necesita trabajar con un punto exacto del mecanismo se puede extraer información de un único punto; se va a utilizar el punto R nombrado anteriormente, punto de unión a la rueda.



**Ilustración 30. Posición del punto R del mecanismo**



**Ilustración 31. Velocidad y aceleración del punto R**

Como ejemplo de análisis se puede elegir el gráfico correspondiente a la aceleración del punto R, se puede observar cómo hay un salto brusco de aceleración que coincide con uno de los puntos singulares, cuando la barra de conexión con la rueda se queda en posición vertical.

Si se necesita obtener información de las construcciones gráficas geométricas también se podrían obtener los círculos de inflexión, círculos de inversión o los centros instantáneos de rotación de cada elemento y cada instante entre otros, en la siguiente ilustración se obtienen los círculos de inflexión e inversión, así como el CIR para el elemento 4 para una posición determinada.

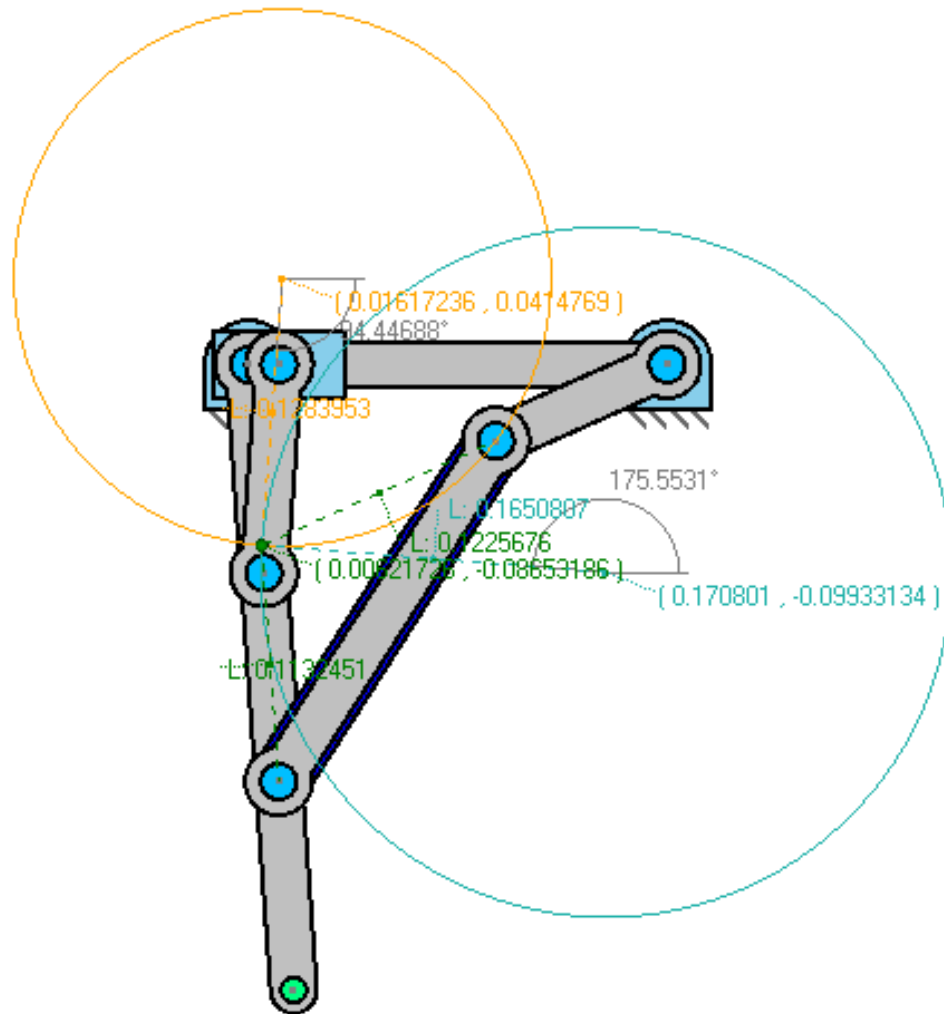


Ilustración 32. Construcciones gráficas geométricas del elemento 4

En cuanto a al análisis dinámico, se dota al sistema de gravedad, para el ejemplo se utilizará el valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$  y se asignará un valor de masa a cada elemento dependiendo de la longitud y material que se seleccione.

Una vez definidos todos los elementos, se puede empezar el análisis inverso para ello se elige el tipo de fuerza, en este ejemplo se ha propuesto una fuerza vertical situada en el punto R.

Si se representan gráficamente los valores de dicha fuerza se consigue lo siguiente:

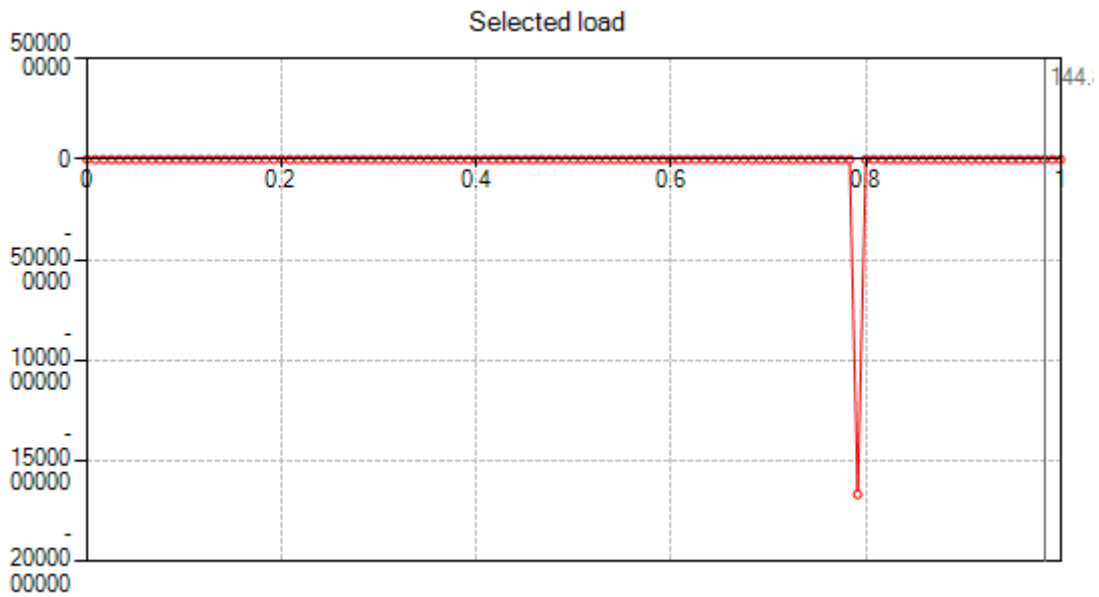


Ilustración 33. Representación de la fuerza

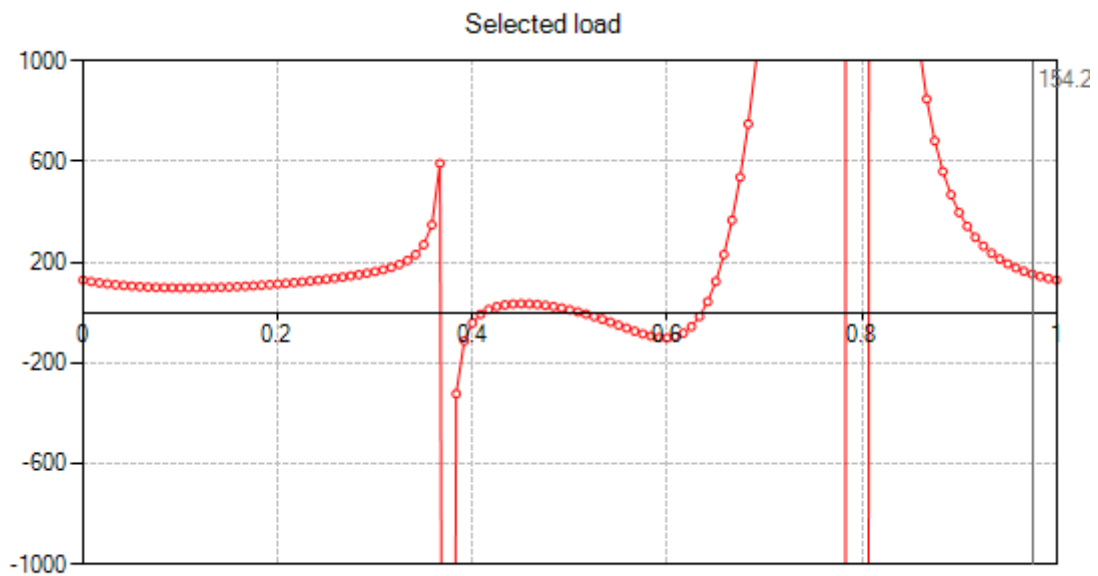


Ilustración 34. Zoom del diagrama de representación de la fuerza

En la primera de las representaciones únicamente se observa la aparición de uno de los puntos singulares mientras que ampliando a valores menores se ve el segundo, el resto del diagrama es continuo

Este mismo análisis se puede ver en la siguiente muestra de imágenes, la primera y última imagen representan posiciones particulares, y toman un valor de las fuerzas mucho mayores.

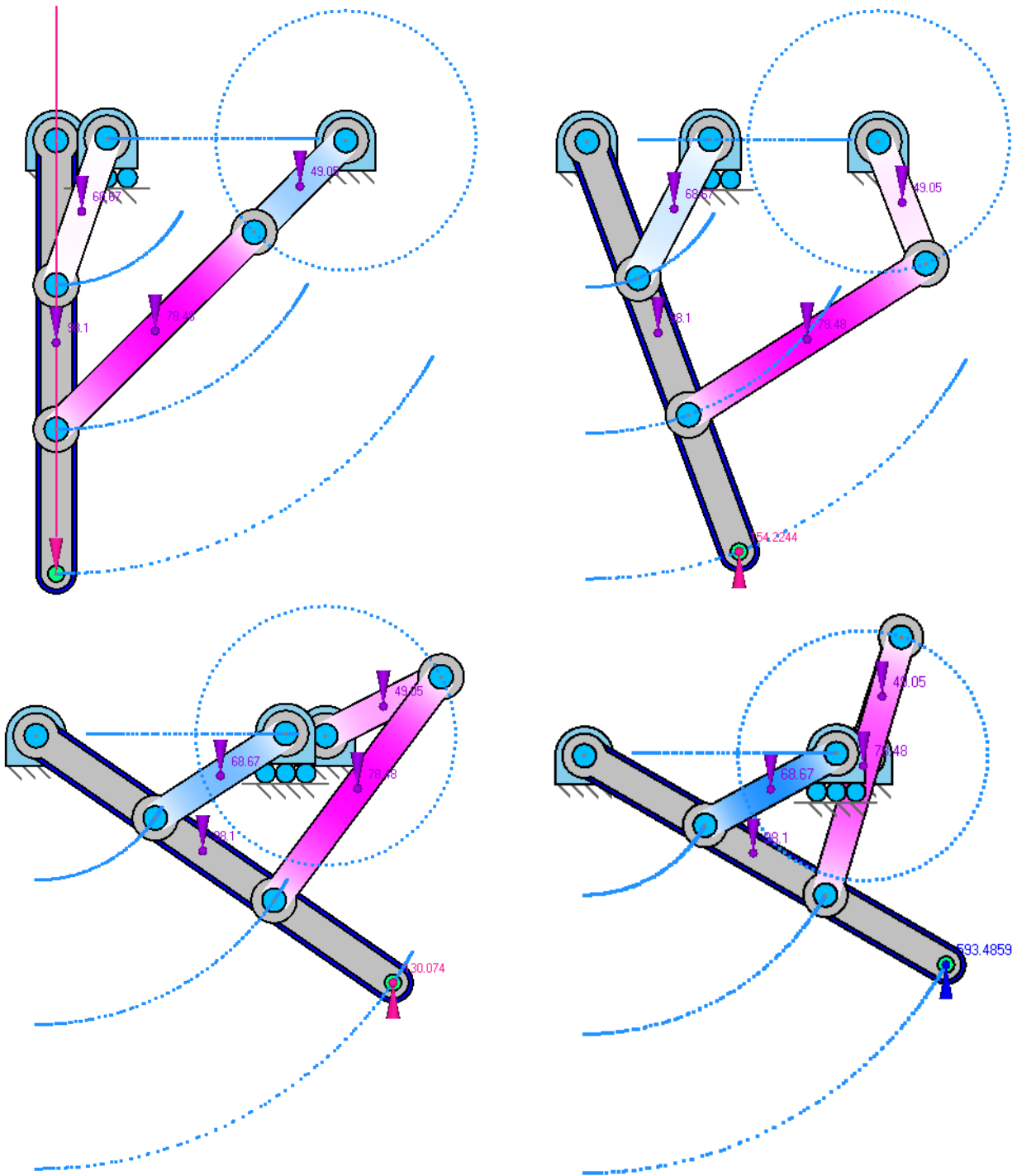


Ilustración 35. Secuencia del movimiento del análisis dinámico

En la anterior secuencia también se puede ver como las barras toman distintos colores, este es un nuevo método visual y no numérico para conocer el valor de esfuerzos en las barras, en este caso está representado el momento flector. Si toma color lila tiene un valor numérico positivo mientras que si es azul tiene un valor negativo.

También se pueden analizar los esfuerzos en las barras de forma clásica mediante los diagramas de esfuerzos. A continuación, se representan los diagramas de la barra 5.

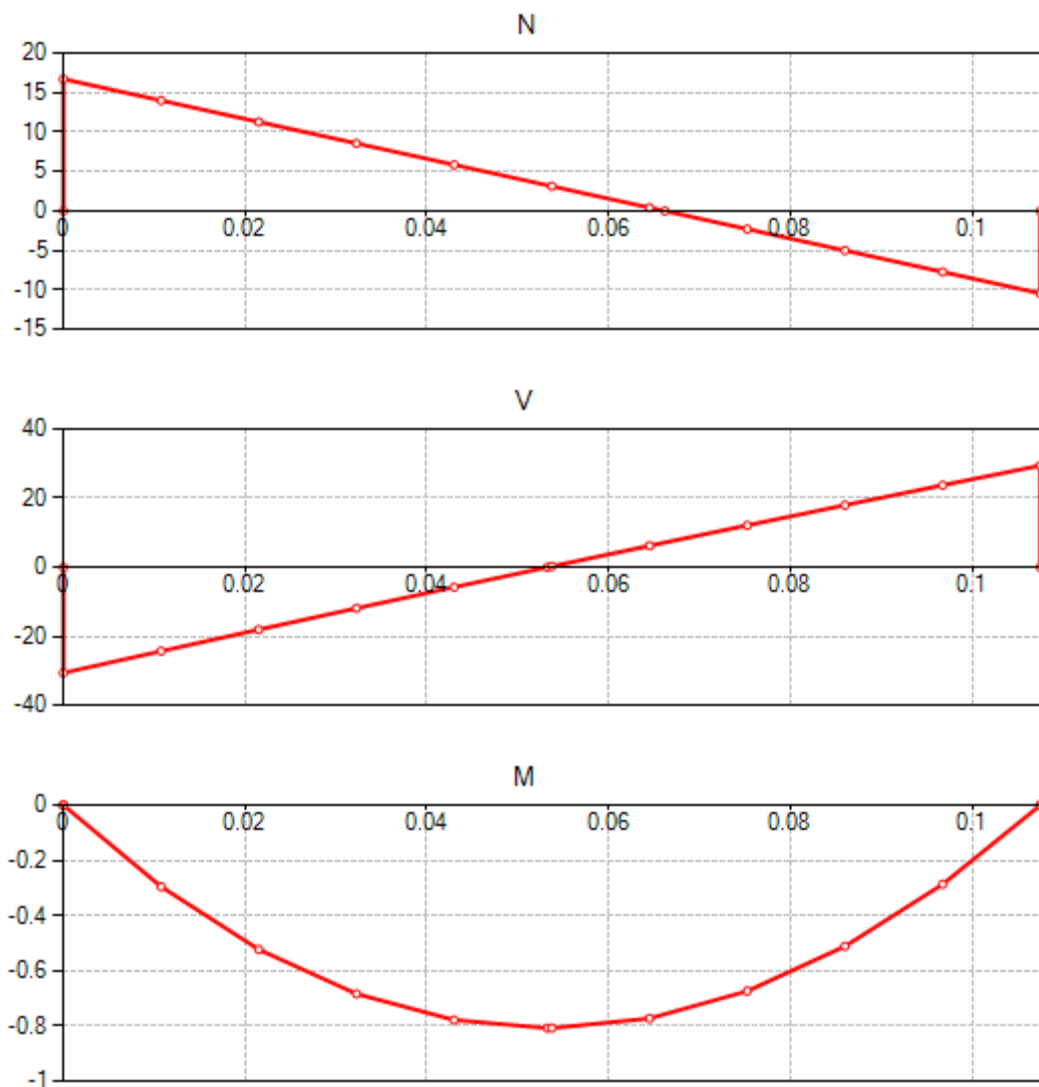


Ilustración 36. Diagramas de esfuerzo de la barra 5



Estos mismos diagramas se pueden ver de forma tridimensional, a continuación, se presentan los correspondientes a la barra 2.

