



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO
**Ingeniería en Diseño Industrial y
Desarrollo de Productos**

**Modelado Virtual en un programa de CAD y
Simulación Cinemática en un programa de CAE
de los modelos Lego© Technic: vLTm 42043-1,
vLTm 42028-1, LTm 42056-1 y LTm 42069-1.**

Autor: Fernando Domínguez Navarro

Tutor: Jose Luís Oliver Herrero

Curso: 2017-2018

CONTENIDO

Memoria pág. 3

Presupuesto pág. 101

MEMORIA

1. RESUMEN Y OBJETIVO DEL PROYECTO.....	pág. 6
2. INTRODUCCIÓN.....	pág. 8
2.1. ¿Qué es un Modelo Lego Technic?.....	pág. 8
2.2. Modelo Lego Technic virtual.....	pág. 8
2.3. Utilidad de los modelos Lego Technic virtuales.....	pág. 9
2.4. Los componentes Lego Technic.....	pág. 9
2.5. Máquinas reales y modelos Lego Technic equiparables.....	pág. 10
3. METODOLOGÍA.....	pág. 12
4. ENSAMBLADO.....	pág. 14
4.1. Presentación y objetivos.....	pág. 14
4.2. Conceptos básicos.....	pág. 15
4.3. Procedimiento de ensamblado.....	pág. 16
4.3.1. Asignación del modelo.....	pág. 17
4.3.2. Selección de componentes.....	pág. 17
4.3.3. Ensamblado.....	pág. 17
4.3.3.1. Relaciones de posición estándar.....	pág. 18
4.3.3.1.1. Coincidente.....	pág. 19
4.3.3.1.2. Paralelo.....	pág. 19
4.3.3.1.3. Perpendicular.....	pág. 20
4.3.3.1.4. Tangente.....	pág. 20
4.3.3.1.5. Concéntrica.....	pág. 20
4.3.3.2. Relaciones de posición avanzadas.....	pág. 21
4.3.3.2.1. Engranaje.....	pág. 21
4.3.3.2.2. Piñón cremallera.....	pág. 22
4.3.4. Geometrías auxiliares.....	pág. 22
5. COMPACTACIÓN.....	pág. 24
6. CREACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO AUTO-ALINEADOR.....	pág. 25
6.1. Presentación y objetivos.....	pág. 25
6.2. Importancia de las máquinas auto-alineadoras.....	pág. 25
6.2.1. Conceptos básicos.....	pág. 25
6.2.1.1. Par cinemático.....	pág. 25

6.2.1.2. Restricciones de un par cinemático.....	pág. 25
6.2.1.3. Grados de libertad.....	pág. 27
6.2.1.4. Cálculo de la movilidad de un mecanismo.....	pág. 27
6.2.2. Mecanismos auto-alineados.....	pág. 28
6.3. Proceso de auto-alineación.....	pág. 28
6.3.1. Pares cinemáticos.....	pág. 29
6.3.1.1. Revolvente.....	pág. 29
6.3.1.2. Traslacional.....	pág. 30
6.3.1.3. Cylindrical.....	pág. 31
6.3.1.4. Spherical.....	pág. 31
6.3.1.5. Universal.....	pág. 32
6.3.1.6. Fixed.....	pág. 33
6.3.1.7. Inline.....	pág. 33
6.3.1.8. InPlane.....	pág. 34
6.3.2. Acoplamientos.....	pág. 35
6.3.3. Muelles y amortiguadores.....	pág. 36
6.3.4. Definición del proceso.....	pág. 36
7. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL.....	pág. 41
7.1. Introducción.....	pág. 41
7.2. Simulación de movimiento en CosmosMotion.....	pág. 41
7.2.1. Definición del movimiento.....	pág. 41
7.2.1.1. Constant.....	pág. 41
7.2.1.2. Harmonic.....	pág. 42
7.2.1.3. Spline.....	pág. 42
7.2.1.4. Step.....	pág. 43
7.3. Proceso de simulación.....	pág. 43
8. MODELOS VIRTUALIZADOS Y SIMULADOS.....	pág. 47
8.1. Modelos Isogawa Yoshihito.....	pág. 47
8.1.1. Tora 002.....	pág. 48
8.1.2. Tora 008.....	pág. 49
8.1.3. Tora 009.....	pág. 50
8.1.4. Tora 013.....	pág. 51
8.1.5. Tora 026.....	pág. 52
8.1.6. Tora 037.....	pág. 53
8.1.7. Tora 040.....	pág. 54
8.1.8. Tora 051.....	pág. 55
8.1.9. Tora 059.....	pág. 56

8.1.10. Tora 062.....	pág. 57
8.1.11. Tora 075.....	pág. 58
8.1.12. Tora 079.....	pág. 59
8.1.13. Tora 093.....	pág. 60
8.1.14. Tora 098.....	pág. 61
8.1.15. Tora 102.....	pág. 62
8.1.16. Tora 107.....	pág. 63
8.1.17. Ev3-0024.....	pág. 64
8.1.18. Ev3-0050.....	pág. 65
8.1.19. Ev3-0053.....	pág. 66
8.1.20. Ev3-0069.....	pág. 67
8.1.21. Ev3-0134.....	pág. 68
8.1.22. Ev3-0108.....	pág. 69
8.1.23. pw-085.....	pág. 72
8.2. vLTm_8047-1.....	pág. 73
8.3. vLTm_8459-2.....	pág. 76
8.4. vLTm_8862-1.....	pág. 79
8.5. vLTm_jkbw-flying.....	pág. 82
8.6. vLTm_nico-quad.....	pág. 85
8.7. vLTm_42056.....	pág. 89
8.8. vLTm_42069-1.....	pág. 94
9. CONCLUSIONES.....	pág. 98
10. BIBLIOGRAFIA.....	pág. 99

1. RESUMEN Y OBJETO DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo principal la asimilación de conocimientos mediante el uso de programas o herramientas de diseño en ingeniería; conocimientos que deberían facilitarse en cualquier escuela enfocada a estudios ingenieriles.

A tal fin se sustituirá la maquinaria real por un sistema de construcción modular como material base. Este sistema tiene un alto nivel de sofisticación fruto del papel que los ingenieros cumplen en su desarrollo, además cuenta con una gran popularidad en personas de todas las edades. Estamos hablando de los “Modelos Lego® Technic”. Estos modelos se pueden encontrar en casi cualquier juguetería, existiendo una gran variedad de modelos comercializados, tanto en tamaño como en precios.

Para alcanzar este objetivo se ha seguido un proceso que consta de dos partes. La primera es una fase de aprendizaje en la que se han seguido una serie de videos grabados por el profesor a cargo de este proyecto, para realizar alguno de los modelos que componen este trabajo. La segunda fase parte de los conocimientos adquiridos en la primera, siendo el alumno el que realiza la definición de los modelos en cuestión de forma independiente.

