



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTUDIO DINÁMICO Y POR ELEMENTOS FINITOS DE VEHÍCULOS TODOTERRENO CON RECURDYN

AUTOR: CARLOS NISTAL ESTEVE

TUTOR: JOSÉ LUIS OLIVER HERRERO

Curso Académico: 2016-17

Agradecimientos

Aprovecho esta ocasión para agradecer a José Luis Oliver, mi tutor y Director de proyecto, toda la dedicación, empeño y tiempo que ha dedicado para hacer viable este proyecto, acercándome las herramientas y los conocimientos necesarios para desempeñar todo el trabajo que hay detrás del mismo.

Me gustaría también agradecer a todos mis compañeros de la universidad, a los que considero grandes amigos, el apoyo que me han prestado durante toda mi etapa universitaria, haciendo de estos últimos seis años los mejores de mi vida.

Por último, agradezco a mi familia los valores éticos y educativos que me han permitido estar hoy aquí, con ganas de seguir aprendiendo y disfrutando.

Resumen

Este proyecto consiste en el análisis dinámico vehículos todoterreno a escala, así como el estudio de algunas partes destacadas por el Método de los Elementos Finitos, todo ello empleando como software el programa de CAE RecurDyn. Los modelos que se han incluido en el presente proyecto son cuatro: tres movidos por cadenas (dos máquinas industriales y un vehículo todoterreno) y uno con tracción a las cuatro ruedas. El trabajo se puede dividir en dos partes:

La primera parte describe el estudio cinemático/dinámico de los modelos, donde se realizan simulaciones sobre una base con obstáculos, mostrando las posibilidades de movimiento de los modelos y extrayendo conclusiones en términos mecánicos y de coste computacional. Para poder realizar las simulaciones, los modelos han de ser ensamblados y su movilidad se debe corresponder con la que tendría el modelo real.

En la segunda parte son analizadas algunas piezas mediante el Método de los Elementos Finitos. Esto supone tratar la pieza como flexible para poder realizar análisis de deformaciones y estrés. En esta parte también se discuten varias posibilidades a la hora de convertir esos sólidos rígidos en flexibles, comparándose las distintas opciones en términos de exactitud y coste computacional.

En definitiva, este proyecto analiza las dos posibilidades de movimiento de los vehículos terrestres (transmisión por cadenas o movimiento de ruedas) empleando un software de CAE, ayudando a adquirir y/o afianzar conocimientos sobre diseño virtual y análisis de dinámicas multi-cuerpo que todo ingeniero formado en una buena escuela debería poseer.

Palabras Clave: Análisis dinámico, vehículo todoterreno, simulación, Método de los Elementos Finitos, RecurDyn.

Resum

Aquest projecte consisteix en l'anàlisi dinàmica de vehicles tot terreny a escala, així com l'estudi d'algunes parts destacades pel Mètode dels Elements Finitos, tot això emprant el software de CAE RecurDyn. Els models que s'han inclòs en el present projecte són quatre: tres moguts per cadenes (dos màquines industrials i un vehicle tot terreny) i un amb tracció a les quatre rodes. El treball es pot dividir en dos parts:

La primera part descriu l'estudi cinemàtic/dinàmic dels models, on es realitzen simulacions sobre una base amb obstacles, mostrant les possibilitats de moviment dels models i extraient conclusions en termes mecànics i de cost computacional. Per a poder realitzar les simulacions, els models han de ser muntats i la seua mobilitat s'ha de correspondre amb la que tindria el model real.

En la segona part són analitzades algunes peces per mitjà del Mètode dels Elements Finitos. Açò suposa tractar la peça com a flexible per a poder realitzar anàlisi de deformacions i estrés. En esta part també es discutixen diverses possibilitats a l'hora de convertir eixos sòlids rígids en flexibles, comparant-se les distintes opcions en termes d'exactitud i cost computacional.

En definitiva, aquest projecte analitza les dues possibilitats de moviment dels vehicles terrestres (transmissió per cadenes o moviment de rodes) emprant un software de CAE, ajudant a adquirir y/o refermar coneixements sobre disseny virtual i anàlisi de dinàmiques multi-cos que tot enginyer format en una bona escola hauria de posseir.

Paraules clau: Anàlisi dinàmica, vehicle tot terreny, simulació, Mètode dels Elements Finitos, RecurDyn.

Abstract

This project consists of a multi-body dynamic analysis of scaled all-terrain vehicles and the FEA (Finite Element Analysis) of several mobile parts of them, all using RecurDyn, a Computer-Aided Engineering software. Four models have been included in this project: three of them are tracked vehicles and the last is a four-wheel drive one. The study can be divided in two parts:

The first one describes the Kinematic/Dynamic analysis of the four models. In this part, several simulations have been done, using a flat base with some obstacles as ground part, showing the degrees of freedom of the models and drawing conclusions in terms of mechanical behaviour and computational requirements. To achieve this, models have to be set up first and carefully joined so that the mobility of every model match to the real one.

In the second part, some mobile parts are analyzed with the FEM (Finite Element Method). By doing that, these parts are no longer considered as rigid solids, and they become flexible parts so that they can be studied by stress analysis. In this part of the project, there are also some discussions about the different ways of turning a rigid part into a flexible one, comparing them in terms of accuracy and analysis time.

To sum up, this project compares the two ways of movement when using all-terrain vehicles using a CAE software and helps getting used to the CAE software and also understanding the multi-body dynamics that every well prepared engineer should know.

Keywords: Kinematic/Dynamic analysis, all-terrain vehicle, simulation, FEA, FEM, RecurDyn.

Índice general

I Memoria	1
1. Objeto del proyecto	3
2. Introducción	5
2.1. Los modelos Lego Technic©	5
2.2. Metodología	6
2.3. Nomenclatura	9
3. Descripción y ensamblaje del modelo	11
3.1. Presentación y Objetivos	11
3.2. Ensamblaje en SolidWorks	11
3.3. Creación del modelo virtual vLTm_8047-1	13
3.4. Creación del modelo virtual vLTm_8047-1	16
3.5. Creación del modelo virtual vLTm_42065-1	19
3.6. Creación del modelo virtual vLTm_sheepo-Jeep.	22
4. Proceso de compactación	33
5. Simulación del modelo virtual con RecurDyn	35
5.1. Presentación y Objetivos	35
5.2. El software RecurDyn	35
5.3. Limitaciones del LM Toolkit	45
5.4. Simulación virtual del modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1	46
5.5. Simulación virtual del modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1	48
5.6. Simulación virtual del modelo vLTm_sheepo-Jeep	50
6. Análisis por el MEF	53
6.1. Presentación y objetivos	53
6.2. La tecnología MFBD	53

6.3. RFlex y FFlex	54
6.4. Análisis Dinámico de un modelo flexible.	54
7. Conclusiones	63
Bibliografía	65
II Presupuesto	67
1. Introducción	69
2. Presupuesto	71
2.1. Software	71
2.2. Hardware	72
2.3. Modelos Lego Technic®	72
2.4. Montaje y Simulación de Modelos Lego Technic® Virtuales.	73
3. Resumen	75
III Anexo	77
RecurDyn: Manual de Usuario	79
1. Introducción	81
1.1. ¿Qué es RecurDyn?.	81
1.2. ¿Cómo se ha desarrollado RecurDyn?	82
1.3. ¿Qué es capaz de hacer RecurDyn?.	82
1.4. Funciones de RecurDyn	82
1.5. Teoría de la dinámica multi-cuerpo	83
2. Usando RecurDyn	85
2.1. Preparación	85
2.2. Conceptos básicos.	87
2.3. Entorno: Profesional	90
2.4. Propiedades, edición y movimiento de cuerpos.	94
2.5. Low-Mobility Tracked Toolkit	99
2.6. Entorno: Análisis	106

Índice de figuras

2.1. Modelo Lego Technic© y sus componentes	5
2.2. Modelo Real VS Modelo Virtualizado	6
2.3. Metodología seguida en el proyecto	8
2.4. Componente, Trozo y Pieza	9
3.1. Relaciones de posición más usadas en SolidWorks	12
3.2. Comprobación de la movilidad	12
3.3. Modelo vLTm_8047-1	13
3.4. Componentes del modelo vLTm_8047-1	14
3.5. Chasis del modelo vLTm_8047-1	15
3.6. Partes móviles del modelo vLTm_8047-1	15
3.7. Modelo vLTm_42028-1	16
3.8. Componentes del modelo vLTm_42028-1	17
3.9. Chasis del modelo vLTm_42028-1	18
3.10. Partes móviles del modelo vLTm_42028-1	18
3.11. Modelo vLTm_42065-1	19
3.12. Componentes del modelo vLTm_42065-1	20
3.13. Chasis del modelo vLTm_42065-1	21
3.14. Partes móviles del modelo vLTm_42065-1	21
3.15. Imágenes de la creación personalizada Jeep Wrangler Rubicon	22
3.16. Imágenes de las instrucciones del modelo Jeep Wrangler Rubicon	23
3.17. Chasis del modelo vLTm_sheepo-Jeep	25
3.18. Tren de potencia del modelo vLTm_sheepo-Jeep	26
3.19. Funcionamiento del embrague en modelos Lego Technic©	27

3.20. Ejes del modelo vLTm_sheepo-Jeep	28
3.21. Conjunto Chasis+Ejes en el modelo vLTm_sheepo-Jeep	29
3.22. Vista de perfil del sistema de suspensión en el modelo vLTm_sheepo-Jeep	30
3.23. Conexión de los ejes con el tren de potencia en el modelo vLTm_sheepo-Jeep	30
3.24. Carrocería del modelo vLTm_sheepo-Jeep	31
3.25. Model completo: vLTm_sheepo-Jeep	32
4.1. Esquema del proceso de compactación	34
5.1. Entorno de trabajo en RecurDyn	37
5.2. Ventana inicial de RecurDyn	37
5.3. Pares cinemáticos en RecurDyn	38
5.4. Acoplamientos en RecurDyn	39
5.5. Contactos en RecurDyn	40
5.6. Cálculo de la movilidad en RecurDyn	41
5.7. Resultado del cálculo de la movilidad	42
5.8. Obtención del modelo auto-alineado	42
5.9. Definición del movimiento en RecurDyn	43
5.10. Simulación Dinámica/Cinemática en RecurDyn	44
5.11. Modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1	46
5.12. Comparación de tamaño entre el modelo 8047-1 y su equivalente	46
5.13. Pares cinemáticos del modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1	47
5.14. Modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1	48
5.15. Comparación de tamaño entre el modelo 42028-1 y su equivalente	48
5.16. Pares cinemáticos del modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1	49
5.17. Modelo equivalente sobre la base, preparado para una simulación	49
5.18. Partes móviles del Jeep Wrangler en RecurDyn	50
5.19. Jeep Wrangler sobre una base en RecurDyn	51
6.1. Mallado en RecurDyn	55
6.2. Resultado del mallado en RecurDyn	56
6.3. Condiciones de contorno	57
6.4. Resultado visual del análisis de estrés	57
6.5. Plano medio que atraviesa la pieza analizada	58

6.6. Desviación con respecto al plano medio en los tres casos	58
6.7. Posición de dos nodos equivalentes	59
6.8. Modos de deformación propios de una pieza RFlex	60
6.9. Deformación de los modos	61
6.10. Comparación de los resultados: 82 VS 61 modos	61
6.11. Datos numéricos de los resultados: 82 VS 61 modos	62
1.1. Esquema de las principales herramientas de RecurDyn	83
2.1. Ventana inicial en RecurDyn	85
2.2. Interfaz del RecurDyn	86
2.3. Criterio de movilidad para mecanismos planos.	87
2.4. Fórmula de Grübler para mecanismos tridimensionales.	88
2.5. Mecanismo autoalineador, sin restricciones en exceso.	89
2.6. Subentorno <i>Body</i> en RecurDyn	90
2.7. Barra de comando de RecurDyn	90
2.8. Subentorno <i>Joint</i> en RecurDyn	91
2.9. Movimiento en los pares cinemáticos	91
2.10. Acoplamientos en RecurDyn	92
2.11. Mecanismo Biela-Manivela-Deslizadera	94
2.12. Acceso a las propiedades de un conjunto	95
2.13. Propiedades del conjunto Biela	96
2.14. Acceso a la edición de un conjunto	96
2.15. Ventana gráfica de un conjunto y sus componentes	97
2.16. Ejemplo de uso de la herramienta de control básico	98
2.17. Herramienta de control básico	98
2.18. Vehículo industrial traccionado por cadenas	100
2.19. Componentes básicos de una cadena	101
2.20. Definición de una rueda motriz en RecurDyn	102
2.21. Definición de un guiador en RecurDyn	102
2.22. Definición de un eslabón en RecurDyn	103
2.23. Resultado del ensamblaje cadena	103
2.24. Propiedades del ensamblaje tipo cadena	104

2.25. Características del terreno	105
2.26. Subentorno <i>Simulation type</i> en RecurDyn	106
2.27. Resultado de un pre-análisis	106
2.28. Ventana previa al análisis dinámico/cinemático	107
2.29. Panel de control de la animación	108
2.30. Establecimiento de marcadores para el seguimiento de trayectorias	109
2.31. Trayectorias de los cuerpos	110
2.32. Subentorno Plot en RecurDyn	110
2.33. Graficado múltiple	111
2.34. Graficado multiventana	111

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Objeto del proyecto

El objeto de este Trabajo Fin de Máster es, en primer lugar, la obtención del título de Máster Universitario en Ingeniería Industrial para su autor.

Sin embargo, este proyecto también pretende realizar un estudio cinemático y dinámico de modelos de vehículos todoterreno a escala, analizando el estado tensional de algunas de sus partes móviles mediante el Método de los Elementos Finitos.

Capítulo 2

Introducción

2.1 Los modelos Lego Technic©

Este proyecto continúa con la línea del Trabajo Fin de Grado que se redactó hace dos años y que, a su vez, continuaba con una propuesta docente que empezó hace más de cinco años el tutor y director de este proyecto, que se basa en la utilización de modelos Lego Technic©.

Los modelos Lego Technic© son "sets" de la conocida marca Lego© que contienen los componentes (piezas individuales) necesarios para construir el modelo. Entre estos componentes se encuentran piezas de unión, piezas de transmisión del movimiento (como ejes, juntas universales, engranajes, etc.) y piezas que otorgan movimiento (como motores, actuadores, etc.). En la Figura 2.1 se puede ver un modelo Lego Technic© y los componentes necesarios para montarlo.

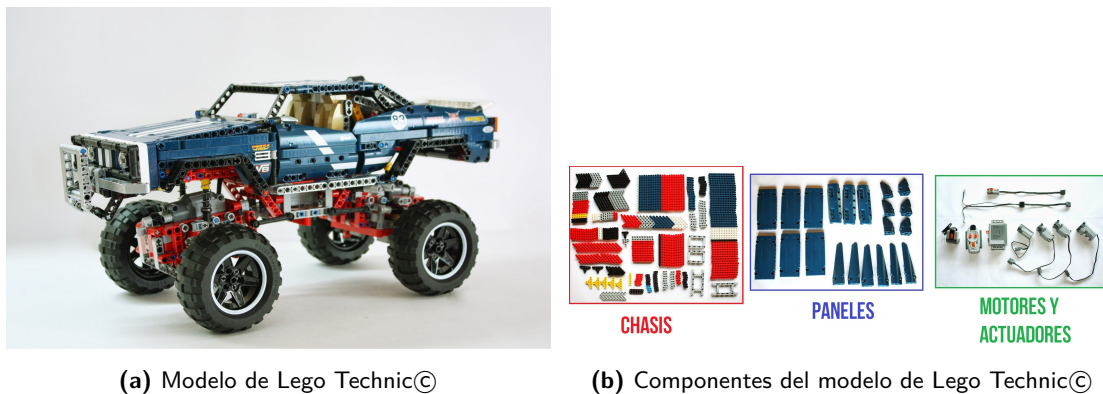


Figura 2.1: Modelo Lego Technic© y sus componentes

Fuente: brickgarage.blogspot.ru

La razón por la cual se ha decidido hacer uso de los modelos Lego Technic© es muy simple. Por un lado, son modelos accesibles tanto por su disponibilidad como por su precio y por tanto cualquier estudiante puede hacerse con uno de ellos. Por otro lado, permiten familiarizar al usuario con el funcionamiento de mecanismos y máquinas mecánicas de cualquier grado de complejidad.

Además, al poseer los componentes virtualizados¹, es posible montar el modelo en un software de CAE (Computer Aided Engineering), de la misma manera que se haría en la realidad, con lo que permite que el usuario no solo adquiera conocimientos acerca del montaje y funcionamiento de máquinas mecánicas, sino que también aprenda el uso de este tipo de softwares, tan necesarios para un ingeniero en la actualidad. En la Figura 2.2 se compara un modelo real de Lego Technic© y su equivalente virtual.

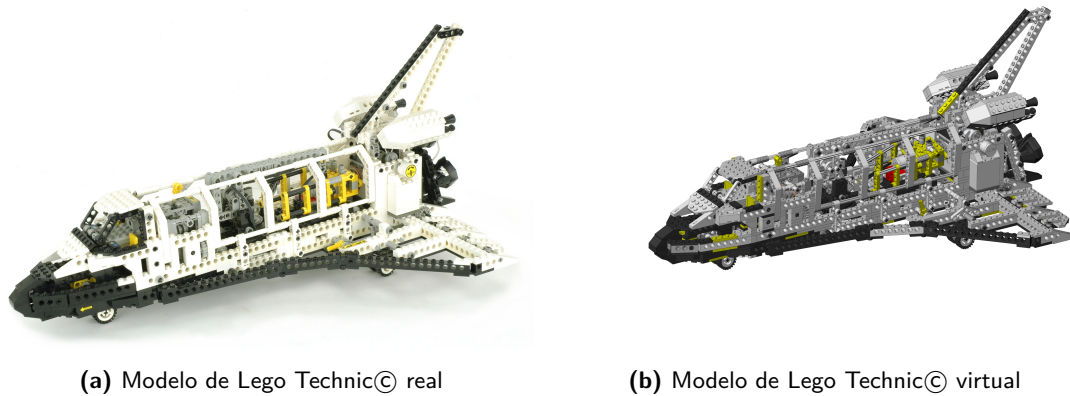


Figura 2.2: Modelo Real VS Modelo Virtualizado

2.2 Metodología

Como ya se ha comentado, el objetivo final de este proyecto es realizar un estudio dinámico/cinemático de varios modelos todoterreno y posteriormente realizar un análisis tensional en algunas de sus piezas móviles. Sin embargo, para llegar a ese punto es necesario seguir una serie de pasos desde el montaje inicial de los modelos hasta las simulaciones finales. A continuación se explica la metodología que se ha seguido a lo largo de este proyecto, para cada modelo.

En primer lugar es necesario **seleccionar aquellos modelos que se desean estudiar**. En este proyecto se han seleccionado un total de cuatro modelos, a saber:

- El modelo de **Lego Technic© 8047-1**. Se trata de una excavadora compacta cuyo movimiento es mediante transmisión por cadena.
- El modelo de **Lego Technic© 42028-1**. Representa un bulldozer cuyo movimiento también es mediante cadenas.
- El modelo de **Lego Technic© 42065-1**. Es un vehículo rápido guiado por cadenas que posee dos motores, uno para cada una de las cadenas.
- La creación personalizada² **Jeep Wrangler Rubicon**, cuyo autor es Sheepo. La página web donde se puede encontrar información acerca de este modelo y otras creaciones personalizadas es <http://www.sheepo.es/>.

¹Los componentes virtualizados son piezas con idéntica geometría a la los componentes Lego Technic© pero en un formato que puede abrir y editar un software de CAD/CAE. Han sido creados por el tutor y director de este proyecto.

²Se llama creación personalizada a un modelo que se ha creado enteramente con piezas de Lego© pero no representa un modelo oficial de la marca, con lo cual no se distribuye y para adquirirlo es necesario contactar con el creador y preguntar acerca de los componentes que son necesarios para crearlo y las instrucciones para montarlo.

Una vez escogidos los modelos, es necesario **adquirirlos**. Para ello hay varias opciones. Si se trata de un modelo oficial de Lego Technic© actual, siempre es posible acceder a la tienda oficial de lego <https://shop.lego.com> y comprar un set. Sin embargo, si se trata de una creación personalizada o un modelo Lego Technic© antiguo que ya no está disponible en la tienda oficial, será necesario acudir a terceros. Un ejemplo muy conocido es <https://www.bricklink.com>, página que permite adquirir modelos nuevos o usados y también componentes de primera y segunda mano como recambios o para realizar creaciones propias.

Antes empezar con el montaje físico de los modelos, resulta imprescindible **listar los componentes que son necesarios para montarlos**. Para ello hay que realizar un inventario de todas las piezas que posee el modelo, clasificándolas por tipo de pieza, longitud característica y color. Esta lista, aunque no es necesaria para montar el modelo real ya que las piezas que contiene el set son las que hay que utilizar, si lo es para montar su equivalente virtual, ya que será esa lista la que permita importar desde la amplia biblioteca de componentes virtuales (que recoge casi todos los componentes que ha fabricado la marca Lego ©) aquellos que se usarán en el software de CAE para montar el modelo virtual.

Ahora si es **momento de montar el modelo físico**, prestando especial atención a las partes complicadas del montaje, los elementos de unión y los transmisores de movimiento, que será de mucha utilidad en el montaje virtual.

Una vez montado el modelo real, es necesario **virtualizarlo**, esto es, realizar el montaje del mismo en un software de CAE de tal manera que posea la misma movilidad, funcionalidades y, en definitiva, posibilidades de movimiento que su homólogo físico. Durante este proceso es determinante la identificación de los **trozos**. Los trozos son agrupaciones de componentes que no poseen movimiento relativo entre ellos y, por tanto, de cara a la movilidad de un modelo, puede ser entendido como uno. La carrocería de un vehículo podría entenderse como uno, ya que forma un bloque cuyas partes actúan como un solo bloque. Ni que decir cabe que, la identificación de los trozos, resulta un proceso fundamental puesto que de él depende que la movilidad del modelo virtual coincida con la del real.

Ahora ya se posee el modelo virtualizado, con las funcionalidades del modelo real. Sin embargo, antes de poder simularlo es necesario un **proceso de compactación** previa. La compactación es un proceso informático que convierte un modelo, formado por trozos, que a su vez están formados por componentes, en un modelo únicamente formado por trozos. Es decir, pasa de concebir los trozos como un conjunto de componentes con una serie de restricciones (paralelismos, perpendicularidades, concentricismos, etc.) a entenderlos como una única entidad, una gran pieza, eliminando así toda la información que se ha usado para crearlos. Es una forma ingeniosa y, sobre todo, eficiente, de aligerar un modelo para que "pese" menos y computacionalmente sea mucho más rápido de procesar.

Es momento de **realizar el análisis dinámico**. Se trata de establecer uniones entre las piezas mediante el uso de pares cinemáticos de tal forma que el modelo posea exactamente los grados de libertad que posee su equivalente físico, y **no posea restricciones en exceso**, esto es, que el modelo quede **cinemáticamente auto-alineado**. Una vez establecidos los pares, habrá que conducir algunos de ellos para dotar de movimiento al modelo y así poder simular su desplazamiento sobre una base plana o con obstáculos.

Tras realizar las simulaciones pertinentes, se someterán las piezas que se consideren oportunas a un **análisis tensional mediante el Método de los Elementos Finitos**. Para ello hay que considerar

dichas piezas como elementos flexibles, es decir, que sufren deformaciones de mayor o menor grado al someterse a esfuerzos, dejando de ser consideradas como sólidos rígidos.

Este proceso se repetirá para cada modelo. La Figura 2.3 ilustra muy bien la metodología seguida y explicada en esta sección. Cada uno de los puntos será explicado con mayor detenimiento y particularizado para cada modelo en los siguientes capítulos.



Figura 2.3: Metodología seguida en el proyecto

2.3 Nomenclatura

Los modelos que se han estudiado en el presente proyecto están formados varios centenares de componentes, algunos, incluso varios millares. Por tanto, resulta absolutamente necesario utilizar una nomenclatura que permita establecer un orden y una jerarquía.

2.3.1 Componente, Trozo y Pieza

A continuación se definen tres conceptos fundamentales que ayudarán a establecer un orden jerárquico entre las partes de un modelo.

Un **componente** es la unidad mínima de construcción que existe (lo que se suele llamar, al contrario que en este proyecto, pieza). Desde el punto de vista de un software de CAE constituye una parte y por ello su extensión es (***.sldprt**).

Un **trozo** es una agrupación de no más de diez componentes que carecen de movimiento relativo entre ellos. Desde el punto de vista de un software de CAE constituye un ensamblaje y por ello su extensión es (***.sldasm**).

Una **pieza** es un conjunto de trozos que carecen de movimiento relativo entre ellos. Desde el punto de vista de un software de CAE constituye un ensamblaje y por ello su extensión es (***.sldasm**).

En la Figura 2.4 se pueden ver los componentes que forman el trozo, y ese mismo trozo señalado en azul dentro de la pieza.

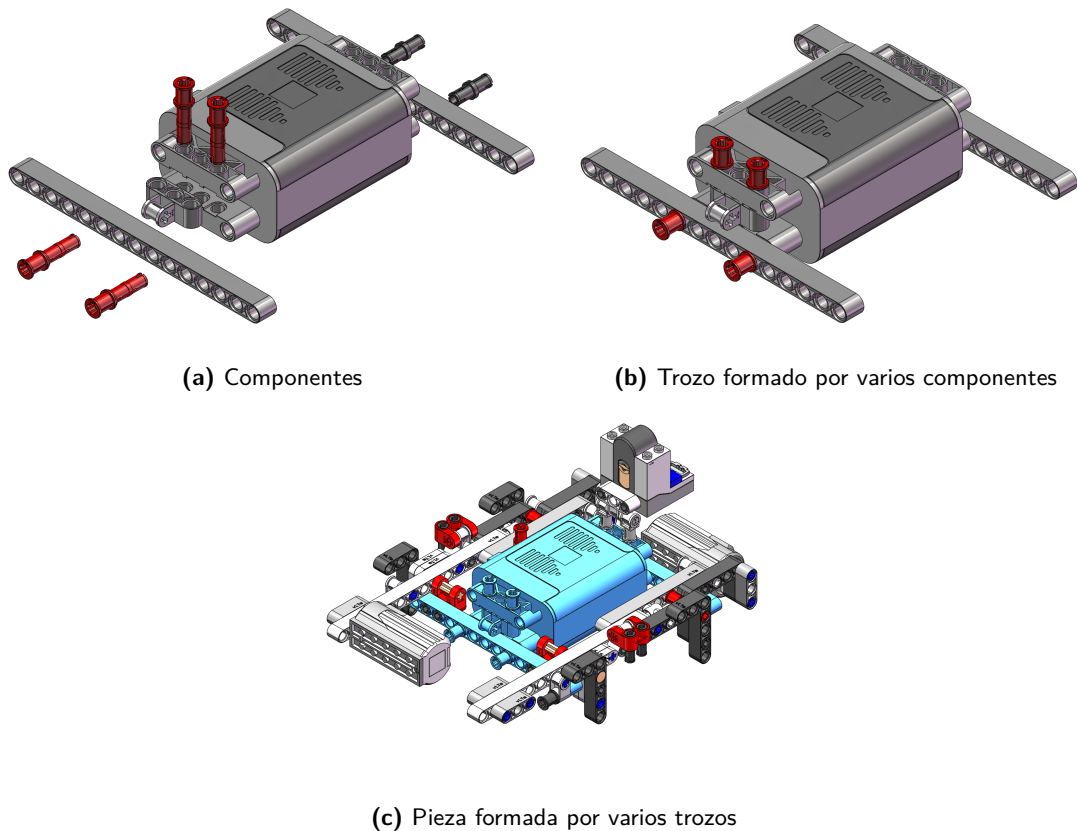


Figura 2.4: Componente, Trozo y Pieza

Una pregunta lógica que puede surgir tras leer la nomenclatura que se ha utilizado es: ¿ Por qué motivo se distingue entre trozos y piezas cuando ambos son, al fin y al cabo, agrupaciones de componentes que carecen de movimiento relativo entre ellos? La razón por la cual las piezas deciden "trocearse" en partes de no mas de diez componentes es porque resulta más eficiente para el posterior proceso de compactación.

2.3.2 Denominación de modelos, piezas y componentes

Una vez entendidas las diferencias entre componentes, trozos y piezas, la nomenclatura seguida para nombrar todas estas entidades se resume en la Tabla 2.1:

Tipo	Nomenclatura	Ejemplo
Componente	vLTm_XXXX Breve Descripción	vLTm_3713 Technic, Axle 3 2017.sldpart
Pieza	vLTm_XXXX-X_part-YYZZ_2017	vLTm_8480-1_part-0109_2017.sldasm
Ensamblaje Final	vLTm_XXXX-X_2017	vLTM_8862-1_2017.sldasm

Tabla 2.1: Nomenclatura utilizada en la demonimación de los modelos, piezas y componentes.

Todos los componentes poseen una codificación de cuatro o cinco cifras. Es la codificación que usa Lego© y las páginas que comercian con componentes de la marca. A esta codificación le acompaña una breve descripción del componente.

Las piezas tienen una designación parecida a los componentes. Los cuatro primeros caracteres se refieren a la codificación que posee la marca, en este caso, para nombrar el modelo comercial. El número que viene después del guión representa la configuración del modelo³. El sufijo *_part* indica que no se trata de el ensamblaje final, si no que representa una de las piezas que lo componen.

Por último, las cifras YYZZ se refieren al número de pieza y trozo. Las dos últimas cifras ZZ representan el número de trozo mientras que las dos primeras indican el número de pieza. Como ya se ha dicho los componentes forman trozos, y las agrupaciones de trozos forman piezas. En el ejemplo de la Tabla 2.1 las cifras "0109" indican que ese ensamblaje contiene el trozo nueve de la pieza uno. Si se deseara abrir la pieza 1 con todos sus trozos, esta estaría codificada bajo la numeración "0100".

³Normalmente los sets de Lego© poseen dos posibilidades de montaje, que dan lugar a modelos de diferente aspecto aunque parecido funcionamiento

Descripción y ensamblaje del modelo

3.1 Presentación y Objetivos

En este capítulo se describirá en qué consiste el ensamblaje del modelo y que herramientas se poseen para llevarlo a cabo. Una vez se conozca el modo de operación, se procederá a explicar el proceso de ensamblaje en cada uno de los cuatro modelos, detallando en ellos el número de componentes que han sido necesarios para montarlos, sus partes fijas y móviles, sus grados de libertad y las funcionalidades que posee cada uno de ellos.

El objetivo de esta sección es, por una parte ilustrar el proceso de creación y montaje del modelo virtual, para que el lector tenga una idea del procedimiento a seguir en el montaje un modelo en un software de CAE, la dificultad a la hora de identificar partes fijas y móviles así como las similitudes entre el montaje físico y el virtual. Por otra parte, esta sección también pretende dar información detallada acerca de los modelos y la complejidad de los mismos atendiendo al número de componentes que lo forman, la cantidad de partes móviles que posee o las posibilidades de movimiento.

3.2 Ensamblaje en SolidWorks

El ensamblaje del modelo es el primer paso hacia la creación del modelo virtual. En este Trabajo Fin de Máster se ha decidido continuar con la línea del pasado Trabajo Fin de Grado y, para montar el modelo, se ha optado por continuar utilizando el programa de CAE Solidworks, esta vez, en su versión más actualizada, el SolidWorks 2017.

Como paso previo al montaje del modelo y, como ya se comentó en la metodología, lógicamente primero se ha de identificar y adquirir los modelos que se desean estudiar, ya sea en la página oficial de Lego© o en páginas de terceros.

El siguiente paso es, mediante la observación visual del modelo real montado, identificar qué partes son fijas y cuáles son móviles. Todas las partes fijas se intentarán agrupar en un sola, que se llamara pieza 1 o chasis y estará formada por varios trozos de no más de diez componentes cada uno. Una vez montado el chasis, se montarán sobre el las piezas móviles, comprobando que el modelo virtual posee las mismas posibilidades de movimiento y funcionalidades que su homólogo físico.

La manera de agrupar componentes de una determinada manera para formar trozos es igual que la manera de agrupar trozos para formar piezas, esto es, imponiendo relaciones de posición entre entidades. SolidWorks posee múltiples relaciones de posición, las más utilizadas se muestran en la Figura 3.1

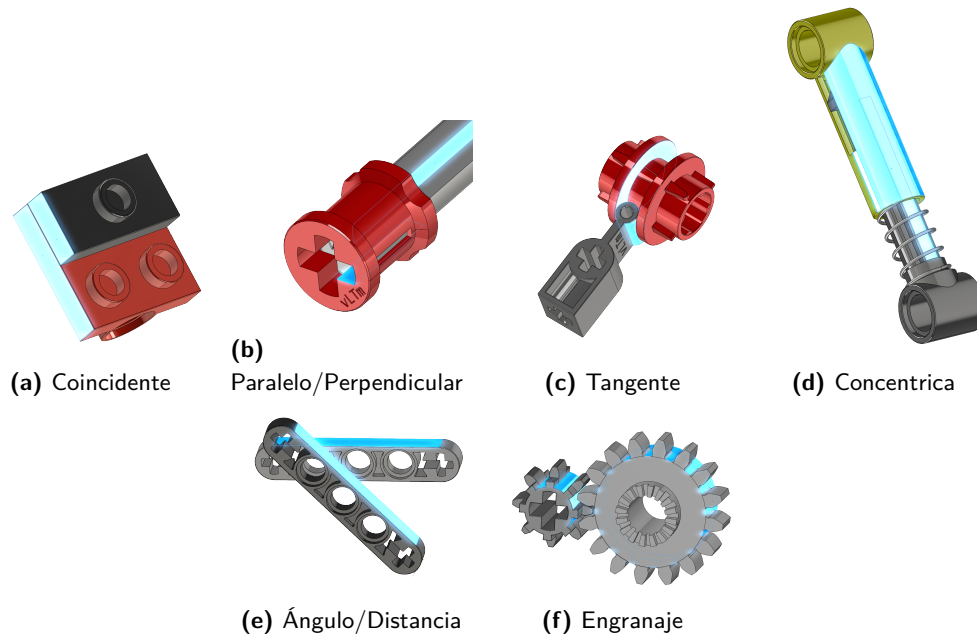


Figura 3.1: Relaciones de posición más usadas en SolidWorks

Una vez impuestas todas las relaciones de posición, se deberá comprobar que el movimiento del modelo virtual se corresponde con su equivalente físico. Dado que no se han impuesto pares cinemáticos, sino relaciones de posición, todavía no es posible conducir los grados de libertad del modelo para animar su movimiento de forma automática o programada. Es por ello que se deberá comprobar de forma "manual", arrastrando con el ratón los impulsores o mecanismos motrices, para comprobar que la cadena cinemática de relaciones de posición es correcta y los seguidores se mueven como deberían. La Figura 3.2 muestra un ejemplo de un modelo ensamblado, en el cual los impulsores están señalados en rojo y los seguidores en azul. Una vez comprobado el movimiento, el proceso de ensamblaje habrá terminado.