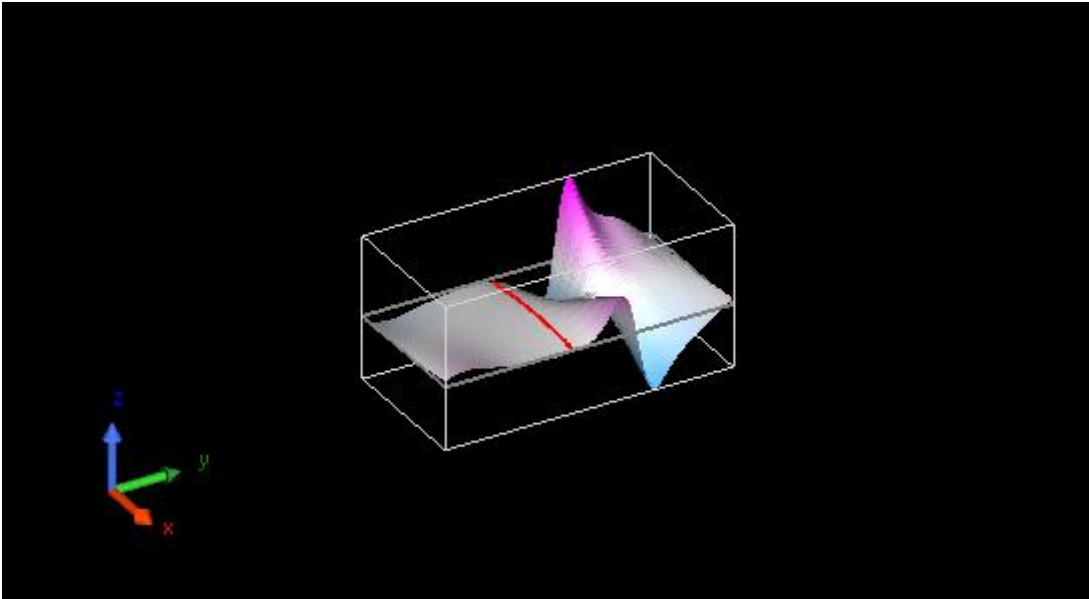


Ilustración 37. Esfuerzo V de la barra 2

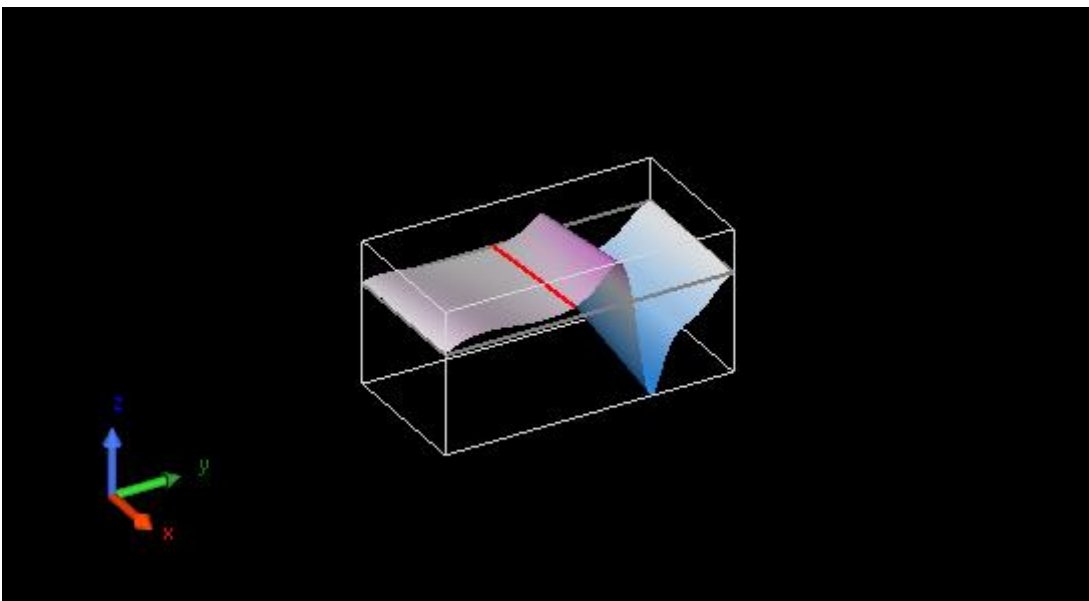


Ilustración 38. Esfuerzo N de la barra 2

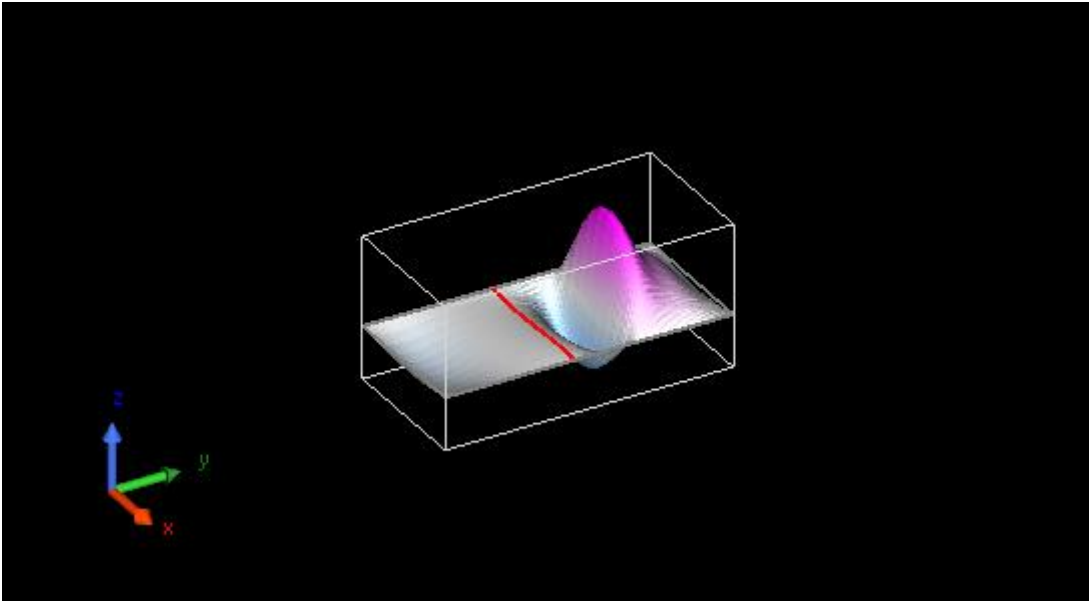


Ilustración 39. Esfuerzo M de la barra 2

De las anteriores gráficas se puede obtener información muy útil por ejemplo para la selección de refuerzos en las barras, así como para la elección de materiales. En este ejemplo concreto se puede ver como hay una zona de la barra 2 que sufre cambios muy bruscos en el esfuerzo  $V$  lo que generará grandes tensiones que pueden causar fatiga y rotura en la barra, es por esto que el análisis dinámico en simulaciones es imprescindible y el programa GIM facilita de forma sencilla e intuitiva se pueden obtener todos los elementos citados con anterioridad.

## 2. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

---

### 2.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos

En este apartado se describe el plan de trabajo que se ha seguido hasta la entrega del TFG, en Julio de 2019. Se ha trabajado de forma regular y continuada.

#### 2.1.1. Definición de tareas

Equipo de trabajo: Leire Landaluce Blanco y Mónica Urizar Arana

Fecha de inicio del TGF: 21 de enero

Fecha de finalización del TFG: 2 julio 2019

Duración: 116 días

Definición de paquetes de trabajo y tareas:

Tarea 1: Estado del arte e introducción. Duración: 81 días

##### T 1.1: Recopilación

En este periodo, no solo se recopilará información sobre mecanismos en libros y artículos, sino que también se hará un estudio intensivo del software GIM para el uso en siguientes tareas del mismo

##### T 1.2: Síntesis

Se seleccionarán los artículos a utilizar, así como los mecanismos a estudiar

Tarea 2: Modelización. Duración: 10 días

La modelización completa se efectuará en un ordenador personal con la supervisión de la tutora.

##### T 2.1: Modelización cinemática

##### T 2.2: Modelización dinámica

Tarea 3: Análisis de grados de libertad. Duración: 2 días

Se calcularán mediante Grübler los grados de libertad de ambos mecanismos.

Tarea 4: Análisis de movilidad. Duración: 3 días

Se estudiarán las configuraciones específicas que producen situaciones especiales en el movimiento, conocidas como puntos de bloqueo.

##### T 4.1: Configuraciones

#### T 4.2: Posiciones de bloqueo

Tarea 5: Análisis de otras características. Duración: 3 días.

##### T 5.1: Características cinemáticas

Tarea 6: Análisis de Workspace. Duración 2 días.

Este análisis del Workspace es importante para el diseño de elementos contiguos a los mecanismos estudiados.

##### T 6.1: características del área de barrido

Tarea 7. Presentación de resultados. Duración 15 días.

## 2.2. Diagrama de Gantt

Tabla 1. Información sobre el diagrama Gantt

Id	EDT	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1	<b>1</b>	<b>Proyecto TFG</b>	<b>116 días</b>	<b>lun 21/01/19</b>	<b>mar 02/07/19</b>
2	H1	<b>Hito: Comienzo de proyecto</b>	0 días	lun 21/01/19	lun 21/01/19
3	<b>P.T.1</b>	<b>Estado del arte e introducción</b>	<b>81 días</b>	<b>lun 21/01/19</b>	<b>lun 13/05/19</b>
4	T. 1.1	Recopilación	46 días	lun 21/01/19	lun 25/03/19
5	T. 1.2	Síntesis	35 días	mar 26/03/19	lun 13/05/19
6	H2	<b>Hito: redacción del estado del arte e introducción</b>	0 días	mar 14/05/19	mar 14/05/19
7	<b>P.T.2</b>	<b>Modelización</b>	<b>10 días</b>	<b>mar 14/05/19</b>	<b>lun 27/05/19</b>
8	T.2.1	Modelización cinemática	7 días	mar 14/05/19	mié 22/05/19
9	T.2.2	Modelización dinámica	3 días	jue 23/05/19	lun 27/05/19
10	H3	<b>Hito: finalización de la modelización</b>	0 días	mar 28/05/19	mar 28/05/19
11	<b>P.T.3</b>	<b>Análisis de grados de libertad</b>	<b>2 días</b>	<b>mar 28/05/19</b>	<b>mié 29/05/19</b>
12	T.3.1	Grados de libertad	2 días	mar 28/05/19	mié 29/05/19
13	<b>P.T.4</b>	<b>Análisis de movilidad</b>	<b>3 días</b>	<b>jue 30/05/19</b>	<b>lun 03/06/19</b>
14	T.4.1	Configuraciones	2 días	jue 30/05/19	vie 31/05/19
15	T.4.2	Posiciones de bloqueo	1 día	lun 03/06/19	lun 03/06/19
16	<b>P.T.5</b>	<b>Análisis de otras características</b>	<b>3 días</b>	<b>mar 04/06/19</b>	<b>jue 06/06/19</b>
17	T.5.1	Características cinemáticas	3 días	mar 04/06/19	jue 06/06/19
18	<b>P.T.6</b>	<b>Análisis de Workspace</b>	<b>2 días</b>	<b>vie 07/06/19</b>	<b>lun 10/06/19</b>
19	T.6.1	Características del área de barrido	2 días	vie 07/06/19	lun 10/06/19
20	H4	<b>Hito: redacción de resultados del análisis</b>	0 días	mar 11/06/19	mar 11/06/19
21	<b>P.T.7</b>	<b>Presentación de resultados</b>	<b>15 días</b>	<b>mar 11/06/19</b>	<b>lun 01/07/19</b>
22	H5	Hito: Entrega del trabajo	0 días	mar 02/07/19	mar 02/07/19

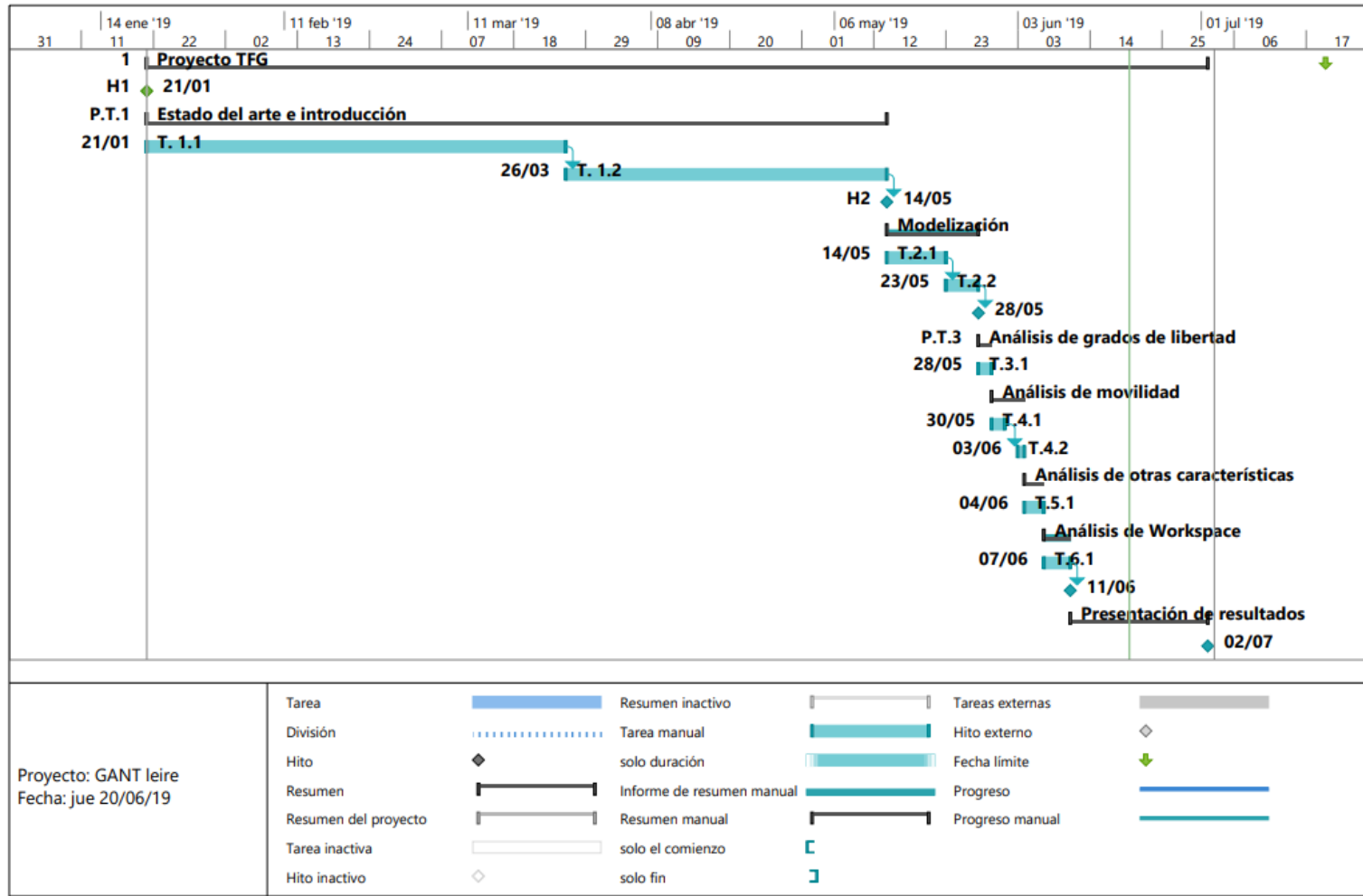


Ilustración 40. Diagrama Gantt

## 2.3. Cálculos, algoritmos

### 2.3.1 Tipos de problemas y diseños

Para el diseño del cualquier mecanismo en la realidad se tiene que seguir meticulosamente un proceso de creación, el cual está ilustrado en el siguiente diagrama de flujo, partiendo de la función objetivo a cumplir por el diseño hasta conseguir finalmente el mecanismo final.