Durante la fase de aprendizaje, se adquiere, no solo los conocimientos necesarios para realizar el proyecto, sino también una metodología de trabajo que sirve para realizar cualquiera de los modelos de este proyecto.

Dicha metodología consta de cuatro pasos:

- 1) El primer paso consiste en la obtención de los componentes virtuales de los modelos reales, los cuales han sido diseñados mediante un programa de CAD, “Solid Works” y facilitados por el profesor a cargo del trabajo. A continuación se debe hacer una selección de los componentes necesarios para realizar el montaje en el programa de CAD, “Solid Works 2007” (programa que se utilizará para la elaboración de todo el trabajo) de cada uno de los modelos que se van a virtualizar. Seguidamente se procede al montaje del modelo siguiendo un sistema en el cual cada una de las piezas del modelo tendrá un máximo de diez componentes.
- 2) Con el modelo debidamente ensamblado, se procede a la compactación de las piezas que lo forman, de manera que cada una de esas piezas que antes contenían un máximo de diez componentes pasan a convertirse en una única entidad virtual, esto es, que a efectos prácticos se convierte en un componente y no en un ensamblaje de varios. Con ello se consigue facilitar y aligerar los cálculos que el programa de CAE debe realizar para la simulación del modelo.
- 3) La tercera fase consiste en la elaboración de modelos cinemáticos auto-alineados mediante el uso de programas de CAE. Para la realización de este trabajo se ha optado por la utilización del complemento “CosmosMotion” del programa “Solid Works 2007”.
- 4) Por último, se procede a la simulación del movimiento del modelo definido en la fase anterior mediante el proceso de auto-alineación, para mostrar el funcionamiento del modelo en cuestión.

Desde un punto de vista profesional el proyecto se puede entender de la siguiente forma: Suponiendo que se trabaja en un despacho profesional, acude una persona con el prototipo de máquina que desea construir a escala real. Dicho prototipo puede estar fabricado con piezas Lego® Technic (fáciles de conseguir a través de

www.bricklink.com) o con un sistema similar. El cliente encarga averiguar dónde y cuáles son los cojinetes que se deberían colocar para conseguir una máquina auto-alineada.

Este tipo de máquinas tienen una vida útil mayor que las no auto-alineadas, evitando la aparición de la obsolescencia programada. Además, su coste de mantenimiento es mínimo.

Aceptar el encargo supone crear:

- 1) Un modelo virtual de la máquina a escala operativo en el entorno Solid Works.
- 2) Un modelo en CosmosMotion con la identificación del tipo de cojinete que se debería colocar en cada par cinemático.
- 3) Una simulación que permita visualizar el funcionamiento del prototipo, que puede servir, tanto para mejorar el prototipo desde un punto de vista funcional como para formar parte de la información comercial del producto final.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. ¿Qué es un Modelo Lego® Technic?

Antes de definir qué son los modelos Lego® Technic, deberíamos conocer a la empresa que hay detrás de los mismos.

El grupo Lego®, es una compañía de carácter privado con sede en Billund (Dinamarca) contando con importantes oficinas ubicadas en ciudades como Londres y Singapur entre otras. Fue creada en 1932 por Ole Kirk Kristiansen como un juego de construcción a base de ladrillos y que se ha ido expandiendo en tamaño y contenido hasta convertirse en una empresa líder internacionalmente en la fabricación de juguetes. Bajo valores como la imaginación, creatividad, diversión, aprendizaje, atención y calidad, ha ido desarrollando una serie de nuevos componentes que ofrecen unas posibilidades de construcción ilimitadas.

De entre las distintas series desarrolladas por Lego® (Creator, Architecture, Mindstorms...) este trabajo se centrará en la denominada Technic.

La serie Technic, es una línea de juguetes, de la compañía Lego®, orientada a un amplio público y que consiste en un gran número de componentes de plástico pensados para conectarse entre sí, e interactuar de forma sencilla, precisa y realista.

Esta serie, nació bajo el nombre de “Expert Builder” en Estados Unidos. Más tarde tras su expansión por Europa, se cambió el nombre por “Technical Lego®”, aunque finalmente pasó a denominarse “Technic” en 1984.

El objetivo de esta serie de Lego® es el de crear modelos más o menos avanzados que cuentan con partes móviles relativamente complejas, propias de esta serie, como son mecanismos de dirección, engranajes o cilindros neumáticos, en definitiva mecanismos que se pueden encontrar en máquinas reales, tanto a nivel industrial como doméstico.

El estilo de los “sets” o “cajas” de la serie Technic ha ido evolucionando con el tiempo. A partir del año 2000 se cambió la metodología de construcción, pasando a lo que se denomina “studless construction”, es decir, se sustituye el sistema de montaje tradicional a base de ladrillos por un método que utiliza vigas y pasadores.

2.2. Modelo Lego® Technic virtual

En la base, un modelo Lego® Technic virtual comparte el objetivo principal de los modelos Lego® Technic reales, a saber, desarrollar la inventiva, y las habilidades constructivas del usuario. No obstante, el modelo virtual aporta un objetivo adicional muy importante: desarrollar las posibilidades que un programa de CAD y posteriormente de CAE proporcionan en el diseño y simulación de todo tipo de sistemas mecánicos.

Análogamente al modelo real, para el montaje de la forma virtual es necesario disponer de los componentes Lego® Technic debidamente seleccionados y virtualizados. En un montaje real el “set” correspondiente consta de los componentes necesarios y suficientes para la realización del modelo siguiendo unas instrucciones debidamente elaboradas. En el modelo virtual, se dispone de las piezas virtualizadas con anterioridad y facilitadas por el profesor a cargo de este trabajo. Como en la versión física, también se deben seguir unas instrucciones para el montaje del modelo, éstas sin embargo no tienen por que ser únicamente en el formato papel (o su correspondien-

te virtual en pdf), en las que se detalla paso a paso las acciones a realizar; sino que también pueden venir dadas en un formato virtual viendo directamente el acabado del modelo y su correspondiente división en piezas. Si bien el proceso es similar, hay una característica fundamental que diferencia el montaje virtual del físico, y es que en el virtual se identifican como piezas virtuales aquellos conjuntos de componentes Lego® Technic que en una máquina real o en el propio modelo físico no tienen movimiento relativo entre ellas.

Es decir, no se trata de reproducir virtualmente en un programa de CAD el modelo en cuestión, sino que se va más allá, se trata de identificar, durante el proceso de montaje, las piezas que la máquina real posee y virtualizarlas de forma independiente para poder simular su movimiento posteriormente.