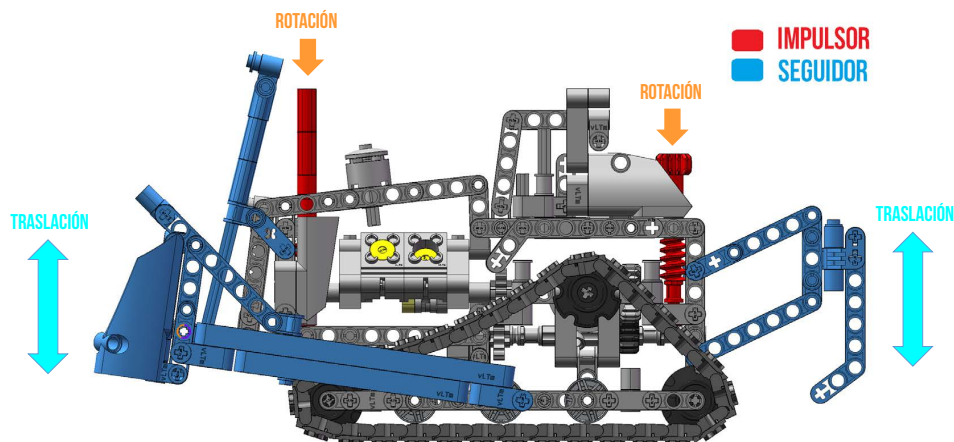


Figura 3.2: Comprobación de la movilidad

3.3 Creación del modelo virtual vLTm_8047-1

3.3.1 Descripción del modelo

El modelo 8047-1 es una excavadora compacta formada por una pala delantera con dos grados de libertad: la inclinación del brazo y la rotación de la pala para realizar el movimiento propio de "escarbar". La cabina de la excavadora, junto con el brazo, esta montada sobre una plataforma giratoria que permite rotar todo el chasis, el brazo y la pala para trasladar más fácilmente la tierra o aquello con lo que se esté trabajando sin tener que recurrir al movimiento de todo el conjunto. Los impulsores de movimiento son dos ruedas dentadas que se encuentran en la parte posterior de la cabina. Una controla la inclinación del brazo y la otra el movimiento rotatorio de la pala. El modelo completo se muestra en la La Figura 3.3.

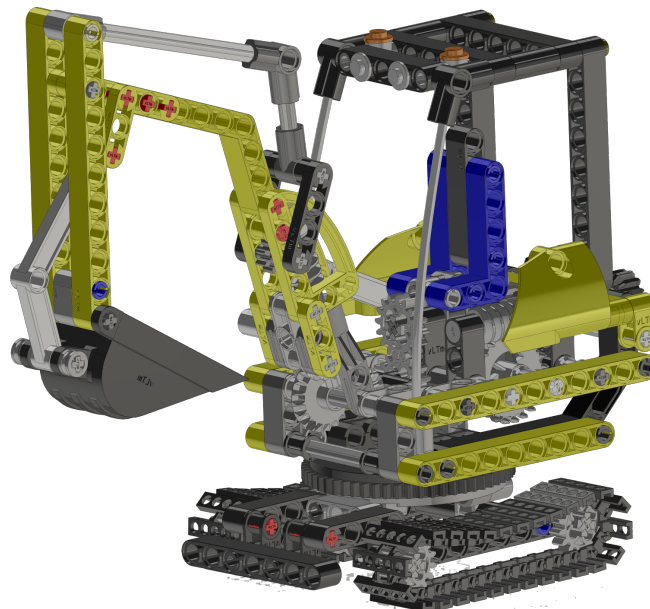


Figura 3.3: Modelo vLTm_8047-1

Se trata de un modelo sencillo, de no muchos componentes que fue el primer modelo con el que se empezó a trabajar en este proyecto. La idea era familiarizarse de nuevo con el manejo del SolidWorks y con la identificación de partes móviles y fijas. Como más tarde se verá, los modelos con cadenas no son especialmente complejos ni tienen muchas funcionalidades y posibilidades de movimiento. La razón por la que se han escogido para este proyecto es, precisamente, el hecho de que se muevan mediante cadenas. Es por ello que, aunque no parezcan modelos muy complejos de cara al montaje, si lo son de cara a las simulaciones y será en ese capítulo donde se ponga especial interés en estos modelos.

3.3.2 Componentes del modelo

El modelo posee 252 componentes, que se aprecian en el despiece de la Figura 3.4.

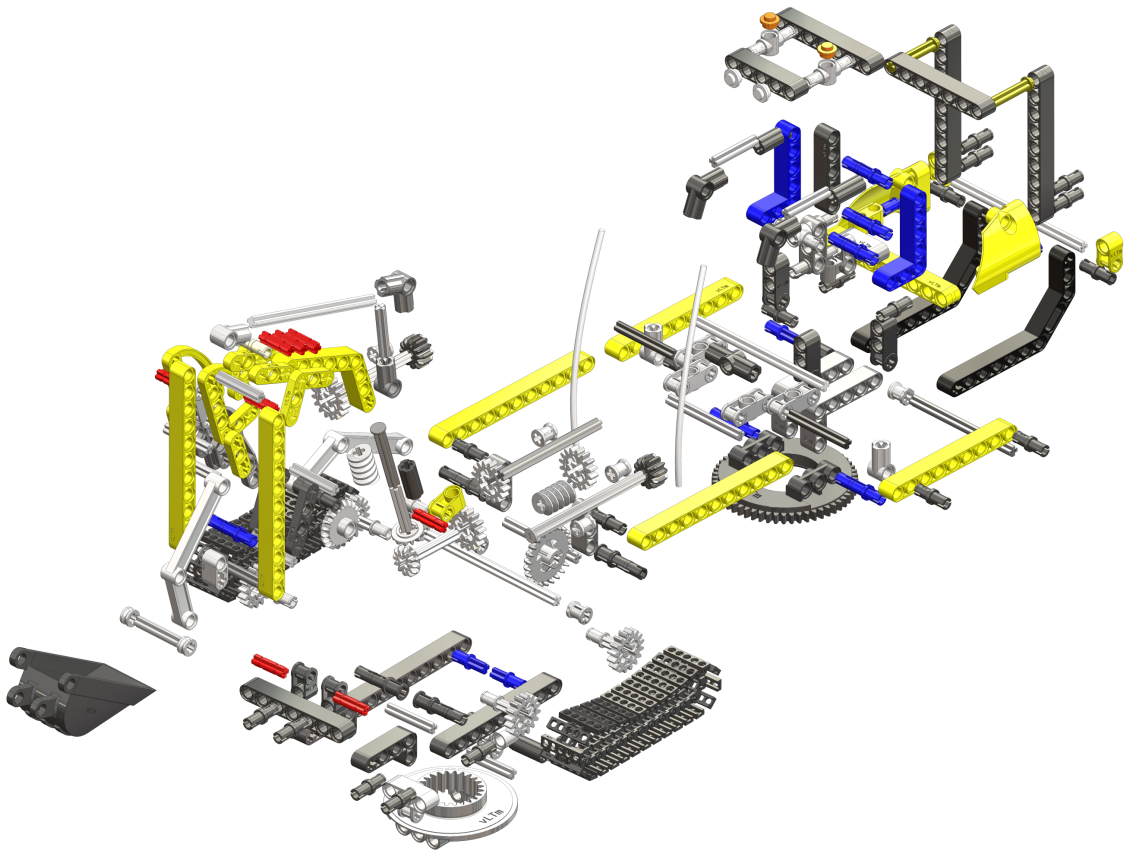


Figura 3.4: Componentes del modelo vLTm_8047-1

3.3.3 Partes fijas y móviles

El proceso más complicado de este modelo es probablemente la identificación de las partes móviles y fijas. No solo porque de ello depende que el modelo final se mueva como debe sino por la dificultad material de visualizar que partes realmente pertenecen al chasis y cuales no. Decidir que trozos compondrán el chasis y cuales no lo harán es una tarea un tanto personal y cada persona posee un modo de identificación de partes móviles y fijas.

Lo más normal en este tipo de modelos es mediante simple observación, no siendo necesario ni siquiera desmontar nada del modelo físico. En otros casos, como se verá con el último modelo, la observación visual no resulta nada útil puesto que hay millares de componentes y es literalmente imposible distinguir nada.

En este modelo se ha escogido como chasis la cabina de la excavadora, como se aprecia en la Figura 3.5.

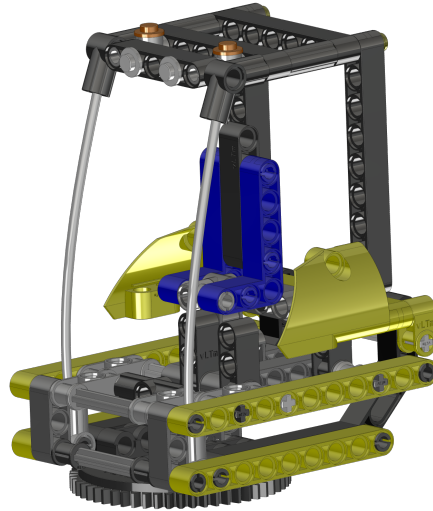


Figura 3.5: Chasis del modelo vLTm_8047-1

La plataforma sobre la que gira el chasis, las cadenas así como todos los engranajes que permiten el movimiento del brazo y de la pala forman un total de 25 y son, lógicamente, las partes móviles de este modelo, tal y como ilustra la Figura 3.6.

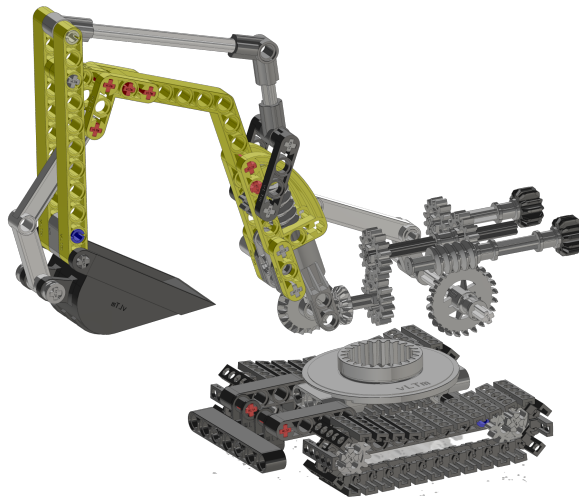


Figura 3.6: Partes móviles del modelo vLTm_8047-1

3.4 Creación del modelo virtual vLTm_8047-1

3.4.1 Descripción del modelo

El modelo 42028-1 es un "bulldozer" formado por una pala muy grande en la parte frontal y un rastrillo en su parte posterior. Este tipo de máquina es utilizada para el movimiento de tierras, la excavación superficial o el empuje de grandes objetos o cantidades de material, incluso el empuje de máquinas industriales más pequeñas. En cuanto a sus funcionalidades, posee dos grados de libertad, el movimiento vertical de la pala delantera que es accionado por un impulsor situado en el morro delantero con forma de torre y el desplazamiento del cuadrilátero articulado al que va acoplado el rastrillo trasero, cuyo impulsor es un tornillo sin fin situado en la parte posterior del vehículo. El modelo completo se muestra en la La Figura 3.7.

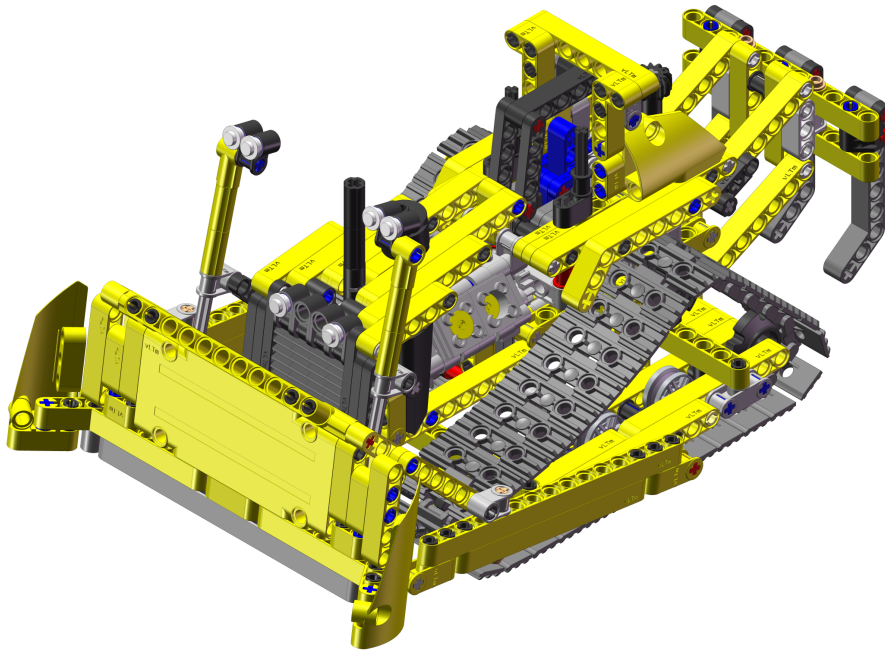


Figura 3.7: Modelo vLTm_42028-1

Este modelo ya es algo más complejo y además de los movimientos de las palas se ha incluido un motor de cuatro cilindros en forma de "V" con un diferencial central que independiza el movimiento de las dos cadenas. Aunque este modelo no es "teledirigido" ni posee motores que permitan dotarlo de movimiento, los cuatro cilindros se mueven imitando un motor de cuatro tiempos al mover el diferencial o al mover las cadenas.

3.4.2 Componentes del modelo

El modelo posee 617 componentes, que se aprecian en el despiece de la Figura 3.8.

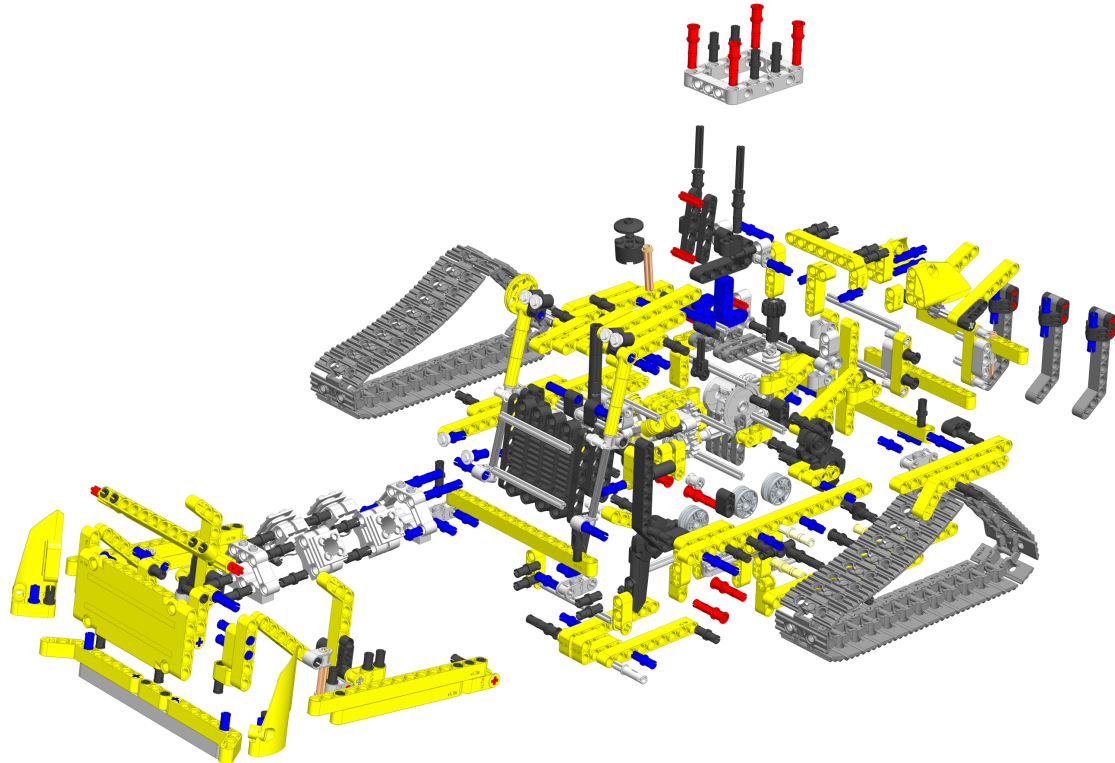


Figura 3.8: Componentes del modelo vLTm_42028-1

3.4.3 Partes fijas y móviles

La distinción entre partes fijas y móviles de este modelo es más complicada que el anterior puesto que hay más componentes que dificultan la visión. Por ello es muy recomendable tener el modelo físico a mano, para poder desmontar algunas partes como la pala delantera y las cadenas, y así poder ver de qué piezas está formado el chasis.

De nuevo en este modelo el chasis se corresponde con la cabina que representa el espacio de operación del conductor, aunque también es parte del chasis la estructura que rodea a la cabina y permite alojar las catalinas sobre las que se monta la cadena, las ruedas guidoras de las cadenas y el bloque motor que aloja los cilindros y el cigüeñal.

En la Figura 3.9 se aprecia la parte fija o chasis y en la Figura 3.10 las partes móviles.

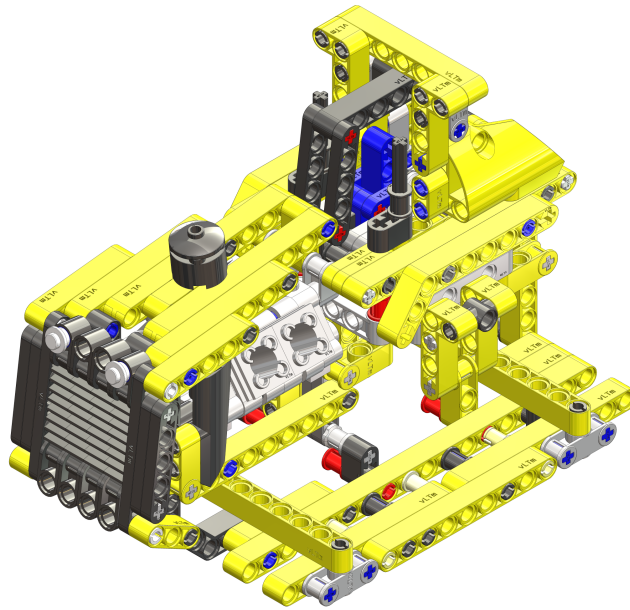


Figura 3.9: Chasis del modelo vLTm_42028-1

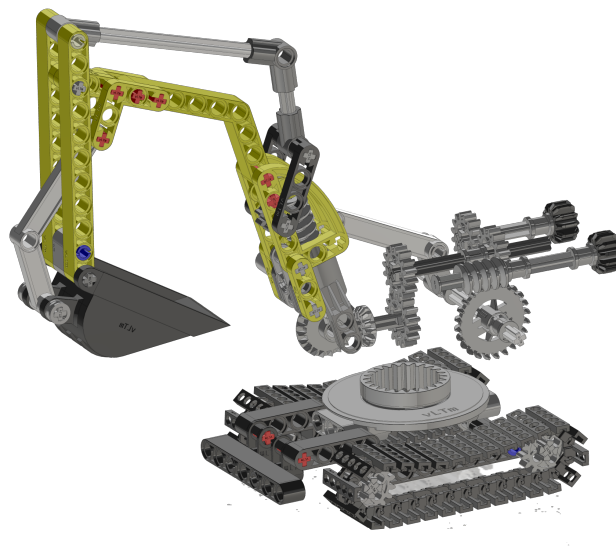


Figura 3.10: Partes móviles del modelo vLTm_42028-1

3.5 Creación del modelo virtual vLTm_42065-1

3.5.1 Descripción del modelo

El modelo 42065-1 es una imitación de un vehículo todoterreno de carreras. Se trata de un vehículo diseñado para ir a más velocidad que los dos anteriores. Este vehículo fue escogido únicamente para simularlo en un módulo de alta velocidad y ver como se comportaba, con lo cual no posee funcionalidades ni mecanismos complejos. El modelo completo se muestra en la La Figura 3.11.

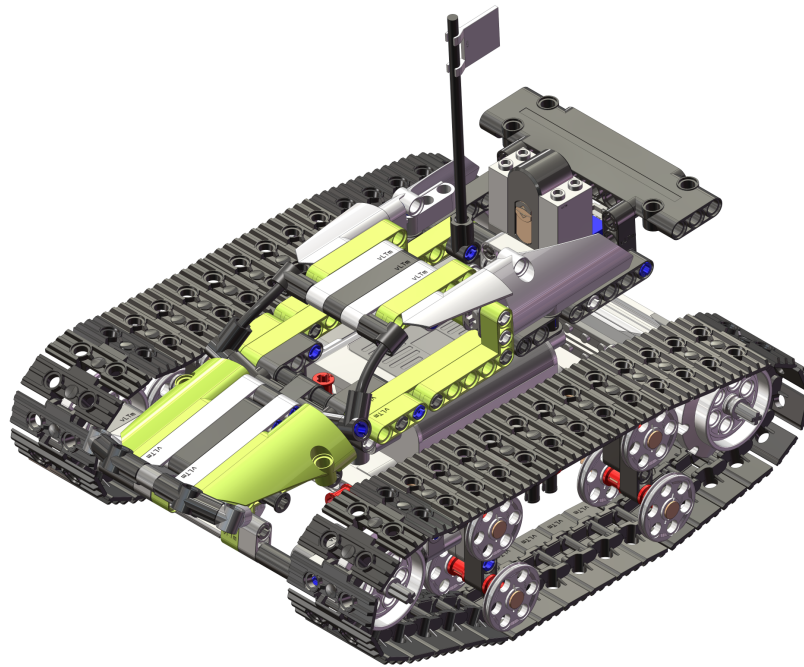


Figura 3.11: Modelo vLTm_42065-1

Es un vehículo teledirigido que posee dos motores, cada uno para arrastrar una cadena. La cadena derecha (mirando el vehículo en el sentido de la marcha) es arrastrada por un motor eléctrico situado en la parte posterior derecha mientras que la cadena izquierda es arrastrada por otro motor de las mismas características, esta vez situado en la parte superior izquierda. Los controles permiten accionar los motores en un sentido u otro y por tanto el vehículo puede moverse hacia delante, hacia atrás o girar si las cadenas se mueven en sentidos opuestos.

3.5.2 Componentes del modelo

El modelo posee 370 componentes, que se aprecian en el despiece de la Figura 3.12.

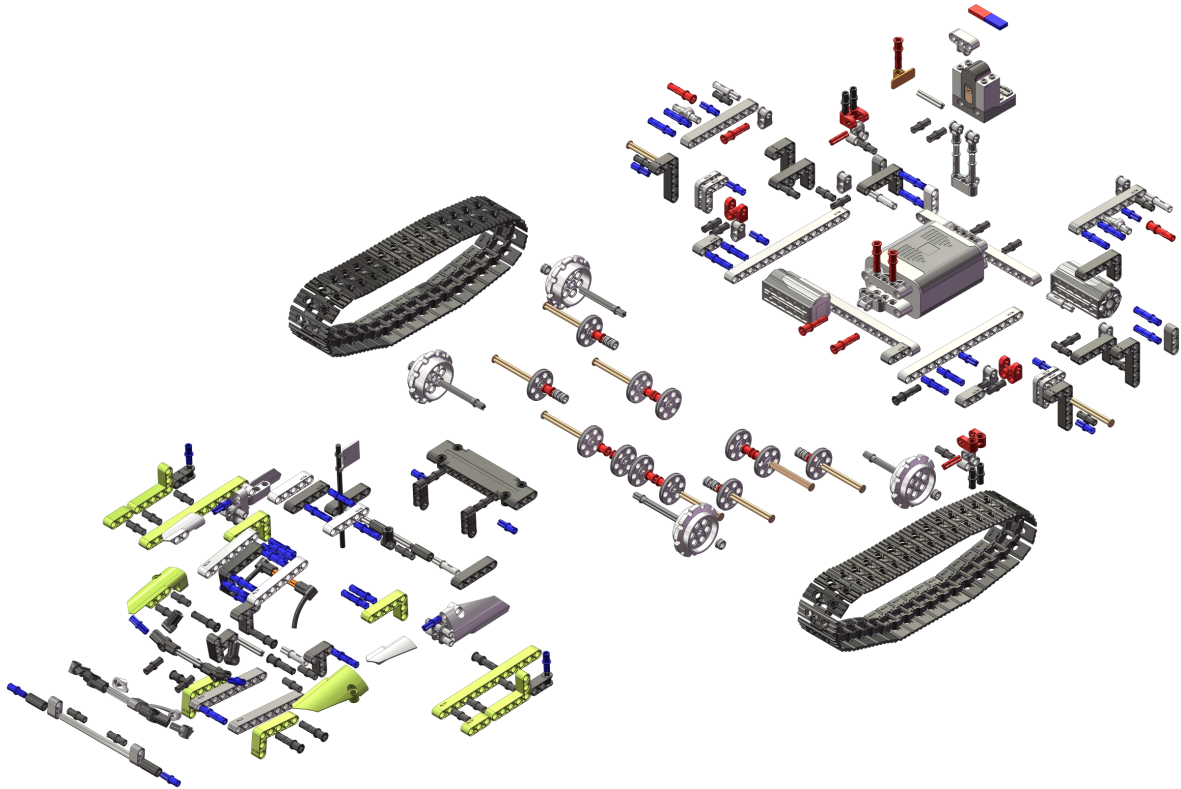


Figura 3.12: Componentes del modelo vLTm_42065-1

3.5.3 Partes fijas y móviles

Al contrario que en los demás, la distinción entre partes fijas y móviles de este modelo es inmediata. Como parte fija y, al contrario de lo que se pueda pensar en un principio, no se ha tomado la carrocería ya que, aunque efectivamente esta supone un bloque completo cuyos componentes no poseen movilidad entre ellos, esta se mueve alrededor de un eje situado en la parte anterior del modelo como si del maletero de un coche se tratase para dejar paso a la verdadera parte fija, que aloja los motores, la alimentación y la centralita que controla los motores y con la que se comunica el mando radio-control.

En la Figura 3.13 se aprecia el chasis, formado por un bloque de componentes en el que se apoya la alimentación, la centralita y los dos motores que controlan el movimiento de las cadenas.

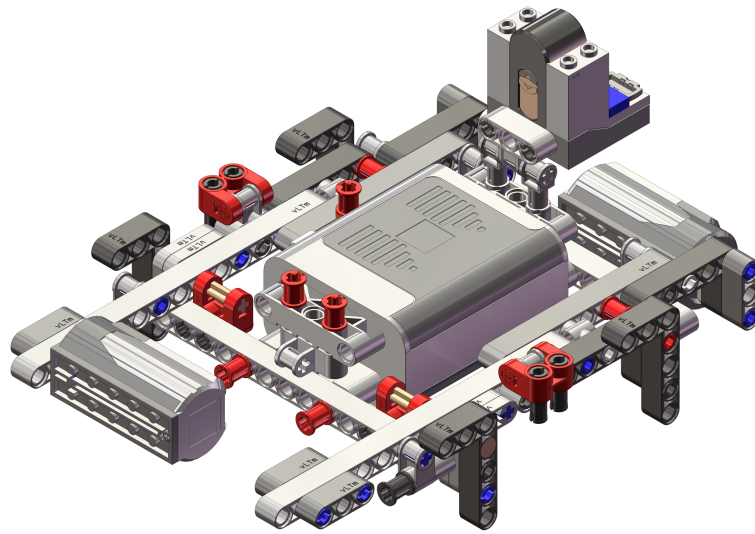


Figura 3.13: Chasis del modelo vLTm_42065-1

Como partes móviles se han distinguido dos, por una parte la carrocería ya que, aunque no posee ninguna funcionalidad salvo acceder al chasis, posee un grado de libertad, el de rotación alrededor de un eje situado en la parte anterior y, por tanto, se trata de una parte móvil. Por otra parte, los dos grupos de cadenas y las catalinas y guidores asociados a las mismas, tal y como muestra la Figura 3.14

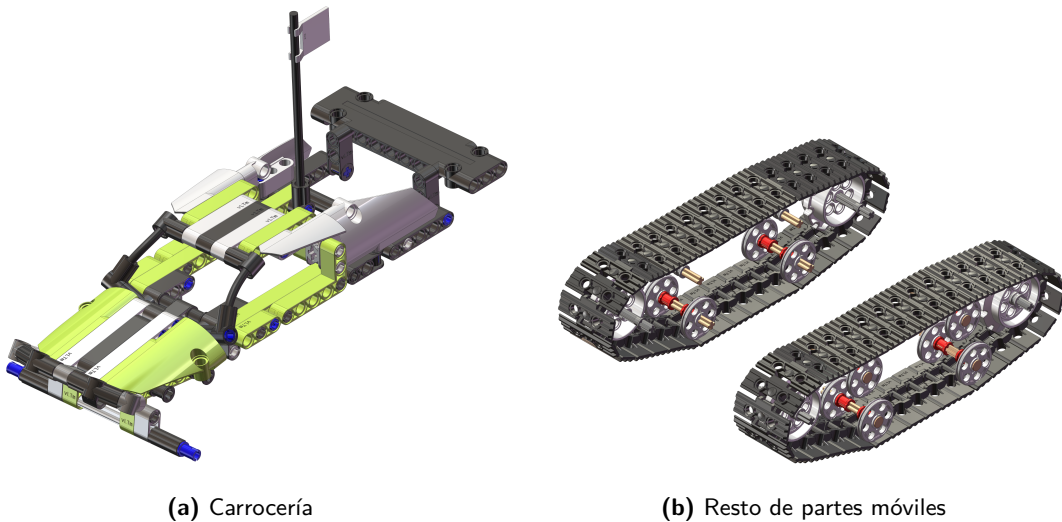


Figura 3.14: Partes móviles del modelo vLTm_42065-1

3.6 Creación del modelo virtual vLTm_sheepo-Jeep

3.6.1 Descripción del modelo

Es el modelo más grande de los cuatro y representa un Jeep Wrangler Rubicon a escala 1/10. Posee unas medidas de 18x42x20 cm y pesa alrededor de 2,7 kg.

Como ya se comentó en el anterior capítulo, se trata de una creación personalizada hecha con piezas oficiales de Lego©. Esto quiere decir que, aunque este fabricada con piezas oficiales de la marca, no representa un modelo comercial que sea distribuido por la compañía. El autor es Fernando Benavides, que posee un *blog* llamado Sheepo's Garage (<https://www.sheepo.es> donde "sube" imágenes de los modelos que ha creado acompañadas de una breve descripción de sus funcionalidades y, si se desea, es posible adquirir las instrucciones en formato electrónico (pdf). La Figura 3.15 muestra imágenes del modelo extraídas directamente de su página web.



Figura 3.15: Imágenes de la creación personalizada Jeep Wrangler Rubicon

Fuente: <http://www.sheepo.es/>

La descripción y montaje de este vehículo seguirán un guión un tanto diferente al de los anteriores ya que se trata de un modelo de una complejidad notable, mucho más cercano a un modelo real en sus partes y funcionamiento. Primero se explicará el procedimiento de montaje, más tarde se explicarán cada una de sus partes y por último se detallarán sus funcionalidades.

3.6.2 Procedimiento de montaje

Este modelo cuenta con, aproximadamente, 2700 componentes y cuenta con muchas funcionalidades. Es por ello que, de cara al ensamblaje del mismo, no es de gran utilidad la "inspección visual" para distinguir piezas y trozos. El procedimiento de montaje ya no se basa por tanto en coger el modelo físico e ir viendo qué trozos de no más de diez componentes se pueden montar y qué partes se mueven y cuáles no sino que se basa en el uso de las instrucciones.

Las instrucciones de este modelo son también, lógicamente, una creación personalizada. Sin embargo, se asemejan mucho a las instrucciones que son proporcionadas en los sets de Lego Technic®. Se trata de un libro (en este caso en formato pdf) donde se indican mediante instrucciones visuales cómo se debe montar cada componente, de tal forma que sea muy ilustrativo, intuitivo y rápido. En la Figura 3.16 se muestran imágenes extraídas de las instrucciones en pdf del modelo, adquiridas en la página web del autor del mismo.