En este caso se va a analizar el mecanismo citado mediante el método directo y mediante el método inverso.

El problema dinámico directo consiste en calcular el movimiento de un sistema mecánico, así como las reacciones en los pares y el valor de las resistencias pasivas, conocidas todas las acciones aplicadas tanto motoras como resistentes.

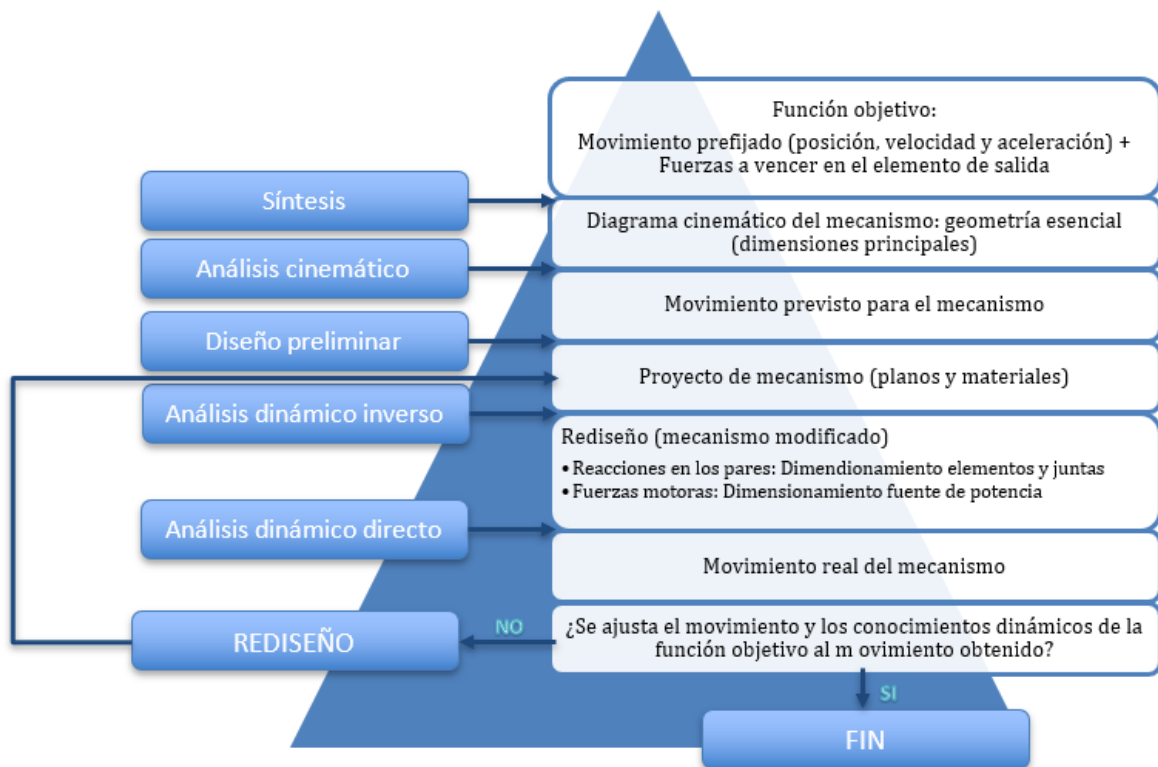


Figura 11. Fases del diseño de un mecanismo

El método dinámico inverso o problema citostático, consiste en calcular las acciones motoras que se han de suministrar al sistema mecánico para la consecución de un movimiento deseado,

### 2.3.2 Cálculo de grados de libertad

Para la utilización del método directo o problema dinámico es esencial el conocer el número de grados de libertad del mecanismo, ya que un mecanismo debe llevar tantos accionamientos como gdl tenga. Para ello se pueden utilizar el criterio de Grübler para el caso plano y el criterio de Malishev para mecanismos espaciales [18].

Suponiendo un mecanismo formado por  $N$  elementos rígidos conectados mediante  $P_I$  pares de clase  $I$  y  $P_{II}$  pares clase  $II$ . El número total de gdl de todos los elementos del mecanismo liberados de todo tipo de restricción es:  $3N$

El número de gdl que se restringen al fijar el elemento fijo es: 3. El número de gdl que restringen  $P_I$  pares de clase  $I$  es:  $2P_I$ . El número de gdl que restringen  $P_{II}$  pares de clase  $II$  es:  $P_{II}$ . Por tanto, el número de gdl de un mecanismo plano es:

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

Ésta es la denominada fórmula de Grübler para el caso plano.

La extensión del criterio de Grübler a mecanismos espaciales se conoce como criterio de Malishev y toma la forma:

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

Hay que tener en cuenta que los mecanismos citados no tienen en cuenta tres tipos de inconsistencias que son:

- Restricciones redundantes
- Grados de libertad inoperantes
- Singularidades

### 2.3.3 Obtención de las ecuaciones del movimiento para el mecanismo limador

El primer paso es hacer la simplificación óptima, para poder así representar en el programa GIM el mecanismo.

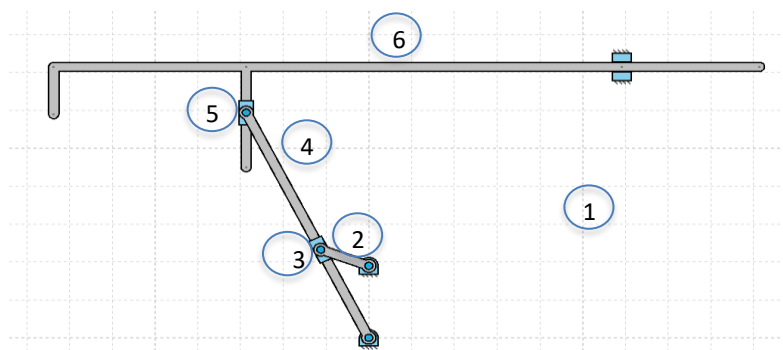


Ilustración 41. Representación significativa de la lijadora en GIM (II)



Teniendo en cuenta que el momento aplicado en el elemento de entrada es constante (con valor 100 Nm por ejemplo, se puede elegir el más adecuado en nuestra simulación, o variarlo en el proceso). El mecanismo parte del reposo. La incógnita es el movimiento del mecanismo a lo largo del tiempo.

La resolución se lleva a cabo mediante el método de Zhukovski. Se tomará como elemento de reducción el elemento de entrada del mecanismo. Para calcular la inercia reducida y el momento reducido se ha de resolver, en primer lugar, el campo de velocidades del mecanismo según el esquema de variables de la Ilustración 2.

El método de Zhukovski puede enunciarse como: *“Elegido un elemento cualquiera de un mecanismo de un grado de libertad y con CIR fijo, al que se denominará elemento de reducción, se puede tomar ese elemento aisladamente como representativo del mecanismo, dándole inercia o masa equivalente y aplicándole un momento o fuerza equivalente de forma que el movimiento del elemento sea el mismo tanto aisladamente como perteneciente al mecanismo”* [19].

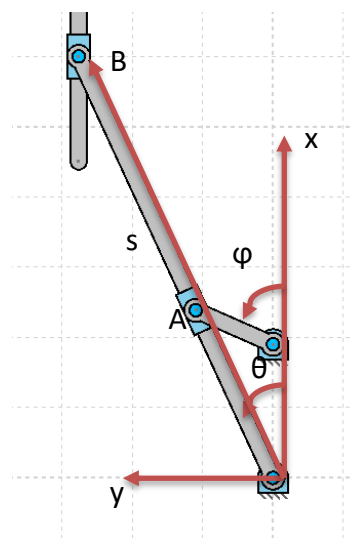


Ilustración 42. Parámetros cinemáticos del mecanismo 1º

Al tratarse de un mecanismo plano de dos lazos, pueden establecerse las siguientes cuatro ecuaciones algebraicas de cierre:

$$y = \overline{O_2A} \operatorname{sen}\theta$$

$$x = \overline{O_2A} \operatorname{cos}\theta$$

$$s \operatorname{cos}\theta - \overline{O_1B} \operatorname{cos}\varphi = \overline{O_1O_2}$$

$$s \operatorname{sen}\theta - \overline{O_1B} \operatorname{sen}\varphi = 0$$

A partir de las anteriores ecuaciones se van a obtener las expresiones de las variables secundarias en función de la variable de reducción (la coordenada generalizada  $\varphi$ ), se pueden deducir las siguientes expresiones:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\overline{O_1 B} \operatorname{sen}\varphi}{\overline{O_1 O_2} + \overline{O_1 B} \operatorname{cos}\varphi}\right)$$

$$s = \sqrt{(\overline{O_1 B})^2 + (\overline{O_1 O_2})^2 + 2 \overline{O_1 B} \operatorname{cos}\varphi}$$

Así las ecuaciones  $x$  e  $y$  pueden representarse como:

$$y = \overline{O_2 A} \frac{\overline{O_1 B} \operatorname{sen}\varphi}{\sqrt{(\overline{O_1 B})^2 + (\overline{O_1 O_2})^2 + 2 \overline{O_1 B} \operatorname{cos}\varphi}}$$

$$x = \overline{O_2 A} \frac{\overline{O_1 O_2} + \overline{O_1 B} \operatorname{cos}\varphi}{\sqrt{(\overline{O_1 B})^2 + (\overline{O_1 O_2})^2 + 2 \overline{O_1 B} \operatorname{cos}\varphi}}$$

Para calcular la inercia y el momento reducido hace falta resolver el problema de velocidades, pueden derivarse directamente las ecuaciones de  $\theta$  y  $s$  o bien derivar implícitamente las primeras ecuaciones obtenidas y despejar las velocidades incógnitas, teniendo en cuenta que  $\overline{O_1 B} = r$ , se obtiene:

$$\dot{s} = \dot{\varphi} r \operatorname{sen}(\theta - \varphi)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\varphi} \frac{r}{s} \operatorname{cos}(\theta - \varphi)$$

$$\dot{y} = \dot{\varphi} \frac{rx}{s} \operatorname{cos}(\theta - \varphi)$$

$$\dot{x} = -\dot{\varphi} \frac{ry}{s} \operatorname{cos}(\theta - \varphi)$$

Para el cálculo del momento reducido se igualan las potencias desarrolladas por todas las fuerzas aplicadas a la potencia desarrollada por el momento reducido. Obviando la potencia desarrollada por las fuerzas de gravedad se tiene:

$$M^*(\varphi)\dot{\varphi} = T \dot{\varphi} + (-F \dot{y})$$

Que puede reescribirse como:

$$M^*(\varphi) = T + -F \frac{r x(\varphi)}{s(\varphi)} \operatorname{cos}(\theta(\varphi) - \varphi)$$

Para el cálculo de la inercia reducida se iguala la energía cinética almacenada por los cuerpos del mecanismo original a la del mecanismo reducido:

$$\frac{1}{2} I_{O_1}^* (\dot{\varphi})^2 =$$

$$\frac{1}{2} I_{G_2} \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_{G_3} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{G_4} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{G_2}^2 + \frac{1}{2} m_3 v_B^2 + \frac{1}{2} m_4 v_{G_4}^2 + \frac{1}{2} m_5 v_A^2 + \frac{1}{2} m_6 \dot{y}^2$$

### 2.3.4. Obtención de medidas y/o posiciones particulares y ecuaciones de movimiento para el mecanismo de tren de aterrizaje

Para el mecanismo de tren de aterrizaje, accionado mediante un actuador hidráulico, que empuja la deslizadera, teniendo en cuenta la variable  $s$  como variable de entrada:

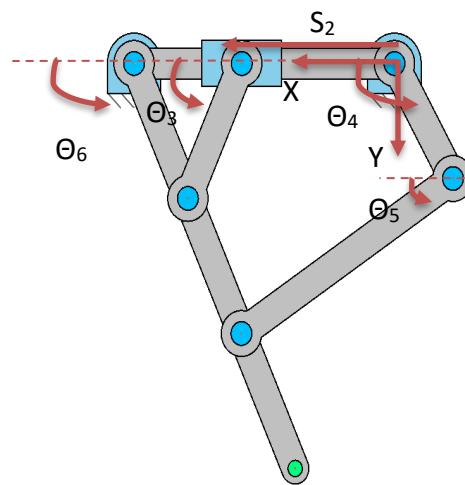


Ilustración 43. Representación significativa del tren de aterrizaje en GIM

Se tendrán en cuenta las siguientes longitudes de las barras del mecanismo, para que el movimiento pueda variar entre la posición plegada durante el vuelo, con el ángulo  $\theta_6 = 150^\circ$ , y con la posición desplegada, es decir para el momento del aterrizaje con valor del ángulo  $\theta_6 = 90^\circ$

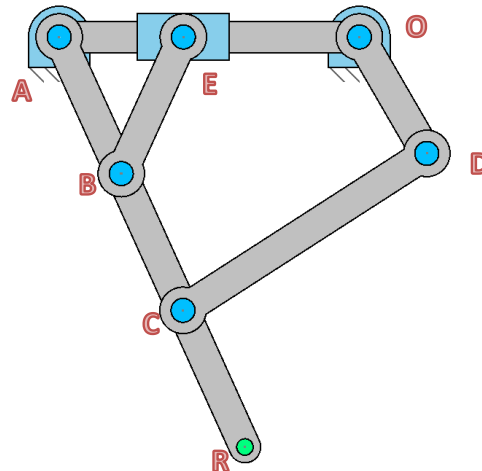


Ilustración 44. Parámetros cinemáticos del mecanismo 2º

Las dimensiones del elemento son las siguientes tomando L como una medida de referencia:

$$\overline{OA} = 2L$$

$$\overline{AB} = 2$$

$$\overline{BC} = L$$

$$\overline{OA} = 2L$$

$$\overline{CR} = L$$

$$\overline{EB} = L$$

$$\overline{OD} = l_4$$

$$\overline{DC} = l_5$$

Teniendo todas las longitudes en función de L y teniendo en cuenta la variable  $S_2$  como variable de entrada y las variables  $\theta_3, \theta_4, \theta_5,$  y  $\theta_6$  son variables secundarias.

En este caso se va a utilizar un método analítico para analizar el planteamiento de las ecuaciones de velocidad, así como las ecuaciones de posición. Se utiliza a continuación el método de los lazos.

Se van a utilizar tantas ecuaciones escalares de posición como variables secundarias, es decir:

$$n^{\circ} \text{ variables secundarias} = n^{\circ} \text{ variables escalares} = 4$$

4 ecuaciones escalares es el resultado de 2 ecuaciones vectoriales.