2.3. Utilidad de los modelos Lego® Technic virtuales

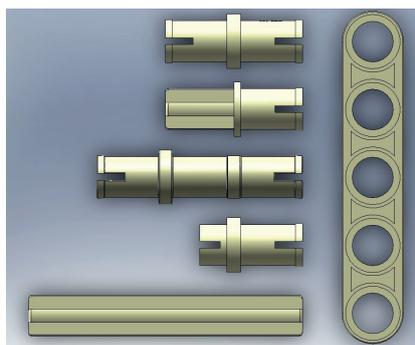
La manera más eficiente de aprender a realizar un trabajo, es haciéndolo. Con este fin los modelos Lego® Technic presentan una gran ventaja sobre máquinas reales. Estos modelos son mucho más asequibles y, pese a tratarse de lo que podríamos denominar modelos a escala, sus mecanismos han sido diseñados con un grado de exactitud con relación a las máquinas reales muy elevado, dando así una visión muy acertada del comportamiento de la máquina real.

La ventaja que aporta el modelo Lego® Technic virtual, es que nos permite tomar contacto con los mismos mecanismos que aparecen en máquinas reales pero sin su complejidad. Haciendo uso de herramientas como Solid Works y otros programas de CAD es fácil concebir una aproximación del funcionamiento de dichas máquinas que puede servir de ayuda tanto para la innovación como para la corrección de las mismas. Así mismo al entrar en contacto con gran variedad de mecanismos sencillos, se toma conciencia del funcionamiento de estos, pudiendo aplicar estos conocimientos a mecanismos más elaborados posteriormente.

Uno de los principales problemas que presenta la teoría sobre máquinas y mecanismos es que pese al gran volumen de textos, documentos, etc. existentes sobre el papel, estos no son suficientes a la hora de suponer la interacción de los mecanismos, ya que requeriría de un nivel de intuición que sólo podría conseguirse con el estudio previo. En este aspecto los modelos Lego® Technic facilitan el trabajo, ya que los mecanismos se pueden construir y es fácil apreciar su movimiento real.

Los programas que se utilizan durante la elaboración de este trabajo, como son Solid Works y su complemento CosmosMotion, son las herramientas que se utilizan en el ámbito profesional a la hora de desarrollar las piezas y los mecanismos, así como para determinar el movimiento de las mismas.

2.4. Los componentes Lego® Technic



(Fig.1. Componentes Lego® Technic)

La principal característica de los componentes Lego® Technic es su modularidad. Están cuidadosamente diseñados, con el objetivo de que el encaje entre ellos sea posible independientemente del sistema que se quiera realizar. Esto permite que con un número limitado de piezas, las posibilidades de construcción sean ilimitadas.

2.5. Máquinas reales y modelos Lego® Technic equiparables

A lo largo de este trabajo ya se ha comentado el nivel de sofisticación y fiabilidad respecto a modelos reales que han alcanzado los componentes Lego® Technic pese a ser un producto destinado al entretenimiento.

Ejemplo de ello son sistemas que permiten la creación de diferenciales operativos, mecanismos básicos como cuadriláteros articulados o, uno de los elementos más recurrentes en las máquinas de obras públicas como es el cilindro hidráulico.

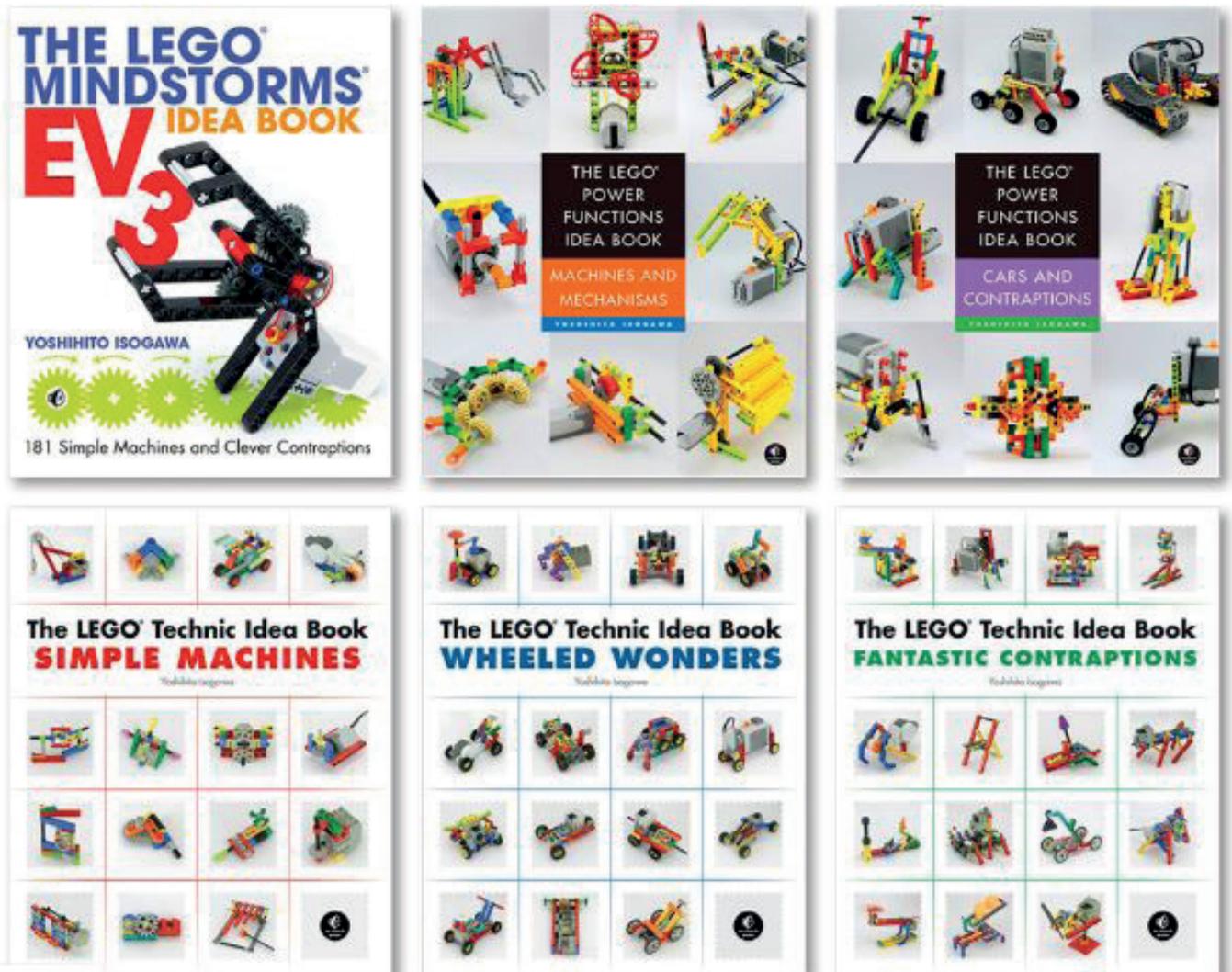


(Fig.2. Mecanismos reales y sus equivalentes virtuales)

2.6. Modelos Isogawa Yoshihito

Isogawa Yoshihito es el autor de varios libros en los que muestra diferentes mecanismos a partir de componentes Lego® Technic y su forma de crearlos. Estos libros, son de gran ayuda a la hora de realizar este proyecto ya que detalla las formas más usuales de conexión entre algunos de los componentes, como pueden ser los engranajes dentados, poleas, pares prismáticos, mecanismos andantes, etc.