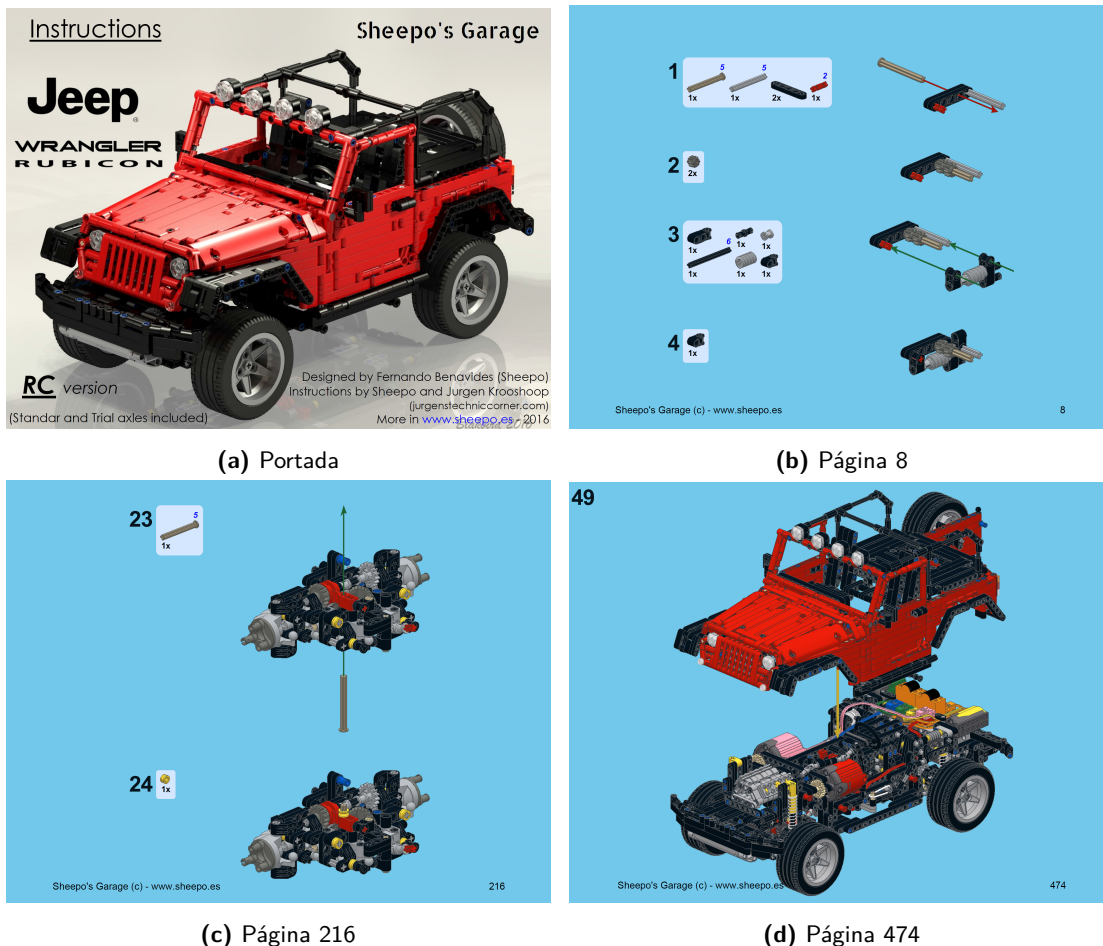


Figura 3.16: Imágenes de las instrucciones del modelo Jeep Wrangler Rubicon

El procedimiento de montaje que se ha seguido para virtualizar el modelo ha sido el siguiente:

1. Realizar un listado de los componentes necesarios para montar el modelo físico.
2. Importar esos componentes de la biblioteca de componentes virtuales del tutor de este proyecto, con los colores que se correspondan al modelo que se va a ensamblar.
3. Seguir las instrucciones de montaje, identificando en las imágenes de las propias instrucciones las partes fijas y móviles del modelo, montando primero todas las partes fijas, agrupando las que no posean movimiento relativo entre ellas de una manera coherente, y después las móviles, añadiéndolas al modelo en la posición que deben estar y con los grados de libertad apropiados.
4. Comprobar que todas las funcionalidades del modelo virtual se corresponden con las del modelo físico arrastrando el ratón en las partes móviles y verificando el funcionamiento del conjunto.

Existe, por tanto, una diferencia fundamental entre el modo de operación de los anteriores modelos y este. Cuando en los anteriores modelos no eran necesarias las instrucciones para montar el modelo virtual (el físico lógicamente sí) y bastaba con la observación visual para identificar las piezas fijas y móviles, en este vehículo, no solo por el volumen de componentes que lo forman sino también por sus múltiples partes móviles, es fundamental seguir las instrucciones y completar el proceso, en algún caso, con la observación visual.

En las instrucciones se distinguen cinco partes muy diferenciadas del modelo, a saber:

- Chasis. Es la base del modelo que soporta el resto de partes.
- Tren de potencia. Transmite y desmultiplica el movimiento de los motores a los dos ejes.
- Eje delantero. Contiene el diferencial y la dirección delantera, con las dos ruedas delanteras.
- Eje trasero. Contiene el diferencial trasero y las dos ruedas traseras.
- Carrocería. La parte que culmina y da forma al modelo e incluye las puertas, el capó y el portón trasero.

En los siguientes apartados se explican con detalle cada una de estas partes.

3.6.3 Partes del modelo

Como ya se ha comentado, este modelo está dividido en cinco partes, cada una con una función en particular, aunque ninguna tiene mucho sentido sin el resto. En esta sección se explicará los componentes que forman cada parte y las funciones que cada una desempeña en el funcionamiento del vehículo completo.

Chasis

El chasis es la estructura interna del vehículo, cuya función es hacer de base y sostener el resto de partes, así como otorgar rigidez al modelo. En la Figura 3.17 se muestra una imagen extraída del propio SolidWorks del chasis del modelo virtualizado.

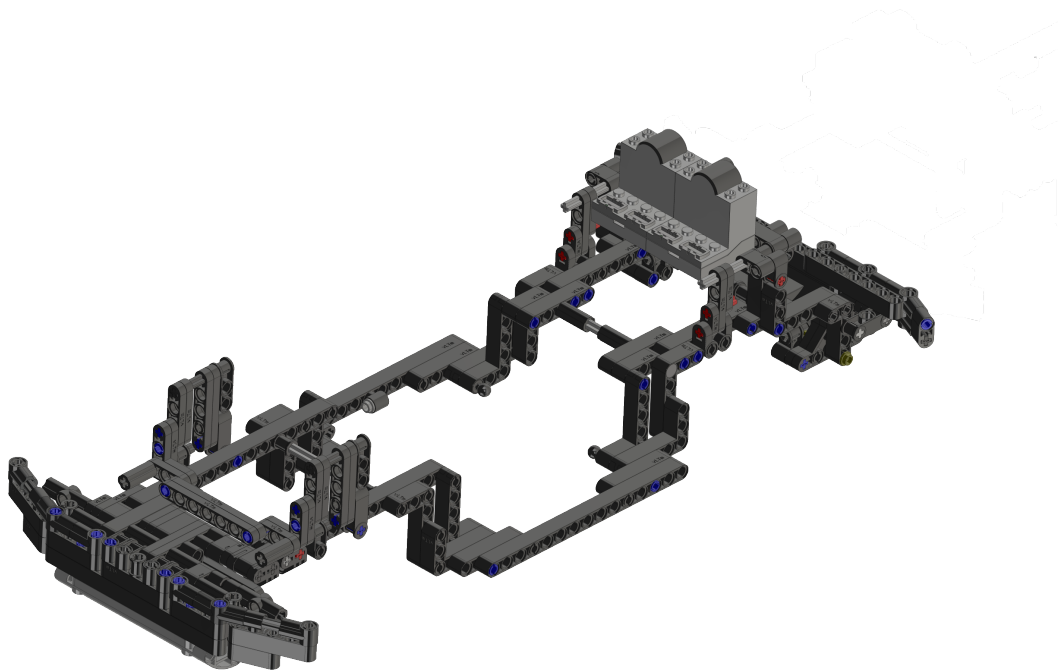
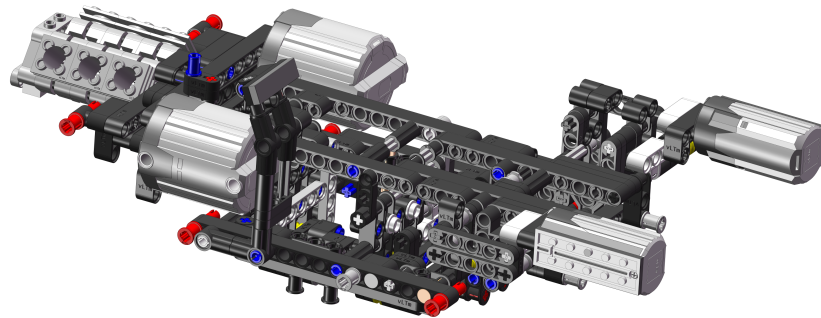


Figura 3.17: Chasis del modelo vLTm_sheepo-Jeep

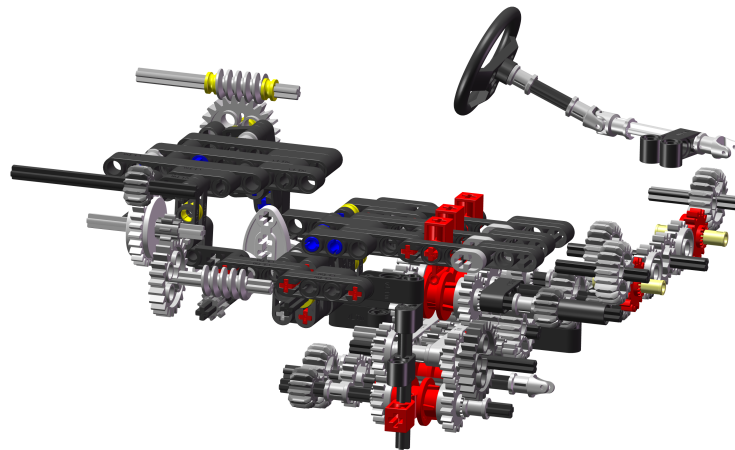
El chasis está formado por 382 componentes y, como se aprecia en la imagen anterior, se trata de una estructura sólida que soportará el tren de potencia, los dos ejes y la carrocería. Además, también incluye las dos centralitas para recibir las ordenes del mando (ya que se trata de un modelo radio-control) y aloja un espacio en la parte trasera para colocar las baterías (seis pilas doble A en este caso).

Tren de potencia

El tren de potencia constituye el corazón del vehículo, puesto que es lo que le da "vida" y movimiento al mismo. Esta formado por 749 componentes. Al contrario que el chasis, el tren de potencia no puede ser considerado como un único bloque cuyas piezas carecen de movimiento relativo, sino que lo compone una gran estructura sobre la que apoyan cientos de partes móviles que permiten transmitir y desmultiplicar el movimiento entre el eje de entrada y el de salida. La Figura 3.18 muestra dos imágenes. La primera corresponde a la parte fija del tren de potencia, que no es más que una estructura con cavidades cilíndricas para que apoyen los ejes y engranajes de la segunda imagen, que forman la caja de cambios del vehículo.



(a) Parte fija del tren de potencia



(b) Partes móviles del tren de potencia

Figura 3.18: Tren de potencia del modelo vLTm_sheepo-Jeep

La caja de cambios es sin duda la parte más ingeniosa de este modelo. Se trata de una caja secuencial de cinco velocidades y la posibilidad de invertir el sentido de giro (marcha atrás). Además, cuenta con una reductora que permite desmultiplicar la relación de transmisión entre el eje de entrada y el de salida, para así conseguir más par, tal y como funciona el vehículo comercial de la marca Jeep. Por si no fuera poco, esta increíble creación también permite alternar la tracción entre las ruedas traseras y las cuatro ruedas así como el bloqueo de los diferenciales de los ejes delanteros y traseros.

En un vehículo real, los cambios de marcha son debidos a variaciones en la relación de transmisión de los ejes de entrada y de salida, como consecuencia del acople de unos engranajes con otros. Este acople se realiza mediante un embrague que puede ser de varios tipos (de fricción, hidráulico, etc.). En los modelos Lego Technic© el principio de funcionamiento del cambio de marchas es exactamente el mismo, sin embargo, el acople entre engranajes se realiza mediante un mecanismo sencillo que simplifica muy bien el funcionamiento de un embrague de un vehículo industrial o de un turismo.

En la Figura 3.19 se ilustra el funcionamiento de un embrague de Lego Technic©.

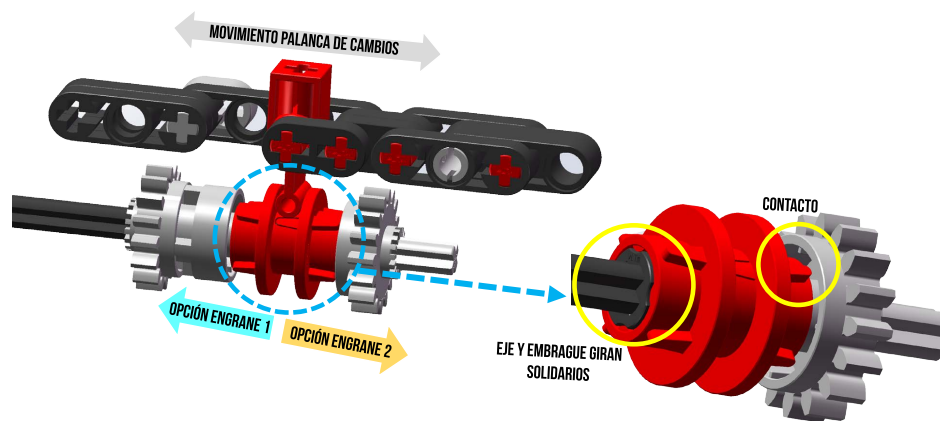


Figura 3.19: Funcionamiento del embrague en modelos Lego Technic©

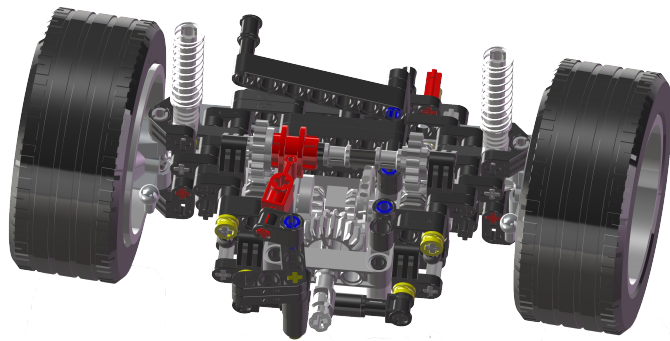
Se trata de una pequeña pieza (pieza roja) que posee unas hendiduras que hacen posible el acople entre un eje u otro. El desplazamiento del propio embrague viene determinado por el movimiento de una palanca que empuja a este a un lado del eje u otro y permite acoplarlo con un eje u otro. En la subfigura b de la Figura 3.18 se puede observar que existen varios de estos embragues que posibilitan todos los modos de funcionamiento del modelo.

En resumidas cuentas, gracias al funcionamiento de la caja de cambios, es posible seleccionar de manera secuencial entre cuatro modos de funcionamiento:

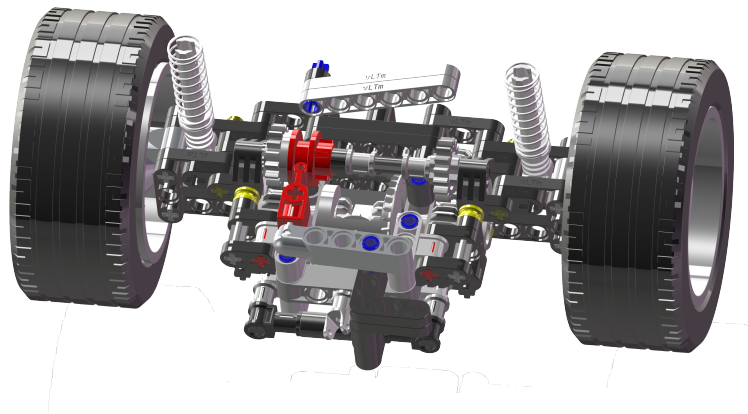
- Tracción trasera con la reductora desactivada (2H).
- Tracción a las cuatro ruedas con la reductora desactivada (4H).
- Tracción a las cuatro ruedas con la reductora activada (4L).
- Tracción a las cuatro ruedas con la reductora activada y los diferenciales bloqueados (4Ldiff).

Ejes

Los ejes son los encargados de transmitir el movimiento desde el tren de potencia a las ruedas y, además, en el caso del eje delantero, orientar las ruedas en un sentido u otro formando el sistema de dirección. Tanto el eje delantero como el trasero poseen un diferencial que permite bloquearse. En este modelo el eje delantero esta formado por 156 componentes y el trasero por 136 (esos veinte componentes de diferencia forman el sistema de dirección del eje delantero). En la Figura 3.20 se muestran imágenes de ambos ejes.



(a) Eje delantero del modelo vLTm_sheepo-Jeep



(b) Eje trasero del modelo vLTm_sheepo-Jeep

Figura 3.20: Ejes del modelo vLTm_sheepo-Jeep

El diferencial es un mecanismo complejo que permite independizar el movimiento de las dos ruedas del eje. Es esencial poseer un diferencial en las ruedas motrices puesto que, al trazar curvas, la rueda exterior gira a más velocidad que la interior y, si no fuese por el diferencial, las ruedas deslizarían sobre el suelo, perdiendo la tracción y el control del vehículo.

Sin embargo, cuando una de las dos ruedas motrices se encuentra en el aire o patinando sobre un terreno con un coeficiente de rozamiento muy bajo (barro, nieve, etc.) toda la fuerza motriz del tren de potencia es conducida a la rueda que se encuentra en libre rotación o patinando. Es en estas ocasiones donde interesa bloquear el diferencial, para que se transmita la misma potencia a las dos ruedas y así la rueda que no se encuentra patinando ejerza fuerza sobre el terreno y el vehículo pueda "escapar" de esa zona.

Dado que este vehículo posee tracción a las cuatro ruedas, es decir, transmite potencia a los dos ejes, este tiene la capacidad de bloquear ambos diferenciales. La forma de hacerlo es mediante el "embrague" rojo que hay en ambos ejes, y el funcionamiento es el explicado en la Figura 3.18.

Suspensiones

Aunque las suspensiones no constituyen una parte independiente del vehículo, resulta muy interesante conocer como absorbe los impactos y las irregularidades del terreno este modelo. En la Figura 3.21 se muestra el conjunto chasis + ejes.

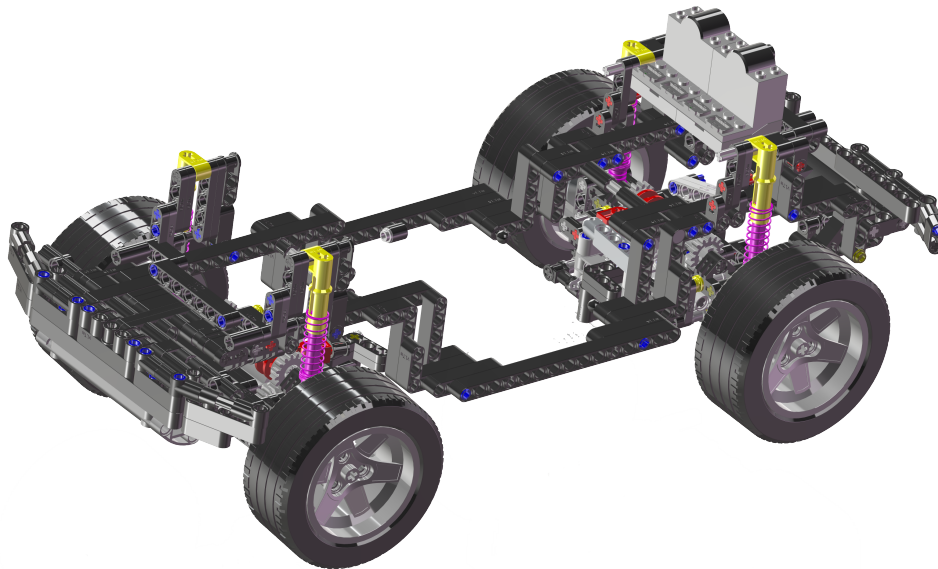


Figura 3.21: Conjunto Chasis+Ejes en el modelo vLTm_sheepo-Jeep

Se trata de un sistema de suspensión mecánica mediante cuatro cilindros (señalados en morado) que se desplazan longitudinalmente a lo largo de otros cuatro (señalados en amarillo) que a su vez se encuentran apoyados en el chasis. La carrera de los cilindros interiores es controlada por cuatro muelles que regulan el desplazamiento de los cilindros interiores.

En la Figura 3.22, donde se han ocultado las ruedas y el tren de potencia, se aprecia claramente el funcionamiento del sistema de suspensión donde los ejes se pueden mover verticalmente, quedando limitados tanto por el recorrido de las suspensiones como por la longitud de los tiradores (señalados en negro) que unen los ejes con el tren de potencia. También es posible ver el funcionamiento de la dirección, que transmite el movimiento desde el volante a las ruedas mediante ejes no alineados, unidos por juntas universales.

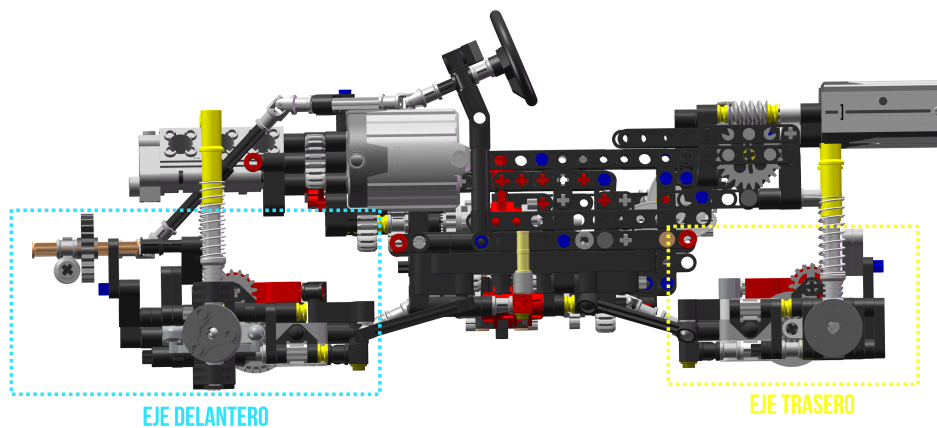


Figura 3.22: Vista de perfil del sistema de suspensión en el modelo vLTm_sheepo-Jeep

Es decir, los ejes están conectados al chasis mediante los cilindros de suspensión, y al tren de potencia mediante los tiradores. En la Figura 3.23 se ha ocultado el chasis, intentando destacar estas uniones. En ella se observan los dos ejes destacados en colores llamativos sobre el tren de potencia, que se ha coloreado de un gris pálido. Se aprecia claramente como ambos ejes están sujetos al tren de potencia mediante tiradores (señalados ahora en rojo). Sin embargo, los tiradores son un mero elemento estructural para sujetar los ejes al tren de potencia. La transmisión del movimiento hacia los ejes se realiza mediante ejes no alineados, unidos de nuevo por juntas cardan (señaladas en verde).

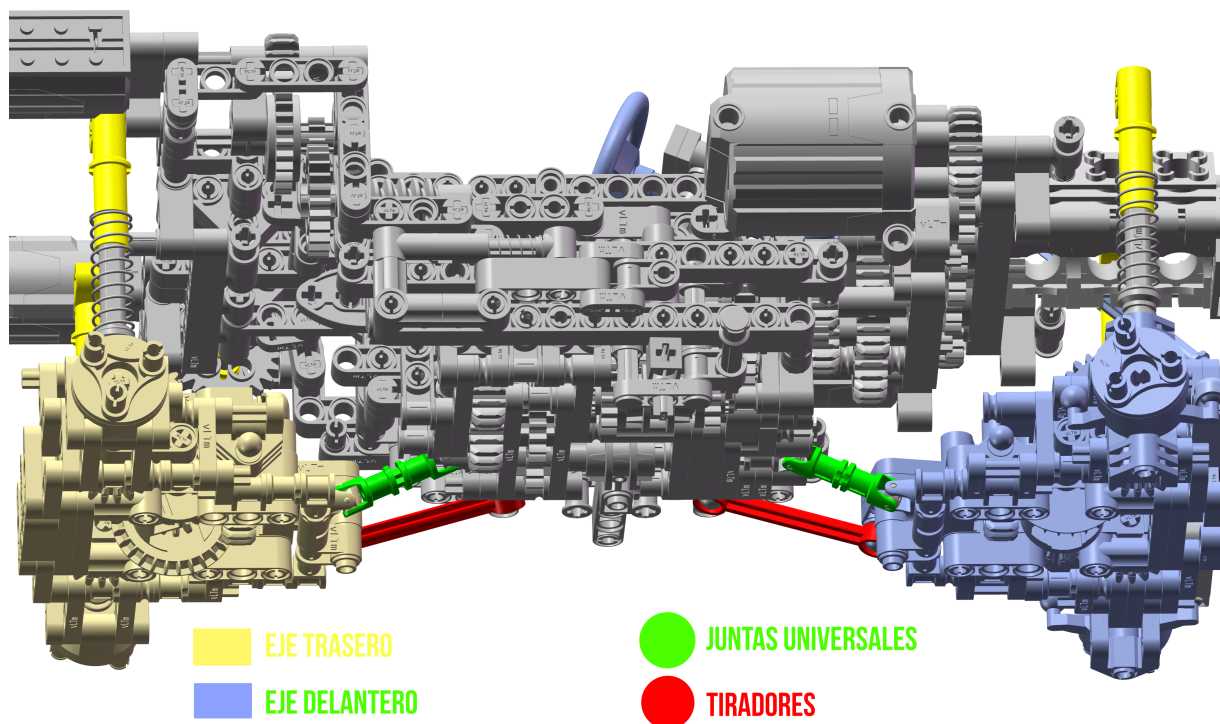


Figura 3.23: Conexión de los ejes con el tren de potencia en el modelo vLTm_sheepo-Jeep

Carrocería

La carrocería de un vehículo es la estructura que le otorga la forma exterior y soporta los pasajeros y la carga. La carrocería de este modelo está formada por 1067 componentes y se muestra en la Figura 3.24.

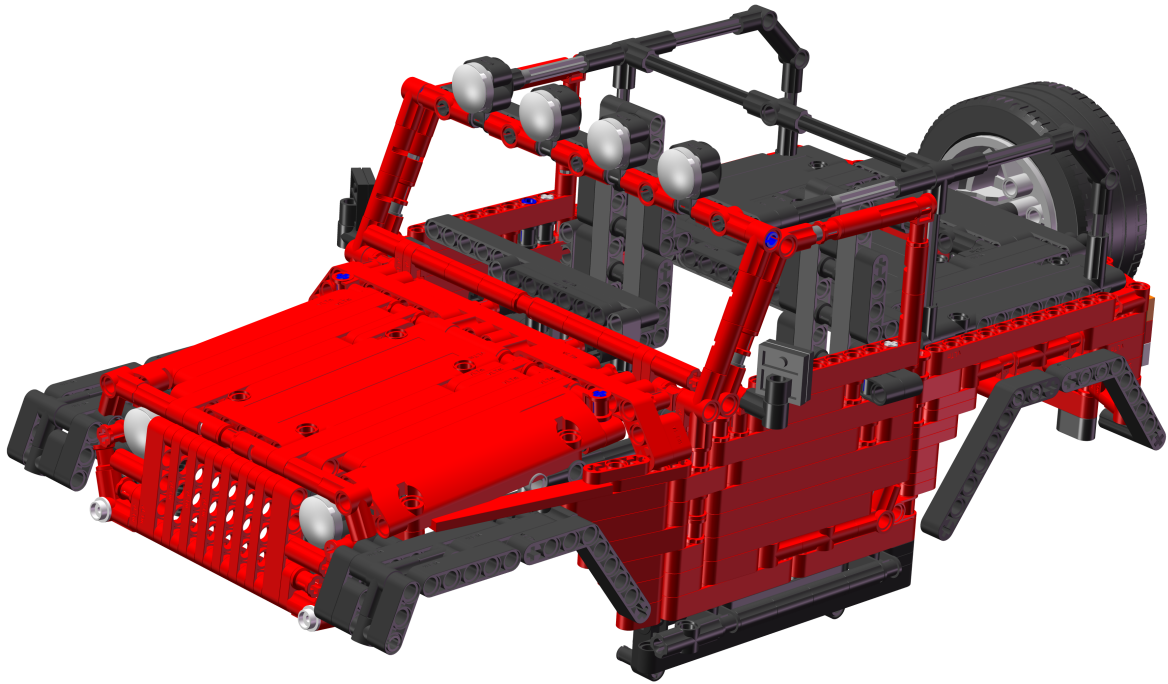


Figura 3.24: Carrocería del modelo vLTm_sheepo-Jeep

Tal y como ocurre con los ejes o el tren de potencia, la carrocería está formada por una gran parte fija y varias móviles. La estructura fija es aquella que le confiere la forma al modelo y aporta rigidez y las partes móviles son cuatro: las dos puertas, el capó y el portón trasero.

3.6.4 Modelo final y funcionalidades

Tras haber detallado cada una de las partes principales que componen el modelo, es hora de mostrar el resultado del proceso de ensamblaje. El modelo completo se muestra en la Figura 3.25.



Figura 3.25: Model completo: vLTm_sheepo-Jeep

Las funcionalidades de este modelo se resumen a continuación:

- Sistema de suspensión mecánica.
- Dos ejes con diferencial bloqueable y sistema de dirección en las ruedas delanteras.
- Cuatro modos de funcionamiento: 2H,4H,4L,4Ldiff.
- Sistema radio-control.
- Abertura de puertas, capó y portón trasero.

Con este modelo queda finalizada la etapa de montaje. Tras el debido proceso de compactación, todos los modelos virtuales estarán listos para entrar en la etapa de simulación, donde se añadirán los pares cinemáticos apropiados y se conducirán los grados de libertad para animar el movimiento.

Capítulo 4

Proceso de compactación

Tras el proceso de montaje, se obtiene como resultado un modelo que es idealmente idéntico a su homólogo físico, posee los mismos componentes y los mismos grados de libertad. Como ya se explicó en el anterior capítulo, durante el ensamblaje, pequeños grupos de componentes son agrupados en trozos, y esos trozos son agrupados a su vez en piezas. Es decir, que el modelo final ensamblado es un documento que posee una gran cantidad de información ya que contiene todas las relaciones de posición que se han impuesto entre los componentes para formar trozos, aquellas que se imponen entre los trozos para conformar las diferentes piezas y las que se definen para que las piezas tengan la movilidad que le corresponden en el ensamblaje final. En definitiva, muchos componentes y muchas más relaciones de posición que tiene que procesar el ordenador.

Sin embargo, para simular un modelo y dotarlo de movimiento, no es necesaria tanta información puesto que todas aquellas partes que no posean movimiento relativo entre ellas, de cara a una simulación, se comportarán como una sola y, por tanto, no será necesario conocer con cuántos componentes se ha creado esa parte o qué relaciones de posición se han impuesto. Un ejemplo muy claro puede ser el chasis de un modelo, o la carrocería de un vehículo. El chasis del Jeep Wrangler Rubicon está formado por 382 componentes que son agrupados en 42 trozos. Sin embargo, esos 42 trozos acaban formando una sola pieza, el chasis, que se comporta como un único bloque en el movimiento del modelo final.

El proceso de compactación consiste en eliminar toda esa información que, de cara a la simulación del modelo, es superflua, aligerando el modelo y haciéndolo mucho más fácil de procesar en términos computacionales. Tras el proceso de compactación se obtendrá un modelo únicamente formado por un nivel jerárquico donde será imposible acceder al árbol para consultar qué trozos y qué componentes formaban cada una de las piezas. Es una forma de desviar los recursos del ordenador, que ya no son empleados en procesar todos esos componentes y relaciones de posición sino que ahora se encuentran disponibles para realizar los futuros cálculos asociados a la cinemática del modelo. No obstante, el archivo con toda la información del montaje siempre estará disponible por si se desea acceder a él.

El resultado del proceso es un archivo en formato Parasolid Binary (**.x_b**) que puede ser leído por el posterior programa de software que se usará para la simulación. El archivo solo contiene información sobre las partes que conforman el modelo final, entendidas como un único bloque.

La Figura 4.1 ilustra muy bien el proceso de compactación.

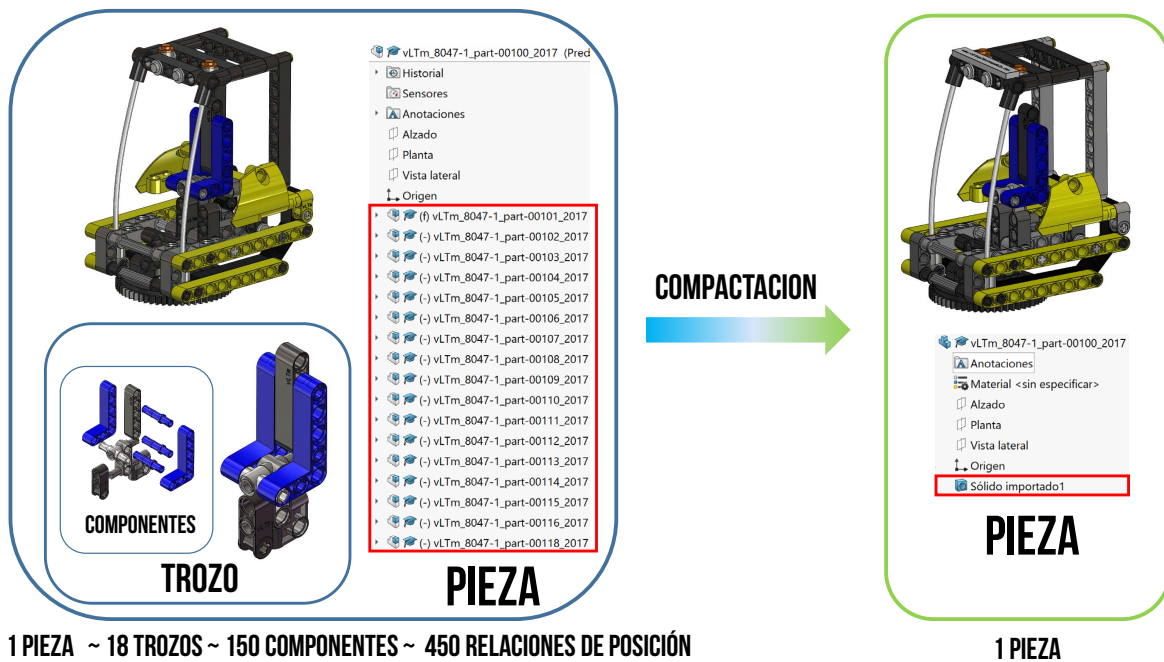


Figura 4.1: Esquema del proceso de compactación

Este proceso resulta muy recomendable para poder continuar trabajando con el modelo, sobre todo si se quieren realizar simulaciones sobre él ya que los cálculos asociados a dichas simulaciones pueden llevar muchas horas, algunas incluso días, y por tanto es necesario que el modelo sea ligero y fácil de procesar para acortar el tiempo del análisis cinemático.

Simulación del modelo virtual con RecurDyn

5.1 Presentación y Objetivos

Este capítulo se centra en la simulación de los modelos virtuales que ya han sido montados de la forma que describen los capítulos anteriores. La simulación consiste en dotar de movimiento al modelo conduciendo sus grados de libertad de forma programada durante un cierto tiempo. La simulación se puede realizar en vacío, si el modelo no se desplaza sobre un terreno, o añadir un suelo simulando un terreno (ya sea asfalto, nieve o barro) y añadiendo contactos entre los elementos de tracción y el propio terreno.

La forma de conseguir que el modelo tenga la movilidad que posee su homólogo físico es mediante la adición de pares cinemáticos. Los pares son uniones entre dos elementos que restringen ciertos grados de libertad y permiten otros. El primer paso antes de conducir los grados de libertad es la obtención del modelo cinemático auto-alineado, esto es, el modelo que, teniendo los grados de libertad que posee el modelo físico, no tenga restricciones en exceso. Una vez conseguido el modelo cinemático auto-alineado será posible programar el movimiento en vacío o sobre una base y extraer conclusiones.