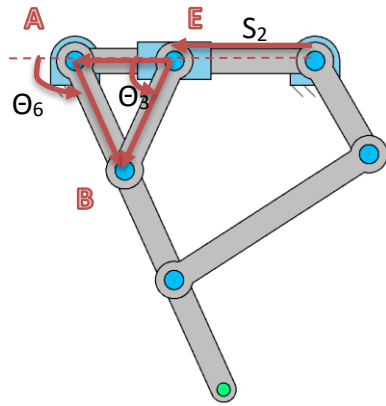


Ilustración 45. Lazo 1 tren de aterrizaje

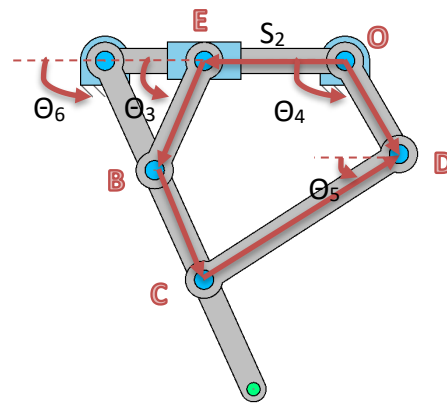


Ilustración 46. Lazo 2 tren de aterrizaje

LAZO 1

$$\vec{EA} + \vec{AB} = \vec{EB}$$

$$\begin{cases} x) 2L - S_2 + L \cos\theta_6 = L \cos\theta_3 \\ y) 0 + L \sin\theta_6 = L \sin\theta_3 \end{cases}$$

LAZO 2

$$\vec{CE} + \vec{EB} + \vec{BC} = \vec{OD} + \vec{DC}$$

$$\begin{cases} x) S_2 + L \cos\theta_3 + L \cos\theta_6 = l_4 \cos\theta_4 + l_5 \cos\theta_5 \\ y) 0 + L \sin\theta_3 + L \sin\theta_6 = l_4 \sin\theta_4 + l_5 \sin\theta_5 \end{cases}$$

Es decir, las ecuaciones de posición son las siguientes:

$$2L - S_2 + L \cos\theta_6 = L \cos\theta_3$$

$$0 + L \sin\theta_6 = L \sin\theta_3$$

$$S_2 + L \cos\theta_3 + L \cos\theta_6 = l_4 \cos\theta_4 + l_5 \cos\theta_5$$

$$0 + L \sin\theta_3 + L \sin\theta_6 = l_4 \sin\theta_4 + l_5 \sin\theta_5$$

Si se derivan estas ecuaciones respecto al tiempo se determinarán las ecuaciones de velocidad y derivando estas se determinarán las ecuaciones de aceleración.

$$-\dot{S}_2 - \dot{\theta}_6 L \sin\theta_6 = -\dot{\theta}_3 L \sin\theta_3$$

$$\dot{\theta}_6 L \cos\theta_6 = \dot{\theta}_3 L \cos\theta_3$$

$$\dot{S}_2 - \dot{\theta}_3 L \sin\theta_3 - \dot{\theta}_6 L \sin\theta_6 = -l_4 \dot{\theta}_4 \sin\theta_4 - l_5 \dot{\theta}_5 \sin\theta_5$$

$$\dot{\theta}_3 L \dot{\cos}\theta_3 + \dot{\theta}_6 L \dot{\cos}\theta_6 = \dot{\theta}_4 l_4 \dot{\cos}\theta_4 + \dot{\theta}_5 l_5 \dot{\cos}\theta_5$$

Para obtener las longitudes exactas de  $l_4$  y  $l_5$  en función de una longitud  $L$  de referencia ha de hacerse teniendo en cuenta el uso que se le va a dar al mecanismo, en este caso el tren de aterrizaje debe funcionar entre las posiciones de plegado y de desplegado es decir el ángulo  $\theta_6$  debe oscilar entre  $90^\circ$  y  $150^\circ$ , es decir entre las posiciones de bloqueo del mecanismo.

Para el análisis de singularidades, la posición del mecanismo está gobernada por el sistema de  $n$  ecuaciones que relacionan  $(n+F)$  coordenadas lagrangianas, de las cuales  $F$  son generalizadas y  $n$  secundarias. Este punto de partida asume implícitamente la independencia funcional entre las  $n$  ecuaciones del sistema. No obstante, esta circunstancia está regida por el rango de la matriz jacobiana del sistema.

Para encontrar estas longitudes se va a utilizarla matriz jacobiana.

Ecuaciones de velocidad:

$$-\dot{S}_2 - \dot{\theta}_6 L \dot{\sin}\theta_6 = -\dot{\theta}_3 L \dot{\sin}\theta_3$$

$$\dot{\theta}_6 L \dot{\cos}\theta_6 = \dot{\theta}_3 L \dot{\cos}\theta_3$$

$$\dot{S}_2 - \dot{\theta}_3 L \dot{\sin}\theta_3 - \dot{\theta}_6 L \dot{\sin}\theta_6 = -l_4 \dot{\theta}_4 \dot{\sin}\theta_4 - l_5 \dot{\theta}_5 \dot{\sin}\theta_5$$

$$\dot{\theta}_3 L \dot{\cos}\theta_3 + \dot{\theta}_6 L \dot{\cos}\theta_6 = \dot{\theta}_4 l_4 \dot{\cos}\theta_4 + \dot{\theta}_5 l_5 \dot{\cos}\theta_5$$

En forma matricial las mismas toman la forma:

$$\begin{bmatrix}
 L \dot{\sin}\theta_3 & 0 & 0 & -L \dot{\sin}\theta_6 & -1 \\
 -L \dot{\cos}\theta_3 & 0 & 0 & L \dot{\cos}\theta_6 & 0 \\
 -L \dot{\sin}\theta_3 & l_4 \dot{\sin}\theta_4 & l_5 \dot{\sin}\theta_5 & -L \dot{\sin}\theta_6 & 1 \\
 L \dot{\cos}\theta_3 & -l_4 \dot{\cos}\theta_4 & -l_5 \dot{\cos}\theta_5 & L \dot{\cos}\theta_6 & 0
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{Bmatrix}
 \dot{\theta}_3 \\
 \dot{\theta}_4 \\
 \dot{\theta}_5 \\
 \dot{\theta}_6 \\
 \dot{S}_2
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{Bmatrix}$$

Jacobiano de las variables secundarias o de salida:  $J_s$

Jacobiano de entrada:  $J_e$

Jacobiano del sistema  $J$

Vector de velocidad de las variables secundarias

Velocidad de la coordenada generalizada (entrada)

Singularidad en el problema directo. Este tipo de singularidad no altera el número de gdl del ciclo completo del mecanismo, sin embargo, afecta localmente a su movilidad. Para detectarla se parte de la ecuación de velocidades expresada según la ecuación  $J_S \dot{s} = -J_E \dot{\phi}$ . El mecanismo alcanza una singularidad de este tipo cuando el determinante de la matriz  $J_S$  se anula.

En esta posición el mecanismo puede tener una entrada  $\dot{\phi}$  nula, que sin embargo permite un movimiento no nulo en los elementos dependientes de las variables  $\dot{s}$ . A veces se consigue eliminar las variables pasivas, de forma que las componentes de  $\dot{s}$  sean exclusivamente variables de salida. De esta manera queda un sistema que relaciona directamente las variables de salida con las de entrada. Por otro lado,  $J_S$  debe tener el mismo rango que la matriz ampliada. Ello obliga a que exista una dependencia lineal entre las variables de entrada  $\dot{\phi}$ . En los mecanismos de Gdl esto significa una posición de bloqueo ( $\dot{\phi} = \mathbf{0}$ )”[20].

Resolviendo de tal forma que  $|J_S| = 0$

$$\begin{vmatrix} L \operatorname{sen} \theta_3 & 0 & 0 & -L \operatorname{sen} \theta_6 \\ -L \operatorname{cos} \theta_3 & 0 & 0 & L \operatorname{cos} \theta_6 \\ -L \operatorname{sen} \theta_3 & l_4 \operatorname{sen} \theta_4 & l_5 \operatorname{sen} \theta_5 & -L \operatorname{sen} \theta_6 \\ L \operatorname{cos} \theta_3 & -l_4 \operatorname{cos} \theta_4 & -l_5 \operatorname{cos} \theta_5 & L \operatorname{cos} \theta_6 \end{vmatrix} = 0$$

$$L \operatorname{sen} \theta_6 \begin{vmatrix} 0 & 0 & L \operatorname{cos} \theta_6 \\ l_4 \operatorname{sen} \theta_4 & l_5 \operatorname{sen} \theta_5 & -L \operatorname{sen} \theta_6 \\ -l_4 \operatorname{cos} \theta_4 & -l_5 \operatorname{cos} \theta_5 & L \operatorname{cos} \theta_6 \end{vmatrix} +$$

$$+ L \operatorname{sen} \theta_6 \begin{vmatrix} -L \operatorname{cos} \theta_3 & 0 & 0 \\ -L \operatorname{sen} \theta_3 & l_4 \operatorname{sen} \theta_4 & l_5 \operatorname{sen} \theta_5 \\ L \operatorname{cos} \theta_3 & -l_4 \operatorname{cos} \theta_4 & -l_5 \operatorname{cos} \theta_5 \end{vmatrix} = 0$$

Operando:

$$L^2 \operatorname{sen} \theta_3 \operatorname{cos} \theta_6 (-l_4 l_5 \operatorname{sen} \theta_4 \operatorname{cos} \theta_5 + l_4 l_5 \operatorname{cos} \theta_4 \operatorname{sen} \theta_5) - L^2 \operatorname{sen} \theta_6 \operatorname{cos} \theta_3 (-l_4 l_5 \operatorname{sen} \theta_4 \operatorname{cos} \theta_5 + l_4 l_5 \operatorname{cos} \theta_4 \operatorname{sen} \theta_5) = 0$$

$$(-\operatorname{sen} \theta_4 \operatorname{cos} \theta_5 + \operatorname{cos} \theta_4 \operatorname{sen} \theta_5)(L^2 l_4 l_5 \operatorname{sen} \theta_3 \operatorname{cos} \theta_6 - L^2 l_4 l_5 \operatorname{cos} \theta_3 \operatorname{sen} \theta_6) = 0$$

Teniendo en cuenta las siguientes relaciones trigonométricas básicas:

$$\operatorname{sen}(a - b) = \operatorname{sen} a \operatorname{cos} b - \operatorname{cos} a \operatorname{sen} b$$

$$-\operatorname{sen}(a - b) = \operatorname{cos} a \operatorname{sen} b - \operatorname{sen} a \operatorname{cos} b$$

$$\begin{cases} -\operatorname{sen}\theta_4 \cos\theta_5 + \cos\theta_4 \operatorname{sen}\theta_5 = 0 & \rightarrow -\operatorname{sen}(\theta_4 + \theta_5) = 0 \\ L^2 l_4 l_5 \operatorname{sen}\theta_3 \cos\theta_6 - L^2 l_4 l_5 \cos\theta_3 \operatorname{sen}\theta_6 = 0 & \rightarrow \operatorname{sen}(\theta_3 + \theta_6) = 0 \end{cases}$$

Se puede así llegar a la conclusión:

$$\begin{array}{ll} -\operatorname{sen}(\theta_4 + \theta_5) = 0 & \operatorname{sen}(\theta_3 + \theta_6) = 0 \\ \operatorname{sen}(-\theta_4 - \theta_5) = 0 & \theta_3 + \theta_6 = 0 \\ -\theta_4 - \theta_5 = 0 & \theta_3 = -\theta_6 \\ -\theta_4 = \theta_5 & \end{array}$$

En la posición de plegado ocurrirá lo siguiente:  $\theta_6 = 150^\circ$

$$\begin{aligned} l_5 - l_4 &= (2L \operatorname{sen}15^\circ) * 2 \\ l_5 - l_4 &= 4L \operatorname{sen}15^\circ \\ l_5 - l_4 &= 4L \frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{4} \\ l_5 - l_4 &= L(\sqrt{6} - \sqrt{2}) \end{aligned}$$

En la posición de desplegado:  $\theta_6 = 90^\circ$

$$\begin{aligned} l_5 + l_4 &= (2L \operatorname{cos}45^\circ) * 2 \\ l_5 + l_4 &= 4L \operatorname{cos}45^\circ \\ l_5 + l_4 &= 4L \frac{\sqrt{2}}{2} \\ l_5 + l_4 &= 2\sqrt{2}L \end{aligned}$$

Si utilizamos las dos ecuaciones que hemos conseguido en las dos posiciones particulares de plegado y desplegado obtendremos un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas resoluble en función de la longitud L.

$$\begin{aligned} l_5 - l_4 &= L(\sqrt{6} - \sqrt{2}) \\ l_5 + l_4 &= 2\sqrt{2}L \end{aligned} \quad \text{que tiene como soluciones: } \begin{cases} l_4 = 0.84L \\ l_5 = 1.98L \end{cases}$$



## 3. ASPECTOS ECONÓMICOS

### 3.1. Descripción del presupuesto y/o del presupuesto ejecutado

En este capítulo se incluye el estudio económico, siendo una difícil tarea ya que al tratarse de un proyecto análisis y desarrollo influyen muchos factores siendo uno de los más importantes la experiencia del ingeniero para:

- Encontrar la bibliografía y estudios anteriores sobre la teoría y práctica relacionadas con el proyecto a realizar, así como investigaciones anteriores realizadas por el propio autor del estudio que le puedan ayudar a continuar en la misma línea de investigación.
- Proyectos similares realizados con lo que la nueva investigación sería de carácter paralelo a la actual y haciendo uso de la misma metodología que funcionó con éxito en otros proyectos.
- Equipo humano y su experiencia en la realización de proyectos similares.
- Material que se utiliza: software avanzado y adaptado, material más avanzado y más apropiado para realizar los sucesivos proyectos de análisis.

Por tanto, el tiempo empleado en el desarrollo del mecanismo depende directamente de la habilidad del equipo o de la persona encargada de hacer ese proceso.

A continuación, se incluyen unas tablas en las que van a quedar desglosadas los diferentes costes, directos, indirectos y totales.

Para calcular el gasto total del trabajo se ha tenido en cuenta los siguientes subapartados: recursos humanos, amortizaciones de materiales y gastos.

#### **Costes unitarios de recursos humanos**

En la siguiente tabla se calculan los costes unitarios de cada miembro del proyecto, teniendo en cuenta los costes indirectos de cada uno.

Tabla 2. Costes unitarios de los recursos humanos

Cargo	Coste unitario (€/h)
Director TFG	50
Ingeniero junior	20

### **Costes previstos debido a amortizaciones**

Son los costes realizados debido a material que constaba previamente antes del trabajo, y que debido a su uso en el proyecto se debe realizar su respectiva amortización. En este apartado se incluyen las herramientas de trabajo GIM y Microsoft Office.

Tabla 3. Costes semanales debido a las amortizaciones

Descripción	Vida útil (sem)	Coste inicial (€)	Coste unit. (€/sem)
Ordenador portátil	330	480,00	1,45
Orden. Sobremesa	330	850,00	2,58
GIM	400	-	-
GanttProject	400	-	-
Microsoft Office	220	100,00	0,45

### **Gastos de trabajo**

Son los gastos realizados en materiales que sirven en exclusividad para este trabajo, es decir, no podrán volver a ser utilizados.

Tabla 4. Costes totales en materiales

Descripción	Coste (€)
Material de oficina	80,00
Conexión a internet	50,00
Total: 120€	

### **Cálculo de costes finales**

A continuación, se realiza el desglose de coste total final teniendo en cuenta el número de horas empleadas por los recursos humanos y las horas de utilización de los materiales amortizados.

### **Costes finales de recursos humanos**

En la siguiente tabla se muestra el coste total de cada miembro del equipo teniendo en cuenta su participación en horas dentro del trabajo.