Algunos de los mecanismos presentados en estos libros, como se verá más adelante, han sido objeto de estudio en este trabajo.



(Fig.3. Colección libros Isogawa Yoshihito, imagen obtenida de "Google images")

3. METODOLOGÍA

Con el objetivo de poder organizar el gran volumen de trabajo que conlleva este proyecto, es necesario definir una metodología marcada que seguir a lo largo de la elaboración del mismo. Las fases del desarrollo de un modelo se pueden dividir en cuatro: el ensamblado del modelo virtual, la compactación de las piezas, la realización del modelo cinemático auto-alineado y por último la simulación de movimiento. Es un proceso de trabajo lineal, durante el cual solo es posible pasar a una fase cuando la anterior está completamente definida.

Las cuatro fases se explicarán de forma detallada a lo largo de los siguientes puntos de esta memoria, sin embargo, a fin de dar una visión global se resumen a continuación:

Ensamblado: Fase durante la cual se da forma al modelo, definiendo las piezas que lo forman, en base, bien a las instrucciones de Lego®, bien a los documentos virtuales disponibles.

Compactación: Las piezas obtenidas en la fase anterior se aligeran de forma que en fases posteriores el ordenador pueda manejar la información.

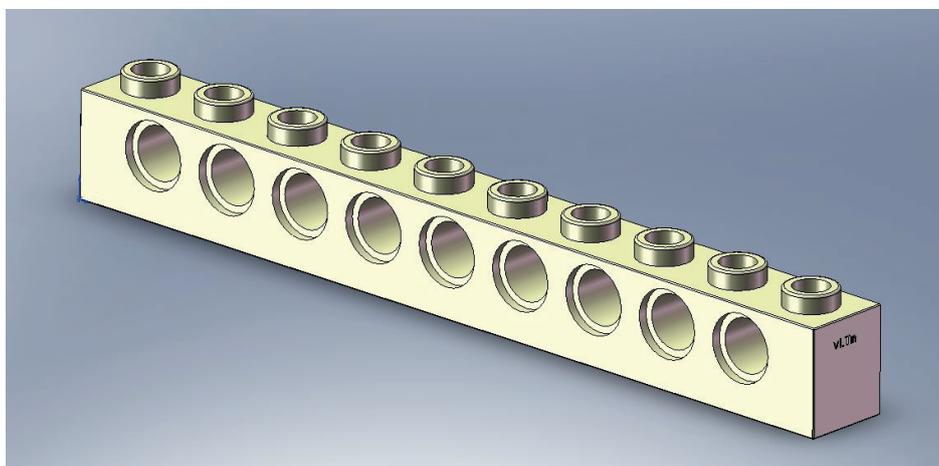
Modelo cinemático: Se definen los pares cinemáticos que actúan entre las distintas piezas del modelo, procurando que definan completamente el movimiento sin determinar restricciones en exceso.

Simulación: El movimiento determinado en la fase anterior se simula para que se pueda visualizar de forma fácil.

A fin de mantener un orden de los componentes y las piezas que se van a utilizar, es necesario definir una nomenclatura que permita localizar con facilidad los elementos en cuestión. Para ello se utilizará una nomenclatura para los componentes y otra para las piezas, y otra para el ensamblaje final. Así mismo, los archivos en los que se realizan el modelo cinemático y la simulación también tienen una denominación que permita diferenciarlos.

La nomenclatura para los componentes sigue el formato que se puede observar en el siguiente ejemplo:

vLTm_2730 Technic Brick 1 x 10 with Holes 2007s



(Fig.4. vLTm_2730 Technic Brick 1 x 10 with Holes 2007s)

vLTm responde a “virtual Lego© Technic model”, o en español, modelo Lego© Technic virtual. 2730 es el número de diseño de la pieza según el listado de la propia empresa Lego©. Seguidamente aparece el nombre de la pieza que no es más que una descripción de la misma (en este caso un ladrillo de 1x10 unidades de longitud con agujeros). Por último se hace referencia a la versión del programa Solid Works para la que está disponible.

La nomenclatura para las piezas presenta el siguiente formato:

vLTm_xxxx-x_part-0yy0_2018

Dónde xxxx-x responde al código del modelo Lego© Technic siendo “-x” únicamente necesario en aquellos sets comercializados que permiten el montaje de al menos dos modelos diferentes con los mismos componentes.

Las cifras “yy” identifican la ordenación de la pieza dentro del montaje. Algunas de las piezas que se utilizarán estarán formadas a su vez por cierto número de piezas, en estos casos el “0” detrás de “yy” se sustituirá por un número que identifique el orden de estas piezas dentro de la pieza mayor. El número de ceros antes y después de “yy” se puede ver aumentado según las necesidades del modelo.

A continuación se muestra un ejemplo donde se ven las piezas necesarias para constituir la pieza 34 del modelo 8862-1.

vLTm_8862-1_part-03400_2018
vLTm_8862-1_part-03401_2018
vLTm_8862-1_part-03402_2018
vLTm_8862-1_part-03403_2018

La nomenclatura de los ensamblajes sigue este formato:

vLTm_xxxx-x_2018

Dónde únicamente aparece el número del modelo en cuestión.

La nomenclatura usada para los archivos que contienen el modelo cinemático y la simulación parte de este último formato. En el caso del modelo cinemático, el archivo se denomina de la siguiente forma:

vLTm_xxxx-x_2018-motion

Dando a entender que, durante la elaboración del mismo se ha hecho uso del componente de Solid Works, CosmosMotion.

En el caso de la simulación:

vLTm_xxxx-x_2018-motion-base

El archivo parte del modelo cinemático para realizar la simulación, pero eso arrastra la nomenclatura anterior. El hecho de que se utilice el término “base” se debe a que la simulación se ha realizado respecto de una pieza base para que se puede apreciar el movimiento del modelo sobre la misma.

4. ENSAMBLADO

4.1. Presentación y objetivos

Esta fase constituye el primer contacto con el modelo o máquina virtual. Durante esta fase se ensamblan los distintos componentes con la ayuda de las instrucciones del modelo Lego® Technic para obtener el modelo completo. Como parte de la metodología a seguir, los componentes se ensamblan en primer lugar en las piezas, que no deben constar de más de diez componentes.