5.2 El software RecurDyn

Una de las principales diferencias de este Trabajo Fin de Máster en comparación con el Trabajo Fin de Grado es la utilización de RecurDyn. Mientras que en el primero se hizo uso del SolidWorks tanto para la parte de montaje como para la de simulación, en este proyecto se ha decidido usar para esta segunda parte un software especializado en simulaciones dinámicas, RecurDyn. RecurDyn es un software claramente enfocado a la realización de análisis cinemáticos y dinámicos que posee múltiples funcionalidades y también es capaz de realizar análisis de estrés mediante el Método de los Elementos Finitos, como se verá en el siguiente capítulo.

La razón principal por la que se ha decidido usar RecurDyn para esta segunda parte del proyecto viene muy ligada a la elección primera que se realizó cuando se escogieron los modelos con los que se iba a trabajar en este proyecto. Se trataba de cuatro modelos, tres de ellos cuyo movimiento es mediante cadenas. RecurDyn posee un módulo específico para simular vehículos industriales que se mueven por cadenas y por ello es perfecto para comparar el movimiento de un vehículo de tracción a las cuatro ruedas con vehículos industriales movidos por cadenas. Además, al ser un software enfocado a la realización de análisis cinemáticos y dinámicos, aprovecha muy bien los recursos del ordenador y resulta muy eficaz en términos de coste computacional.

Durante las siguientes secciones se explicará cómo se han realizado las simulaciones de los diferentes modelos y los pasos necesarios para llegar hasta ese punto. Sin embargo, RecurDyn es un software que, aunque posee una interfaz intuitiva, requiere un largo proceso de aprendizaje, sobre todo si se desean realizar simulaciones complejas con varios movimientos o donde intervienen fuerzas exteriores. Por ello, se ha incluido en el Anexo I un Manual de Usuario para el que desee profundizar más en el tema o esté interesado en aprender los fundamentos básicos del programa. El Manual de Usuario incluye una pequeña introducción, una explicación del entorno gráfico del programa y varios ejemplos y pequeños tutoriales para hacer más ameno el proceso de aprendizaje.

5.2.1 Entorno de trabajo

La interfaz de RecurDyn se organiza en varios subespacios de trabajo, que se explican a continuación:

- Pestañas: RecurDyn divide sus funcionalidades en diferentes pestañas:
 - **Home:** Permite realizar cambios básicos en la interfaz como definir el tamaño de las ventanas por defecto, el color de fondo, el color de la interfaz e importar y exportar modelos.
 - **Analysis:** Es el espacio de post-tratamiento donde comprueba la movilidad del mecanismo y donde se realizan las simulaciones y el graficado de resultados.
 - **Professional:** Es la pestaña de trabajo por excelencia, donde se establecen pares cinemáticos, contactos entre piezas, fuerzas, etc.
 - **Toolkit:** Contiene módulos adicionales al paquete básico del programa como por ejemplo un módulo para simular vehículos industriales con cadenas, un módulo de partículas o un módulo para simular el comportamiento de un motor de combustión interna alternativo.
- Ventana gráfica: Donde se muestra gráficamente el modelo y todo lo relacionado con él.
- Ventana de Mensajes: Proporciona todo tipo de información sobre el modelo, los grados de libertad, las restricciones en exceso, errores durante la simulación, etc.
- Árbol de Trabajo: Muestra la información jerarquizada acerca de los cuerpos que forman el modelo, los pares cinemáticos, etc. Permite mostrar u ocultar items, acceder a las propiedades de cada ítem y editarlas.

La Figura 5.1 se corresponde con una captura de pantalla del programa RecurDyn donde se distinguen los subespacios de trabajo explicados anteriormente.



Figura 5.1: Entorno de trabajo en RecurDyn

5.2.2 Importación de modelos

El primer paso, una vez conocida la distribución de la interfaz de RecurDyn, es importar el modelo cuyo análisis se desea realizar. Hay que decir que, aunque RecurDyn en su pestaña: Professional posee opciones para crear cuerpos como cilindros, cajas y esferas, no es el objetivo de este proyecto aprender a usar este tipo de herramientas, sino que el uso de este software estará centrado en importar los modelos montados y comenzar a imponer pares cinemáticos. No obstante, en el Manual de Usuario están explicadas las herramientas de creación de cuerpos.

RecurDyn permite importar modelos con formatos muy distintos, procedentes de softwares diferentes como AutoCAD, CATIA, ADAMS, etc. En este proyecto se trabajará con archivos Parasolid procedentes del software SolidWorks. Para importar un modelo primero se deberá crear uno nuevo, vacío, nombrarlo y escoger las unidades con las que se va a trabajar, tal y como muestra la Figura 5.2.

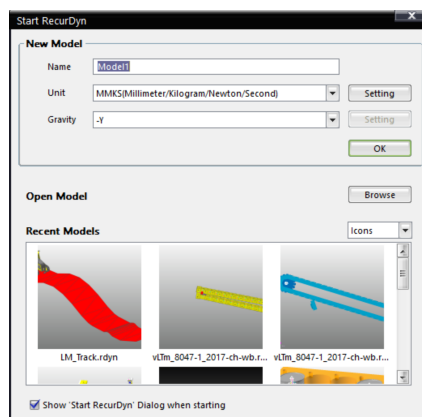


Figura 5.2: Ventana inicial de RecurDyn

Una vez pulsado el botón *OK*, se habilitará la interfaz principal del RecurDyn que se ha descrito en la sección anterior. Pulsando en el botón con el logo del programa (situado en la parte superior izquierda de la pantalla) se abrirá un menú con múltiples opciones, entre ellas la de importar un modelo. Al clicar en *Import* se abrirá el explorador de archivos, donde deberemos seleccionar el tipo de archivo (parasolid binary en este caso), buscar el modelo que se desee importar y clicar en *Abrir*. Con esto habrá finalizado el proceso de importación.

5.2.3 Pares cinemáticos

Los pares cinemáticos son uniones encargadas de transmitir el movimiento entre piezas. Equivalen a los cojinetes y rodamientos que se colocan en todo tipo de mecanismos para permitir unos grados de libertad y restringir otros.

Una vez importado el modelo, el siguiente paso es imponer pares cinemáticos entre piezas hasta conseguir restringir aquellos grados de libertad que se deban restringir para que el modelo virtual se mueva como su equivalente físico. En RecurDyn, los pares cinemáticos se encuentran en la pestaña: *Professional* y para definirlos son necesarios:

- Dos cuerpos que se encuentren en contacto.
- Un eje de referencia para situar el par cinemático.
- Una dirección para restringir el/los grado/s de libertad correctamente (p.e. perpendicular a una cara, en la dirección de una arista, etc.).

Se trata pues de ir añadiendo pares cinemáticos entre piezas e ir comprobando la movilidad de la máquina o modelo a medida que se van cerrando "lazos cinemáticos"¹. En la Figura 5.3 se muestra una tabla que resume los pares cinemáticos más utilizados en RecurDyn, el icono con el que son representados así como los grados de libertad que restringen y los que no.













PAR	SÍMBOLO DEL PAR EN RECURDYN	RESTRICCIONES TRASLACIONALES	RESTRICCIONES ROTACIONALES	GRADOS DE LIBERTAD RESTRINGIDOS	GRADOS DE LIBERTAD RESTANTES
REVOLUCIÓN		3	2	5	1
TRASLACIONAL		2	3	5	1
CILÍNDRICO		2	2	4	2
ESFÉRICO		3	0	3	3
UNIVERSAL		3	1	4	2
PLANAR		1	2	3	3
FIJO		3	3	6	0
EN LA LÍNEA		2	0	2	4
EN EL PLANO		1	0	1	5
ORIENTACIÓN		0	3	3	3
PARALELO		0	2	2	4
PERPENDICULAR		0	1	1	5

Figura 5.3: Pares cinemáticos en RecurDyn

¹Un lazo cinemático es un conjunto de mecanismos que constituye una entidad capaz de funcionar por sí sola. Por ejemplo, el mecanismo de movimiento de un brazo de una excavadora está constituido por múltiples barras, engranajes y cilindros neumáticos de tal manera que al accionar una palanca el brazo se inclina o se reclina. Ese conjunto de elementos constituyen un lazo cinemático pues comprenden desde la acción inicial de mover la palanca hasta el movimiento final del brazo.

5.2.4 Acoplamientos

Los acoplamientos son relaciones que se establecen entre pares cinemáticos para definir como se transmite el movimiento. En algunos casos pueden sustituir a los contactos. La mejor forma de explicar esto es mediante un ejemplo:

Existen dos engranajes en contacto que giran cada uno alrededor de su eje. Lo más normal es definir dos pares de tipo revolución para restringir todos los grados de libertad excepto la rotación de cada uno. Ahora bien, al estar en contacto, se ha de simular el contacto que se establece entre el engranaje motriz y el conducido. Esto se puede hacer definiendo un contacto entre ambos, sin embargo, al definir un contacto, RecurDyn detectará la geometría de los engranajes, su masa y su momento de inercia y comenzará a calcular el movimiento. La inclusión de contactos supone un incremento importante en el tiempo de simulación, puesto que el software tiene que realizar multitud de cálculos complejos. Una alternativa al contacto puede ser, en este caso, definir un acoplamiento entre los dos engranajes, definiendo los grados que girará el engranaje conducido por cada grado que gire el engranaje motriz. De esta manera, el comportamiento de cara a la simulación será el mismo, pero el tiempo de procesamiento se habrá visto notablemente reducido al no ser necesario identificar geometría ni realizar cálculos basados en fuerzas e inercias.

En RecurDyn los acoplamientos se definen desde la pestaña: *Professional*, en la opción *Coupler*, y se definen tal y como muestra la Figura 5.4.

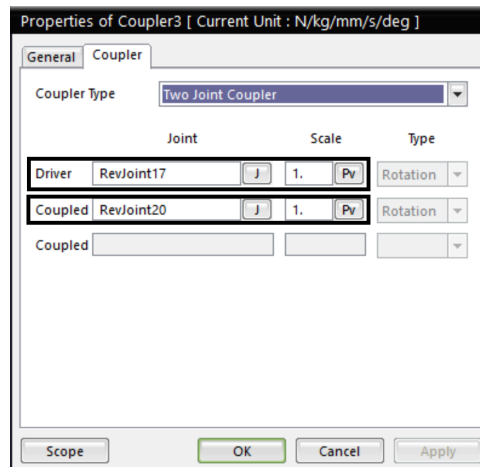


Figura 5.4: Acoplamientos en RecurDyn

Siguiendo con el ejemplo y, puesto que se hecho una "trampa" sustituyendo los contactos por acoplamientos, es absolutamente necesario comprobar que la posición inicial de los dientes no produzca ninguna interferencia. Lo mismo se podría aplicar para otros tipos de mecanismos cuyo funcionamiento se haya definido mediante acoplamientos.

5.2.5 Contactos

Cuando se quiere analizar el movimiento de una rueda o un eslabón de una cadena sobre una superficie, ya sea plana o con obstáculos, los acoplamientos ya no son viables puesto que no se trata de una relación entre dos pares cinemáticos. Es necesario, en estos casos, establecer un contacto.

Los contactos son formas de transmitir el movimiento cuando las partes están tocándose de alguna manera. Existen muchos tipos de contactos como son el contacto sólido, el contacto cilindro-superficie, cilindro-cilindro, esfera-superficie, esfera-esfera, etc. En todos ellos RecurDyn identifica la geometría de los cuerpos y calcula su movimiento en función de la velocidad, la masa, el momento de inercia, etc. Por todos los cálculos que implica la adición de un contacto, el tiempo necesario para llevar a cabo una simulación se ve notablemente aumentado con la inclusión de estos.

Para añadir un contacto solo se necesita seleccionar el tipo de contacto y los cuerpos que se encuentran tocándose o que en algún momento de la simulación se tocarán (por ejemplo la rueda dentada que empuja los eslabones de una cadena y uno de los eslabones que, aunque en la posición inicial no se encuentra tocando la rueda dentada, unos instantes después, cuando la rueda gire, lo hará).

Las propiedades de un contacto ofrecen multitud de parámetros para modificar y adecuar el comportamiento del mismo según se desee, sin embargo, en este proyecto solo se modificarán dos parámetros: el coeficiente de rozamiento y el factor de cálculo, tal y como muestra la Figura 5.5

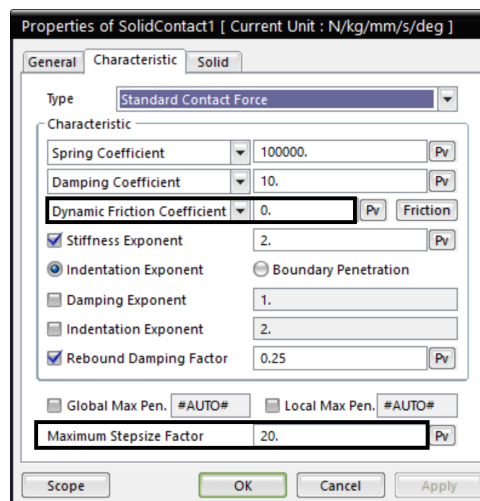


Figura 5.5: Contactos en RecurDyn

El coeficiente de rozamiento mide la oposición al deslizamiento que ofrecen dos cuerpos que se encuentran en contacto. El valor por defecto es 0 y se modificará según el tipo de terreno que se desee simular, así como el tipo de neumático que se encuentre en contacto con ese terreno.

El factor de cálculo de un contacto (*Stepsize Factor* en inglés) mide la exactitud con la que RecurDyn calcula el contacto. El valor del factor de cálculo de un contacto se multiplica por el valor del factor de cálculo de la simulación. Esto quiere decir que si se ha definido una simulación de 5 segundos y 250 pasos (*steps*) y además se ha definido un contacto con un valor de factor de cálculo de 20, RecurDyn calculará $250 \times 20 = 5000$ veces el valor del contacto en esos 5 segundos de simulación. Es por ello que el coste computacional de los contactos es muy elevado por ello se intenta evitar la definición de muchos contactos y, si se hace, se definen con factores de cálculo muy bajos.

5.2.6 Cálculo de movilidad y mecanismos auto-alineadores

Los grados de libertad son el número de coordenadas independientes que hacen falta para indicar con exactitud la posición de un cuerpo con respecto a un sistema de referencia. Así, una rueda que gira alrededor de un eje solo posee un grado de libertad, la rotación alrededor de su propio eje y, por tanto, solo es necesario indicar el ángulo que forma respecto a un sistema de referencia para indicar su posición exacta o las vueltas que ha dado desde su posición inicial.

Cuando se habla de pares cinemáticos, los grados de libertad que permiten se asocian a la **conectividad** de ese par cinemático. Por ejemplo, un par revolución tiene una conectividad de uno ya que solo permite la rotación alrededor de un eje, y un par traslacional tiene una conectividad de tres ya que permite las tres rotaciones alrededor de los ejes principales, restringiendo las tres traslaciones.

Si, por el contrario, se habla de mecanismos o de máquinas mecánicas (conjunto de mecanismos), a los grados de libertad del conjunto se le conoce también como **movilidad del sistema**².

RecurDyn permite calcular la movilidad de un conjunto realizando lo que llama un **Pre-Analysis**. La opción de *Pre-Analysis* está disponible en la pestaña: Analysis bajo el nombre de *Pre*. La Figura 5.6 muestra la ventana que aparece al pulsar en esta opción.

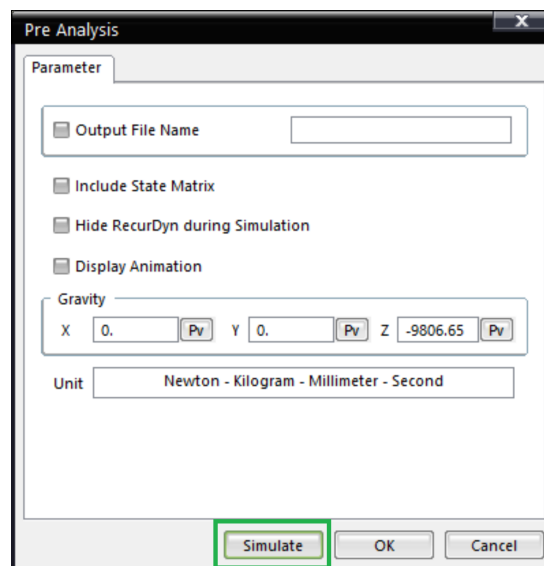


Figura 5.6: Cálculo de la movilidad en RecurDyn

Como se aprecia, la ventana es sencilla y no posee demasiadas opciones. Se mantendrá el valor de la gravedad que viene por defecto así como su dirección y sentido, con lo que solo será necesario pulsar el botón *Simulate* y, tras unos segundos de cálculo, nos aparecerá en la ventana de mensajes algo parecido a lo que muestra la Figura 5.7

²Para que se entienda mejor el concepto de movilidad, en el Anexo I, dentro del Manual de Usuario de RecurDyn se explica el cálculo de la movilidad de mecanismos planos y tridimensionales.

```

System Configuration Information
  No. of Generalized Coordinate
  No. of Generalized Velocity
  No. of Rigid Body

Kinematic Degree of Freedom = 5

Total array size = 274572
Total memory size for array = 11 MB

Success Process: Array Structure Construction

Redundant Constraint Information
TYPE          REDUNDANT
Spherical     TRANSLATION ALONG Y
Spherical     TRANSLATION ALONG Y

No. of Redundant Constraint = 2
WARNING!!! : There are 2 redundant constraints
    
```

Figura 5.7: Resultado del cálculo de la movilidad

Como se aprecia en la imagen, RecurDyn proporciona información acerca de los grados de libertad de todo el sistema (su movilidad) y además es capaz de detectar el número de restricciones en exceso, si las hubiera. En el caso del ejemplo, el sistema posee cinco grados de libertad pero, al definir los pares cinemáticos se ha cometido un pequeño error, ya que se ha sobrerrestringido el conjunto, que ahora tiene dos restricciones en exceso. De hecho, el propio RecurDyn ha detectado de que tipo de par provienen esas dos restricciones en exceso y cuál es el movimiento que se ha restringido dos veces, en este caso la traslación alrededor de eje y que limita el par esférico.

Atendiendo a esto, será necesario sustituir uno de los pares esféricos por uno que no limite la traslación en el eje y y volver a analizar el conjunto con la herramienta de Pre-Analysis para comprobar que el sistema, manteniendo los grados de libertad que le corresponden, ya no posee restricciones en exceso. Si el proceso se ha realizado correctamente, el resultado del *Pre-Analysis* debería quedar algo parecido a lo que muestra la Figura 5.8.

```

System Configuration Information
  No. of Generalized Coordinate
  No. of Generalized Velocity
  No. of Rigid Body

Kinematic Degree of Freedom = 5

Total array size = 274572
Total memory size for array = 11 MB

Success Process: Array Structure Construction

Redundant Constraint Information
There is no redundant constraint
    
```

Figura 5.8: Obtención del modelo auto-alineado

El resultado idóneo es el que muestra la imagen, es decir, el de un modelo que, teniendo los grados de libertad que posee su equivalente físico, no posee restricciones en exceso. Se dice entonces que el modelo se encuentra **autoalineado**. El concepto de mecanismo auto-alineador o modelo autoalineado es fundamental en mecánica. En la práctica real, una mala elección de los cojinetes que sobrerrestringa la máquina puede ocasionar no solo que el conjunto no se mueva como debería sino que, pequeños desajustes de coaxialidad entre ejes o fallos de construcción en las piezas den lugar a un mal funcionamiento del sistema y acorten su vida útil.

5.2.7 Definición de movimiento

Una vez definidos todos los pares cinemáticos y creado el modelo cinemático auto-alineado es momento de realizar una simulación dinámica donde se muestren las funcionalidades del modelo conduciendo algunos de los grados de libertad que posee. Para ello se deben editar las propiedades de los pares cinemáticos cuyo movimiento se desee programar y clicar en la casilla llamada *Motion*. Al hacerlo se abrirá una ventana que permite establecer una expresión (puede ser una constante o una función) para el desplazamiento, la velocidad o la aceleración del par cinemático que controla un determinado movimiento del modelo.

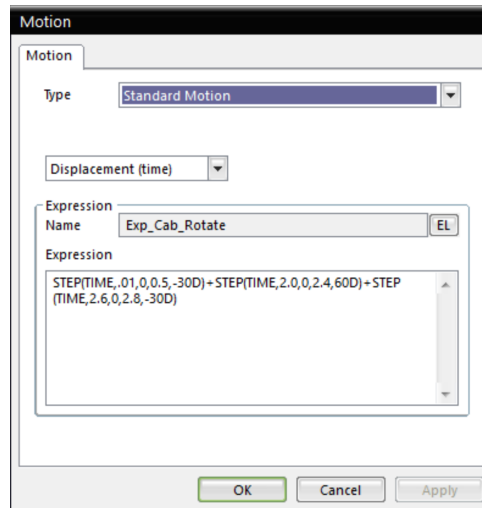


Figura 5.9: Definición del movimiento en RecurDyn

En la Figura 5.8 se muestra la ventana que permite definir el movimiento de un par. Se trata en concreto de un par tipo revolución que controla el movimiento de rotación de una cabina de un tractor industrial, en el que se está controlando el desplazamiento (al ser un par revolución, la rotación) por medio de comandos llamados STEP.

Los comandos STEP poseen la siguiente estructura:

$$STEP(TIME, t_0, f(t_0), t_1, f(t_1))$$

Es decir, el instante inicial, el valor de la variable (en este caso el desplazamiento) en ese instante inicial, el instante final y el valor de la variable en ese instante final. Entre el valor inicial y el valor final RecurDyn realiza una interpolación que puede ser de grado 3 si se utiliza el comando STEP o de grado 5 si se usa el comando STEP5, que posee la misma estructura.

En el caso del ejemplo que se muestra en la imagen, se puede ver como se ha hecho uso de varios comandos STEP, cuyo resultado es:

1. Desde $t \approx 0$ hasta $t = 0,5 \Rightarrow$ La cabina se mueve 30 grados en sentido antihorario.
2. Desde $t = 2$ hasta $t = 2,4 \Rightarrow$ La cabina se mueve 60 grados en sentido horario.
3. Desde $t = 2,6$ hasta $t = 2,8 \Rightarrow$ La cabina se mueve 30 grados en sentido antihorario, volviendo a la posición inicial.

5.2.8 Simulación cinemática/dinámica

Hasta ahora se han definido todos los pares cinemáticos, comprobado la movilidad y ausencia de restricciones en exceso y dotado de movimiento al modelo conduciendo algunos de sus grados de libertad de forma programada. Es momento de comprobar visualmente todo aquello que se ha definido realizando una simulación dinámica en vacío o sobre una base plana o con obstáculos.

Para simular dinámica/cinemáticamente un modelo se ha de clicar en la opción **Dyn/Kyn** dentro de la paetña Analysis y aparecerá una ventana como la que ilustra la Figura 5.9.

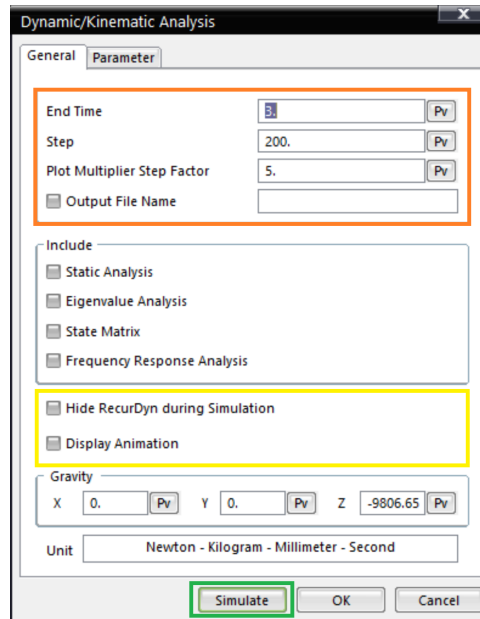


Figura 5.10: Simulación Dinámica/Cinemática en RecurDyn

Esta ventana ofrece varias posibilidades, de las cuales destacan:

- **End Time:** Establece el tiempo que durará la simulación.
- **Step:** Establece el número de puntos de cálculo en los cuales RecurDyn calculará el valor de las variables dinámicas y cinemáticas. Cuanto mayor número de puntos de cálculo, más exacto será el análisis y más tiempo llevará.
- **Plot Multiplier Step Factor:** Establece el número de puntos de cálculo que RecurDyn toma para el graficado de resultados. El número total de puntos viene dado por la expresión $\text{Plot points} = \text{Step} \times \text{Plot Multiplier Step Factor}$.

Asimismo, RecurDyn ofrece la posibilidad de mostrar el resultado visual de la simulación a medida que se vaya calculando (por si se observa que el modelo no se mueve como debería durante los primeros segundos detener el cálculo sin tener que esperar a que termine toda la simulación) o, por el contrario, ocultar el programa mientras calcula (por si se desea trabajar realizando otras tareas mientras RecurDyn calcula los resultados de la simulación).

5.3 Limitaciones del LM Toolkit

Tras haber montado todos los modelos y terminado el proceso previo de aprendizaje del RecurDyn, familiarizándose con la interfaz gráfica del programa, su entorno y sus posibilidades, es hora de comenzar con la simulación virtual de los modelos ensamblados con anterioridad.

El proceso de simulación de un modelo virtual se puede dividir en dos grandes etapas. Una primera etapa de colocación de los pares cinemáticos hasta conseguir el modelo cinemático auto-alineado y una segunda etapa donde se añade una base plana o con obstáculos así como los contactos necesarios para que el modelo se desplace respecto de la base.

En el caso de vehículos traccionados por ruedas se pueden incluir contactos del tipo cilindro-superficie, para simular el contacto entre las ruedas (cilíndricas) y la base. Sin embargo, y, como ya se comentó en secciones anteriores, en modelos traccionados por cadenas la inclusión de contactos no es una opción ya que ralentiza el cálculo de manera prohibitiva. Es por ello que se hace uso de la herramienta llamada *Low-Mobility Tracked Toolkit* que permite añadir las cadenas y todos los elementos necesarios para que funcionen sin necesidad de añadir contactos.

Sin embargo, esta herramienta posee una clara limitación que afecta a los modelos Lego Technic[©]. Al ser modelos muy pequeños, las piezas encargadas de mover las cadenas también lo son, y poseen masas e inercias muy pequeñas que ocasionan múltiples errores en la simulación del modelo³.

Por ello se ha optado por crear modelos, utilizando las propias herramientas de creación que posee RecurDyn, cuyas funcionalidades sean lo más parecidas posible a las de los modelos Lego Technic[©] montados previamente, pero a escala real, de tal forma que se puedan simular sobre una base haciendo uso de la herramienta indicada para ello.

En cuanto a los modelos de Lego Technic[©] montados anteriormente, se ha optado por realizar una simulación en vacío⁴ que muestre las funcionalidades del modelo y sus posibilidades de movimiento, evitando los problemas comentados anteriormente.

En las secciones siguientes se describen los modelos equivalentes a los modelos Lego Technic[©] que se han creado y simulado utilizando la herramienta.

³El problema de esta herramienta con modelos muy pequeños no es trivial y su solución tampoco. Tras semanas hablando con las personas al mando del soporte técnico de RecurDyn se llegó a la conclusión de que el problema tenía que ver con la pequeña masa e inercia de las piezas, y se recomendó trabajar con modelos equivalentes a una escala más parecida a la real, que es para lo que se ideó la herramienta, para simular prototipos de vehículos reales

⁴Una simulación en vacío es aquella en la que no se incluye la interacción entre el vehículo y el terreno. Por tanto, se deja el chasis como pieza fija y se colocan pares cinemáticos de tal forma que el modelo resultante es un modelo auto-alineado con los mismos grados de libertad que el modelo real, pero sin poder moverse sobre una base

5.4 Simulación virtual del modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1

Dadas las limitaciones del *toolkit* cuando se trata de modelos con masas e inercias muy bajas, se ha optado por crear modelos a una escala mucho más próxima a la real, haciendo uso de las propias herramientas de creación que posee RecurDyn en el entorno: *Professional*. En lo referente al modelo vLTm_8047-1, se han añadido los pares cinemáticos adecuados hasta crear el modelo cinemático auto-alineado y por último, se ha realizado una simulación en vacío que muestre sus posibilidades de movimiento.

Para la creación del modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1, se han utilizado los conocimientos sobre creación de partes adquiridos con los tutoriales de aprendizaje. El modelo equivalente se muestra en la Figura 5.10.

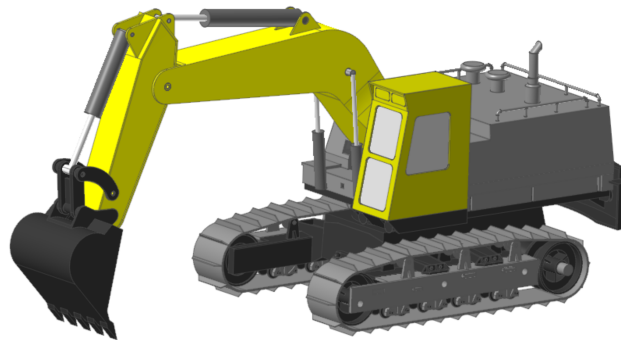


Figura 5.11: Modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1

Se trata de una excavadora con una pala central que posee tres grados de libertad, el movimiento rotacional de la cabina, la inclinación del brazo y el movimiento de la pala, exactamente igual que los grados de libertad que poseía el modelo de Lego Technic©. Sin embargo, la escala es mucho mayor, teniendo las dimensiones que poseería una excavadora real, para evitar los problemas a la hora de simular, como ya se ha comentado. En la Figura 5.11 se aprecia la diferencia evidente de tamaño.

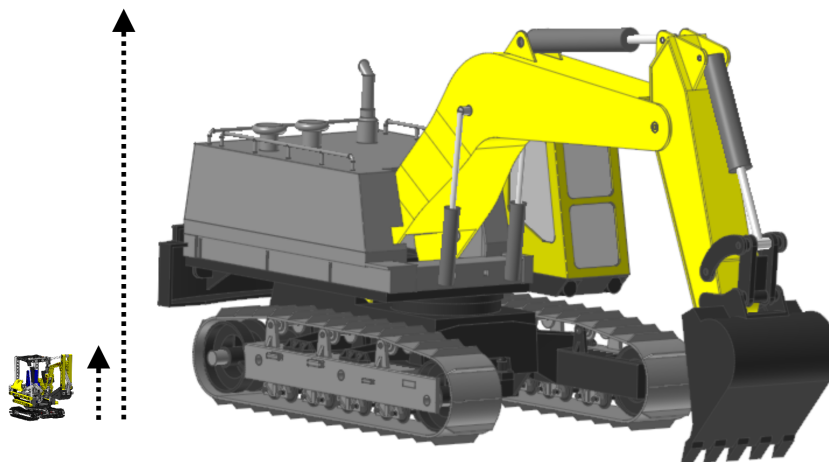


Figura 5.12: Comparación de tamaño entre el modelo 8047-1 y su equivalente

Tras la creación del modelo, se han impuesto los pares cinemáticos adecuados hasta conseguir el modelo cinemático auto-alineado y se ha conducido tanto el movimiento de la cabina como la posición de los dos cilindros neumáticos que controlan el movimiento del brazo y la pala, hasta conseguir simular un movimiento de recogida de material (como tierra o escombros), y su posterior depósito en un lugar cercano. La Figura 5.12 muestra una imagen del modelo en un render transparente que destaca los pares cinemáticos en rojo⁵.

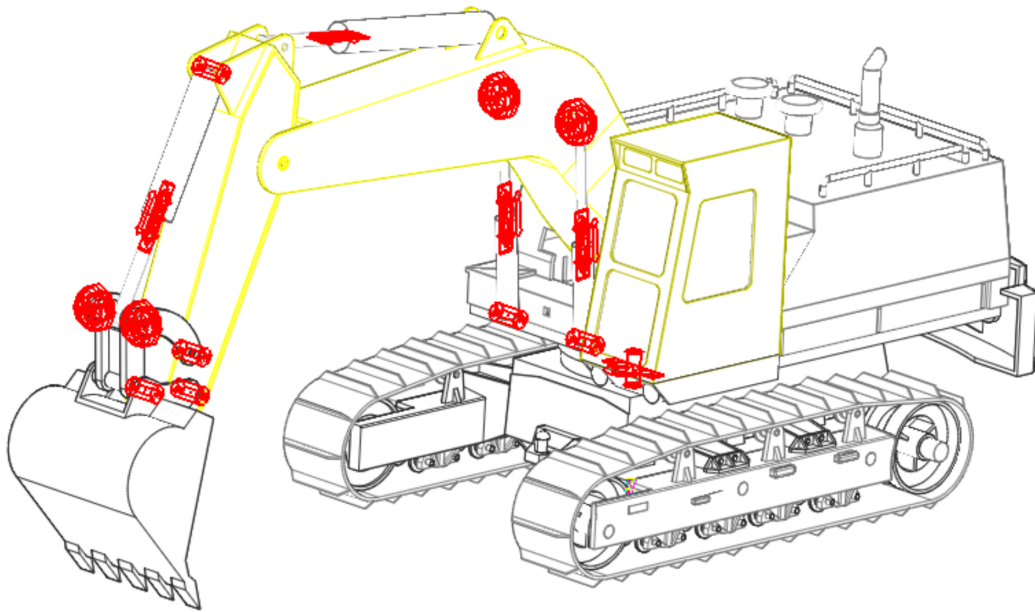


Figura 5.13: Pares cinemáticos del modelo equivalente al modelo vLTm_8047-1

Dado que se trata del primer modelo equivalente que se realiza, únicamente se ha realizado una simulación en vacío comparando los movimientos del modelo de Lego© con su homólogo a escala real. Sin embargo, las cadenas están montadas utilizando el *LMT Toolkit* y funcionan a la perfección, por si se desea añadir una base plana o con obstáculos posteriormente y simular la circulación sobre dicha base, tal y como se ha hecho con el modelo siguiente.

⁵RecurDyn no realiza el dibujo de los pares cinemáticos con la misma calidad que el modelo y es por ello que es posible que no se aprecie muy bien los símbolos de los pares y/o la posición de los mismos.

5.5 Simulación virtual del modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1

El modelo vLTm_42028-1 es un *bulldozer* con una una cuchilla delantera y un rastrillo trasero que posee únicamente dos grados de libertad, correspondientes al movimiento de ambos subconjuntos. El modelo equivalente creado a partir de las herramientas que posee RecurDyn también es el mismo tipo de vehículo pero solo posee la cuchilla delantera, tal y como muestra la Figura 5.13.