Tabla 5. Costes desglosados de los recursos humanos

Cargo	Tiempo (Horas)	Coste unitario(€/h)	Coste (€)
Director TFG	20	50,00	1.000,00
Ingeniero junior	250	20,00	5.000,00
			Total: 6.000,00€

### Costes finales de amortizaciones

Tabla 6. Costes desglosados de las amortizaciones

Descripción	Utilización (sem)	Coste unit (€/sem)	Coste(€)
Ordenador portátil	8	1,45	11,64
Ord. Sobremesa	6	2,58	15,45
GIM	10	0,00	0,00
GanttProject	2	0,00	0,00
Microsoft Office	8	0,45	3,64
			Total: 30,73€

### Resumen económico

Por último, en la Tabla 6 se representa el gasto final del trabajo desglosado en las facetas más importantes dentro del presupuesto, a los que añadimos un 5% en costes indirectos y un 10% de imprevistos adicional

Tabla 7. Costes exhaustivos desglosados y coste final del trabajo

Concepto	Tiempo	Coste unitario	Coste (€)
Recursos humanos			6.000,00€
Director TFG	20 h	50,00 €/h	1.000,00€
Ingeniero junior	250 h	20,00 €/h	5.000,00€
Amortizaciones			30,73€
Ordenador portátil	8 sem	1,45 €/sem	11,64€
Ord. Sobremesa	6 sem	2,58 €/sem	15,45€
GIM	10 sem	0,00 €/sem	0,00€
GanttProject	2 sem	0,00 €/sem	0,00€
Microsoft Office	8 sem	0,45 €/sem	3,64€
Gastos			120,00€
Material de oficina	Uds	80,00 €	80,00€
Conexión internet	uds	50,00€	50,00€

Gastos directos		6150,73€
Gastos indirectos	5%	307,53€
Subtotal primero		6.458,26€
Imprevistos	10%	645,82€
<b>TOTAL</b>		<b>7.104,08</b>

Tabla 8. Costes desglosados y coste final del trabajo

Concepto	Importe (€)
Recursos humanos	6.000,00
Recursos materiales	30,73
Gastos	120,00
<b>SUBTOTAL</b>	<b>6.150,73</b>
Costes indirectos (5%)	307,54
Costes imprevistos (10%)	615,07
<b>TOTAL</b>	<b>7.073,34€</b>

Por lo tanto, el gasto presupuestado final del trabajo asciende a 7.073,34€

### 3.2. Descargo de gastos

Con objeto de realizar un resumen una vez realizados todos los gastos del proyecto posterior a la ejecución de cada tarea se presenta la descarga de gastos. En este apartado por lo tanto no tiene cabida el apartado de imprevistos ya que una vez ejecutado el proyecto no aparecerán nuevos gastos.

Tabla 9. Descargos exhaustivos desglosados y coste final del trabajo

Concepto	Tiempo	Coste unitario	Coste (€)
Recursos humanos			7.000,00€
Director TFG	20 h	50,00 €/h	1.000,00€
Ingeniero junior	275 h	20,00 €/h	5.500,00€
Amortizaciones			30,73€
Ordenador portátil	8 sem	1,45 €/sem	11,64€
Ord. Sobremesa	6 sem	2,58 €/sem	15,45€
GIM	10 sem	0,00 €/sem	0,00€
GanttProject	2 sem	0,00 €/sem	0,00€
Microsoft Office	8 sem	0,45 €/sem	3,64€
Gastos			120,00€
Material de oficina	Uds	80,00 €	80,00€

<b>Conexión internet</b>	uds	50,00€	50,00€
<b>Gastos directos</b>			6.650,73€
<b>Gastos indirectos</b>	5%		332,53€
<b>TOTAL</b>			6.983,26€

El presupuesto inicial tenía un valor de 7.073,34€, sin embargo, el valor presentado en el descargo de gastos asciende a 6.983,26€, esto ha ocurrido ya que las horas previstas del ingeniero junior no eran suficientes y se han tenido que invertir 25 horas más para el óptimo control del programa GIM. Se puede concluir que el coste del proyecto ha quedado dentro del presupuesto previsto.

### 3.3. Análisis de riesgos

En este apartado se han de analizar los posibles riesgos que existen en el diseño del proyecto y que pueden poner en riesgo la ejecución del mismo.

Adoptar una actitud proactiva en lo referente a los riesgos es esencial para garantizar el éxito del mismo. Se deben barajar todos los posibles contratiempos a los que se verá expuesto durante el desarrollo del trabajo y evaluar los más relevantes o los de mayor impacto negativo.

Al tratarse de un TFG de simulación e investigación el mayor riesgo potencial al que se hace frente es el de la elección de las herramientas y del modelo estudiado. Para hacer frente a estos riesgos, se debe llevar a cabo un análisis de alternativas donde se localice la mejor y más segura opción. Por otro lado, se cuenta con la coordinación y dirección de un tutor, por lo que la verificación del modelo estudiado está garantizada por su amplia experiencia en el sector mecánico.

- **Riesgos A:** Uno de los posibles riesgos que existe es que se haya dimensionado cualquiera de los dos mecanismos y que en el proyecto se pierda algún tipo de información por falta de capacidad del pc, fallo del programa...
- **Riesgo B:** También podría ocurrir que una vez que se haya dimensionado toda la instalación no se cuente con el dinero necesario, ya que inicialmente se requiere una fuerte inversión económica, y, por lo tanto, no se pueda seguir adelante con el proyecto. **Riesgo C:** Otro posible riesgo es que el aparato donde van los mecanismos incluidos haya sido construido y posea la instalación óptima para el funcionamiento pero que posteriormente, puedan aparecer futuros desarrollos inesperados.
- **Riesgo D:** Además de los anteriores riesgos, también podrían suceder una serie de imprevistos muy fuertes, de una intensidad inesperada, que podrían

provocar la rotura de la instalación, como pueden ser un material demasiado duro para la lijadora o un viento fuerte que impida la apertura del puente de aterrizaje.

De esta manera se ha construido la matriz de priorización de riesgos pertinente, que nos permite evaluar de forma

Tabla 10. Matriz de priorización de riesgos

		Impacto		
		Bajo (0.1)	Medio (0.5)	Alto (0.8)
Probabilidad	Baja (0.2)	D (0.1)	C (0.25)	A (0.64)
	Media (0.5)	B (0.08)	C (0.25)	A (0.64)
	Alta (0.8)	B (0.08)	A (0.64)	A (0.64)

Esto supone que debería ponerse atención en los riesgos C y especialmente al A, para dar solución al mismo lo que se debe hacer es hacer copias de seguridad locales y extraíbles en todo momento para que en caso de pérdida o error el impacto sea el menor posible.

## 4. CONCLUSIONES

---

Como se pudo indicar en la parte de objetivos a cumplir en el proyecto, el estudio realizado abarca tanto el análisis cinemático como dinámico de mecanismos a modo de ejemplos ilustrativos, que nos permite valorar el grado de adecuación del diseño. Es muy valioso para decidir definitivamente si un diseño debe seguir siendo modificado para reducir los esfuerzos o ayudarnos a decidir entre la instalación de un mecanismo u otro.

Al tratarse de mecanismos sencillos en su mayoría, no constituidos por más de 5 barras podría realizarse un estudio dinámico de una manera convencional, pero se propone realizarlo con algún software tipo I-DEAS, con lo que también se puede experimentar con la elasticidad de los materiales y ajustarse aún más a la realidad, además de poder obtener todos los resultados de una manera simple, eficaz y rápida.

También se propone continuar el proyecto en el proceso de fabricación, en una cadena de fabricación y montaje.

Mediante el software GIM, se han podido diseñar y analizar dos mecanismos planos con aplicaciones prácticas, si bien sería interesante en un futuro poder analizar también mecanismos espaciales. Actualmente, el software puede realizar el análisis cinemático de mecanismos espaciales, pero el análisis dinámico no está todavía implementado para los casos espaciales. Se espera que próximamente pueda implementarse la dinámica para mecanismos espaciales.

En cuanto al uso de este tipo de recursos conocidos como programas no directivos donde el ordenador queda a disposición del alumno como instrumento interactivo en ámbitos educativos, es muy útil ya que proporciona entornos de exploración donde el alumno puede experimentar y comprobar las consecuencias de sus acciones, de manera que va construyendo un marco de referencia, unos esquemas de conocimiento, que facilitarán la posterior adquisición de nuevos conocimientos [21].

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *International Federation for the Promotion of Mechanisms and Machine Science*. (s.f.). Obtenido de <http://iftomm.net/>
- [2] A. Bilbao, E. A. (2006). *Mecánica Aplicada: Estática y cinemática*. Bilbao, España: Sección de Publicaciones ETSI de Bilbao.
- [3] Hernández, A. (2014). *Cinemática de Mecanismos: Análisis y diseño*. Bilbao, España: Sección de Publicaciones ETSI de Bilbao.
- [4] COMPMECH. (s.f.). «Software GIM». Available: <http://www.ehu.es/compmech/>.
- [5] *geometriadinamica.cl*. (s.f.). Obtenido de <http://www.geometriadinamica.cl/2005/09/geonext/>
- [6] Geogebra. (s.f.). Obtenido de <https://www.geogebra.org/en/wiki/index.php/Spanish>
- [7] SAM. (s.f.). Obtenido de <https://www.artas.nl/es/>
- [8] *Cinderella*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cinderella.de/tiki-index.php>
- [9] ANSYS. (s.f.). Obtenido de <https://www.ansys.com/>
- [10] *Catia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>
- [11] *Solid Works*. (s.f.). Obtenido de [https://discover.solidworks.com/es/solidworks-products?mktid=7773&gclid=EAlaIqobChMIwtCZupm\\_4wIWEETTCh3fpwQ-EAAYASAAEgIZLPD\\_BwE](https://discover.solidworks.com/es/solidworks-products?mktid=7773&gclid=EAlaIqobChMIwtCZupm_4wIWEETTCh3fpwQ-EAAYASAAEgIZLPD_BwE)
- [12] Departamento de ingeniería mecánica Universidad de Salamanca. (4 de Abril de 2019). *www.usal.es*. Obtenido de <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/evoluci%C3%B3n%20m%C3%A1quinas%20y%20mecanismos.htm>
- [13] Ruiz, P. T. (15 de Agosto de 2004). *Origen del Software Educativo y su relación con la Tecnología Educativa, Repensar Educativo*. Obtenido de <http://repensareducativo.com/origen-del-software-educativo-y-su-relacion-con-la-tecnologia-educativa-primera-parte/>
- [14] Novoa, V. D. (2 de Julio de 2013). *Uso del software educativo en el proceso de enseñanza y aprendizaje, Gestipolis*. Obtenido de <https://www.gestipolis.com/uso-del-software-educativo-en-el-proceso-de-ensenanza-y-aprendizaje/>
- [15] <http://www.tecnologia-tecnica.com>. (s.f.). Obtenido de [http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/limadora/index%20limadora\\_archivos/Page365.htm](http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/limadora/index%20limadora_archivos/Page365.htm)
- [16] *Universidad de la Serena*. (s.f.). Obtenido de <http://www.userena.cl.html>: <https://alexanderaraya.webcindario.com/>



- [17] Rafael Trallero, Ricardo Atienza y Malte Frövel. (Mayo de 2013). EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE EN LAS. *TECNOLOGÍA y DESARROLLO*, 13, 4-20.
- [18] Hernández, A. (2014). *Cinemática de Mecanismos: Análisis y diseño*. Bilbao, España: Sección de Publicaciones ETSI de Bilbao.
- [19] Myszka, D. H. (2012). *Cinemática de mecanismos. Análisis y diseño*. México: Pearson educación.
- [20] Hernandez, A. (2004). *Cinemática de mecanismos, análisis y diseño*. Madrid: Síntesis
- [21] Marqués, P. (s.f.). *El software educativo*. Universidad Autónoma de Barcelona.

## 6. ANEXO I: Diseño de detalle o de bajo nivel

A continuación, se exponen varios momentos de trayectorias teniendo el elemento móvil 4 como referencia, expuesto en el punto 1.7.1.2.

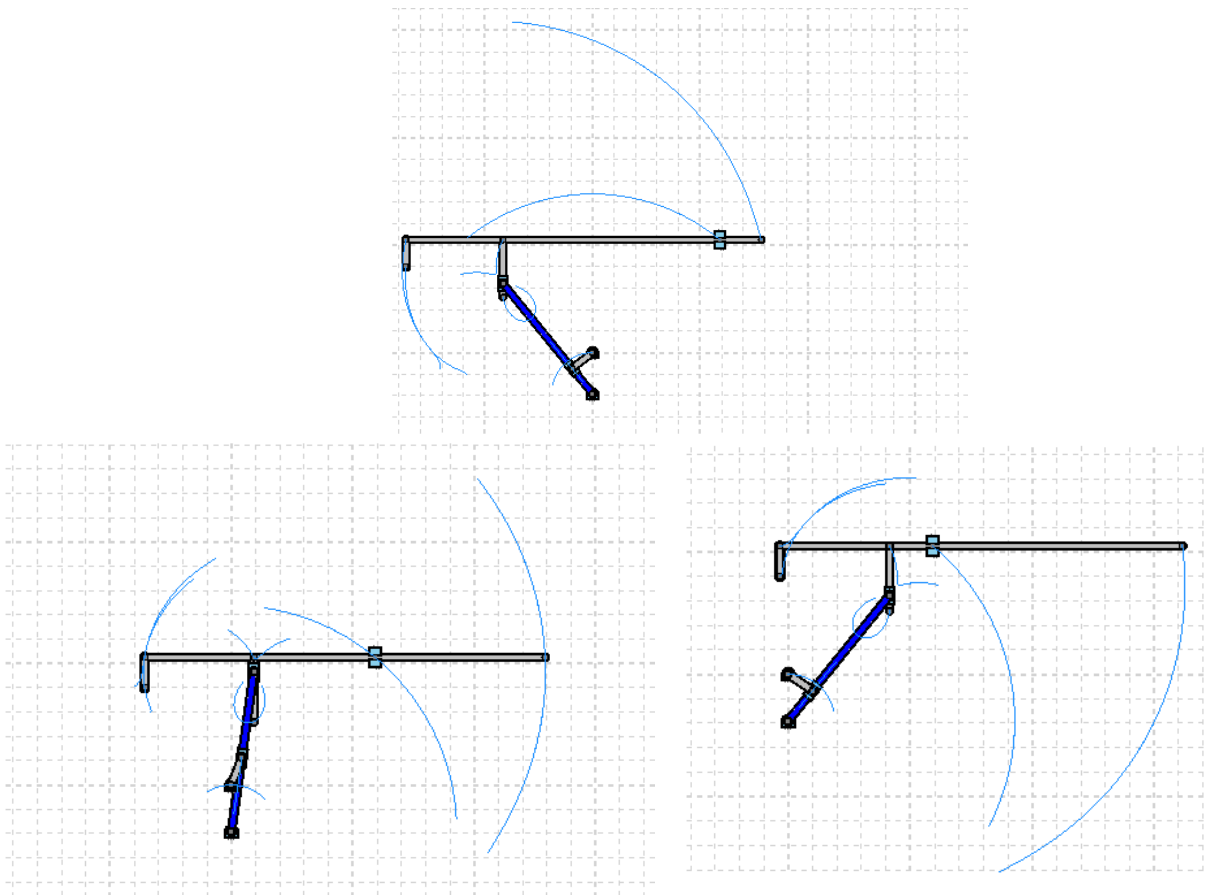


Ilustración 47. Distintas representaciones de las trayectorias siendo el elemento 4 la referencia

Información de las masas e inercias de algunos elementos:

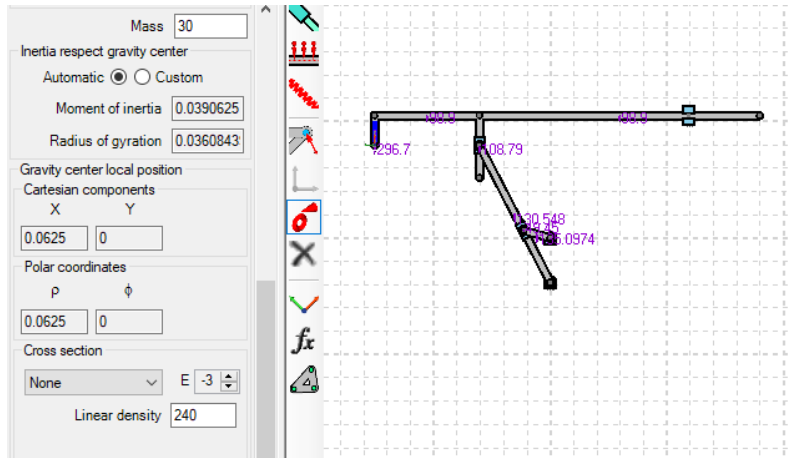


Ilustración 48. Masa e inercia del elemento 6 (I)