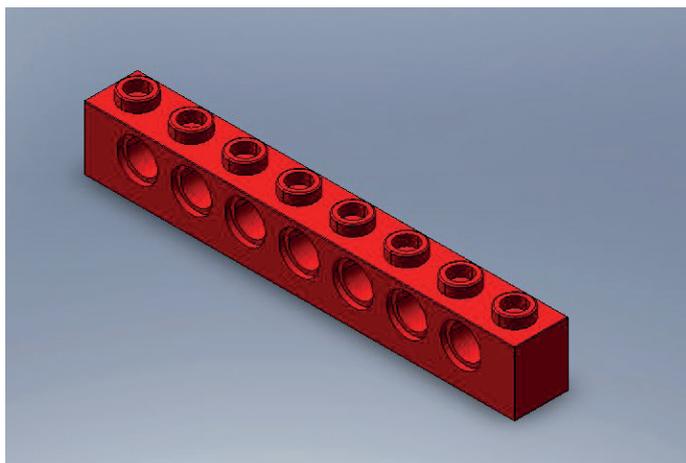
Para el correcto montaje de las piezas se dispone, igual que en el modelo real, de unas instrucciones detalladas. Es un aspecto clave el identificar, durante la virtualización del modelo, las piezas que no tienen movimiento relativo entre ellas, como podría ser el chasis de un coche, y ensamblarlas en una pieza formada por diversas piezas a su vez, antes de introducirlas en el ensamblaje final. Es decir, que no se trata de reproducir de forma virtual en un programa de CAD una máquina real Lego® Technic ya ensamblada montándola mediante el uso de las herramientas informáticas correspondientes, sino que se va más allá. se trata de diferenciar, durante el montaje, las piezas que tienen un movimiento relativo entre ellas de la estructura y proceder a su virtualización de una forma coherente.

De esta forma se consigue un modelo móvil preparado para las siguientes fases del proyecto y se adquiere una gran soltura en el manejo de programas y herramientas de CAD, en este caso, como ya se ha comentado repetidas veces, Solid Works 2007.

4.2. Conceptos básicos

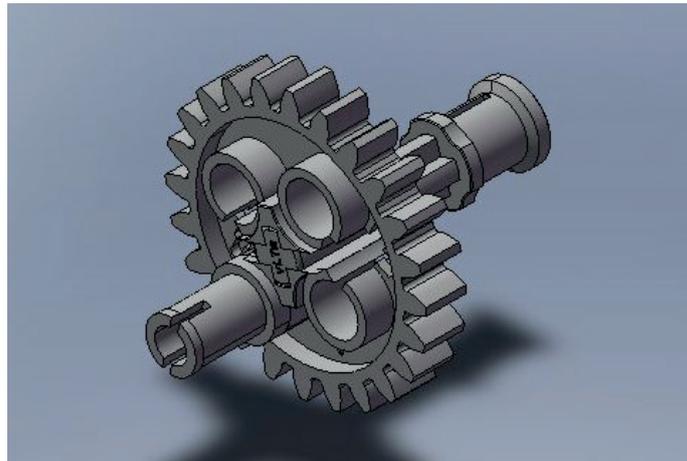
Existen tres conceptos clave, que se deben definir para poder entender el proceso seguido:

Componente: se entenderá por componente, aquel elemento unitario el cual se puede ensamblar con otros elementos de su misma categoría para formar las piezas.



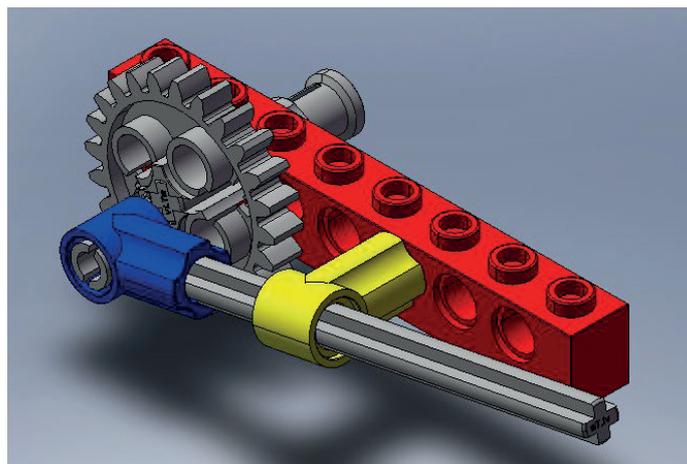
(Fig.5. Ejemplo de componente)

Pieza: se entenderá por pieza un conjunto de hasta un máximo de diez componentes debidamente relacionados entre ellos mediante los cuales se formará el modelo completo. Los componentes de la pieza no deben tener movimiento relativo entre ellos en el montaje final.



(Fig. 6. Ejemplo de pieza)

Ensamblaje: se entenderá por ensamblaje al conjunto de todas las piezas que forman el modelo correctamente posicionadas entre ellas.

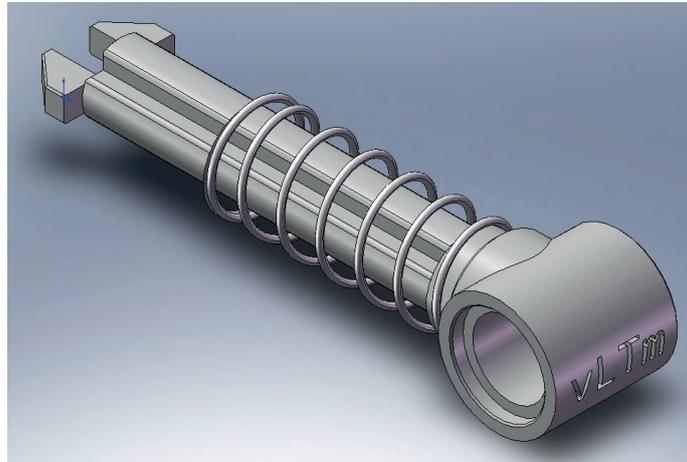


(Fig. 7. Ejemplo de ensamblaje)

Partiendo de la definición de pieza hay una serie de puntos que cabe aclarar, ya que de lo contrario la metodología podría no entenderse de forma completa.