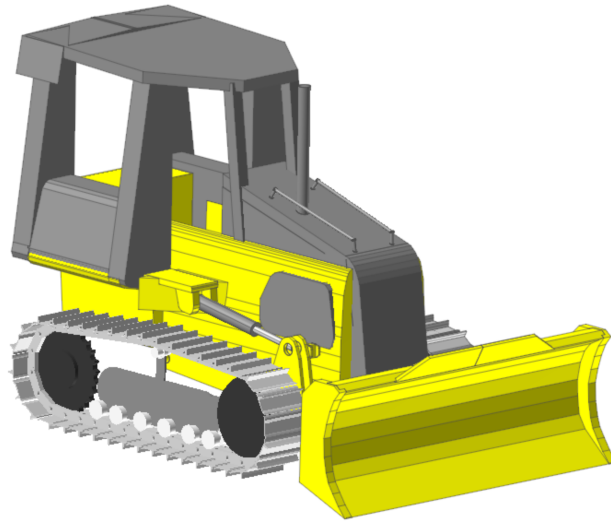


Figura 5.14: Modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1

De nuevo se ha creado a escala real para evitar problemas en las simulaciones. En la Figura 5.14 se vuelve a apreciar la diferencia de escalado entre los dos modelos.

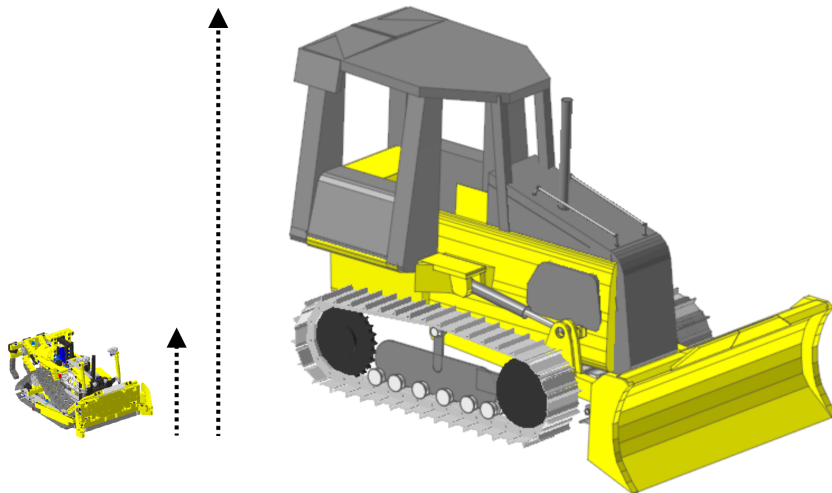


Figura 5.15: Comparación de tamaño entre el modelo 42028-1 y su equivalente

El hecho de no haber invertido tanto tiempo en reproducir el modelo equivalente de una forma más fiel al modelo de Lego Technic©(habiendo incluido por tanto el cuadrilátero articulado trasero que hace de rastrillo) es debido a que se ha puesto especial interés en la simulación sobre la base, y no tanto sobre las posibilidades de movimiento del vehículo. Aun así, se han creado dos cilindros neumáticos que

modelan el movimiento de la cuchilla delantera con el objetivo de que el modelo equivalente tenga, al menos, la funcionalidad principal que poseía el de Lego©. En la Figura 5.15 se vuelve a ilustrar el modelo transparente con los pares cinemáticos en rojo.

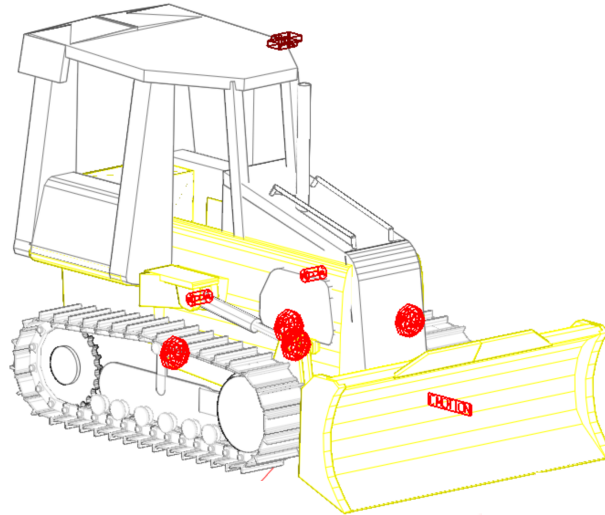


Figura 5.16: Pares cinemáticos del modelo equivalente al modelo vLTm_42028-1

Como ya se ha comentado, en este caso se ha puesto especial atención en la simulación sobre una base, y no tanto en mostrar las funcionalidades del modelo. Se ha creado una base de una longitud considerable, con ciertos obstáculos, y se ha analizado el comportamiento del vehículo simulando diferentes tipos de terreno sobre la base (tierra compactada, nieve, barro, etc.). La Figura 5.16 muestra el modelo equivalente sobre la base.

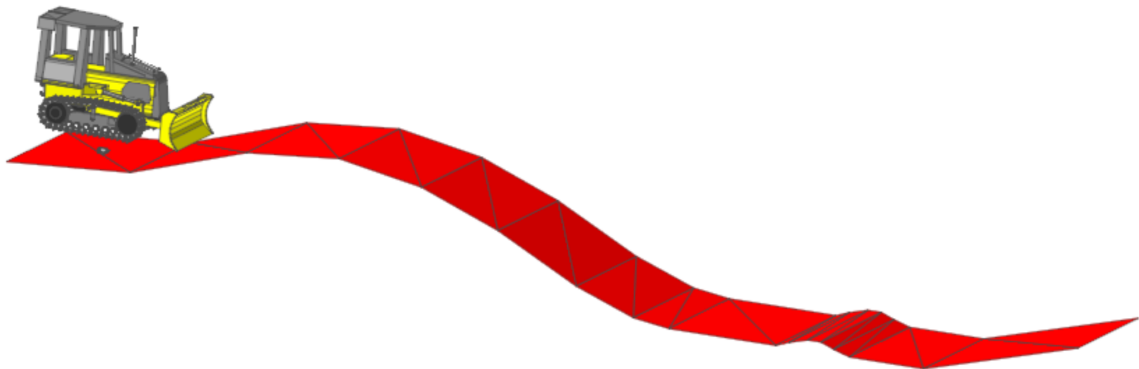


Figura 5.17: Modelo equivalente sobre la base, preparado para una simulación

La forma de preparar el modelo para una simulación es situarlo ligeramente por encima de la base para que al comenzar caiga por efecto de la gravedad hasta apoyar con la base y, conduciendo las ruedas dentadas que impulsan las cadenas, guiarlo sobre el terreno. A partir de ahí se pueden realizar múltiples comparaciones entre terrenos, graficar las fuerzas que aparecen en las cadenas en función del terreno, añadir tensionadores a las cadenas, etc.

5.6 Simulación virtual del modelo vLTm_sheepo-Jeep

La creación personalizada Jeep Wrangler RC es el último modelo que se ha simulado. Dado que tiene varias funcionalidades, se han realizado múltiples simulaciones con el objetivo de mostrar visualmente como funcionan. A continuación se describen las simulaciones que se han realizado:

- Animación del funcionamiento de los diferenciales y su sistema de bloqueo.
- Animación del funcionamiento de la dirección.
- Animación del funcionamiento de la caja de cambios.
- Simulación sobre un base plana y con pequeños obstáculos.

Se trata de un modelo muy complejo que posee mas de dos millares de piezas y en el que resulta muy complicado (dadas las características del software del equipo utilizado en este proyecto) simular el funcionamiento de todas las partes móviles a la vez. En la Figura 5.17 se muestra una imagen de todas las partes móviles del modelo en RecurDyn, donde se ha ocultado la carrocería y el chasis.

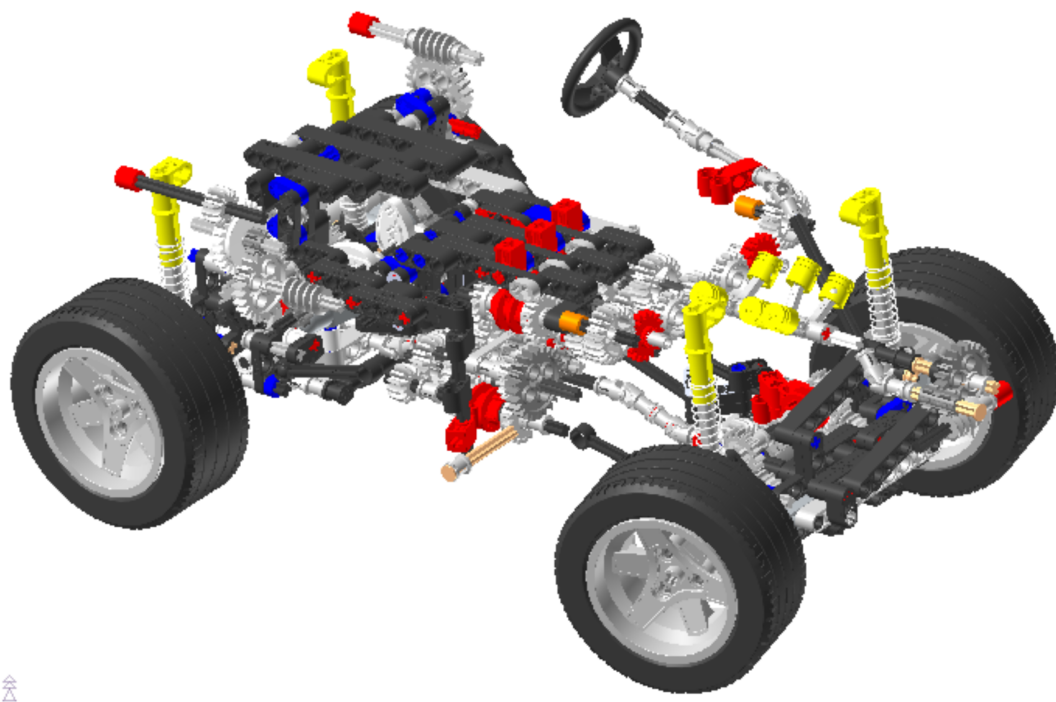


Figura 5.18: Partes móviles del Jeep Wrangler en RecurDyn

Por todo ello se han realizado varias copias del modelo, simulando funcionalidades distintas en archivos distintos. De esta manera no se satura el equipo y se pueden realizar simulaciones fluidas y representativas del funcionamiento real del modelo.

Finalmente, para la simulación sobre la base, si se han definido todos los pares cinemáticos necesarios para hacer que el modelo se mueva sobre una base plana con pequeños obstáculos. En la la Figura 5.17 se muestra la posición inicial del vehículo antes de comenzar el recorrido sobre la base.

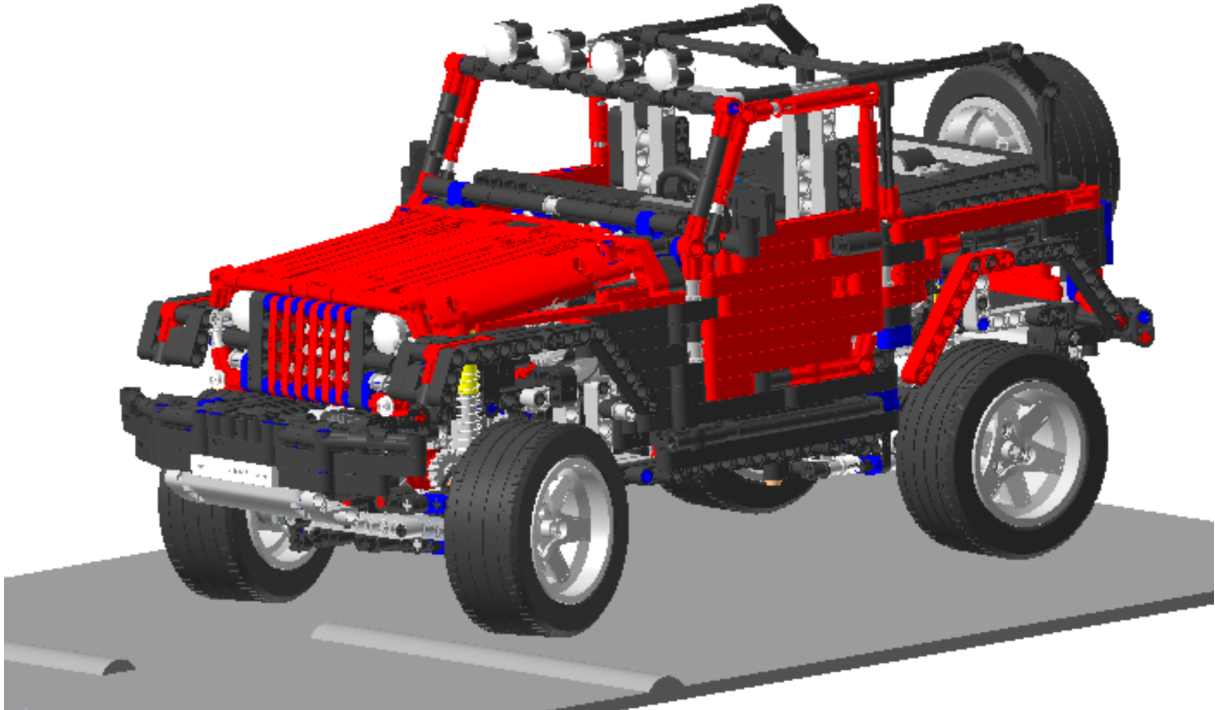


Figura 5.19: Jeep Wrangler sobre una base en RecurDyn

Capítulo 6

Análisis por el MEF

6.1 Presentación y objetivos

En el presente capítulo se explicará la tecnología que utiliza RecurDyn para analizar cuerpos, ya sean considerados sólidos rígidos o flexibles. Se analizarán y compararán las dos concepciones de flexibilidad que posee RecurDyn y las diferencias entre ellas de cara al mallado de piezas y los análisis dinámicos. También se explicará como convertir una pieza de rígida a flexible y de un tipo de flexibilidad al otro.

El fin de este capítulo es aprender a simular un modelo que *a priori* posee todas sus piezas rígidas pero en el que se sustituye una o varias de esas piezas rígidas por flexibles. También es objetivo de esta parte aprender como funciona el proceso de conversión de una pieza rígida en flexible, entender cómo funciona el mallado y cómo variar sus parámetros para conseguir un balance óptimo entre tiempo computacional y exactitud de los resultados.

6.2 La tecnología MFBD

La tecnología MFBD (Multi Flexible Body Dynamics, en inglés) es una manera de analizar el comportamiento dinámico de sistemas que incluyen tanto cuerpos rígidos como flexibles. Combina la teoría de la dinámica multi-cuerpo (MDB, Multi Body Dynamics) para analizar el movimiento de sólidos rígidos y el MEF (Método de los Elementos Finitos, FEM en inglés) para analizar el movimiento, las fuerzas y el estrés y deformaciones generadas en cuerpos flexibles. RecurDyn combina estos dos métodos en un único simulador que agiliza el proceso de simulación y lo hace más rápido e intuitivo.

6.3 RFlex y FFlex

RecurDyn admite dos definiciones de cuerpos flexibles. La primera, llamada RFlex (Reduced Flex, Flexibilidad Reducida) está basada en un método de síntesis modal en el cual la deformación de un cuerpo es representada por un conjunto de ecuaciones lineales y se utiliza en cuerpos cuya deformación puede ser considerada como lineal. La segunda, llamada FFlex (Full Flex, Flexibilidad Completa) utiliza un método nodal en el cual se consideran para el cálculo todos los grados de libertad de los nodos. Este método admite deformaciones no-lineales como las de los materiales plásticos o las de materiales hyper-elásticos.

Las piezas consideradas como FFlex obtendrán en los análisis dinámicos, resultados más fieles a la realidad al considerar ambos aspectos (lineales y no lineales) de la deformación. Sin embargo, el hecho analizar una pieza FFlex aumenta considerablemente el tiempo de análisis¹. Por ello, resulta fundamental realizar un balance entre precisión-tiempo computacional para comprobar si, dada la geometría y composición de la pieza, merece la pena considerarla como FFlex o RFlex.

Además, el propio RecurDyn incorpora una herramienta de mallado que no solo permite analizar las piezas tanto si son consideradas de flexibilidad reducida como completa sino que permite cambiar la concepción de una pieza de flexibilidad reducida a completa y viceversa.

6.4 Análisis Dinámico de un modelo flexible

En esta sección se lleva a la práctica lo explicado en las dos anteriores, aplicando esos conocimientos a una pieza de un modelo concreto.

Los modelos de Lego Technic[©] son modelos pequeños cuyas piezas poseen una masa muy baja y las fuerzas a las que están sometidas son pequeñas y además están formados de piezas robustas de plástico. Por todo ello, las deformaciones a las que están sometidos son extremadamente bajas y no se comete un error muy grande al considerar las piezas de Lego[©] como sólidos rígidos.

Para que este análisis dinámico tenga sentido, se ha de realizar en modelos cuyas piezas si que sean sensibles de deformarse. Por ello se ha decidido realizar este estudio relacionado con la flexibilidad al vehículo equivalente al modelo 8047 puesto que se trata de un modelo a escala real, donde las piezas si son sensibles a deformaciones. Más concretamente, se ha decidido estudiar el comportamiento a estrés del brazo central que conecta la cabina con la pala del primer modelo equivalente que se creó.

¹Dependiendo de la complejidad de la pieza y el modelo, los análisis de piezas FFlex pueden llegar a tardar varias horas, frente a los pocos segundos que tardan los análisis de piezas RFlex

6.4.1 Mallado de la pieza flexible

El primer paso, tras haber decidido la pieza cuyo análisis de estrés se va a realizar, es el mallado de la pieza. De esta forma, al terminar el proceso de mallado y tras realizar el correspondiente análisis dinámico, RecurDyn interpretará esa pieza como flexible y quedará sustituida por el antiguo sólido rígido (por ello se recomienda guardar el archivo tras el mallado con otro nombre diferente para poder recuperar el original en cualquier caso).

Existen dos maneras de mallar una pieza:

- Exportar la pieza que se desea mallar en un formato compatible con un software especializado en el Análisis por el Método de los Elementos Finitos y realizar el mallado con un software externo.
- Realizar el mallado con la herramienta que posee el propio RecurDyn.

A continuación se explica el segundo método, puesto que es el que tiene que ver con el software que se utiliza en este proyecto.

Mallado en RecurDyn

Para empezar a mallar un cuerpo tan solo se deberá clicar en la pieza deseada con el botón derecho y seleccionar la opción *Mesh*. Tras hacerlo aparecerá una nueva ventana que muestre únicamente la pieza seleccionada. En ese momento y, antes de comenzar el proceso de mallado se deberán definir las condiciones de mallado. Para ello RecurDyn posee dos opciones. Las opciones básicas de mallado permiten definir el tipo de malla (triangular, cuadrada, etc.) y el tamaño medio de los nodos de la malla. Las opciones avanzadas de mallado permiten además crear elementos FDR (Force Distributed Rigid) y decidir si mantener las fuerzas y pares que estaban asociados con la pieza rígida. La Figura 6.1 muestra las opciones avanzadas de mallado en RecurDyn.

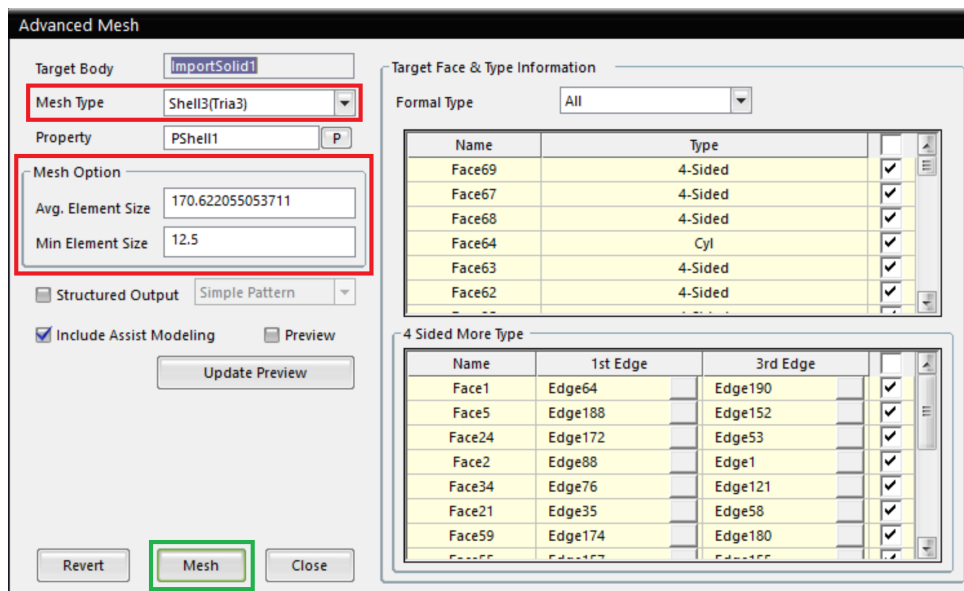


Figura 6.1: Mallado en RecurDyn

Tras acabar el proceso de mallado la pieza rígida quedará sustituida por su equivalente flexible, quedando algo parecido (variará en función de las condiciones de mallado que se hayan definido) a lo que ilustra la Figura 6.2.

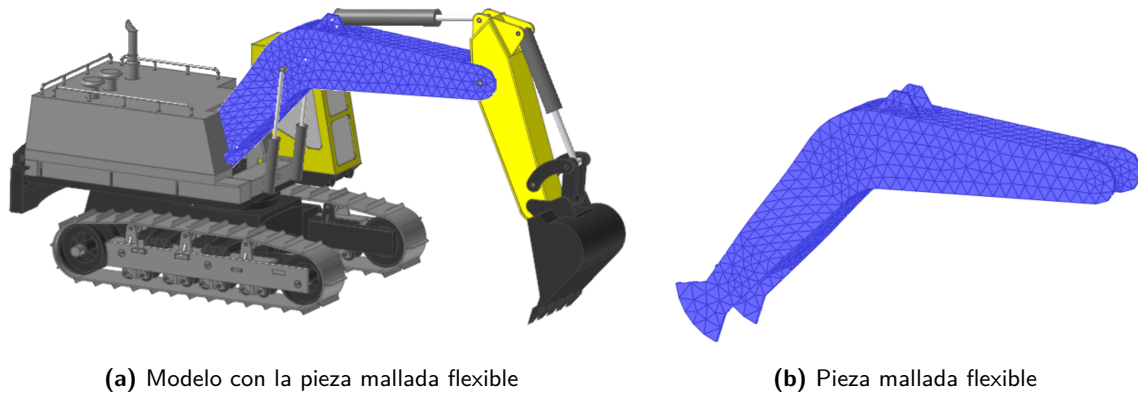


Figura 6.2: Resultado del mallado en RecurDyn

Por defecto, RecurDyn realiza el mallado para analizar la pieza como FFlex, es decir, teniendo en cuenta tanto los aspectos lineales de la deformación como aquellos no lineales. Esto posee una principal ventaja y una desventaja, como se ha comentado la sección anterior. La principal ventaja es el aumento en la precisión de los resultados del análisis dinámico y la principal desventaja es el aumento en el tiempo computacional que tarda en realizarse dicho análisis, comparado con el asociado a piezas RFlex. En concreto, el estudio dinámico de la pieza analizada en este proyecto tardó alrededor de 30 segundos con el análisis de flexibilidad reducida (RFlex) y alrededor de 2 horas y 45 min con el análisis de flexibilidad completa (FFlex).

Antes de comparar los resultados del análisis de flexibilidad completa con los de flexibilidad reducida y ver si, para este modelo y esta pieza, merece la pena el incremento de tiempo de simulación en base a la exactitud de los resultados, se explicará como convertir una pieza FFlex en una RFlex.

6.4.2 Conversión de FFlex en RFlex

Para convertir una pieza FFlex en una RFlex de nuevo se presentan dos opciones:

- Mallar la pieza en formato RFI (RecurDyn RFlex Input) utilizando un software externo como ANSYS.
- Realizar la conversión utilizando una herramienta en el propio RecurDyn llamada RFlexGen.

Al contrario que antes, en este caso se ha optado por mallar la pieza utilizando ANSYS e importarla sustituyendo a la FFlex, puesto que la herramienta RFlexGen no se encuentra integrada con la licencia de RecurDyn adquirida para elaborar este proyecto.

6.4.3 Análisis de estrés

Finalizado el proceso de mallado, para poder mostrar los resultados (tanto gráficos como visuales) del estudio dinámico, es necesario realizar un análisis con la herramienta *Dyn/Kyn* explicada en capítulos anteriores. Tras acabar el análisis (cuya duración dependerá de si la pieza es considerada como FFlex o como RFlex) es posible mostrar los resultados del mismo en términos de esfuerzo y definir la escala con los valores máximos y mínimos que se mostrarán en tanto en las gráficas como en la animación visual. En la Figura 6.3 se muestran las opciones que permiten definir el tipo de análisis que se quiere realizar, los valores máximos que se desean mostrar o el estilo y colores de visualización de la pieza y la leyenda.

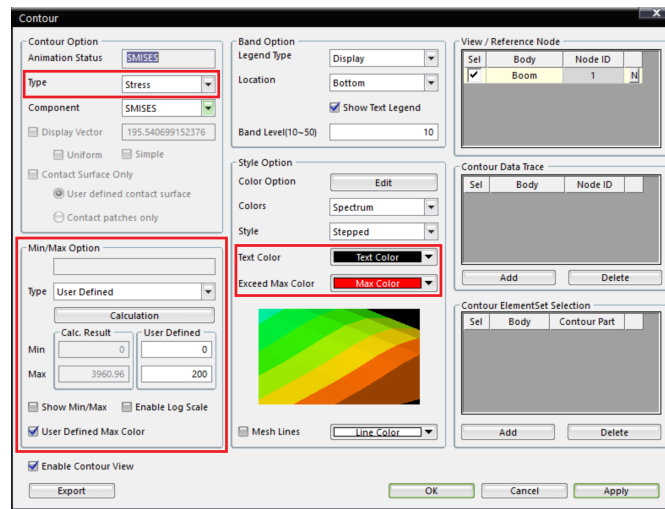


Figura 6.3: Condiciones de contorno

La Figura 6.4 muestra como ejemplo, el fotograma 19 de la animación resultado del análisis de estrés a la pieza seleccionada.

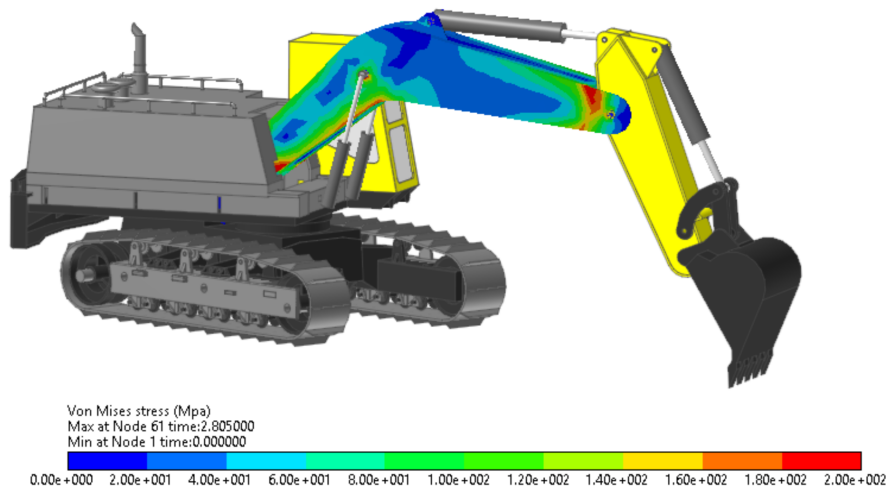


Figura 6.4: Resultado visual del análisis de estrés

6.4.4 Comparación de resultados

En esta sección se pretende analizar los resultados obtenidos tratando la pieza como sólido rígido, como elemento de flexibilidad completa y como elemento de flexibilidad reducida, y determinar cuál de los tres modos es más adecuado para esta pieza.

La mejor forma de realizar esta comparación es mediante el graficado de resultados. Por ello se han exportado archivos **.plot** de los tres casos y se ha comparado la evolución del valor de algunas variables de interés durante el tiempo de la simulación (3 segundos).

En primer lugar se ha comparado la desviación respecto al plano medio que atraviesa la pieza a estudiar, puesto que la excavadora realiza un movimiento de carga y descarga en el que la cabina rota, se produce una desviación del brazo central con respecto al plano medio que la atraviesa. La Figura 6.5 ilustra esta idea.

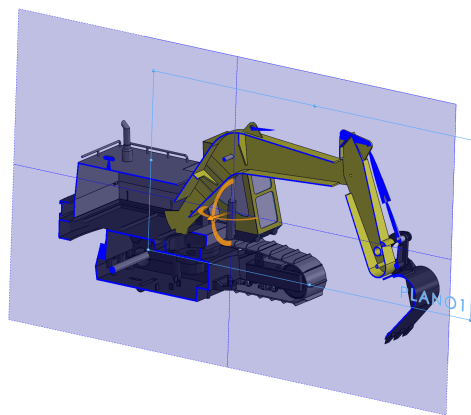


Figura 6.5: Plano medio que atraviesa la pieza analizada

En la Figura 6.6 se muestran tres graficos superpuestos bajo la misma escala. El eje de ordenadas muestra la amplitud de la desviación con respecto al plano de la Figura 6.5 y el eje de abcisas el tiempo en segundos de la simulación. La grafica en verde se corresponde con la del sólido rígido, la roja con la del de flexibilidad reducida y la azul muestra el comportamiento de la pieza con flexibilidad completa.

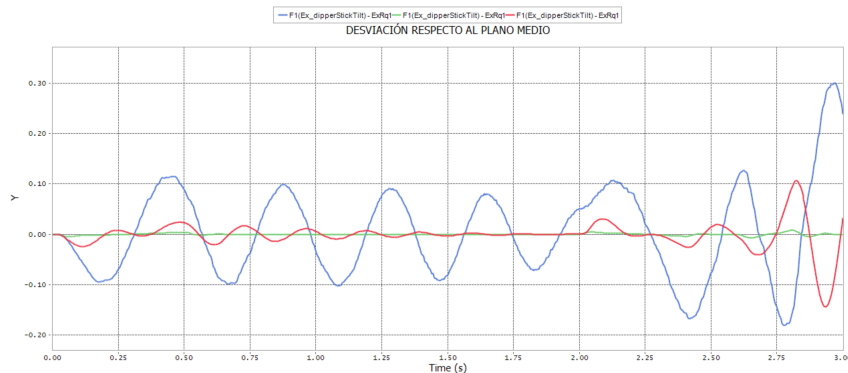


Figura 6.6: Desviación con respecto al plano medio en los tres casos

Se aprecia claramente las diferencias en el comportamiento de los tres casos. El sólido rígido apenas se desvía del plano central, mientras que los dos flexibles si lo hacen, sobre todo hacia el final de la simulación. Lógicamente el modelo de flexibilidad completa alcanza una mayor amplitud máxima puesto que tiene en cuenta todos los modos de deformación (lineales y no lineales) pero su tiempo de análisis fue de 2 horas y 45 minutos frente a los 30 segundos del análisis de flexibilidad reducida. Para ayudar a tomar una decisión final se va a comparar la evolución de un nodo equivalente en los dos casos de flexibilidad.

Más concretamente se ha comparado la evolución de la posición en el eje de abscisas de dos nodos equivalentes (representan el mismo nodo en los dos casos de flexibilidad) durante los 3 segundos de simulación. El resultado se muestra en la Figura 6.7.

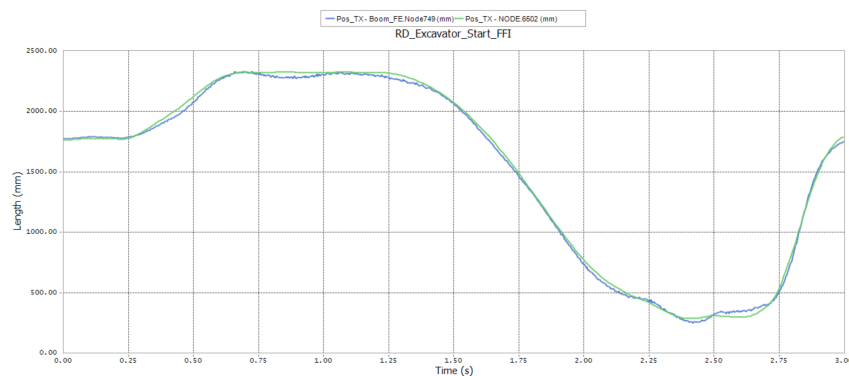


Figura 6.7: Posición de dos nodos equivalentes

En azul se muestra la evolución de la posición del nodo perteneciente a la pieza FFlex y en verde lo hace la RFlex. Como se puede apreciar, la evolución es prácticamente idéntica en ambos casos. Atendiendo únicamente a esta gráfica, no vale la pena el incremento de tiempo en el análisis con respecto al aumento en la exactitud de los resultados ya que los valores de ambas gráficas no se van más de un 5%. No ha ocurrido así en la gráfica de la Figura 6.6 donde los cambios entre los dos tipos de flexibilidades eran aparentemente más evidentes, aunque atendiendo a la escala del eje de ordenadas, ambos poseen unas amplitudes de desviación muy pequeñas.

En función del tiempo del que se disponga, la precisión que se desee y sobre todo las características del hardware del equipo informático se tomará una decisión. Para este proyecto y dadas las características del equipo portátil con el que se está trabajando se utilizaría la pieza de flexibilidad reducida.

En la siguiente sección se propondrá una solución para mejorar el rendimiento del análisis dinámico cuando en el estén involucradas piezas de flexibilidad reducida (RFlex).

6.4.5 Mejora del rendimiento

Las piezas de flexibilidad reducida (RFlex) se deforman como consecuencia de la suma de una serie de **modos de deformación propia**. Cada modo de deformación es de un tipo (hay modos de flexión, modos de torsión, mezcla de flexión y torsión, etc) y lleva asociados dos parámetros: la **frecuencia de resonancia** asociada a ese modo y el **coeficiente de amortiguación** (*Damping ratio*, en inglés). En RecurDyn ambos parámetros están relacionados de la siguiente manera:

- $0 < f < 100$ Hz: Damping ratio = 0,01
- $100 < f < 1000$ Hz: Damping ratio = 0,1
- $0f \geq < 1000$ Hz: Damping ratio = 1

El coeficiente de amortiguación controla como afecta un modo de deformación propia al comportamiento de toda la pieza. Cuanto mayor es el coeficiente, menos afecta al conjunto. Los coeficientes de amortiguación que valen la unidad afectan muy poco al comportamiento general de la deformación.