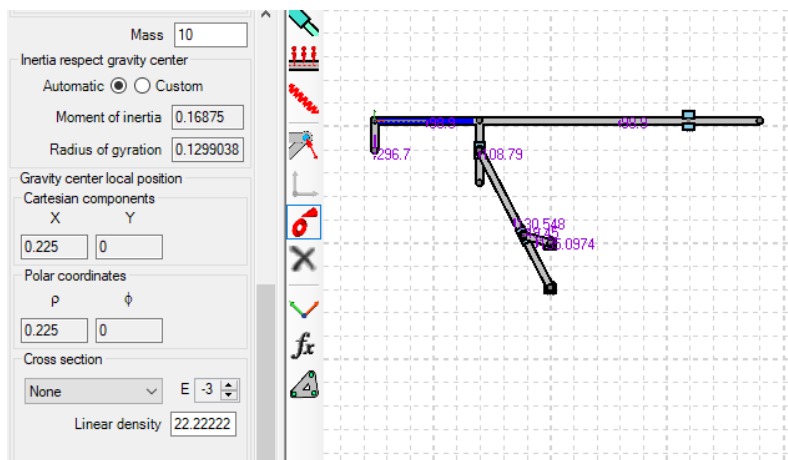


Ilustración 49. Masa e inercia del elemento 6 (II)

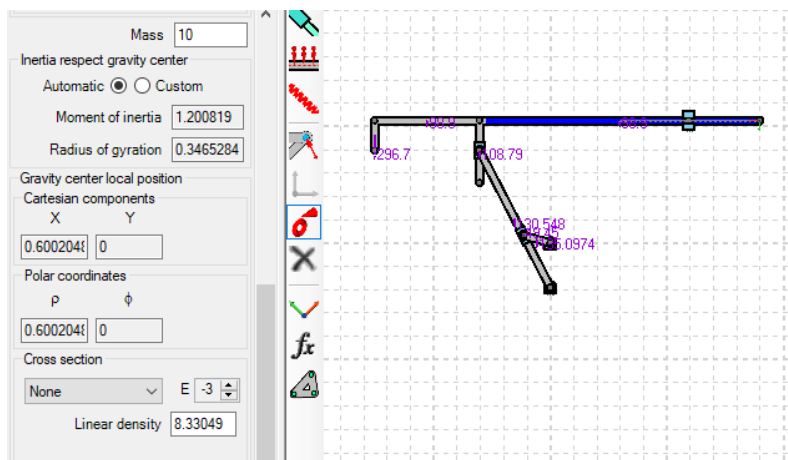


Ilustración 50. Masa e inercia del elemento 6 (III)

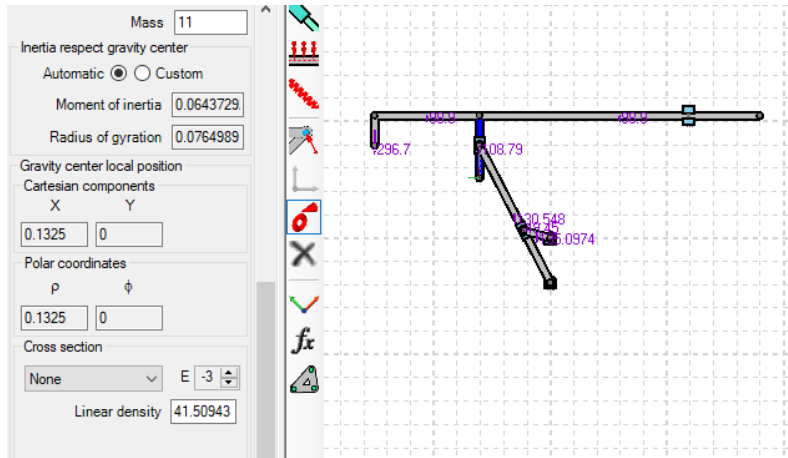


Ilustración 51. Masa e inercia del elemento 6 (IV)

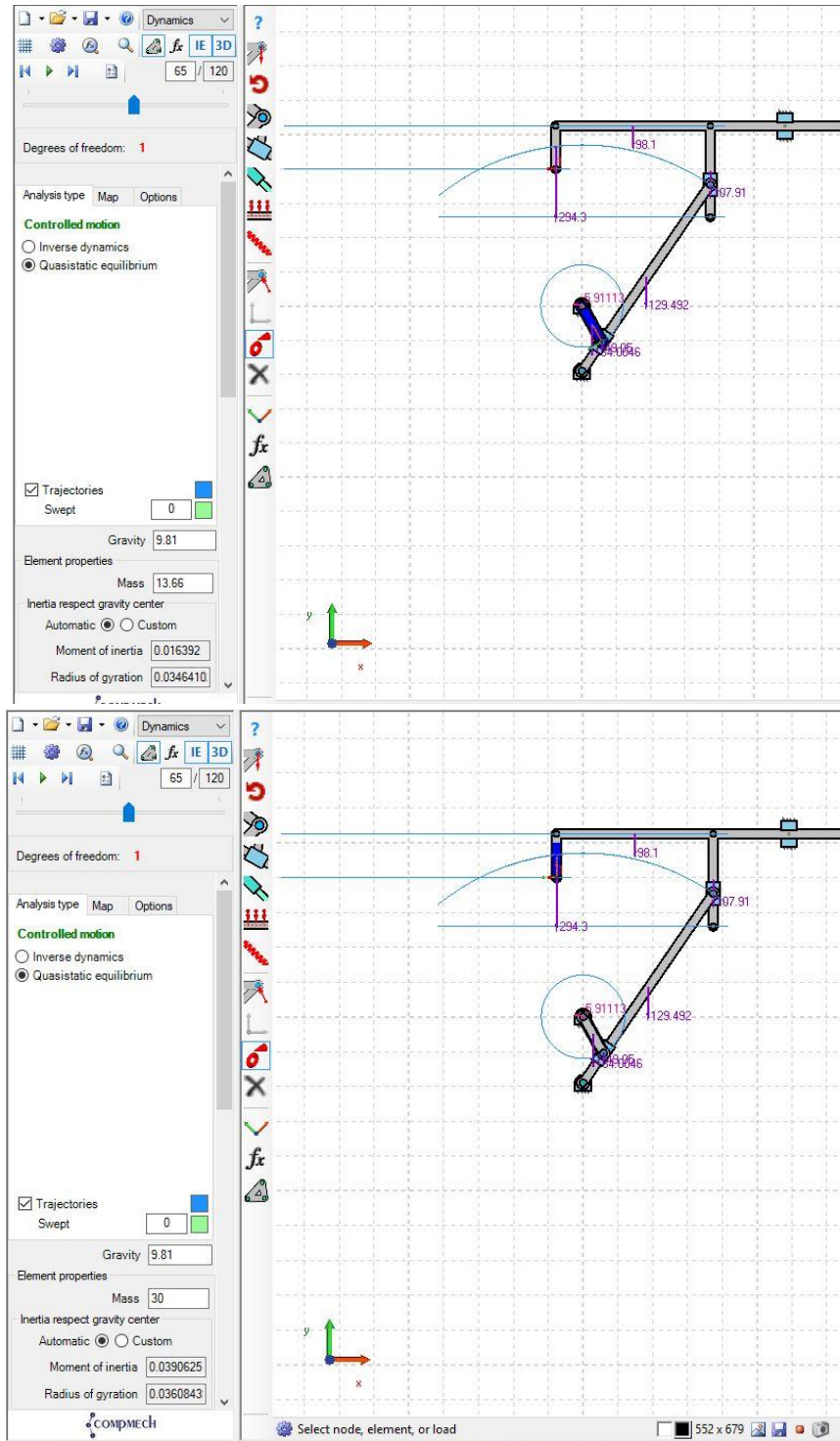


Ilustración 52. Información dinámica de distintos elementos. (masa / gravedad)



Ilustración 53. Comandos verticales dynamics

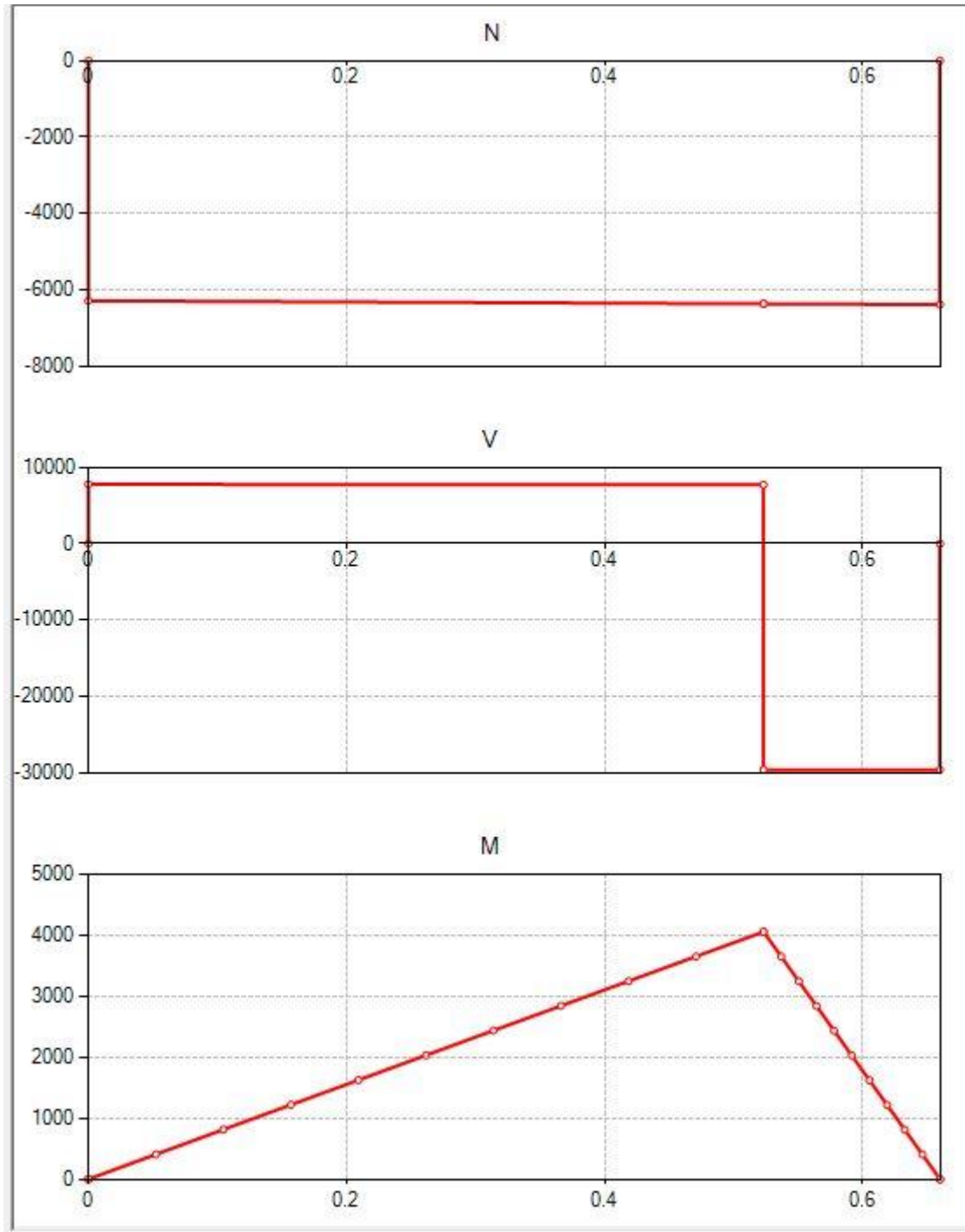


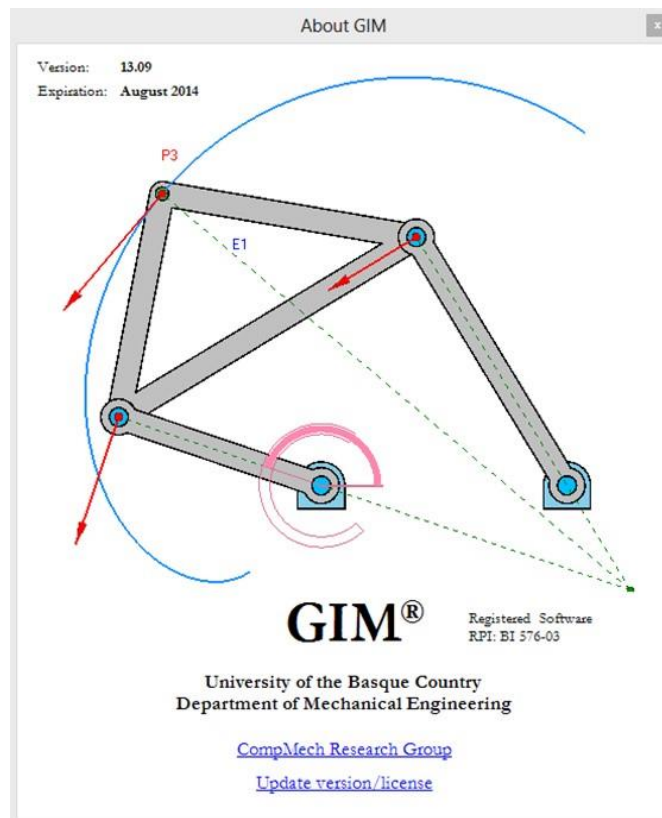
Ilustración 54. Diagrama de esfuerzos internos biela 2

## 7. ANEXO II: Manual de usuario

# Tutorial of GIM Software

## Part I: Kinematic Analysis

COMPMECH Research Group [www.ehu.es/compmech](http://www.ehu.es/compmech)



Faculty of Engineering in Bilbao  
Department of Mechanical Engineering  
University of the Basque Country (UPV/EHU)



## Contents

<b>1 What is GIM?</b> .....	<b>81</b>
1.1 Application of GIM software .....	82
1.2 Access to GIM software.....	82
<b>2 Main Modules in Kinematic Analysis</b> .....	<b>83</b>
2.1 Geometry module .....	83
2.1.1 Basic options.....	83
2.1.2 Defining the geometry of the mechanism .....	85
2.2 Motion module.....	86
2.2.1 Defining the input conditions.....	88
2.2.2 Getting into the kinematics .....	89
2.2.3 Graphical plots.....	92
<b>3 Examples of Planar Mechanisms</b> .....	<b>94</b>

### 1. What is GIM?

---

GIM is a registered software created by the COMPMECH Research Group, belonging to the Department of Mechanical Engineering of the University of the Basque Country (UPV/EHU). The software is intended for educational purposes, in particular destined to the field of kinematic analysis, motion simulation and synthesis of planar mechanisms, and also static analysis of mechanical structures.

This tutorial refers to GIM Software, Part I, which focuses on the kinematic analysis and motion simulation of mechanisms. Planar mechanisms with  $n$ -ary elements joined by revolute and prismatic pairs can be introduced. The position problem is solved iteratively using a numerical method, several of its conditions can be controlled and visualized. Inputs can be defined with a polynomial up to the quintic, so position, velocity and acceleration can be specified at motion extremes.

The program allows plotting the paths of points of interest, as well as the curvature center and curvature center locus of the trajectory, and also the area swept by specific elements of the mechanism can be depicted. Velocities and accelerations can be obtained and the corresponding vectors visualized as the motion is performed, also graphs and tables associated with this data can be plotted. Every kinematic construction can be represented: Instantaneous Center of Rotation (ICR), fixed and

moving polodes, acceleration pole, main circles (inflection circle, return circle and Bresse circle), and so on (see illustrative example in Fig. 1).