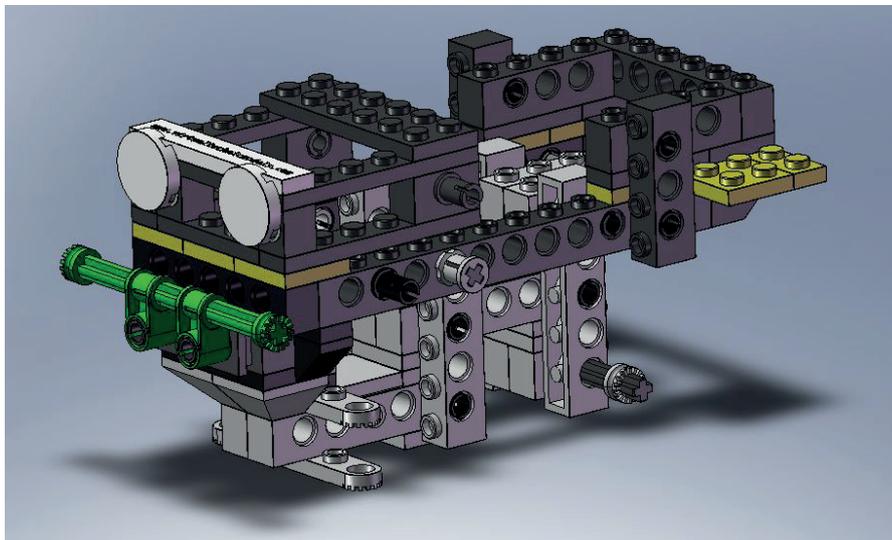
Se ha tomado, como número máximo de componentes por pieza el 10, no obstante hay dos supuestos que se deben contemplar:

Si la pieza consta de un solo componente (esto es en el caso en que tal componente no está fijo a ningún otro y por tanto presente un movimiento relativo a todos los demás componentes con los que entra en contacto), también se debe definir una pieza con ese único componente. Esto ayudará a posteriori a localizar la pieza con mayor facilidad, y en caso de tener que editarla, la edición afectará únicamente a la pieza en cuestión y no a todos los componentes idénticos.



(Fig. 8. Ejemplo de pieza de un solo componente)

Si la pieza consta de más de 10 componentes, esta se debe trocear en subpiezas que contengan un máximo de 10 componentes. En el punto 3 de este trabajo se ha explicado cómo se debe proceder a la hora de denominar estas subpiezas. Un ejemplo de pieza que conste de más de 10 componentes puede ser el chasis de un modelo, los componentes del cual no presentan movimiento entre ellos. Para facilitar el trabajo de computación, estas piezas se dividen en piezas que cumplan la condición de un máximo de 10 componentes y luego se ensamblan en una pieza que contenga todas las piezas necesarias para su definición.



(Fig. 9. Ejemplo de pieza formada de piezas)

Cabe destacar que durante la elaboración de este trabajo se ha hecho alguna excepción con las piezas que presentan 11 componentes, ya que dividir las en dos piezas de 5 y 6 componentes podría ser contraproducente.

4.3. Procedimiento de ensamblado

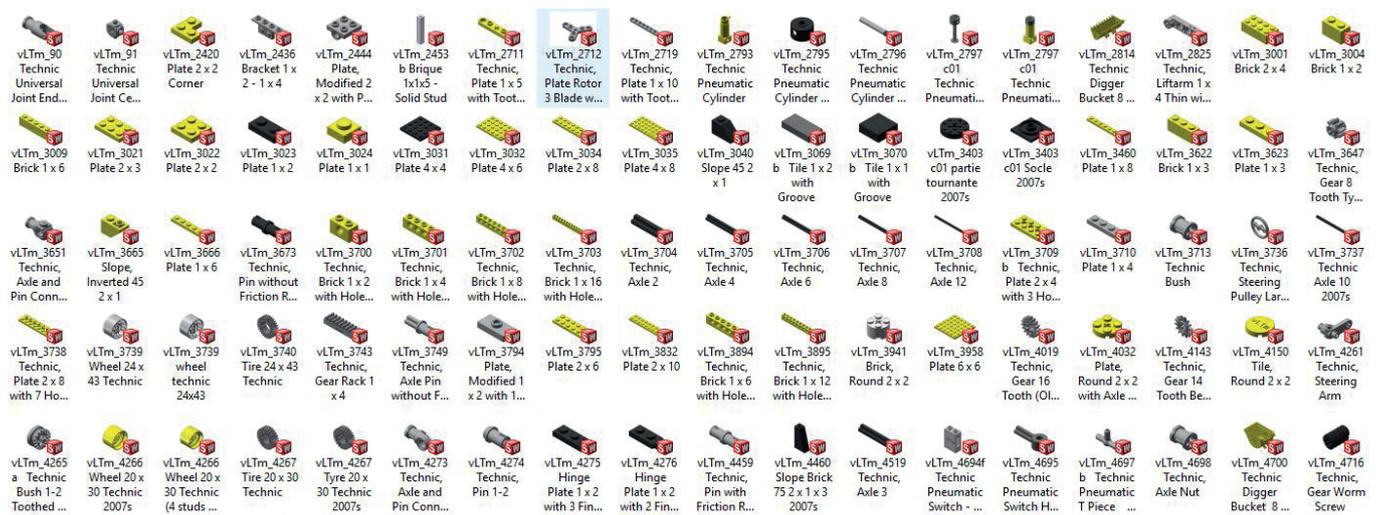
La metodología seguida consta de una serie de pasos dentro del proceso de ensamblado del modelo. Dichos pasos se detallan a continuación.

4.3.1. Asignación del modelo

En primer lugar se selecciona el modelo a virtualizar. Durante este proyecto el profesor a cargo ha efectuado la labor de preselección en base al nivel del alumno y los objetivos de dicho proyecto. En función de los gustos del alumno se han seleccionado conjuntamente los modelos a virtualizar.

4.3.2. Selección de los componentes

Ya se ha mencionado con anterioridad en este proyecto, que los “sets” o “cajas” Lego® Technic cuentan con los componentes necesarios y suficientes para la elaboración del modelo en cuestión. Puesto que la cantidad de los componentes virtualizados es elevada, el primer paso consiste en la selección de los componentes necesarios para la virtualización del modelo. Para ello es recomendable, acudir a la página web oficial de Lego® <http://www.Lego.com> donde se pueden consultar todos los modelos (Technic o no) creados por Lego®, apareciendo un listado de los componentes necesarios para cada modelo y posibilitando la descarga de las instrucciones en formato .PDF. Las propias instrucciones también detallan la final los componentes que aparecen en el “set”, siendo otra fuente a la que acudir para dicha tarea.

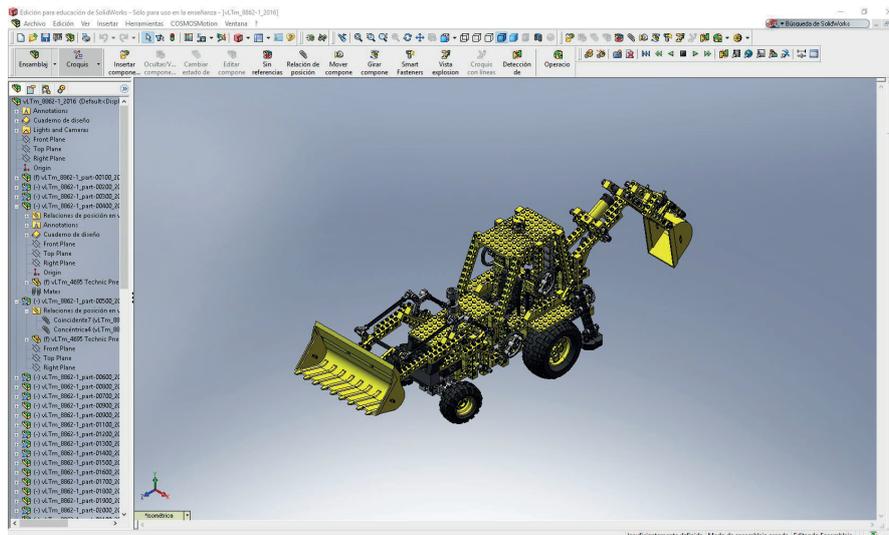


(Fig. 10. Extracto componentes Lego® a usar en el modelo vLTm_8862-1_2018)

4.3.3. Ensamblado

Con los componentes ya seleccionados y todas las instrucciones y referentes localizados, es el momento de comenzar el ensamblado.