En la Figura 6.8 se pueden ver las propiedades de la pieza analizada en este proyecto (como RFlex).

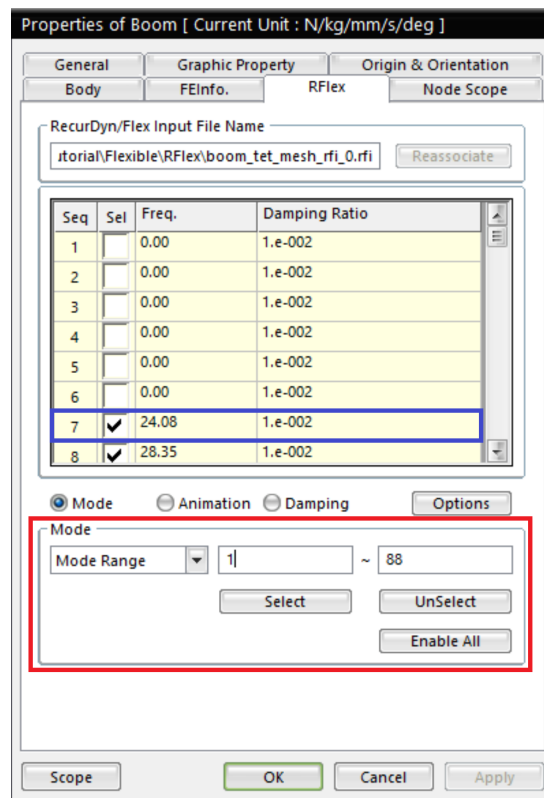


Figura 6.8: Modos de deformación propios de una pieza RFlex

Dentro de las propiedades, en la pestaña RFlex, se pueden ver los modos de deformación propios de la pieza, con su frecuencia y coeficiente de amortiguación asociados. Como se puede apreciar, los seis primeros modos están desactivados puesto que corresponden a los modos de deformación propios del sólido rígido. Sin embargo, a partir del modo siete están todos seleccionados, puesto que, en una pieza RFlex, vienen por defecto todos los modos de deformación seleccionados, excepto los del sólido rígido, lógicamente.

La pieza estudiada tiene concretamente 88 modos (se puede ver en la figura donde se ve el rango de modos, *mode range*, que va desde el uno hasta el ochenta y ocho). El modo siete tiene una frecuencia de 24 Hz y un coeficiente de amortiguación de 0.01, por lo que se prevee tenga una importancia relevante en el comportamiento general. Sin embargo, a partir del modo 67 las frecuencias comienzan a ser superiores a 1 kHz y los coeficientes de amortiguación alcanzan la unidad. Todos estos modos de funcionamiento no poseen demasiada relevancia en el comportamiento general. Si se selecciona un modo y se pulsa el botón *Play* se reproduce una animación que representa la deformación de la pieza atendiendo a ese modo de funcionamiento. Conforme aumenta la frecuencia y el coeficiente de amortiguación las animaciones de los modos comienzan a ser más "extrañas" con flexiones y torsiones combinadas. En la Figura 6.9 se pueden observar dos instantáneas de las animaciones de los modos siete y sesenta y ocho, para que se aprecia la diferencia en el tipo de deformación.

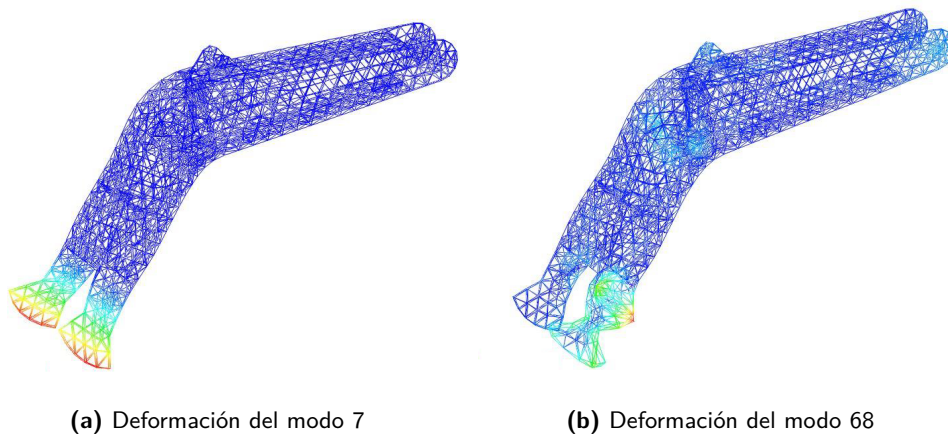


Figura 6.9: Deformación de los modos

Se ha propuesto como mejora del rendimiento, no considerar los modos a partir del 67, es decir, eliminar del análisis todos los modos que tengan frecuencias iguales o superiores a 1 kHz y coeficientes de amortiguación iguales a la unidad.

El resultado es un aumento de más de un 50 % en el tiempo de la simulación, pasando de tardar 30 segundos a menos de 12 segundos. Para comprobar si la precisión en los resultados sigue siendo buena al no tener en cuenta todos estos modos se ha repetido el análisis de la desviación del brazo central con respecto al plano medio. Los resultados se muestran en la Figura 6.10.

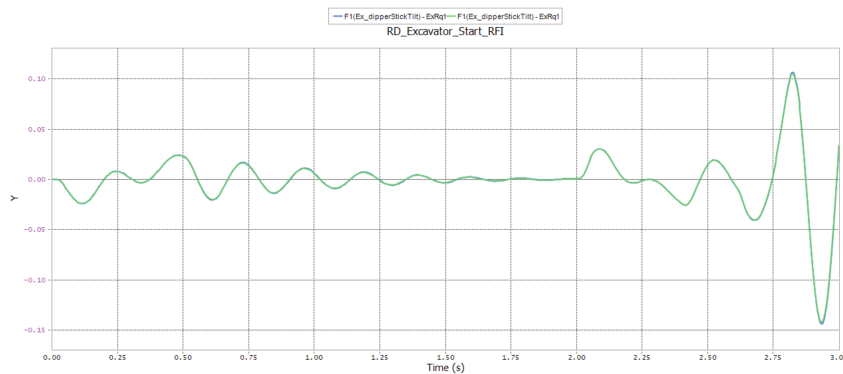


Figura 6.10: Comparación de los resultados: 82 VS 61 modos

La gráfica en verde muestra la evolución teniendo en cuenta todos los modos de deformación de una pieza flexible y la gráfica en azul muestra la opción eliminando los modos que afectan menos al comportamiento general. La segunda ni siquiera se aprecia en la imagen porque está justo debajo de la primera, y si se comparan los resultados numéricos, mostrados en la Figura 6.11 con dos decimales, se advierte que son idénticos, con una diferencia menor al 1 %.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
F1(Ex_dipperStickTilt) - ExRqt	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
F1(Ex_dipperStickTilt) - ExRqt	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10

Figura 6.11: Datos numéricos de los resultados: 82 VS 61 modos

Es decir, seleccionando de forma rigurosa los modos más importantes de cara al comportamiento general de la deformación, no solo se consigue ahorrar tiempo computacional sino que se alcanza un nivel de precisión excelente.

6.4.6 Conclusiones

Como conclusión de este capítulo se puede decir que:

RecurDyn posee de forma integrada un potente herramienta de mallado y análisis dinámico que permite realizar estudios de deformaciones y estrés considerando dos niveles de flexibilidad.

La decisión de llevar a cabo un análisis teniendo en cuenta el nivel de flexibilidad reducida o el nivel de flexibilidad completa dependerá de las características del hardware del equipo informático de que se disponga, el tiempo que se posea y el nivel de precisión que se desee.

Una buena selección de los modos de deformación propios de una pieza RFlex permite conservar el nivel de precisión de los resultados de los análisis de tensiones, reduciendo considerablemente el tiempo de análisis.

Capítulo 7

Conclusiones

Terminado el proyecto es momento de extraer conclusiones tanto a nivel profesional, aquellas relacionadas directamente con el proyecto, como a nivel académico, refiriéndose a los nuevos conocimientos adquiridos o aquellos que han servido para complementar lo estudiado durante el Grado y el Máster.

Empezando por las conclusiones del proyecto, se puede decir que:

En la actualidad, casi cualquier prototipo o modelo inicial (sobre todo de sectores como el de la automoción, el sector aeronáutico o incluso el naval) es modelado virtualmente mediante el uso de softwares de CAD y CAE para posteriormente poder ser simulado y así comprobar sus fortalezas y sus debilidades constructivas así como sus posibilidades de movimiento. Además, tras las simulaciones cinemáticas, se realizan análisis dinámicos para estudiar qué partes están sometidas a un mayor estrés, verificar que los materiales de construcción son los adecuados y realizar un estudio de viabilidad del producto final y estimación de su vida útil.

Todos estos análisis son previos a la construcción física del prototipo, y permiten abaratar costes de fabricación, reducir tiempos de trabajo e incluso aumentar la calidad de los productos finales. Todos ellos factores muy importantes que pueden ser determinantes para asegurar el éxito comercial de una empresa.

Los modelos Lego Technic© constituyen una manera eficaz y muy intuitiva de comprender cómo funcionan multitud de mecanismos que son ampliamente utilizados en vehículos industriales, agrarios, turismos, aviones, helicópteros, etc. Lego© posee un sinfín de sets comerciales de todas las dificultades y por ello no solo permiten adquirir conocimientos acerca del funcionamiento de máquinas mecánicas de diferentes grados de dificultad sino que también son una vía ingeniosa hacia el aprendizaje de los softwares de CAE, puesto que, gracias a la biblioteca de componentes virtuales, los modelos pueden ser montados y simulados tal y como se haría en la realidad, tal y como se hace actualmente con los prototipos de todo tipo de vehículos.

Por otra parte, si se realiza un balance de lo aprendido, lo estudiado y las competencias adquiridas, se pueden extraer como conclusiones académicas que:

Se han afianzado los conocimientos sobre el manejo del software de CAD/CAE SolidWorks que ya se utilizó en el Trabajo Fin de Grado y se ha aprendido el manejo de un nuevo software de CAE claramente enfocado a las simulaciones cinemáticas y los análisis dinámicos, como es el RecurDyn.

Se han repasado conceptos de Teoría de Máquinas relacionados con máquinas mecánicas, mecanismos, grados de libertad y restricciones en exceso, así como conocimientos sobre el Método de los Elementos Finitos estudiados en Métodos Matemáticos.

Se ha aprendido la importancia de los pares cinemáticos y su equivalente físico (los cojinetes y rodamientos) en el movimiento de los modelos. También se ha aprendido a conducir los grados de libertad de un modelo de forma programada para realizar una simulación cinemática que muestre las posibilidades de movimiento de una máquina.

Por último, al ser un proyecto basado en una serie de actividades ordenadas, de tal manera que no es posible pasar a la siguiente sin haber completado la anterior, así como el hecho de tener que realizarse en un tiempo determinado contribuye a la madurez académica del alumno. Es necesaria una buena organización y gestión del tiempo y, sobre todo, dedicación. Aspectos fundamentales que ayudan a prepararse de cara al mundo laboral, donde será habitual tener que formar grupos de trabajo, coordinar y repartir las tareas para finalmente entregar un proyecto en un tiempo determinado.

Bibliografía

BrickLink - Buy and sell LEGO Parts, Sets and Minifigures. URL: <https://www.bricklink.com>.

Isogawa, Yoshihito (2010). *Tora no Maki*.

Recurdyn, Multibody Dynamics Analysis. URL: <http://support.recurdyn.com/>.

Reshetov, L. N. (1982). *Self-aligning mechanisms*. Mir Publishers.

Sheepo's LEGO Technic custom creations. URL: <http://www.sheepo.es/>.

Shimizu, Nobuyuki (2015). *Innovation for Design and Analysis with Multibody Dynamics, RecurDyn for Beginners*. FunctionBay, Inc.

Solidworks. URL: <http://www.solidworks.es/>.

Virtual Lego® Technic Models. URL: <http://www.sheepo.es/>.

Parte II

Presupuesto

Capítulo 1

Introducción

El siguiente presupuesto se ha planteado como si fuera un encargo que realiza un cliente, que quiere conocer cómo funcionan los mecanismos de una serie de prototipos o modelos así como sus posibilidades de movimiento. Se han excluido, por tanto, las horas dedicadas al aprendizaje del software utilizado en este proyecto (lectura de manuales, ejercicios básicos procedentes de tutoriales, etc.).

Capítulo 2

Presupuesto

El presupuesto se divide en cuatro capítulos que corresponden a los diferentes recursos que se han empleado (software informático, hardware informático, recursos materiales y recursos humanos).

2.1 Software

Para desarrollar este proyecto se ha utilizado dos softwares de CAE diferentes. Por una parte se ha hecho uso de SolidWorks 2016-2017 para el montaje virtual de los modelos y, por otra parte, se ha utilizado RecurDyn como herramienta para la simulación virtual de dichos modelos, así como el análisis mediante el método de los elementos finitos. Por tanto, es necesario incluir la parte correspondiente de ambas licencias en el presupuesto.

Herramientas Informáticas	Uds	Precio unitario (€)	Tiempo amortización (años)	Horas/año	Precio amortización/hora (€/hora)	Horas trabajo	Coste (€)
SolidWorks 16-17	1,00	9.000,00	3,00	1840	1,63	130,00	211,96
RecurDyn V8R5	1,00	12.000,00	3,00	1840	2,17	120,00	260,87
					TOTAL	472,83	

Tabla 2.1: Software informático.

2.2 Hardware

Para realizar cualquier proyecto que involucre la utilización de softwares tipo CAE es necesario poseer un ordenador (ya sea de sobremesa o portátil) cuyo hardware permita que los programas se ejecuten con cierta fluidez.

Se propone como solución el ordenador utilizado durante el desarrollo de este proyecto. Se trata de un portátil de la marca MSI con las siguientes especificaciones:

- Procesador Intel Core i7-4720HQ @2,6GHz
- Memoria RAM de 16,00 GB
- Gráfica NVIDIA Quadro K2100M
- SO Windows 10 Pro

Equipo	Uds	Precio unitario (€)	Tiempo amortización (años)	Horas/año	Precio amortización/hora (€/hora)	Horas trabajo	Coste (€)
PC	1,00	1.600,00	4,00	1840	0,22	300,00	65,22

Tabla 2.2: Hardware informático.

2.3 Modelos Lego Technic®

Todos los modelos virtuales que se han montado y simulado han sido previamente adquiridos en su versión física, incluida la creación personalizada del Jeep Wrangler Rubicon.

Modelo Lego Technic	Unidades	Precio unitario (€)	Coste (€)
4047-1 Compact excavator	1,00	59,99	59,99
42028-1 Bulldozer	1,00	64,99	64,99
42065-1 RC Tracker Racer	1,00	89,99	89,99
Jeep Wrangler RC	1,00	710,00	710,00
TOTAL			924,97

Tabla 2.3: Modelos Lego Technic Físicos.

2.4 Montaje y Simulación de Modelos Lego Technic® Virtuales

El montaje y la simulación virtual de los diferentes modelos constituye el grueso del proyecto, así como del presupuesto. En esta sección se describen las tareas realizadas en cada uno de los modelos y su coste asociado en base a las horas de trabajo y los honorarios.¹

Modelo Virtual	Tareas	Horas	Precio (€/h)	Precio Tarea	Coste (€)
8047-1	Montaje del modelo virtual	20,00	27,00	540,00	
	Creación del modelo autoalineador	10,00	27,00	270,00	
	Simulación en vacío y de su equivalente	10,00	27,00	270,00	
	Análisis por el MEF	15,00	27,00	405,00	1485,00
42028-1	Montaje del modelo físico	15,00	27,00	405,00	
	Montaje del modelo virtual	30,00	27,00	810,00	
	Creación del modelo autoalineador	15,00	27,00	405,00	
	Simulación en vacío y de su equivalente	15,00	27,00	405,00	2025,00
42065-1	Montaje del modelo físico	10,00	27,00	270,00	
	Montaje del modelo virtual	15,00	27,00	405,00	
	Creación del modelo autoalineador	5,00	27,00	135,00	810,00
Sheepo's Jeep Wrangler	Montaje del modelo físico	25,00	27,00	675,00	
	Montaje del modelo virtual	65,00	27,00	1755,00	
	Creación del modelo autoalineador	30,00	27,00	810,00	
	Simulación	20,00	27,00	540,00	3780,00
				TOTAL	8.100,00

Tabla 2.4: Montaje y Simulación de Modelos Lego Technic Virtuales.

¹El importe de los honorarios de un ingeniero industrial es de 27 € por hora trabajada. Esta cantidad se obtiene considerando un salario base de 35.000 € al año, con un total de 230 días trabajados durante 8 horas al día (46 semanas de trabajo y 6 semanas de fiesta entre días festivos y vacaciones), añadiendo la seguridad social estipulada en un 28.3% del salario base y una cantidad (alrededor de un 12%) en dietas y pluses.

Capítulo 3

Resumen

A modo de resumen se incluye una tabla sintetizando la información detallada en el capítulo anterior. Para finalizar se calcula el presupuesto total, incluyendo el beneficio industrial y el IVA.

Capítulo	Coste (€)
Software	472,83
Equipo Informático	65,22
Modelos Lego Technic	924,97
Montaje y Simulación de Modelos	8.100,00
SUBTOTAL	9.563,01

Tabla 3.1: Resumen de las partes del presupuesto.

Concepto	Coste (€)
Presupuesto de ejecución material	9.563,01
Gastos generales (13 %)	1.243,19
Beneficio Industrial (6 %)	573,78
Presupuesto de ejecución por contrata	11.379,99
Iva (21 %)	2.389,80
Presupuesto Total	13.769,78

Tabla 3.2: Presupuesto total.

El presupuesto total asciende a *trece mil setecientos sesenta y nueve euros con setenta y ocho céntimos*.

Parte III

Anexo

Manual de Usuario

Capítulo 1

Introducción

1.1 ¿Qué es RecurDyn?

RecurDyn es un software de Ingeniería Asistida por Ordenador (Computer Aided Engineering o CAE, en inglés) que permite realizar que permite realizar una amplia gama de operaciones, desde la concepción y creación de un mecanismo o sistema mecánico, hasta su simulación dinámica, pudiendo estudiar las vibraciones de un cuerpo (o un conjunto de ellos) e incluso llevar a cabo un análisis de tensiones por el método de los elementos finitos.

RecurDyn es desarrollado y comercializado por la empresa FunctionBay y su nombre procede de la forma en la que calcula y resuelve las ecuaciones de movimiento de los diferentes sistemas mecánicos.¹

El análisis cinemático y dinámico de mecanismos y sistemas mecánicos es muy utilizado en el desarrollo de productos de muchas áreas del sector industrial tales como automóviles, todo tipo de máquinas del sector de la construcción, máquinas eléctricas, etc. Durante el desarrollo de producto se comprueba el comportamiento de este usando un modelo prototipo. El comportamiento del sistema se evalúa para los casos en los que un test físico, real, resulta imposible por razones físicas o económicas. Por tanto, resulta imprescindible contar con un software de CAE que permita no solo crear el producto con las mismas características constructivas que tendría en la realidad, sino también simular su comportamiento en distintos escenarios. Todo ello permite reducir una gran cantidad de costes así como acortar el periodo de diseño y desarrollo de producto.

¹El nombre de RecurDyn es el resultado de juntar dos términos. El primero es *Recursive*, que se refiere a la teoría de las funciones recursivas en la que esta basada su lógica, y el segundo es *Dynamics*, ya que resuelve ecuaciones relacionadas con el movimiento de los cuerpos.

1.2 ¿Cómo se ha desarrollado RecurDyn?

El software RecurDyn ha sido desarrollado por dos profesores coreanos. Dae Sung Bae, de la universidad de Hangyang y Jin Hwan Choi, de la universidad de KyungHee. En un principio este software estaba pensado solo para ser usado únicamente en laboratorios. Desde entonces, RecurDyn ha ido progresando, analizando sistemas mecánicos con sólidos rígidos y flexibles e incorporando nuevos métodos de cálculo y análisis de movimiento además del método recursivo. Por otra parte, para que un software se pueda comercializar, su interfaz ha de ser amigable e intuitiva, algo en lo que también ha evolucionado mucho. La versión 4.0 fue lanzada al mercado en 2001 y es la base de la actual versión, la V8R5.

1.3 ¿Qué es capaz de hacer RecurDyn?

RecurDyn analiza máquinas o sistemas mecánicos que poseen todo tipo de partes móviles tales como automóviles, equipamiento acústico, robots, máquinas usadas para la construcción, máquinas de control numérico, satélites y sondas espaciales así como cuerpos biomecánicos.

RecurDyn no solo está limitado a resolver problemas dinámicos de sólidos rígidos sino que es capaz de analizar problemas no lineales relacionados con mecanismos elásticos y superelásticos con grandes deformaciones, problemas de fatiga y estrés de materiales con variaciones en la tolerancia de los mismos (debidos a posibles errores en el desarrollo de producto), problemas relacionados con fluidos, etc.

1.4 Funciones de RecurDyn

En esta sección se esquematizarán las herramientas principales del RecurDyn, que son:

- Herramienta de **análisis dinámico de sólidos rígidos**.
- Herramienta de **análisis de elementos flexibles** por el método de los elementos finitos.
- Herramienta de **control de sistemas mecánicos**.
- Herramienta de **diseño de producto**, desde mecanismos simples a máquinas complejas formadas por centenares de mecanismos.
- Herramienta de **análisis de tensiones**, comportamiento a fatiga y estrés de los componentes.

Es decir, RecurDyn no es solo una herramienta de análisis de movimiento, sino que abarca todo el proceso desde el diseño, hasta el propio control, pasando, por supuesto, por el análisis cinemático y dinámico del sistema. Todas estas herramientas se encuentran integradas en la interfaz del propio programa, tal y como muestra la Figura 1.1.

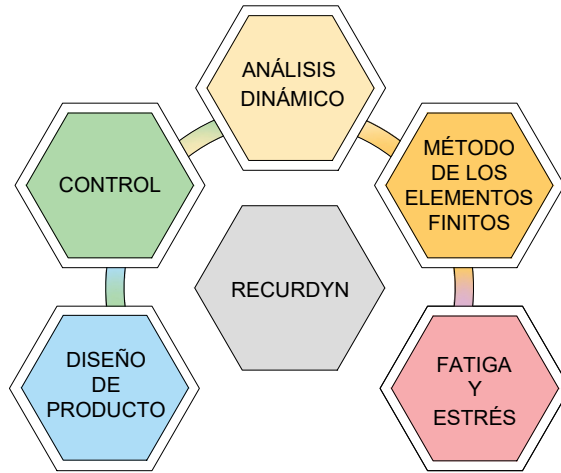


Figura 1.1: Esquema de las principales herramientas de RecurDyn

En consecuencia, no es necesario recurrir a otros programas para realizar cualquiera de estas funciones, lo que facilita la labor de diseño, agiliza el proceso de adaptación a la interfaz del programa y, en resumen, ahorra tiempo y dinero.

1.5 Teoría de la dinámica multi-cuerpo

La teoría de la dinámica multi-cuerpo (*multibody dynamics* o *MBD* en inglés) es una compleja teoría cuyo desarrollo no es objeto de un manual de usuario y, por ello, en el presente capítulo solo se explicarán los conceptos más sencillos de los que parte dicha teoría.

La teoría fundamental de la dinámica multi-cuerpo analiza posiciones, velocidades, aceleraciones y fuerzas que actúan sobre los cuerpos y por tanto resulta de gran importancia la situación de los ejes de coordenadas.

Sin entrar en detalle, es importante conocer que existen dos métodos que analizan la dinámica de los cuerpos. El método Newton-Euler y el método Euler-Lagrange (método recursivo). Cada método se utiliza para resolver diferentes tipos de problemas y cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes. En el primero las ecuaciones que definen el movimiento de los cuerpos son derivadas a partir de la Segunda Ley de Newton, que relaciona fuerza y momento, así como par y momento angular. En este método las ecuaciones no son expresadas en términos de variables independientes y por tanto requiere conocimientos profundos de física y matemáticas. El segundo método describe el comportamiento de un sistema en términos de trabajo y energía almacenada y se puede escribir de forma recursiva. Es el método más utilizado por los softwares de CAE ya que permite expresar las ecuaciones de manera recursiva, de tal forma que se reduce el número de variables y es posible realizar múltiples iteraciones con un coste computacional relativamente bajo.

Capítulo 2

Usando RecurDyn

En este capítulo se pretende desarrollar el Manual de Usuario propiamente dicho, es decir, explicar las principales funciones del programa de cara a tanto a usuarios que usan por primera vez el RecurDyn como a aquellos que, sin ser expertos, ya han dado sus primeros pasos en softwares de CAE.

Por ello, a lo largo del capítulo se explicarán las principales herramientas que conforman RecurDyn como la creación de modelos, la importación de modelos procedentes de otros programas, la definición de los pares cinemáticos, el estudio del movimiento y el graficado de resultados de interés, para que el usuario se acostumbre a la interfaz del programa y, en definitiva, aprenda lo que RecurDyn es capaz de hacer.

2.1 Preparación

Al iniciar RecurDyn, aparecerá la Figura 2.1, que permite crear un modelo desde cero. Para ello se deberá de poner un nombre, elegir las unidades con las que RecurDyn trabajará y por último indicar el eje en el que actuará la gravedad. Si, por el contrario, no se desea crear un modelo sino importar uno hecho o continuar trabajando sobre otro habrá que seleccionar *Browse* que permite importar archivos del propio RecurDyn (*.dyn) o archivos procedentes de otros softwares en formato PARASOLID (*.x_t), CATIA (*.catpart), ADAMS (*.adm), CAD (*.cmd), etc.

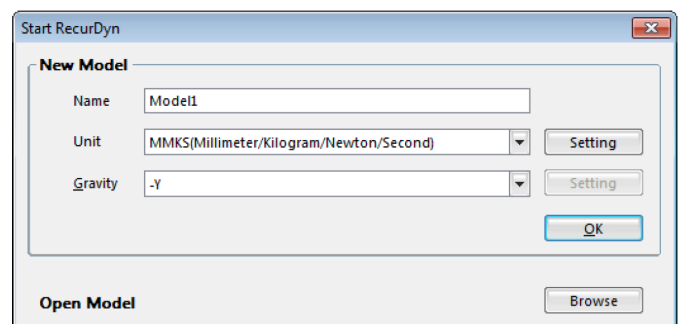


Figura 2.1: Ventana inicial en RecurDyn

Una vez superada la ventana inicial, aparecerá la ventana principal, que dará acceso a todas las funcionalidades del RecurDyn. Antes de explicar cada una de estas funcionalidades individualmente, resulta necesario entender cómo está organizada la interfaz del RecurDyn. Tal y como muestra la Figura 2.2, la interfaz esta dividida en varios bloques, a saber:

- **Barra de Acceso Rápido.** Permite realizar las clásicas funciones de Abrir un documento, Guardar, Guardar Como, deshacer, etc.
- **Paleta Principal.** Según la pestaña seleccionada, permitirá realizar diversas funciones desde crear cuerpos, unir cuerpos, dividir cuerpos, crear pares cinemáticos, definir los parámetros de una simulación, controlar dicha simulación, plotear resultados, etc.
- **Barra de Comando.** Permite especificar puntos en el espacio, cuerpos, y direcciones que sean necesarios definir para realizar las funciones de la paleta principal.
- **Barra principal.** También llamada barra de control, permite mover el cuerpo y objeto seleccionados, cambiar de vista, cambiar de plano, cambiar el tipo de render, mostrar y ocultar los ejes de referencia, etc.
- **Ventana Principal.** Donde se muestra toda la información visual relacionada con el producto con el que se esté trabajando. El propio producto, resultados de la simulación, subpartes del producto, etc.
- **Herramienta de Rotación.** Herramienta integrada en la ventana principal que permite rotar el objeto alrededor de un eje.
- **Árbol de Trabajo.** Árbol donde se muestran jerárquicamente los cuerpos y pares cinemáticos con los que se está trabajando y sus correspondientes ejes de referencia.
- **Ventana de Mensajes.** Proporciona información sobre el transcurso del programa, resultados de la simulación, errores, etc.

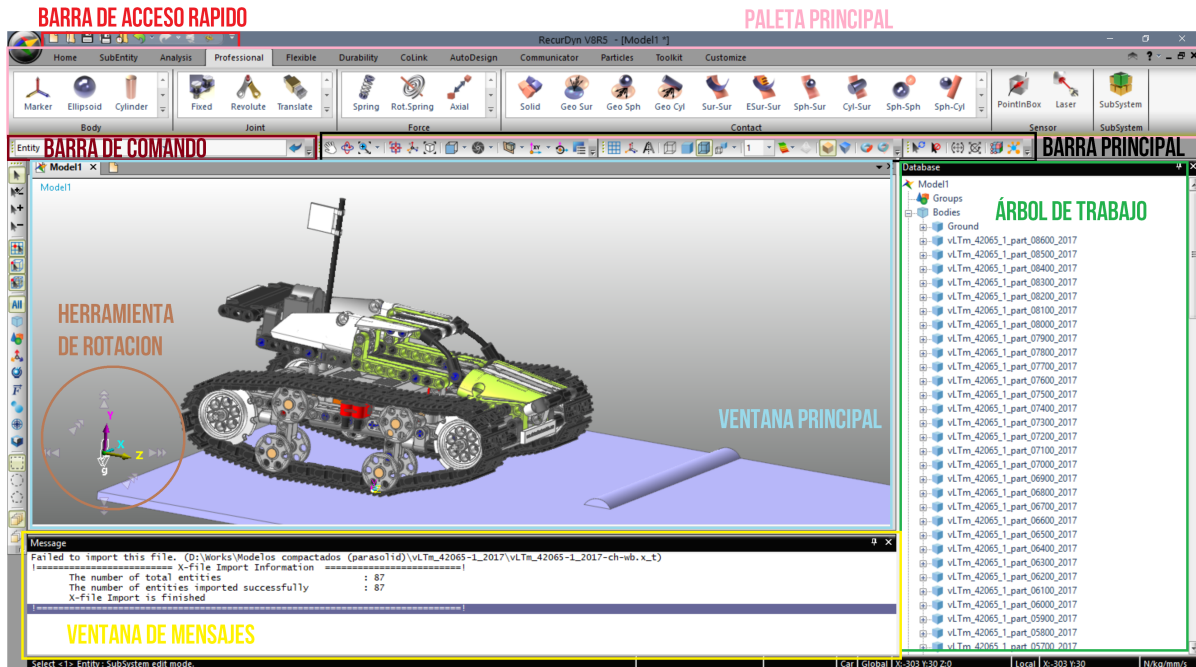


Figura 2.2: Interfaz del RecurDyn

2.2 Conceptos básicos

En esta sección se definirán conceptos básicos de mecánica acerca de la definición de pares cinemáticos, el cálculo de la movilidad de mecanismos y las restricciones en exceso.

2.2.1 Pares cinemáticos

Los pares cinemáticos son uniones que permiten transmitir el movimiento entre piezas. En el entorno virtual, equivalen a la colocación de rodamientos y cojinetes para permitir ciertos tipos de movimientos.

Los pares cinemáticos se pueden clasificar en tres tipos: **superiores**, **inferiores** y **mixtos**. En los primeros el contacto entre los dos sólidos se realiza a través de una arista o punto, mientras que en los segundos lo hace a través de una superficie. Los últimos se obtienen por combinación de los dos anteriores. A continuación se muestran una tabla con los pares que conforman cada grupo mencionado:

Pares superiores	GDL	Pares inferiores	GDL	Pares mixtos	GDL
Rodadura sin deslizamiento	1	Giratorio	1	Cojinete de bolas	1
Leva rodadura con deslizamiento	2	Prismatico	1	Junta universal	2
Bola rodadura sin deslizamiento	3	Helicoidal	1	Deslizadera de rodillos	1
Bola dentro de cilindro	4	Cilindrico	2		
		Esférico	3		
		Planar	3		

Tabla 2.1: Pares cinemáticos superiores, inferiores y mixtos

2.2.2 Cálculo de la movilidad

Mecanismos planos

En el plano existen tres grados de libertad. Si se considera un mecanismo en el plano, formado por **N** cuerpos distintos y esas uniones están definidas a través de **J** pares la ecuación para el cálculo de la movilidad **M** resulta:

$$M = 3(N - J - 1) + \sum_{i=1}^J f_i$$

Figura 2.3: Criterio de movilidad para mecanismos planos.

Donde f_i tomará el valor uno si el par i se trata de un par inferior y dos si se trata de uno superior.

Mecanismos tridimensionales

En el espacio, sin embargo, existen seis grados de libertad. Por tanto, aplicando la fórmula de Grübler de forma análoga para el caso con tres dimensiones:

$$M = 6(N - J - 1) + \sum_{i=1}^J f_i$$

Figura 2.4: Fórmula de Grübler para mecanismos tridimensionales.

Donde f_i tomará el valor uno si el par i se trata de un par inferior y dos si se trata de uno superior.

2.2.3 Grados de libertad de las uniones

A continuación se muestra un tabla con los pares más utilizados, las restricciones traslacionales y rotacionales que imponen y los grados de libertad restantes¹.

Par	Restricciones traslacionales	Restricciones rotacionales	GDL restringidos	GDL restantes
Revolución	3	2	5	1
Traslacional	2	3	5	1
Cilíndrico	2	2	4	2
Esférico	3	0	3	3
Universal	3	1	4	2
Planar	1	2	3	3
Fijo	3	3	6	0
En la línea	2	0	2	4
En el plano	1	0	1	5
Orientación	0	3	3	3
Paralelo	0	2	2	4
Perpendicular	0	1	1	5

Tabla 2.2: Pares cinemáticos más utilizados, restricciones que añaden y grados de libertad restantes

¹La tabla representa los grados de libertad de cada uno de los pares. En un mecanismo formado por varios cuerpos y, por tanto, varias uniones, los grados de libertad del mecanismo se calculan con la fórmula de Grübler vista con anterioridad

2.2.4 Mecanismos Autoalineadores

Un **mecanismo autoalineador** es aquel que, teniendo los grados de libertad adecuados, no posee restricciones en exceso. A continuación se expone un ejemplo para facilitar la comprensión de este concepto.