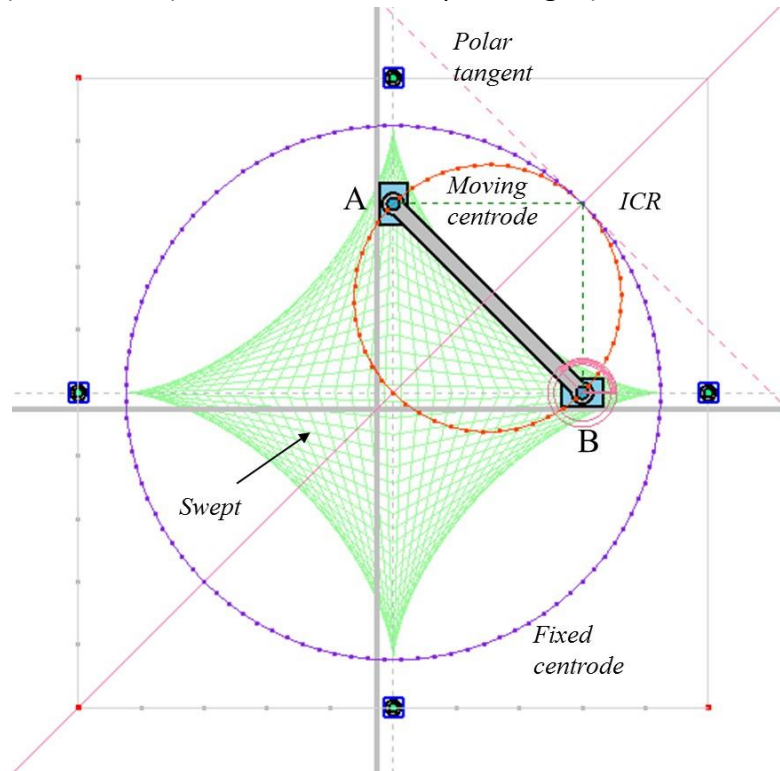


Figure 1: Illustrative example: PRRP mechanism

### 1.1. Application of GIM software

This software has been developed by COMPMECH Research Group with the aim of approaching the difficulties students usually encounter when facing up to kinematic analysis of mechanisms. A deep understanding of the kinematic analysis is necessary to go a step further into design and synthesis of mechanisms. In order to support and complement the theoretical lectures, GIM software is used during the practical exercises, serving as an educational complementary tool reinforcing the knowledge acquired by the students.

### 1.2. Access to GIM software

GIM software can be freely downloaded from the COMPMECH web site in the following link: <http://www.ehu.es/compmech/software/>

## 2. Main Modules in Kinematic Analysis

Regarding the kinematic analysis of planar mechanisms, GIM software has two main modules: Geometry and Motion.

- Geometry module is the one in charge of defining a specific design of the mechanism object of study.
- Motion module performs the kinematic analysis and motion simulation of the mechanism.

### 2.1. Geometry module

In Fig. 2, the starting main window associated with Geometry module is shown. In the following sections, the different options included in this module are explained in detail.

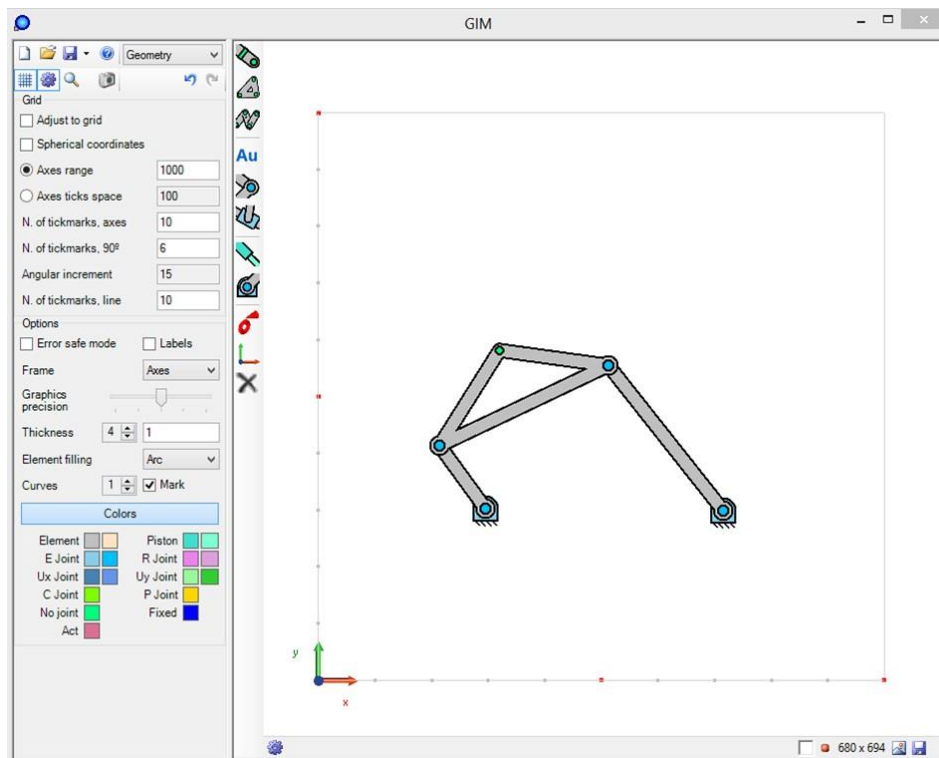


Figure 2: Main window of Geometry module

#### 2.1.1. Basic options

On the left-hand side of the main window several options appear. The icons located at the upper left-hand corner serve to perform common actions, such as creating a new document, open an existing document or saving the work. Just below, a second bar contains some other icons which display two specific menus, as shown in Fig. 3.

The first one, *Grid* menu (see Fig. 3 left), has the following options:

- *Adjust to grid*: selecting this option enables the designer to locate the nodes of the mechanism adjusting to the grid depicted in the plotting window.
- *Spherical coordinates*: serves to define the design of the mechanism using spherical coordinates.
- *Axes range*: permits defining a specific range for the grid axes.
- *Axes ticks space*: serves to define the number of tickmarks appearing in the grid.

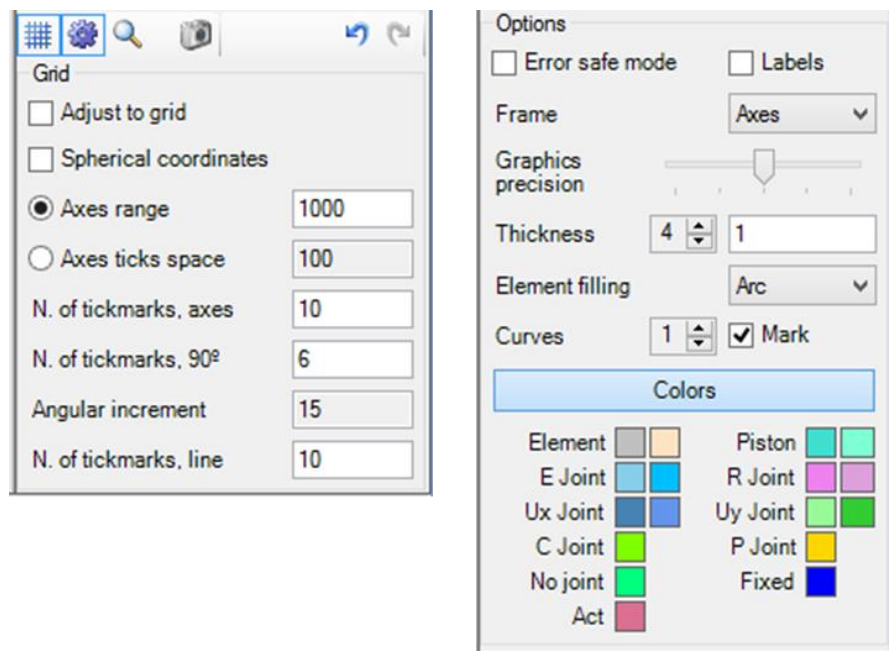


Figure 3: *Grid* and *Options* menus of Geometry module

The second menu, *Options* menu, (see Fig. 3 right), adds the following possibilities:

- *Error safe mode*: it avoids closing the program if some error occurs.
- *Labels*: selecting this option enables displaying the labels of each node, element and joint of the mechanism.
- *Frame*: it includes four possibilities. The default one, *Axes*, displays the two principal axes XY of the grid. The other options are: *None*, no grid is shown; *Ground*, full-grid, and *Walls*, similar to *Ground* but depicts the grid of all drawing planes.
- *Graphics precision*: it permits modifying the precision of the graphics displayed.
- *Thickness factor*: it permits modifying the thickness of the elements.

- *Element filling*: related to the filling mode of the elements.
- *Colors*: it shows the color legend of each elements and joint type.

### 2.1.2. Defining the geometry of the mechanism

In this section, it is explained how to define a specific design of a mechanism under study. To do so, the designer will use the icons included in the vertical bar on the lefthand side of the drawing screen. As shown in Fig. 4, these icons serve for: creating the nodes of the mechanism, creating the elements, defining the type of joints (revolute or prismatic joints can be established), establish the fixed joints, modifying or deleting elements, etc.



Figure 4: Icons included in Geometry module to design a mechanism

The process to depict the mechanism is very simple: select the desired icon and locate the cursor mouse on the drawing screen. In general, the basic design process consists in: *first*, create the nodes of the mechanism; *second*, define the elements between the established nodes and *finally*, define all the joint types.

- **Nodes**: To create the nodes just select the corresponding icon, and then, having the mouse cursor on the drawing screen, just click on the desired location. Note that it is also possible to define specific  $(x,y)$  coordinates of the node by writing the numerical values on the boxes that appear at lower left-hand corner once the *nodes* icon has been selected.

- Elements: Once the nodes have been depicted, the elements can be created. To do so, select the *elements* icon, and again move the mouse cursor to the drawing screen. Click once on the first node forming the element, and click twice on the last node of the element.
- Kinematic joints: To define the kinematic joints of the mechanism just select the corresponding icon (revolute or prismatic joint icon) and go to the drawing screen in order to click on the corresponding node.

In order to illustrate the designing process, several examples are shown in the following videos:

- Video of Four-bar mechanism - creating the geometry:  
<http://www.ehu.es/compmech/software/gim-examples-4-bar-mechanism/>
- Video of PRRP mechanism - creating the geometry:  
<http://www.ehu.es/compmech/software/gim-examples-prrp-mechanism/>

## 2.2. Motion module

Motion module is the module in charge of carrying out the motion simulation and kinematic analysis of the planar mechanism under study. The user can access this module only once the geometry of the mechanism has been completely defined in Geometry module. To get into Motion module, just select the option *Motion* from the display menu on the upper bar of the main window.

In Fig. 5, the starting main window associated with Motion module is shown, using the four-bar mechanism as an illustrative example.

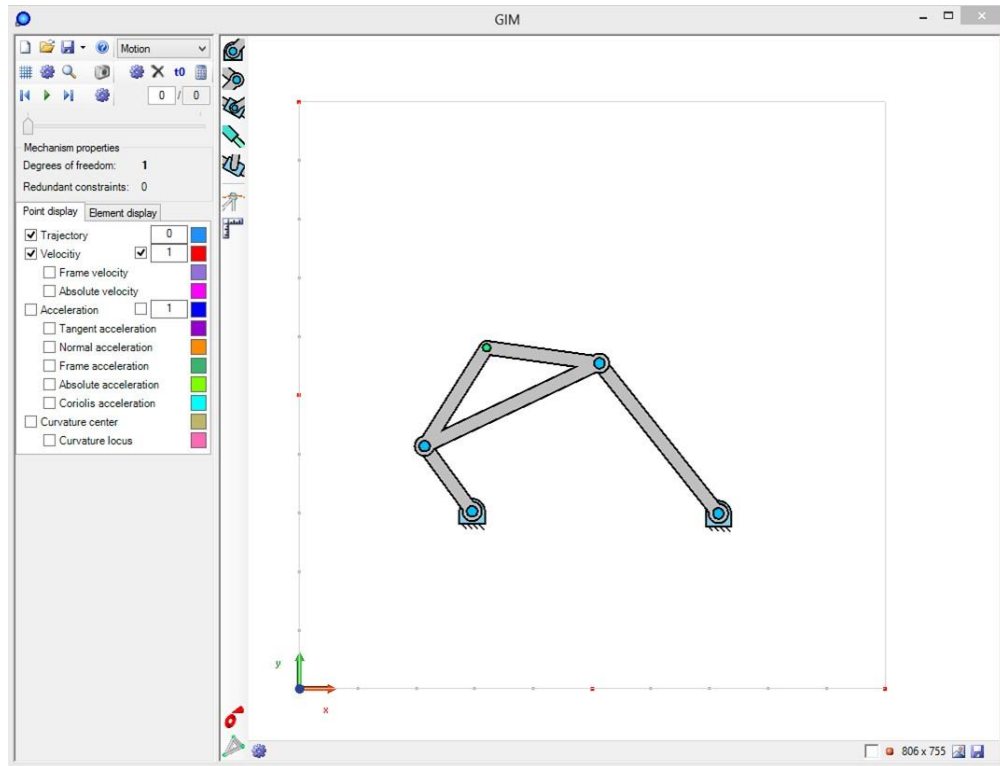


Figure 5: Main window of Motion module

This screen contains three main parts:

1. The vertical bar close to the drawing screen in which several icons appear so as to define the inputs' motion. The first five icons serve to define the inputs of the mechanism. The two last icons permit selecting specific elements or nodes, and showing graphs respectively (see Fig. 6).

The way the input conditions has to be established is detailed in Section 2.2.1.

2. The top horizontal bar containing, on the one hand, the icon that serves to compute the motion (the *calculator* icon) and, on the other hand, the controls of the motion simulation (play/pause, next step, previous step). Besides, just below the motion controls, it is displayed the number of degrees of freedom, and the number of redundant constraints (see Fig. 7).
3. Two boxes named Point display and Element display, in which the kinematic properties related to points or elements of the mechanism are shown. This is the main part of the Motion module, as it contains all the options that can be visualized in relation to important kinematic features of the mechanism, as for example, velocities and accelerations, points' trajectory, Instantaneous Center of Rotation (ICR), fixed and moving polodes, main circles, and so on (see Fig. 8).

Detailed explanation of the operation of this part is given in Section 2.2.2.

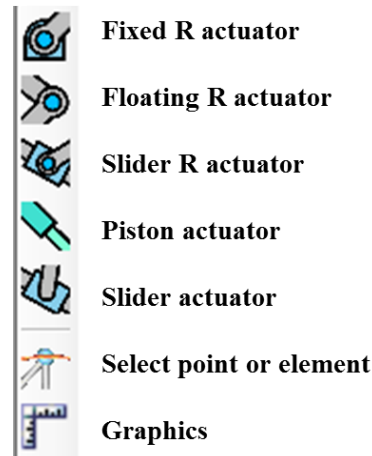


Figure 6: Vertical bar of Motion module

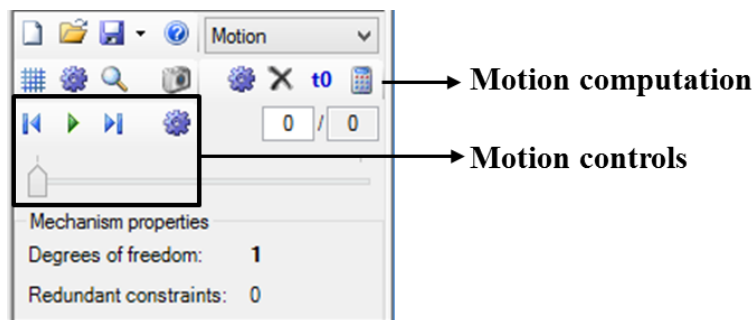


Figure 7: Motion controls of Motion module

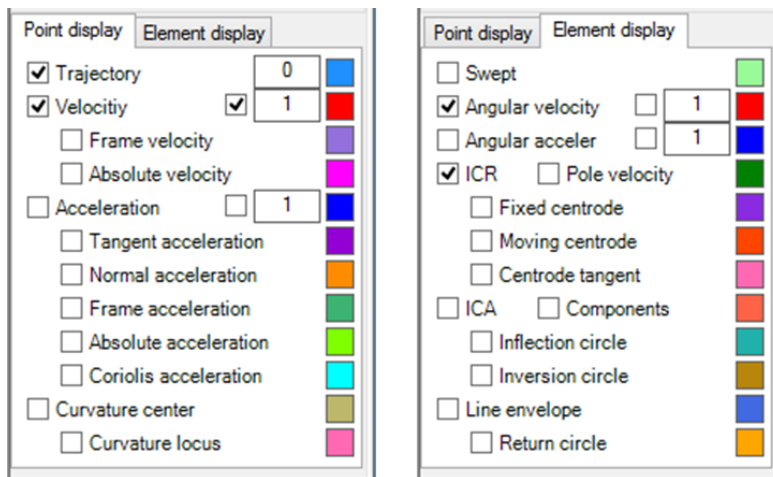


Figure 8: Kinematic properties included in Motion module

### 2.2.1. Defining the input conditions

The first step to proceed with the kinematic analysis of a mechanism under study is to define the input(s) of the mechanism. For a  $n$ -DOF mechanism,  $n$  number of inputs must be established. As highlighted in Fig. 6, the icons in the vertical bar serve to define



the following type of inputs: fixed revolute actuator, floating revolute actuator, slider revolute actuator, piston actuator and slider actuator.