Para ello es necesario acceder al programa Solid Works, que como ya se ha comentado, en este trabajo se utiliza la versión 2007. En primer lugar, se debe abrir el archivo ensamblaje, donde se insertarán las piezas a medida que se vayan definiendo. En segundo lugar, hay que definir cada una de las piezas que forman el modelo mediante la relación entre componentes. Para ello, se debe abrir el archivo pieza e insertar los componentes necesarios en él. Los componentes presentan un color amarillo claro, el cual se debe modificar desde el apartado de propiedades para asignarle el color correspondiente que se puede observar en las instrucciones. A continuación se deben asignar lo que el programa denomina relaciones de posición, entre cada uno de los componentes que forman la pieza, para establecer la posición relativa de los componentes entre ellos. Por último se deben establecer las relaciones de posición de las piezas en el archivo ensamblaje para dar forma al modelo siguiendo las instrucciones.



(Fig. 11. Entorno de trabajo Solid Works 2007)

En la imagen (Fig. 11.), se presenta el entorno de trabajo de ensamblaje en Solid Works 2007.

En la parte izquierda se puede observar el árbol de las piezas dentro del ensamblaje. Cada una de ellas cuenta a su vez con un árbol desplegable donde se pueden apreciar por una parte los componentes y relaciones que la definen, y por otra las relaciones que la posicionan con respecto al resto de piezas del ensamblaje. Esto es de gran ayuda ya que permite comprobar las relaciones establecidas para una pieza en particular y de esta forma poder editarlas con facilidad cuando sea necesario.

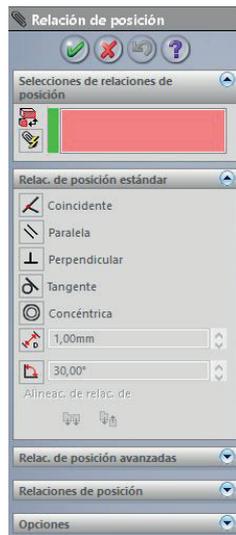
El programa Solid Works establece una diferencia entre relaciones de posición estándar y relaciones de posición avanzadas. Generalmente el primer tipo de relación sirve para determinar la posición entre componentes que sean fijos o permitan algún movimiento sencillo. El segundo tipo se utiliza, mayoritariamente, para definir el movimiento entre componentes como pueden ser los engranajes. El hecho de poder establecer movimientos entre piezas, es una gran ventaja que ofrece Solid Works frente a otros programas de CAD, ya que permite visualizar el movimiento sin tener que recurrir a una simulación. Además Solid Works cuenta con el complemento CosmosMotion que ofrece incluso más información sobre el comportamiento del movimiento del modelo, como se verá más adelante.

4.3.3.1. Relaciones de posición estándar

Las relaciones de posición estándar son las más utilizadas a la hora de construir los modelos y las que el propio programa intenta definir por defecto. Existen varias formas de determinar la unión entre dos componentes, de forma que una misma unión puede realizarse con distintas relaciones de posición.

Cabe destacar que es necesario fijar uno de los componentes a la hora de definir las relaciones dentro de una pieza, ya que de lo contrario no es posible determinar el lugar, con exactitud, en que se unirán los componentes. También se debe fijar una pieza al definir el modelo completo en el ensamblaje. En este caso es conveniente determinar el chasis como pieza fija.

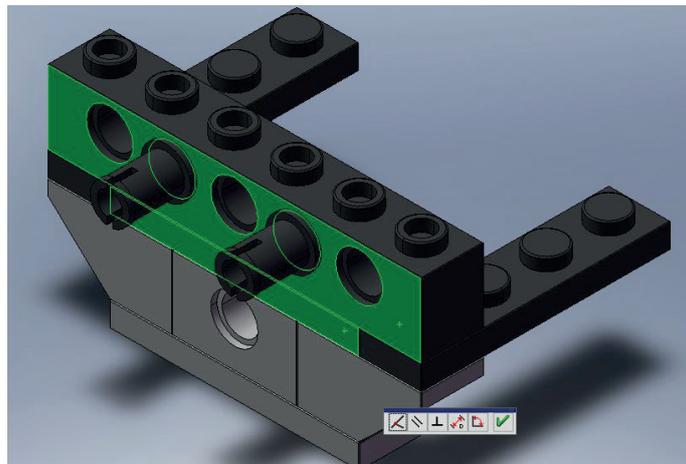
Las relaciones de posición estándar son las que aparecen en la imagen (Fig. 12.).



(Fig.12. Relaciones de posición estándar)

4.3.3.1.1. Coincidente

Como indica su nombre se utiliza para hacer que dos caras de diferentes componentes coincidan en el mismo plano.



(Fig.13. Relación de posición coincidente)

4.3.3.1.2. Paralelo

La relación de posición obliga a que dos caras de distintos componentes se ubiquen en planos paralelos. Permite determinar la distancia a la que deben de estar estos planos.



(Fig.14. Relación de posición paralelo)

4.3.3.1.3. Perpendicular

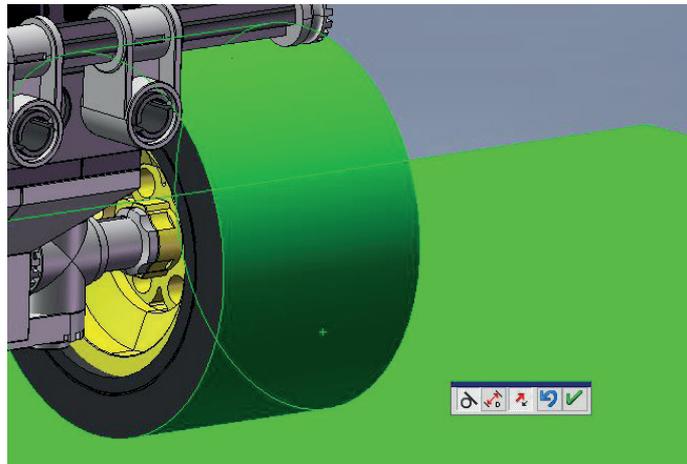
Establece una posición entre dos caras de distintos componentes de 90°.