Si en un automóvil el eje de transmisión está apoyado en dos puntos, harán falta, lógicamente, dos cojinetes que, aplicado al caso virtual de se traduce en dos pares cinemáticos. La transmisión de un vehículo tiene un grado de libertad, el de rotación alrededor de su eje. Pues bien, si colocamos dos pares de tipo R, a pesar de que el grado de libertad del sistema es uno, el modelo quedará sobrerrestringido (aparecerán cinco restricciones en exceso) puesto que, en un principio, hubiese bastado solo con un par R (ya que este tipo de par limita cinco grados de libertad, permitiendo solo el giro alrededor de un eje). Sin embargo, al tener dos apoyos se necesitan dos pares, de manera que será necesario pensar en otra combinación que, dando como resultado una movilidad de uno, no imponga restricciones de más. Una combinación apropiada podría ser la de cilíndrico-en el plano o también la de esférico-en la línea².

Llevado a la práctica real, una mala elección de los cojinetes que sobrerrestringa el el mecanismo puede ocasionar que, pequeños desperfectos en las piezas o errores de coaxialidad entre ejes den lugar a un mal funcionamiento de la máquina. Los errores geométricos o los de una incorrecta alineación son difíciles de detectar y corregir, por tanto el hecho de utilizar una buena combinación de cojinetes y rodamientos que de como resultado un mecanismo autoalineado resulta una solución ingeniosa y práctica. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de mecanismo autoalineador.

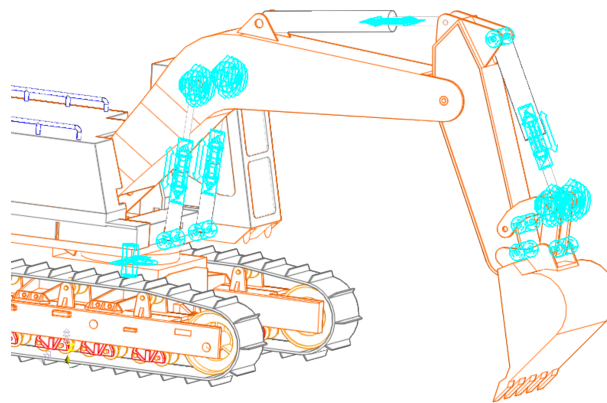


Figura 2.5: Mecanismo autoalineador, sin restricciones en exceso.

²Para poder realizar acoplamientos entre pares, como se verá mas adelante, es necesario que estos sean pares de revolución, cilíndricos o traslacionales. Por tanto y, siguiendo con el ejemplo de la transmisión de un vehículo, si esa transmisión va acoplada a otro mecanismo como puede ser un diferencial, se deberá escoger el par de uniones *cilíndrico-en el plano*, quedando descartado el conjunto *esférico-en la línea* por no poder acoplarse con ningún par

2.3 Entorno: Profesional

En esta pestaña se encuentran las herramientas básicas de creación de cuerpos, unión de los mismos mediante pares cinemáticos, establecimiento de contactos entre cuerpos y aplicación de pares y fuerzas a dichos cuerpos. El entorno de la pestaña está dividido por tanto en cuatro subentornos: cuerpo (*body*), par (*joint*), fuerza (*force*) y contacto (*contact*).

2.3.1 Creación de cuerpos

El subentorno **Body** permite crear los siguientes items (mostrados en la Figura 2.6): Eje de Referencia, Elipsoide, Cilindro, Caja, Anillo, Prisma, Cono, Biela y, por último, la Tierra, que constituirá el escenario base sobre el que se mueva la máquina mecánica.

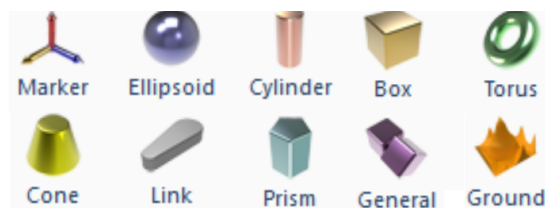


Figura 2.6: Subentorno *Body* en RecurDyn

Al seleccionar alguno de los items nombrados en el párrafo anterior, se habilitará la **barra de comando**, donde se podrá especificar tanto el origen de creación del item como sus dimensiones. RecurDyn ofrece varias posibilidades de creación, así por ejemplo el ítem cilindro se podrá seleccionar en la barra de comando entre *Punto, Punto* (donde creará un cilindro cuyos centros de circunferencia se encuentren en los puntos seleccionados) y *Punto, Punto, Radio* (donde, además de especificar la posición de las circunferencias, también se impondrá su radio). Es importante subrayar que, aunque las opciones de creación que ofrece la barra de comando son diferentes, en todos los casos es posible llegar al mismo resultado. Por ejemplo, si se define un cilindro únicamente definiendo la posición de las circunferencias, RecurDyn tomará un radio de las mismas por defecto. Sin embargo, ese radio se podrá editar posteriormente de manera fácil y rápida, como se explicará más adelante.

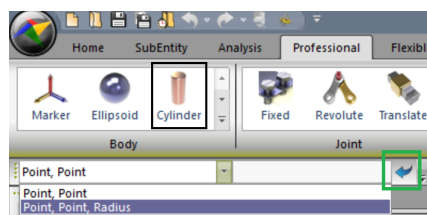


Figura 2.7: Barra de comando de RecurDyn

En la Figura 2.7 se puede observar la barra de comando, en la que se ofrecen dos posibilidades al seleccionar la entidad "Cilindro". El procedimiento a seguir pasa por escribir en la barra de comando las coordenadas de los puntos en formato *Coordenada X, Coordenada Y* y pulsar la tecla *Enter* (o la flecha recuadrada en verde en la imagen). Para el radio, lógicamente, solo será necesario escribir el valor absoluto de la magnitud.

2.3.2 Establecimiento de pares

El subentorno **Joint** permite definir uniones cinemáticas entre los cuerpos. Es el equivalente a los cojinetes y rodamientos que se incorporan entre las piezas de las máquinas para permitir uno o varios tipos de movimiento entre ellas, restringiendo otros.

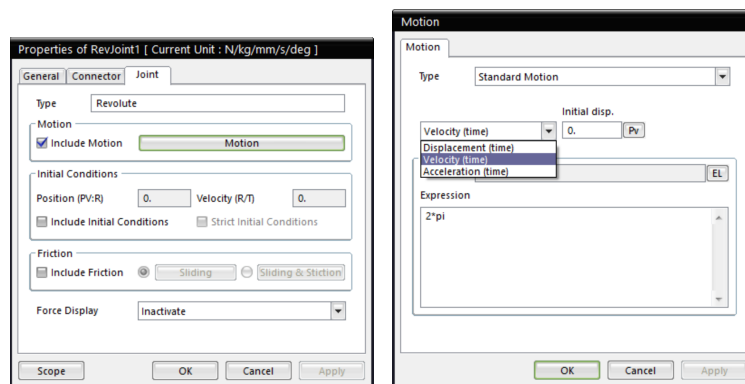
Las juntas o pares son definidos de la misma manera que los cuerpos, mediante la barra de comando de RecurDyn. Para definir un par correctamente es necesario seleccionar los cuerpos que unirá dicho par, así como su localización en el espacio. En la Figura 2.8 se muestra el desplegable de RecurDyn con los pares que son más utilizados. RecurDyn permite colocar otros tipos de pares más avanzados como acoples, un par de levas, un par engranaje, o un par que imita la colocación de una correa entre dos ruedas.



Figura 2.8: Subentorno *Joint* en RecurDyn

2.3.3 Dotación de movimiento a los pares

La dotación de movimiento los pares cinemáticos es la base para poder realizar las posteriores simulaciones dinámicas y cinemáticas. Para dotar de movimiento a un par se deberá **editar el par** desde el árbol de trabajo, clicando en la opción *Property* tras pulsar con el botón derecho en dicho par. Posteriormente se deberá marcar la casilla *Motion* y, pulsando en el botón alargado llamado con el mismo nombre se abrirá una ventana que permitirá seleccionar la variación en el desplazamiento, la velocidad o la aceleración del par así como establecer un expresión o una constante que establezca una ley de variación de la magnitud anteriormente seleccionada. Las dos ventanas que se han descrito se muestran en la Figura 2.9



(a) Activación del movimiento

(b) Expresión del movimiento

Figura 2.9: Movimiento en los pares cinemáticos

2.3.4 Acoplamientos y Contactos

En esta sección se explicará la diferencia entre estos dos términos y cuando se ha de usar cada uno. La diferencia fundamental entre un acople y un contacto es que, en el acople se define el número de unidades en las que variará una magnitud de un par cinemático con respecto a otro, mientras que en el contacto es el software el que identifica la superficie de contacto y calcula el movimiento de dos cuerpos en contacto dada su geometría, velocidad, inercia, etc. Se podría decir, por tanto, que el acople es una forma virtual de relacionar el movimiento de pares, aunque estos estén asociados a cuerpos que no se encuentren en contacto, y el contacto es la forma más "real" que existe de calcular un acoplamiento entre cuerpos, aunque implique un coste computacional muy elevado. La mejor forma de entender cuando se usa cada uno es mediante un ejemplo.

En este ejemplo, se quiere relacionar el movimiento de un engranaje formado por dos ruedas dentadas en contacto, la primera de 12 y la segunda de 24 dientes. Existen, como ya se ha comentado, dos maneras de hacerlo.

La primera es seleccionar, en la pestaña *Profesional*, la opción *Coupler*, dentro del subentorno *Joint*. Al clicar en dicha opción, **se deberán seleccionar los dos pares**, en este caso, los dos pares revolución que se hayan colocado para restringir el movimiento de los engranajes a la rotación sobre su eje. Al hacerlo, se creará en el **Árbol de trabajo** un ítem llamado *Coupler1* (el número que le acompaña se refiere a la identificación del acoplamiento, en este caso un uno ya que es el primero que se define). Por defecto el acoplamiento se realiza 1 a 1, es decir, por cada vuelta que de el par revolución uno, dará una vuelta el par revolución dos. Esto no es así, ya que los engranajes poseen número de dientes distintos. Por tanto, se deberá **editar el acoplamiento** pulsando sobre la opción *Property*, al clicar con el botón derecho sobre dicho acoplamiento (*Coupler1*). Aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 2.10:

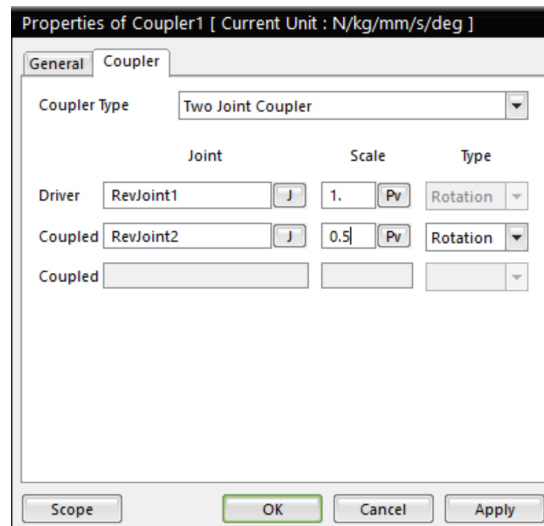


Figura 2.10: Acoplamientos en RecurDyn

La ventana muestra las propiedades del acoplamiento. Como se puede apreciar, existen dos casillas en las que se encuentran los pares relacionados y las unidades (en este caso de rotación ya que son pares de revolución) que definirán el acoplamiento. **En la primera casilla se deberá colocar siempre la unidad, y en la segunda, la relación entre los pares.** En el caso del ejemplo, se deberá colocar un uno en la primera casilla y en la segunda un 0.5, ya que por cada vuelta que de el engranaje de 12 dientes, dará media el de 24.

La segunda manera es muy sencilla, se trata de definir un contacto sólido entre las dos piezas, en este caso, los dos engranajes. Para ello, solo se deberá clicar en la opción *Solid*, dentro del subentorno *Contact*, en la pestaña Profesional. Al hacerlo, únicamente restará **seleccionar los cuerpos** entre los que se establecerá el contacto, en este caso, los dos engranajes. El propio RecurDyn hará el resto, identificando la geometría y resolviendo el problema del movimiento relativo entre ambos cuerpos.

Visto así, la opción del contacto parece mucho más rápida y sencilla, no teniendo que identificar los pares a relacionar, contar dientes, etc. Sin embargo, a la hora de simular, el tiempo que RecurDyn tarda en resolver las ecuaciones del movimiento es significativamente mayor cuando se ha establecido un contacto, aumentando casi de forma exponencial conforme se aumenta el número de contactos. Por otro lado, los acoplamientos no aumentan el tiempo de simulación de manera apreciable, por lo que, si se posee un modelo complejo con gran cantidad de mecanismos, es fundamental utilizar la herramienta acoplamiento antes que establecer un contacto. Hay veces que no es posible establecer acoplamientos y los contactos son necesarios, por ejemplo, para definir el contacto de las ruedas con un escenario como pueda ser una carretera lisa, un terreno arenoso o una superficie nevada. El establecimiento de contactos en superficies "poco comunes" se verá más adelante.

2.4 Propiedades, edición y movimiento de cuerpos

Una vez se ha aprendido a crear cuerpos y formar mecanismos mediante las uniones de dichos cuerpos con pares cinemáticos es imprescindible saber realizar cambios en estos mecanismos. Desde cambios sencillos como el movimiento y rotación de cuerpos alrededor de un eje o el cambio de plano de trabajo hasta cambios más complejos como modificaciones de la geometría o las propiedades másicas (masa, momento de inercia, etc).

Antes de profundizar en este apartado, resulta clave entender que, en RecurDyn, existen varios niveles de propiedades dependiendo de si se accede a las propiedades de un componente (un cuerpo) o si, por el contrario, se accede a las propiedades de un conjunto de cuerpos, aunque este conjunto de cuerpos este unido y no posea movimiento relativo entre ellos no pudiendo ser tratado de mecanismo. Todo esto se entiende mejor con un ejemplo.

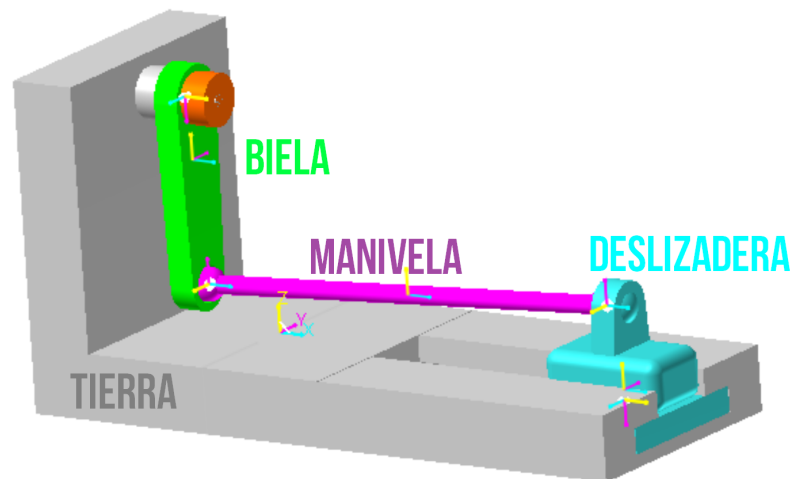


Figura 2.11: Mecanismo Biela-Manivela-Deslizadera

En la Figura 2.11 se muestra el mecanismo Biela-Manivela-Deslizadera con el que se pretenderá ilustrar el ejemplo. Todo el montaje está unido a Tierra, que no es más que un escenario propicio para que la biela rote en un plano y la deslizadera pueda moverse en el plano perpendicular.

En este montaje las entidades Biela (Crank), Manivela (Connecting rod) y Deslizadera (Slider) están formadas por varias operaciones que incluyen varios cuerpos, a saber:

- La biela está formada por la propia biela, a la que se le ha acoplado un cilindro en la parte superior, y se le ha realizado una hendidura mediante una intersección booleana con una esfera.
- La manivela está formada por un cilindro al que se la han acoplado, mediante uniones booleanas, dos esferas en los extremos.
- La deslizadera está compuesta por una caja redondeada a la que se le ha acoplado una bieleta con una hendidura esférica en el extremo superior.

Por esta razón, las propiedades del conjunto Biela (y lo mismo para las otras dos entidades) están por encima de las propiedades de cada uno de los componentes y operaciones del conjunto Biela (la propia biela en sí, el cilindro superior y las operaciones booleanas).

Propiedades del conjunto

Para acceder a las propiedades del conjunto se deberá clicar con el botón derecho en el nombre del conjunto, situado en el **árbol de trabajo** y seleccionar la opción *Property*, tal y como muestra la Figura 2.12

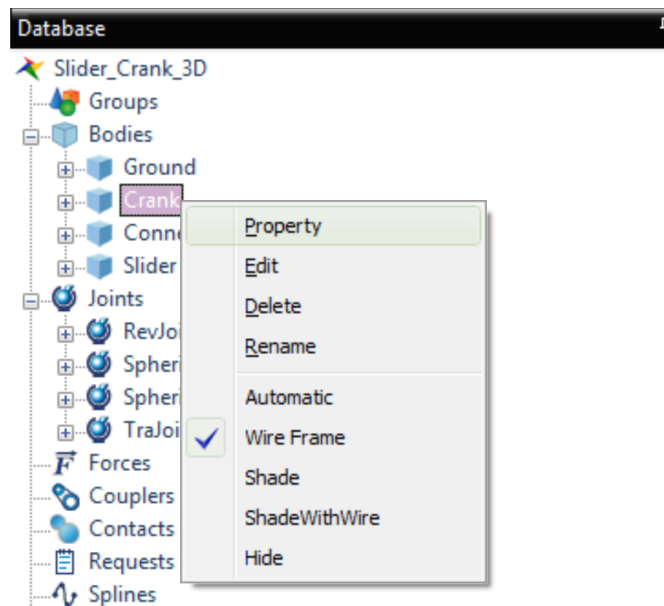


Figura 2.12: Acceso a las propiedades de un conjunto

Las propiedades de conjunto están divididas en cuatro pestañas, tal y como muestra la Figura 2.13:

- **General:** Permite cambiar el nombre del conjunto y las unidades de trabajo.
- **Graphic Property:** Permite cambiar el color del conjunto.
- **Origin and Orientation:** Permite cambiar la posición del origen de referencia del conjunto y su orientación.
- **Body:** Permite modificar aspectos del conjunto como la masa, el volumen o el momento de inercia alrededor de los ejes principales.

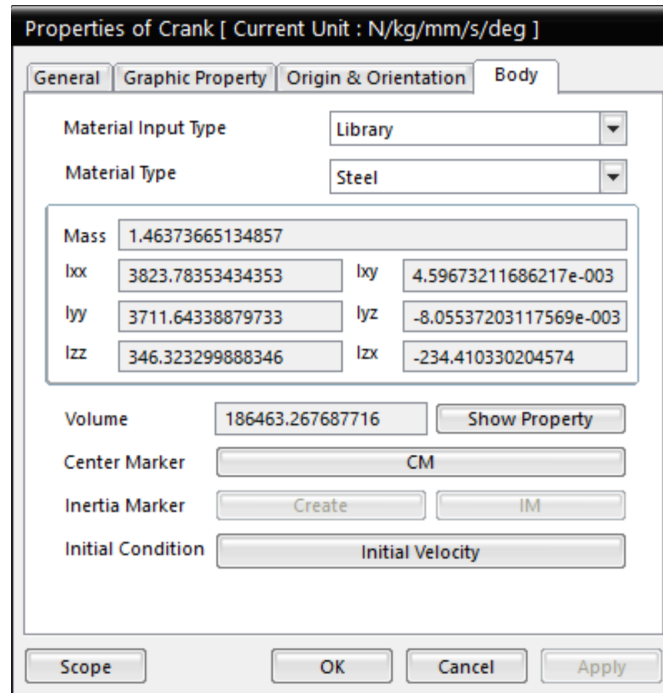


Figura 2.13: Propiedades del conjunto Biela

Propiedades del componente

Para acceder a las propiedades del componente, se deberá primero entrar en el conjunto. Para ello hay dos opciones, hacer doble click en el conjunto sobre la **ventana principal de trabajo** o seleccionar en el árbol de trabajo la opción *Edit* como ilustra la Figura 2.14

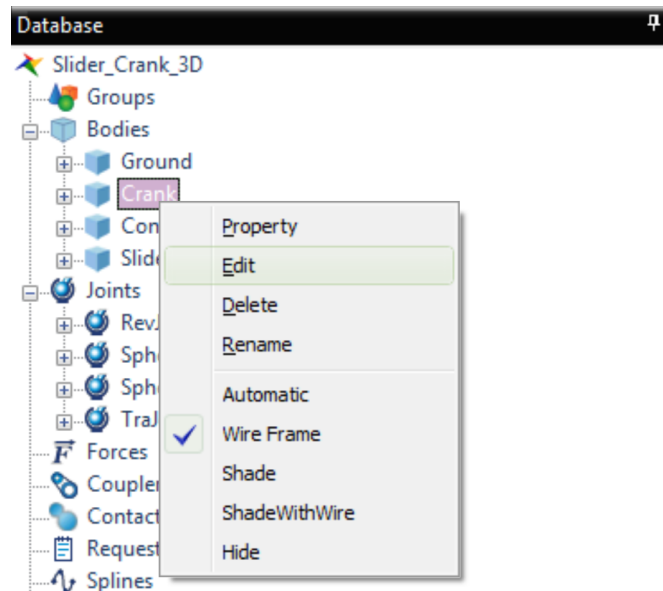


Figura 2.14: Acceso a la edición de un conjunto

Al entrar en el conjunto, se superpondrá una ventana gráfica que ya no mostrará el mecanismo sino solo el conjunto seleccionado, como se puede apreciar en la Figura 2.15.

Para modificar las propiedades de alguna de los componentes u operaciones booleanas el procedimiento será el mismo, cliclar con el botón derecho encima del componente y seleccionar la opción *Property*. Las propiedades de un componente son más limitadas y solo permitirán cambiar el nombre y el color del componente, y la geometría básica (en el caso de un cilindro, la localización de los centros de sus circunferencias y el radio de las mismas).

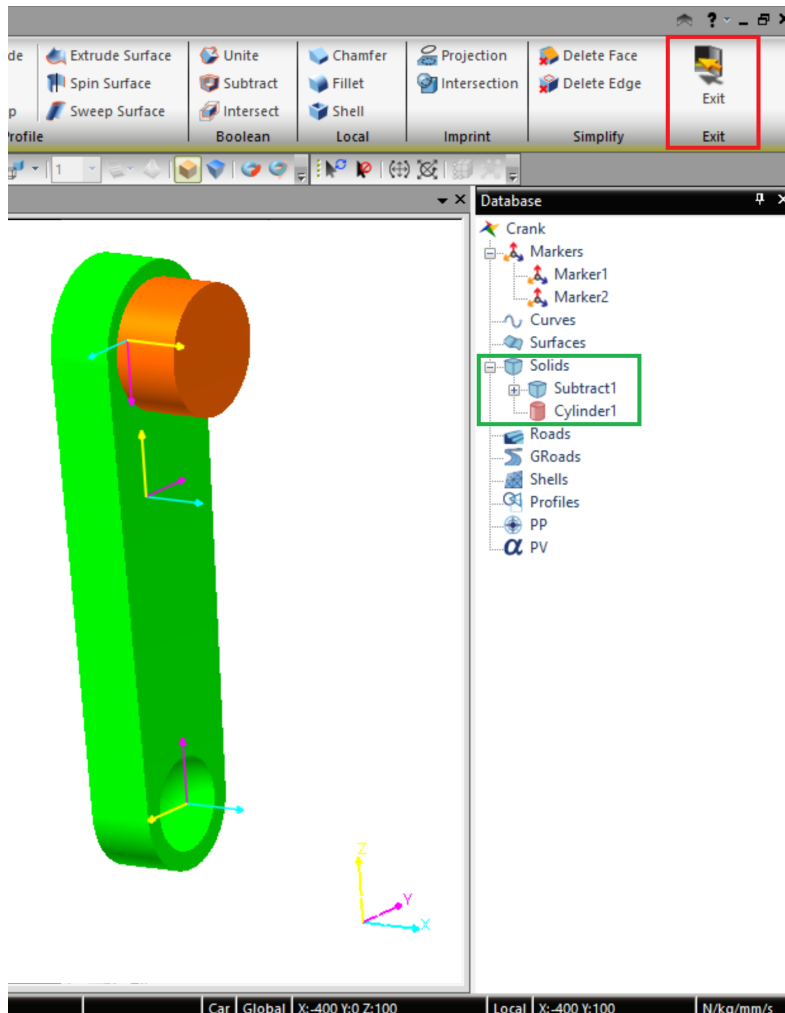


Figura 2.15: Ventana gráfica de un conjunto y sus componentes

Por último, para volver al escenario donde se mostraba el mecanismo se deberá seleccionar la opción *Exit*, situada arriba a la derecha de la ventana.

Desplazamiento y rotación de cuerpos

El aprendizaje del movimiento de los cuerpos resulta fundamental en RecurDyn ya que permite trasladar o rotar cuerpos o conjuntos de cuerpos para colocarlos en la posición deseada. Por ejemplo (como se muestra en la Figura 2.16) para establecer una posición de la rueda dentada en la que no exista ningún tipo de interferencia entre la propia rueda y los eslabones de la cadena o imponer la posición inicial de una deslizadera a lo largo de una guía.

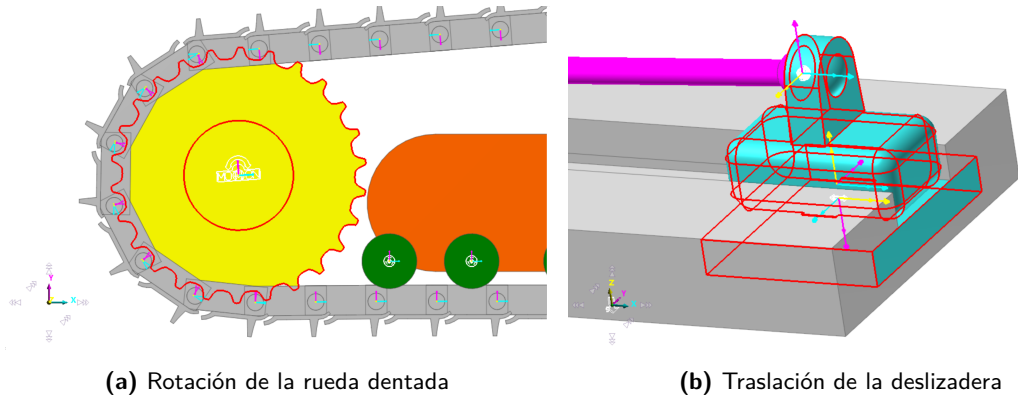


Figura 2.16: Ejemplo de uso de la herramienta de control básico

Este tipo de movimientos se realiza con la herramienta llamada **Basic Control Tool** que permite realizar traslaciones y rotaciones alrededor de cualquier eje, definido por ejes de referencia o *markers*. El acceso a la herramienta se encuentra en la **barra principal o barra de control** y tiene el aspecto que muestra la Figura 2.17:

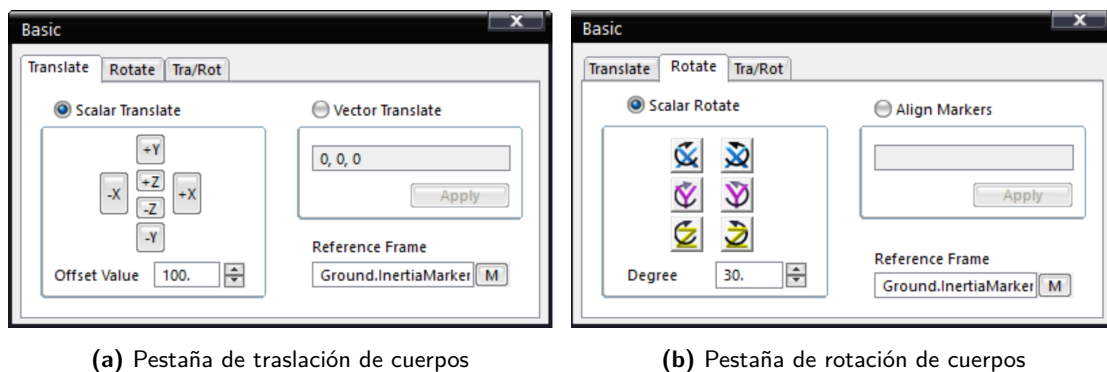


Figura 2.17: Herramienta de control básico

Para trasladar un cuerpo se deberá seleccionar las unidades que se deseen trasladar (indicando el número de unidades en *Offset value*), el sistema de referencia respecto al cual se van a trasladar (seleccionando el botón **M** en el apartado de *Reference Frame* y arrastrando un eje de referencia) y, por último, la dirección del eje en la cual se desea que se traslade el cuerpo (clicando en alguna de las direcciones de los ejes que se muestran en los seis botones que aparecen). Para rotar el procedimiento es homólogo, teniendo que seleccionar de nuevo un valor en grados, un eje de referencia y una dirección de giro respecto a ese eje de referencia.

2.5 Low-Mobility Tracked Toolkit

RecurDyn posee múltiples herramientas que han sido específicamente diseñadas para desarrollar funciones concretas, y están todas agrupadas en la pestaña llamada **Toolkit**.

En esta pestaña se pueden encontrar herramientas para la resolución de problemas relacionados con:

- Modelos flexibles de geometría compleja.
- Modelos traccionados por cadenas como vehículos industriales y agrarios, tanques, etc.
- Motores de combustión interna alternativos.
- Elementos flexibles como muelles, neumáticos, etc.

Sin embargo, cada una de estas herramientas excepto la **herramienta para vehículos de baja movilidad traccionados por cadena** (Low-Mobility Tracked Toolkit, LMTT, en inglés) suponen un coste extra al no estar incluidas en la licencia estándar y por ello en este Manual de Usuario únicamente se mostrarán los principios básicos de funcionamiento de la única herramienta específica que se incluye con la licencia estándar.

2.5.1 Utilidad del LMTT

Para comprender realmente la importancia de esta herramienta primero se ha de pensar cómo se procedería si no fuese posible acceder a ella. Es decir se ha de modelar y simular un vehículo traccionado por cadenas sin usar la herramienta específica para ello. El procedimiento estándar sería el siguiente:

1. Montar el chasis del vehículo.
2. Montar las partes móviles del vehículo (incluyendo las cadenas y los elementos que permiten su movimiento como ruedas dentadas, guidores, etc.).
3. Añadir la carrocería.
4. Añadir todos los pares cinemáticos necesarios para que el modelo posea los grados de libertad que debe y no quede sobrerrestringido.
5. Añadir los contactos que sean necesarios, incluyendo todos los contactos entre cada uno de los eslabones y las ruedas y guidores, así como los contactos entre cada uno de los eslabones y el suelo.
6. Dotar de movimiento al conjunto conduciendo los grados de libertad necesarios y comprobar los resultados.

El penúltimo paso hace que la simulación de este tipo de modelos sea inviable por la cantidad de contactos que se han de incluir. La mejor forma de entender esto es mediante un ejemplo:

Imaginemos un vehículo industrial, cuyo movimiento sea traccionado por cadenas, tal y como muestra la Figura 2.18.

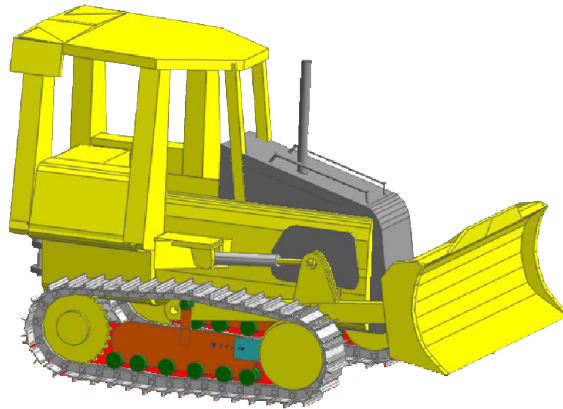


Figura 2.18: Vehículo industrial traccionado por cadenas

Este vehículo posee una única funcionalidad y es el movimiento de la pala delantera, por tanto no será muy costoso definir los pares cinemáticos para que dicha pala se mueva como debe. Sin embargo, posee 40 eslabones en cada lado que forman cada una de las dos cadenas. Además, esos eslabones al moverse hacen contacto con cada uno de los elementos móviles que se han creado para que la cadena se mueva correctamente, como son las dos ruedas motrices (coloreadas en amarillo) y siete los guidores (coloreados en verde). Por tanto, no solo es necesario colocar pares cinemáticos en cada una de las uniones entre eslabones, sino que además hay que añadir contactos entre cada uno de los eslabones y cada una de las partes móviles. Por si no fuera poco, si se desea analizar el movimiento del vehículo sobre una base plana o con obstáculos, es necesario definir además contactos entre cada uno de los eslabones y el suelo. Si sumamos todos los contactos que hay que incluir tenemos que:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{contactos}} &= 2 \text{ Cadenas} \times [\text{Contactos}_{\text{eslabon-ruedas}} + \text{Contactos}_{\text{eslabon-guiadores}} + \text{Contactos}_{\text{eslabon,suelo}}] = \\
 &= 2 \times [40 \cdot 2 + 40 \cdot 7 + 40 \cdot 1] = 800
 \end{aligned}$$

Si la inclusión de un contacto ya ralentiza el proceso de simulación varios minutos puesto que el software tiene que reconocer la geometría y realizar múltiples cálculos relacionados con la dinámica y la cinemática del modelo, añadir 800 contactos hace que la simulación resulte completamente inviable.

El LMTT es una herramienta específicamente diseñada para este tipo de problemas que no solo permite crear ruedas motrices, guidores y demás elementos de forma sencilla sino que crea de forma automática la cadena de eslabones con solo definir un perfil de diente y clicar de forma ordenada los elementos móviles en los que se apoyará la misma.

2.5.2 Creación de los elementos de una cadena

Una cadena está formada por varios elementos, desde los propios eslabones hasta las ruedas que mueven ese conjunto de eslabones, pasando por todos los elementos estructurales que mantienen cada cosa en su sitio. En la Figura 2.19 se muestran los componentes básicos de un ensamblaje tipo cadena.