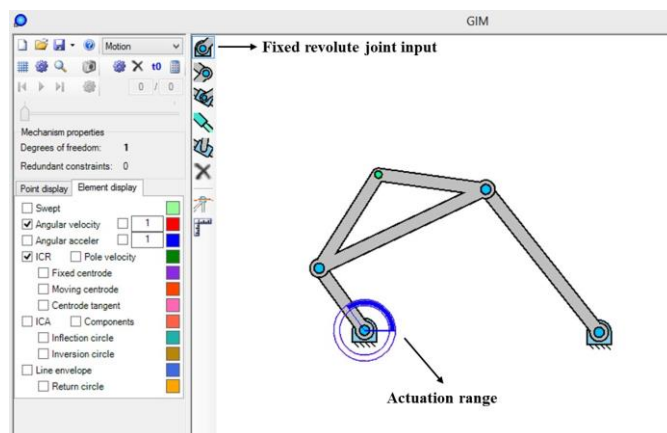
Following with the four-bar example, let us chose one of the fixed revolute joints as the actuated one, as shown in Fig. 9a. The process is very simple, first select any of the icons of the vertical bar associated with the input you want to specify, and then click on the corresponding input joint of the mechanism. Next, define the characteristics of the input (position, velocity, acceleration) by establishing the desired parameters on the right-hand side box menu, as shown in Fig. 9b.

The default input option consists in a linear increment of position, that is, constant velocity. However, the characteristics of the input actuation can be varied by the user, by modifying the parameters of position, velocity and acceleration displayed in the menu of Fig. 9b. A polynomial up to the quintic can be specified. The graphs on the right-hand side are displayed according to the established input conditions.

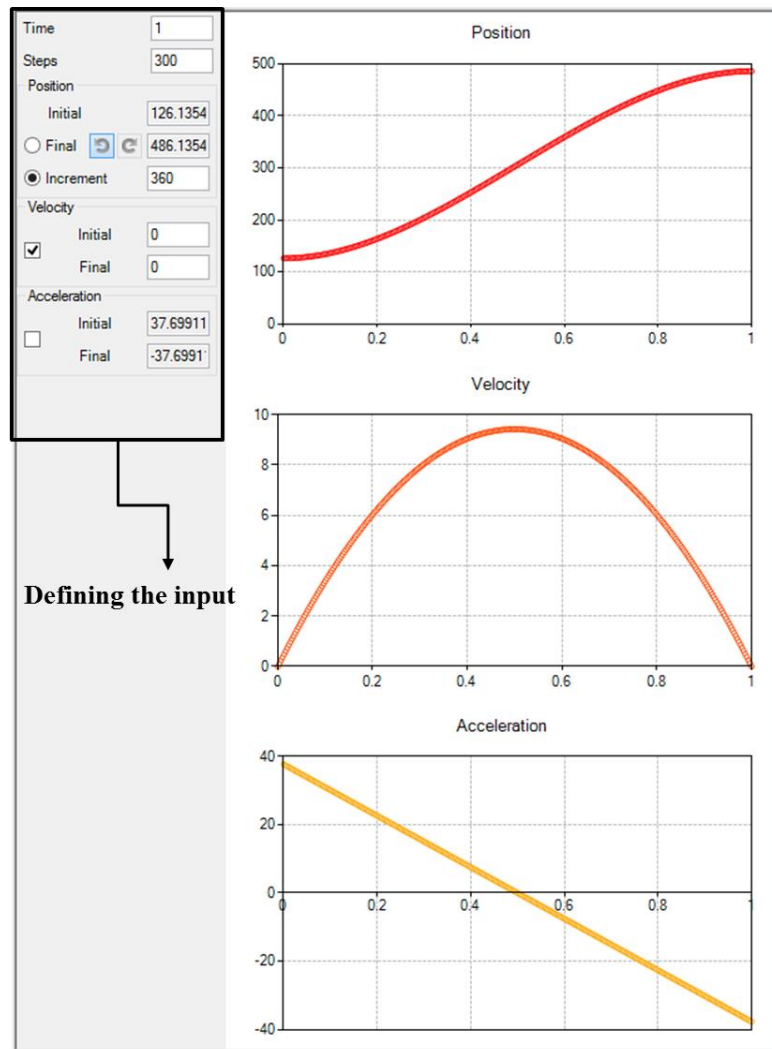
### 2.2.2. Getting into the kinematics

Once the input (or inputs in the case of more than one DoF) of the mechanism has been defined and the motion has been computed, the user is ready to analyze several kinematic properties of the mechanism.

As stated in Section 2.2, in particular focusing on the options of Fig. 8, there exist two menus regarding the kinematic properties that can be obtained. On the one hand, in relation to points of interest of the mechanism (Point display menu), the following data can be displayed:



(a)



(b)

Figure 9: Defining the input actuation: (a) selecting the input; (b) Establishing the input conditions

- Trajectory
- Velocity
  - Frame velocity
  - Absolute velocity
- Acceleration
  - Tangent acceleration
  - Normal acceleration
  - Frame acceleration
  - Absolute acceleration
  - Coriolis acceleration

- Curvature center
  - Curvature locus

On the other hand, regarding the elements of the mechanism (Element display menu), the user can obtain the next features:

- Swept
- Angular velocity
- Angular acceleration
- ICR (Instantaneous Center of Rotation)
  - Pole velocity
  - Fixed centrode
  - Moving centrode
  - Centrode tangent
- ICA (Instantaneous Center of Acceleration)
  - Components
  - Inflection circle
  - Inversion circle
- Line envelope
  - Return circle

In order to visualize any of the aforementioned options (or various options simultaneously) it is just needed to click the box (or boxes) associated with the desired option included in *Point* or *Element* menu, and then select the point or element of interest.

An illustrative example is shown in Figs. 10 and 11. In Fig. 10, some properties of a point of interest, in this case the coupler point P, are displayed: the velocity and acceleration, its trajectory and the curvature center of the trajectory. Figure 11 displays significant kinematic features associated with a specific element, in this case the moving platform: the ICR, and the fixed and moving centrodes.

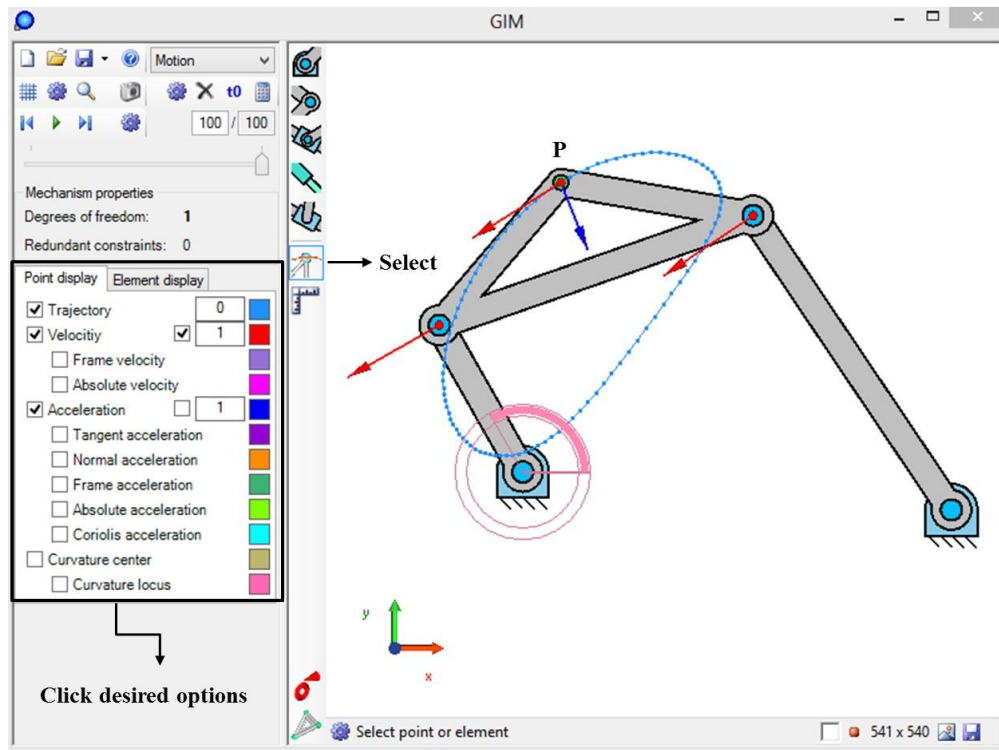


Figure 10: Showing kinematic properties of the coupler point

It is essential to *remark* that all of the kinematic features can be visualized not only for a certain position but all along the motion of the mechanism. In order to get this, just press the play button included in the motion controls.

Again, following with the four-bar example, the visualization of several features along the motion is shown in the following video:

- Video of Four-bar mechanism - properties related to points of interest and elements: <http://www.ehu.es/compmech/software/gim-examples-4-bar-mechanism/>

### 2.2.3. Graphical plots

Motion module allows to represent the graphs of features associated with points or elements. These graphics are obtained by selecting the icon indicated in Fig. 12, which displays the menu also shown in the figure. This menu is divided into the characteristics of points and the ones associated with elements.

With respect to points, the following graphs can be obtained:

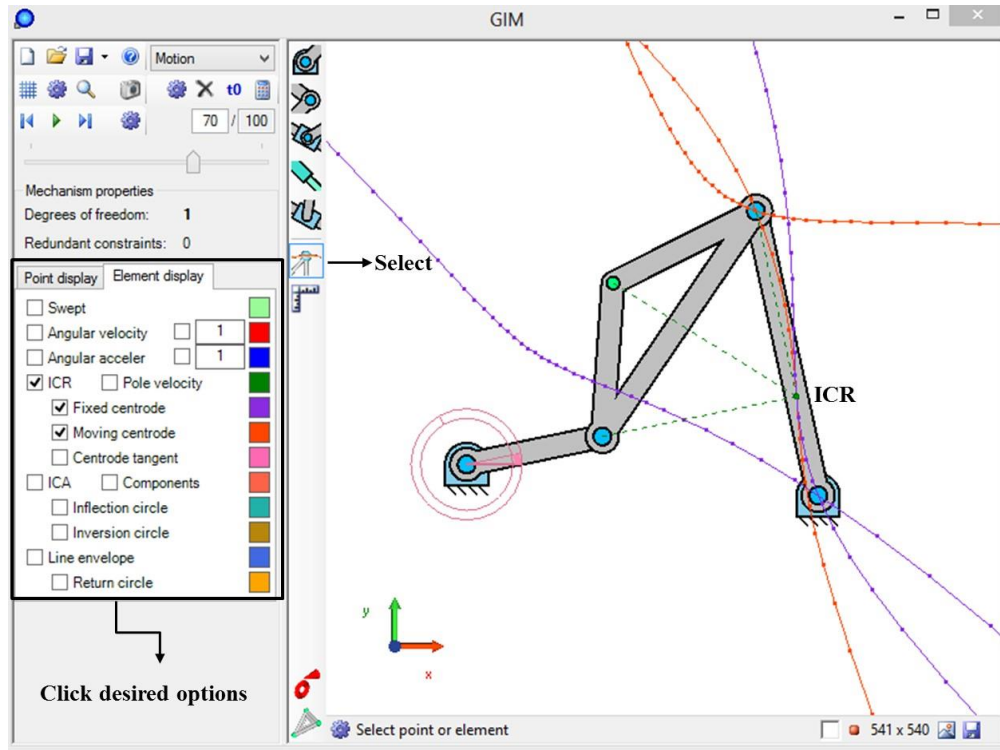


Figure 11: Showing kinematic properties of the moving platform

- Coordinates
- Velocity
- Acceleration
- Tangential acceleration
- Normal acceleration
- Curvature Center
- Curvature radius

And regarding the elements:

- Angular velocity
- Angular acceleration
- ICR
- Pole velocity
- IC of acceleration

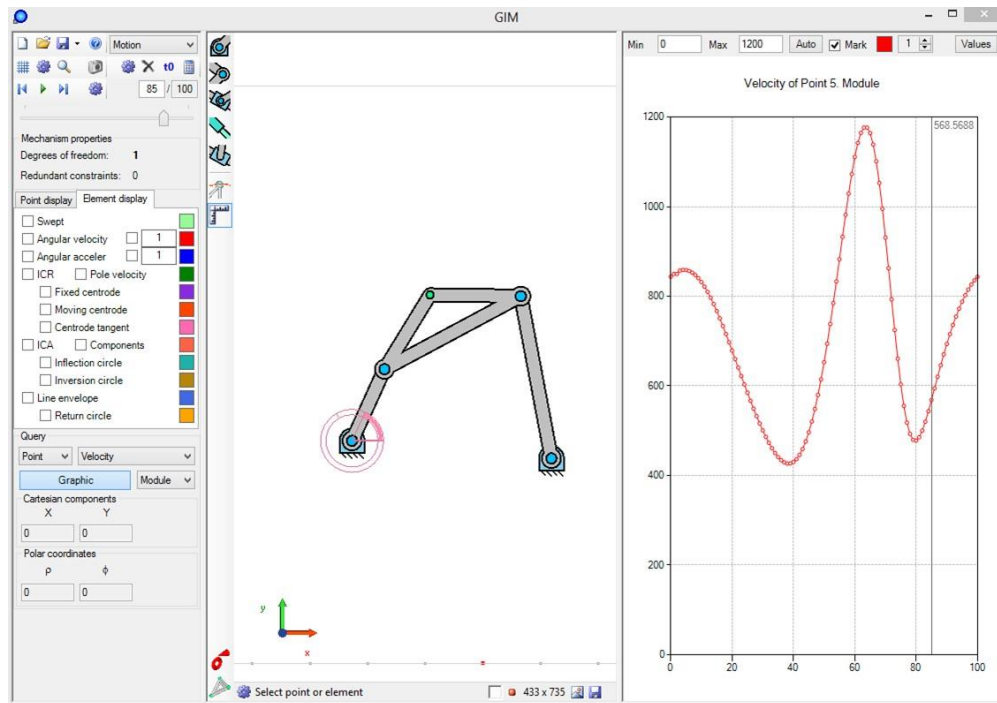


Figure 12: Obtaining graphs of features associated with points or elements

### 3. Examples of Planar Mechanisms

The analysis of different planar mechanisms (four-bar mechanism, 5R mechanism, Scotch Yoke mechanism, 3-RPR mechanism, etc) making use of GIM software is reported in the videos available in the subsequent link: <http://www.ehu.es/compmech/software/>

Besides, several interactive video tutorials can be shown in: <http://www.ehu.es/compmech/gim-software-tutorial/>

The video tutorials explain step-by-step how to create the geometry, carry out the motion simulation and perform the kinematic analysis of various planar mechanisms: four-bar mechanism, PRRP mechanism, Scotch Yoke mechanism and Peaucellier mechanism.