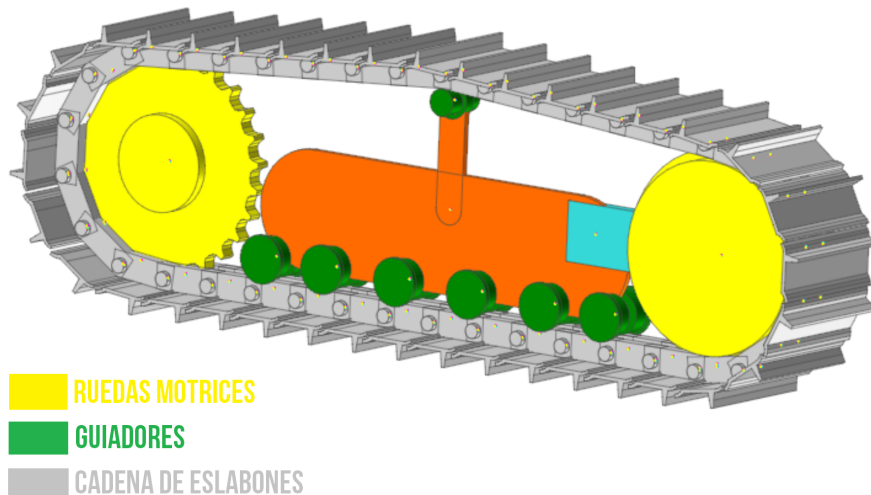


Figura 2.19: Componentes básicos de una cadena

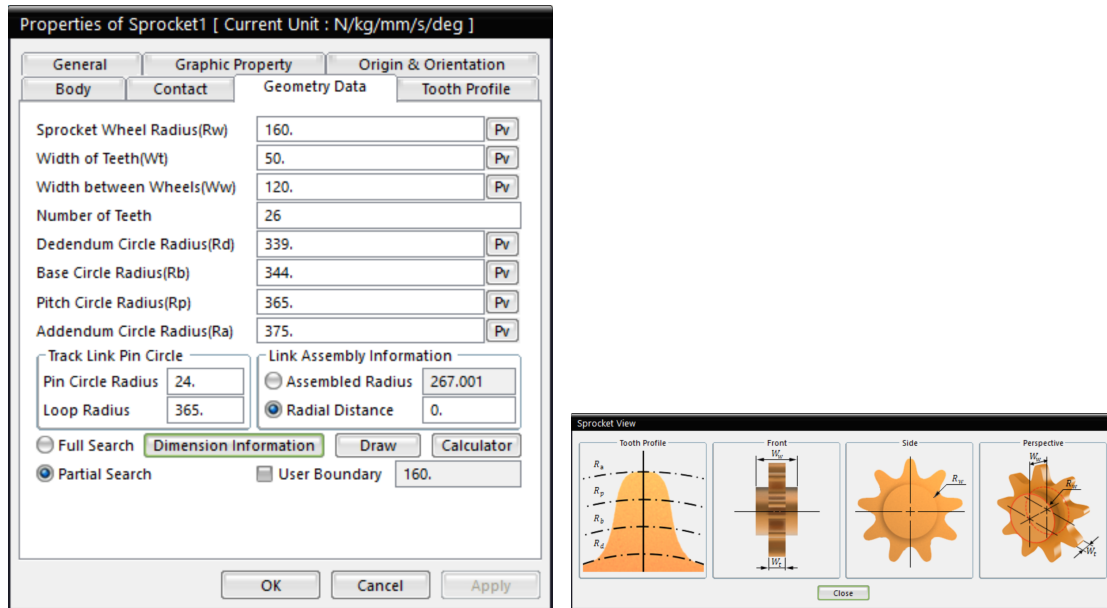
RecurDyn posee varias subherramientas dentro del toolkit para crear todos los componentes necesarios para formar un ensamblaje tipo cadena. A continuación se explica el método de creación de cada uno de ellos.

Creación de una rueda motriz

Las ruedas motrices son las encargadas de transmitir el movimiento hasta los eslabones de la propia cadena. Para definir una rueda motriz se deberá clicar en la opción *Sprocket* y seleccionar un punto del espacio que se corresponderá con el centro de la rueda motriz. A continuación se abrirá una ventana donde se podrá definir la geometría de la rueda, tal y como muestra la subfigura a de la Figura 2.20.

RecurDyn permite definir la geometría en base a muchos parámetros como el radio primitivo, el número de dientes, la anchura de la rueda, etc. Para conocer de forma visual a qué se refieren estos parámetros se ha de clicar en el botón llamado *Dimension Information*, en la pestaña *Geometry Data*. Al hacerlo aparecerá una imagen con la rueda motriz acotada en varias vistas para conocer a qué hacen referencia exactamente todos esos parámetros, tal y como muestra la subfigura b de la Figura 2.20.

Además, la pestaña *Tooth Profile* permite definir un perfil de diente apropiado para la rueda motriz definiendo una serie de puntos o bien importando un perfil que se tuviese guardado.



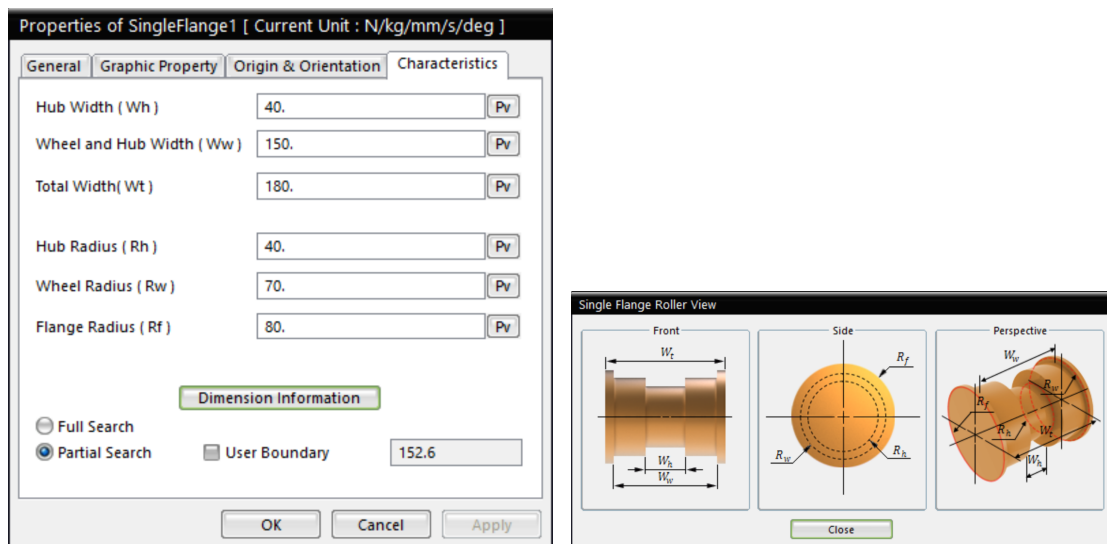
(a) Geometría de una rueda motriz

(b) Información visual de la geometría de la rueda

Figura 2.20: Definición de una rueda motriz en RecurDyn

Creación de los seguidores

Los seguidores son elementos rodantes que permiten el movimiento de los eslabones y dan forma a la cadena. Para definir un guiador se deberá clicar en la opción *Single* del subconjunto llamado *Flange* y seleccionar el origen y el radio. El resto de propiedades geométricas se pueden modificar a través de las propiedades del guiador, accesibles a través del árbol de trabajo. De nuevo se mostrarán una serie de propiedades geométricas cuya información visual se mostrará clicando en *Dimension Information*, como ilustra la Figura 2.21



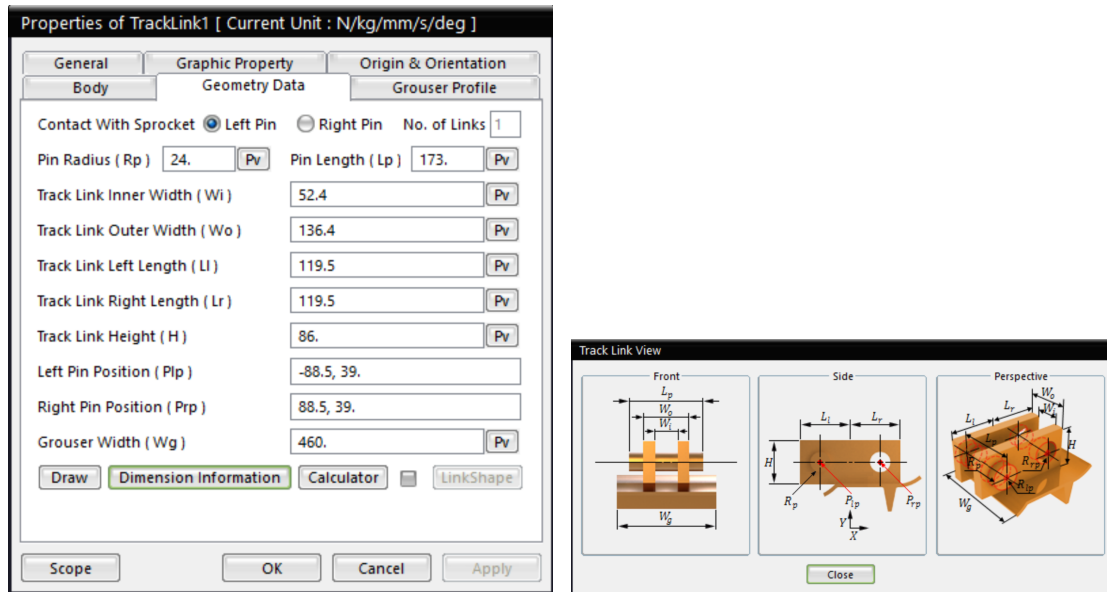
(a) Geometría de un guiador

(b) Información visual de la geometría del guiador

Figura 2.21: Definición de un guiador en RecurDyn

Creación de la cadena

La cadena es el conjunto de eslabones responsable del movimiento del vehículo al hacer contacto con el suelo. Para definir la cadena es necesario primero definir la geometría de sus eslabones. Para ello es necesario clicar en la opción *Link*. Tras definir un origen para el eslabón se abrirá una ventana que mostrará las propiedades geométricas, de nuevo pudiendo acceder a una ventana que muestra esas propiedades gráficamente, como se muestra en la Figura 2.22. De igual forma que en la rueda dentada, es posible definir o importar un perfil de diente que establezca la geometría de la parte exterior del eslabón, la parte que estará en contacto con el terreno.



(a) Geometría de un eslabón

(b) Información visual de la geometría del eslabón

Figura 2.22: Definición de un eslabón en RecurDyn

Ahora que ya se ha definido la geometría del eslabón solo queda montar los eslabones necesarios para completar la cadena. Para ello se deberá clicar en la opción *Assembly* y seleccionar, en sentido anti-horario y empezando por la rueda motriz, todos los elementos móviles de la cadena. Al hacerlo quedará algo parecido a lo que muestra la Figura 2.23.

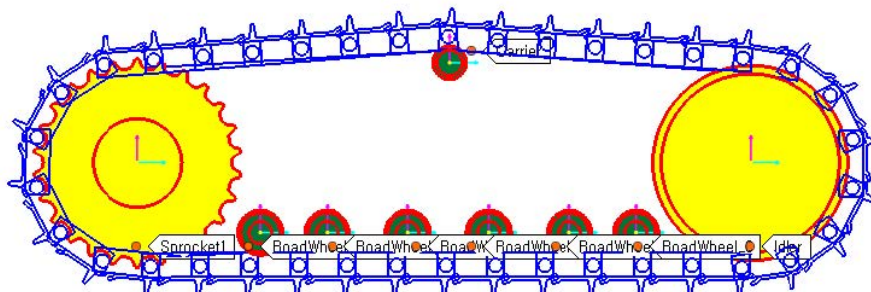


Figura 2.23: Resultado del ensamblaje cadena

Para completar el ensamblaje es necesario definir los pares cinemáticos adecuados para que el conjunto se mueva correctamente. Lo más normal es definir pares de tipo revolución entre los elementos móviles y el chasis, no siendo necesario definir ningún tipo de par entre los eslabones de la cadena. Además, es muy conveniente comprobar que la posición de los dientes de las ruedas motrices no interfiere con los eslabones en la posición inicial. De lo contrario habrá que rotar la/s rueda/s motrices con las herramientas explicadas en apartados anteriores para evitar esa interferencia.

También es necesario comentar que todo el conjunto cadena-ruedas-seguidores forma una entidad que se puede copiar y pegar, para duplicarla y colocar la copia en otra posición simétrica pero desplazada en caso de ser necesario.

La herramienta de vehículos de baja movilidad traccionados por cadenas permite crear un subensamblaje tipo cadena de forma rápida y, sobre todo, muy eficiente en términos computacionales al no tener que incluir ningún contacto.

Propiedades del terreno

Una vez definido por completo el subsistema tipo cadena y comprobada su funcionalidad se pueden modificar las propiedades del terreno sobre el que apoyará dicho subsistema. Curiosamente, la forma de acceder a este menú de propiedades no es a través de las características de la entidad *Ground* (Terreno, en inglés) sino a través de las propiedades del subsistema tipo cadena.

La forma de acceder a las propiedades es a través del árbol de trabajo, pero son las propiedades a nivel de componente las que se han de modificar, por tanto y, como ya se explicó en la sección anterior, habrá que entrar primero en el subsistema cadena clicando dos veces sobre el en la ventana gráfica o mediante la opción *Edit* del árbol de trabajo y una vez dentro del subsistema, de nuevo en el árbol de trabajo, clicando con el botón derecho sobre *Assembly* y seleccionando *Property*. Al hacerlo aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 2.24.

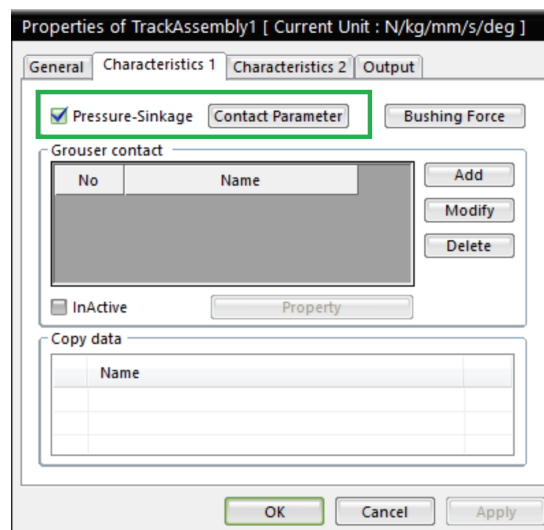


Figura 2.24: Propiedades del ensamblaje tipo cadena

Para poder cargar unas características del terreno diferentes a las preestablecidas se deberá comprobar que el tick en la casilla llamada *Pressure-Sinkage* está habilitado para posteriormente clicar en la opción *Contact Parameter*. Tras hacerlo aparecerá una ventana como la que ilustra la Figura 2.25.

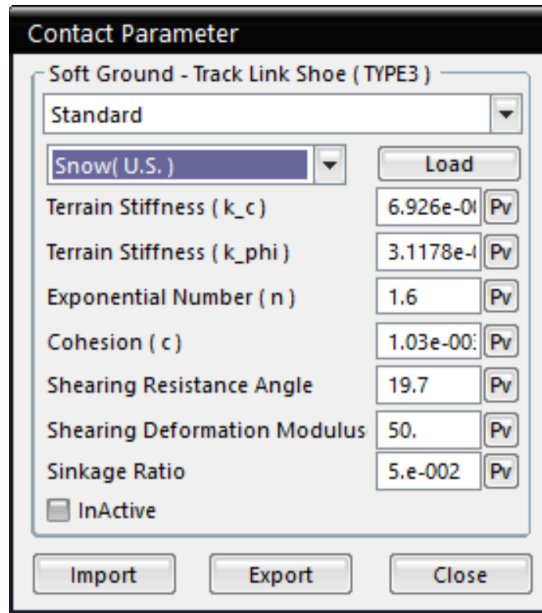


Figura 2.25: Características del terreno

El submenú que aparece en la imagen muestra las propiedades con las que RecurDyn caracteriza el terreno (dureza, módulo de deformación, etc.). Aunque es posible crear un terreno personalizado modificando cada una de las propiedades como se desee, dado que se trata de parámetros poco intuitivos, RecurDyn ofrece una biblioteca en forma de desplegable donde se pueden seleccionar terrenos como arena seca, arena húmeda, barro seco, barro mojado, nieve, etc. Para hacerlo solo habrá que seleccionar el tipo de terreno que se desee cargar y clicar en la opción *Load*. Se puede comprobar que al cargar un terreno las propiedades que caracterizan el terreno cambian.

Es muy importante saber que las propiedades que se han modificado son las que relacionan el terreno directamente con el subsistema tipo cadena. Si se tiene un modelo con dos subsistemas tipo cadena, como es lo normal en los vehículos industriales y agrícolas impulsados por cadenas, se deberá modificar las propiedades que relacionan el otro subsistema cadena con el terreno, de lo contrario al realizar la simulación los dos subsistemas tendrán comportamientos diferentes con respecto al suelo que pisan.

2.6 Entorno: Análisis

La pestaña análisis permite realizar múltiples funciones relacionadas con el cálculo de la movilidad y las restricciones en exceso, la simulación cinemática y dinámica de los modelos o incluso el graficado de resultados relacionados con la posición, velocidad y aceleración de cuerpos durante la simulación.

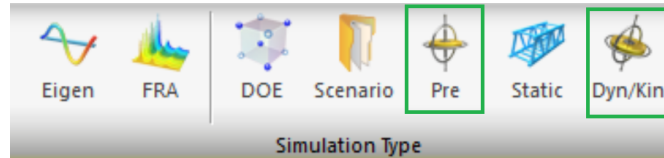


Figura 2.26: Subentorno *Simulation type* en RecurDyn

La Figura 2.26 muestra los dos tipos principales tipos de simulación que son usualmente usados. A continuación se explican las herramientas más utilizadas de esta pestaña:

2.6.1 Pre-Análisis

La herramienta pre-análisis (llamada *Pre* en el RecurDyn) permite realizar el cálculo de la **movilidad** del conjunto, indicando los grados de libertad del mismo y la existencia de restricciones en exceso. Para llevar a cabo este tipo de análisis se ha de seleccionar la herramienta **Pre**, en el subentorno llamado *Simulation Type*. Tras pulsar en *Simulate* aparecerá una ventana como esta, en el cuadro de mensajes:

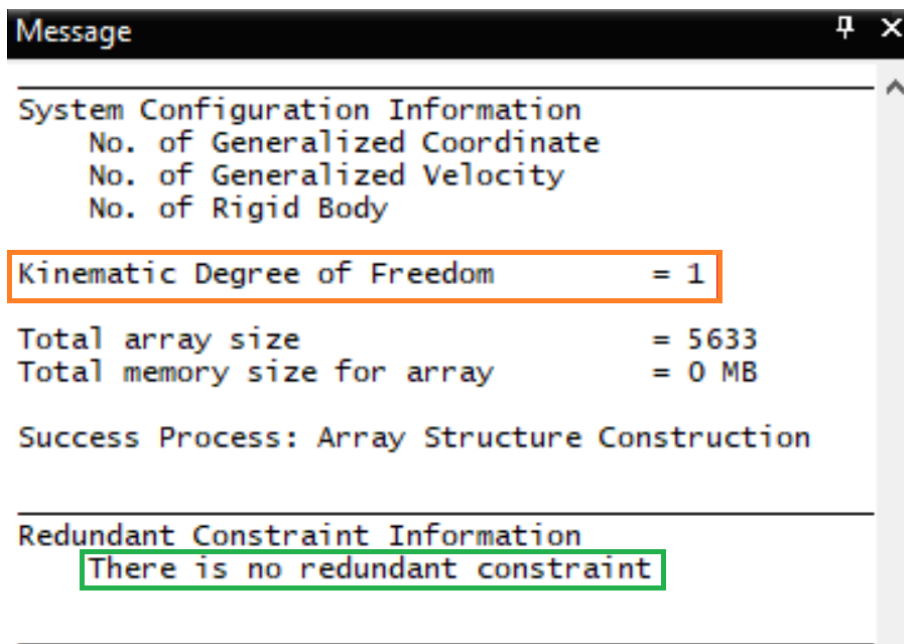


Figura 2.27: Resultado de un pre-análisis

La Figura 2.27 muestra información sobre el cálculo de la **movilidad** del conjunto así como de las restricciones en exceso y, por tanto, con estos dos parámetros se puede conocer si el mecanismo se encuentra **cinemáticamente autoalineado**.

2.6.2 Análisis dinámico/cinemático

La herramienta de análisis dinámico/cinemático (identificada como *Dyn/Kyn* en RecurDyn) permite llevar a cabo una simulación visual del movimiento del mecanismo o la máquina mecánica en su conjunto. Para realizar una simulación correctamente, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- El mecanismo debe estar cinemáticamente autoalineado, de lo contrario aparecerán restricciones en exceso que estropearán los resultados de la simulación.
- Para evitar restricciones en exceso habrá que "jugar" con los pares cinemáticos hasta encontrar una combinación que, teniendo los grados de libertad del modelo original, no sobre-restrinja el sistema.
- Para que la simulación sea interactiva, se debe dotar de movimiento a los pares o aplicar fuerzas externas a la máquina, de lo contrario la simulación se calculará teniendo en cuenta únicamente la acción de la gravedad.
- A la hora de conducir (dotar de movimiento) los pares, se debe hacer solo con los pares que correspondan con los grados de libertad que posee el mecanismo o máquina. Por ejemplo, si se trata de una excavadora cuya pala posee dos grados de libertad (la inclinación del brazo y el movimiento de la pala) se deberán conducir únicamente dos pares cinemáticos, y es recomendable que sean aquellos que inicien el lazo cinemático.

Tras pulsar en el icono *Dyn/Kyn* aparecerá la ventana que muestra la Figura 2.28:

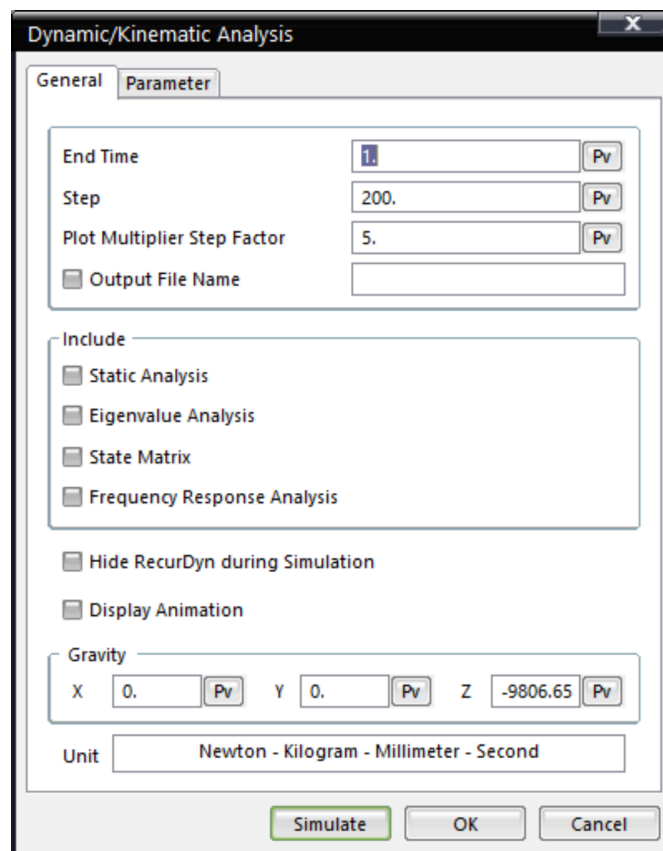


Figura 2.28: Ventana previa al análisis dinámico/cinemático

En la pestaña General se ofrecen distintos parámetros modificables, de las que se destacan:

- **End Time:** Permite definir el tiempo (en segundos) que durará la simulación.
- **Step:** Permite establecer el número de fotogramas que se calcularán durante toda la simulación. Cuanto más fotogramas, más fiel a la realidad será la simulación y, lógicamente, más requerimientos de tiempo y computacionales empleará.
- **Plot Multiplier Step Factor:** Define el número de puntos que serán guardados para graficar los resultados. El número de puntos que se almacenan viene determinado por la expresión $Puntos = Step \times Plot Multiplier Step Factor$.

Además, RecurDyn ofrece la posibilidad de mostrar los resultados de la simulación (gráficamente) a medida que se van calculando. Para ello se deberá de seleccionar la opción *Display animation*. Si, por el contrario, la simulación es complicada y requiere un mucho tiempo para llevarse a cabo, se puede seleccionar la opción *Hide RecurDyn during Simulation*, que esconde el programa mientras este calcula, volviendo a aparecer cuando la simulación haya terminado.

Panel de animación

Una vez calculada la simulación es posible animarla. Para ello, se hará uso del panel de control de la animación que muestra la Figura 2.29:

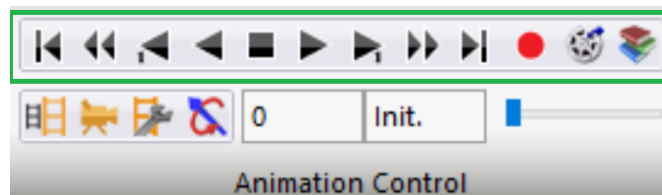


Figura 2.29: Panel de control de la animación

El panel de control de la animación permite:

- Reproducir/parar la animación completa (*Play/Pause*).
- Parar la animación y volver al estado inicial (*Stop*).
- Avanzar/Retroceder fotograma a fotograma.
- Avanzar/Retroceder de forma rápida la animación completa.
- Avanzar/Retroceder hasta el fotograma final/inicial.
- Guardar el resultado de la animación en un formato de video³ (*Rec*).

³Para ello se deberá seleccionar la resolución con la que se desee que se guarde, así como el códec que se usará para la compresión.

2.6.3 Seguimiento de trayectorias de los cuerpos

Existe una herramienta que permite trazar las trayectorias de puntos pertenecientes a cuerpos, para así comprender mejor el movimiento de los mismos, saber si la animación se está realizando correctamente o comprobar si los cuerpos poseen los grados de libertad que deberían.

Esta herramienta se encuentra en el subentorno *Post Tool* y se deberá seleccionar la opción *Marker Trace*, dentro del desplegable llamado *Trace*. A continuación aparecerá una ventana como la de la Figura 2.30:

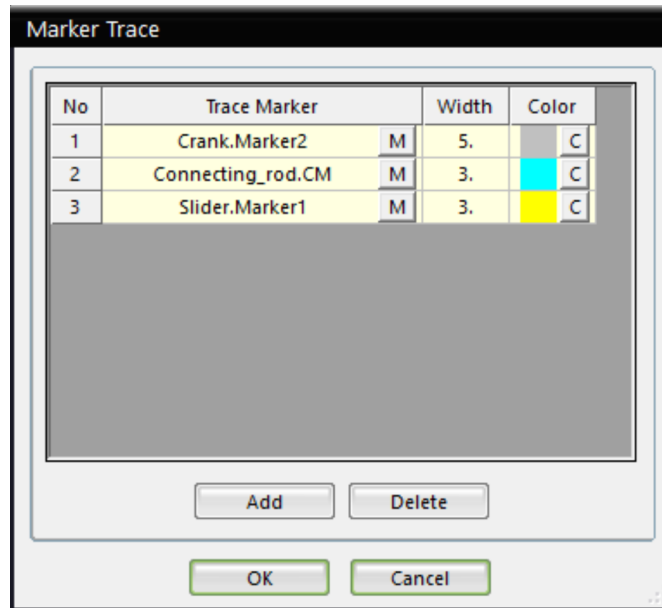


Figura 2.30: Establecimiento de marcadores para el seguimiento de trayectorias

En esta ventana se deberá seleccionar lo siguiente:

- El **eje de referencia** de cuya trayectoria se desea realizar el seguimiento. Si el eje de referencia no se encuentra en un punto concreto que se desee, el usuario siempre puede crear uno nuevo haciendo uso del entorno *Body* y seleccionando *Marker*, en la pestaña Profesional, como ya se vio en anteriores apartados. Para seleccionar el eje de referencia se deberá clicar en el botón **M** y arrastrar el eje de coordenadas al cuadro que aparece.
- El **tamaño** con el que se mostrarán las curvas de trayectoria. Para cambiar el tamaño se deberá introducir un número en la casilla *width*. Cuanto más grande sea el número, mayor será el grosor de la trazada de la trayectoria.
- El **color** de la trayectoria. Es conveniente usar colores que destaquen las trayectorias de los cuerpos. Para seleccionar el color de la trayectoria se clicará en el botón **C** y se escogerá un color de la paleta.

El resultado de aplicar el seguimiento de trayectorias se puede apreciar en la Figura 2.31:

En la imagen se describen las trayectorias de los cuerpos del sistema biela-manivela-deslizadera que se ha puesto como ejemplo en apartados anteriores. Como se puede apreciar, la biela posee un grado de libertad rotacional en las dos direcciones, mientras que la manivela posee dos grados de libertad,

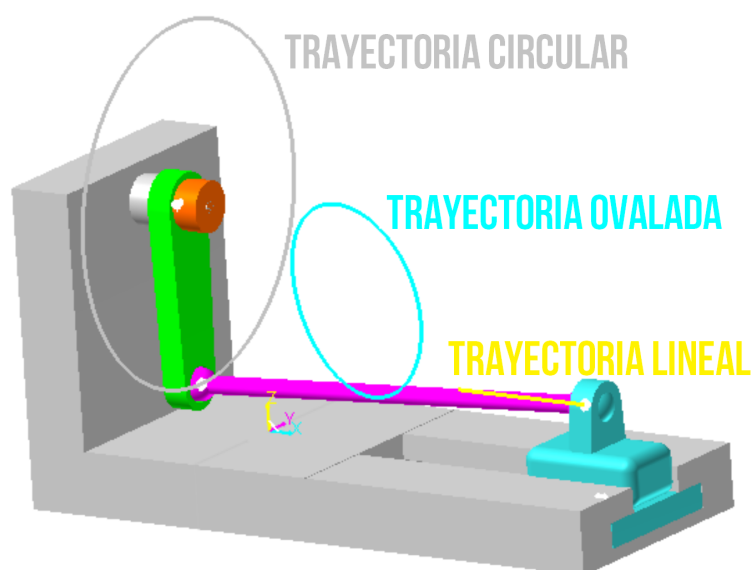


Figura 2.31: Trayectorias de los cuerpos

como describe la forma ovalada de su trayectoria. La deslizadera, sin embargo, solo posee un grado de libertad asociado al movimiento lineal sobre la guía en las dos direcciones.

2.6.4 Graficado de resultados

Analizar los resultados gráficamente siempre es importante ya que permite visualizar variaciones en la posición, velocidad y aceleración de cuerpos de manera muy rápida. Para acceder a esta opción, se deberá pulsar en la opción *Plot* del submenú llamado de igual manera, tal y como muestra la Figura 2.32.

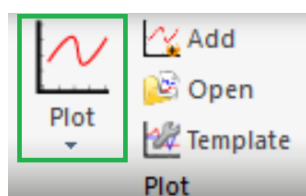


Figura 2.32: Submenú Plot en RecurDyn

Una vez dentro, se abrirá una ventana en blanco. En este momento es necesario acceder al árbol de datos (situado a la derecha), desplegar la entidad que se desee graficar y seleccionar una de las variables disponibles haciendo doble clic (posición, velocidad o aceleración en los distintos planos).

Graficado múltiple

En ocasiones, resulta muy útil graficar varios resultados en la misma hoja, para poder compararlos sobre los mismos ejes, con la misma escala, apreciando así el orden de magnitud de la variación.

Para ello, únicamente se habrá de seleccionar otra magnitud diferente haciendo doble clic en el árbol como se ha explicado anteriormente. La nueva variable se añadirá al gráfico, con su correspondiente leyenda, como se muestra en la Figura 2.33.

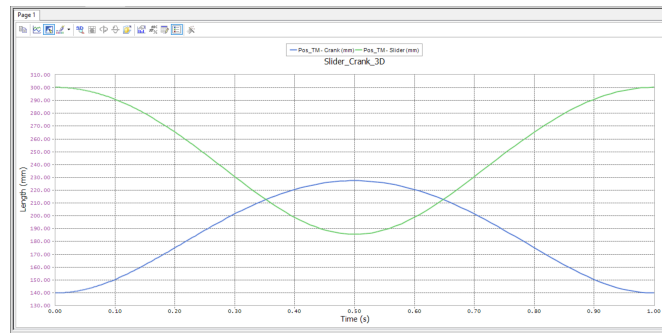


Figura 2.33: Graficado múltiple

Graficado multiventana

El graficado multiventana resulta interesante cuando se quieren mostrar simultáneamente varios gráficos, en distintas ventanas, de tal forma que no compartan ejes ni escala. RecurDyn permite dividir la ventana de graficado hasta en cuatro ventanas. Para ello se deberá seleccionar, dentro del entorno de Plot, la opción *Window*, en la pestaña *Home*, y seleccionar del desplegable la opción *Show All Windows*. En ese momento la ventana se dividirá en cuatro, y el procedimiento a seguir para incluir gráficos en cada una de ellas será homólogo al descrito con anterioridad, debiéndose seleccionar primero la ventana en la que se desean graficar los resultados haciendo un clic sobre ella y posteriormente seleccionando la/s variable/s a graficar del árbol.

Además, RecurDyn permite mostrar en uno de los subespacios ventana, la simulación del modelo. Para ello se deberá seleccionar la ventana en la cual se desea visualizar el modelo, y clicar en la opción *Load Animation*, de la pestaña *Tool*. El resultado es el que se muestra en la Figura 2.34.

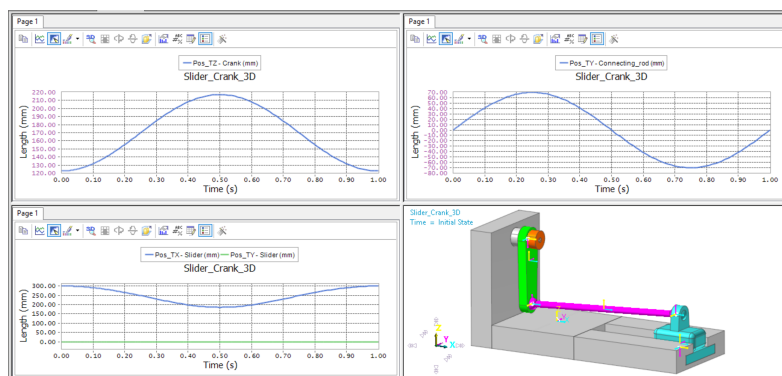


Figura 2.34: Graficado multiventana