(Fig.15. Relación de posición perpendicular)

4.3.3.1.4. Tangente

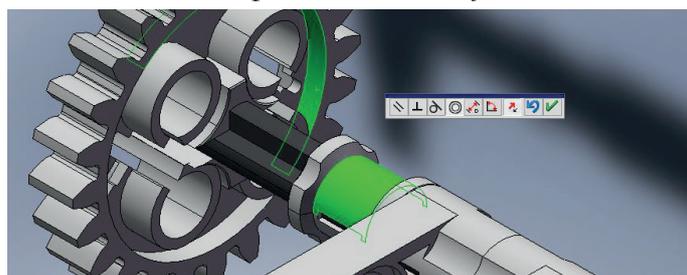
La tangente obliga a dos superficies de componentes distintos a mantener el contacto.



(Fig.16. Relación de posición tangente)

4.3.3.1.5. Concéntrica

Esta relación de posición solo se puede aplicar sobre superficies circulares o cilíndricas. Determina que dichas superficies de componentes distintos compartan un mismo eje de concetricidad.

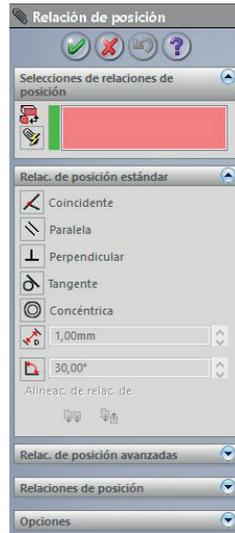


(Fig.17. Relación de posición concéntrica)

4.3.3.2. Relaciones de posición avanzadas

Durante el desarrollo de este proyecto se ha hecho uso de únicamente las relaciones de posición avanzadas que definen el movimiento entre componentes. El resto, por el hecho de determinar posiciones a las que se le debe dar un valor numérico se han evitado, ya que podrían dar lugar a errores en la definición correcta del modelo. Por ese motivo a continuación se detallan únicamente aquellas que se han utilizado.

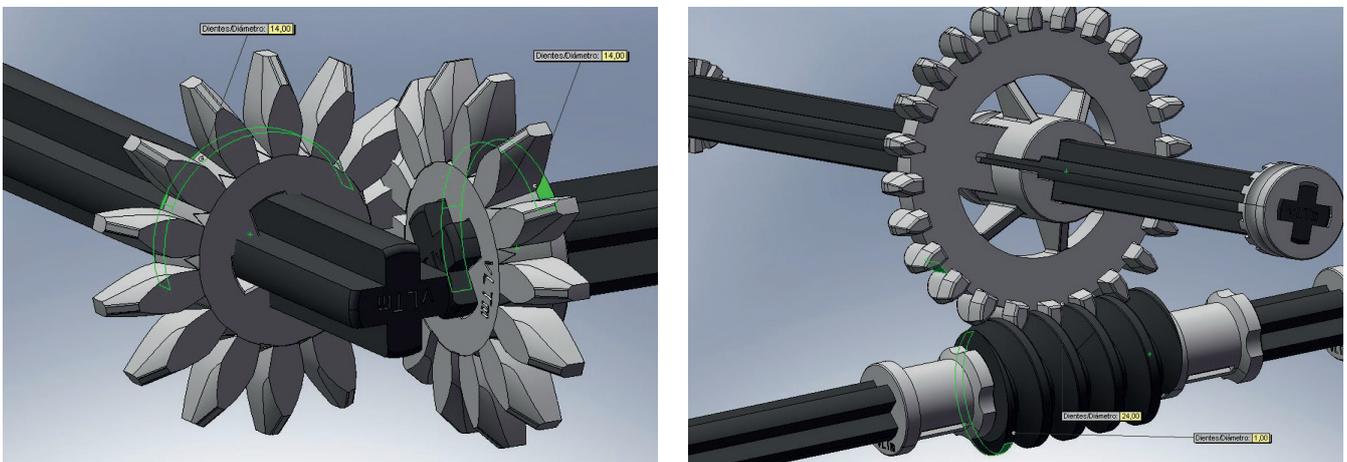
En la imagen se muestran las relaciones de posición avanzadas (Fig. 18.).



(Fig.18. Relaciones de posición avanzadas)

4.3.3.2.1. Engranaje

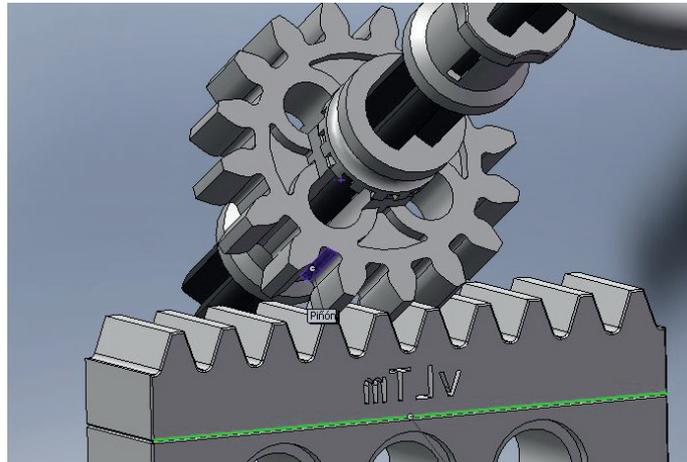
Permite establecer el giro de un eje respecto de otro mediante una relación que, en este trabajo se determina siempre por el número de dientes que tiene cada una de las ruedas dentadas en contacto. No es la única forma de definirlo, ya que también se podrían usar los diámetros de las ruedas o la ventaja cinemática que proporciona. Además sirve para definir la relación entre un engranaje y un tornillo sin fin, sólo se ha de tener en cuenta que a la hora de determinar el número de dientes del sin fin siempre debe ser uno. Pese al nombre “engranaje”, la relación de posición permite por definición establecer el giro entre poleas y componentes similares, sin necesidad de dientes.



(Fig.19. Relación de posición engranaje y engranaje-sin fin)

4.2.3.2.2. Piñón cremallera

Se asemeja a la relación engranaje, pero en este caso determina el desplazamiento lateral de la cremallera en relación al giro de la rueda dentada. De nuevo existen varias formas para definirlo, pero en este trabajo se utiliza la longitud que avanza la cremallera por vuelta de la rueda dentada.



(Fig.20. Piñón cremallera)

4.3.4. Geometrías auxiliares

En ocasiones es necesario utilizar lo que Solid Works denomina geometrías de referencia para poder definir correctamente las relaciones entre componentes. Un ejemplo de esto son los componentes con uniones esféricas. En estos casos el método a seguir es editar dichos componentes, ubicando un punto en el centro de las superficies esféricas que se pretenden unir. De esta forma se puede definir una relación de coincidencia entre ambos puntos, dando lugar a una relación que se asemeja mucho al contacto entre las superficies esféricas.

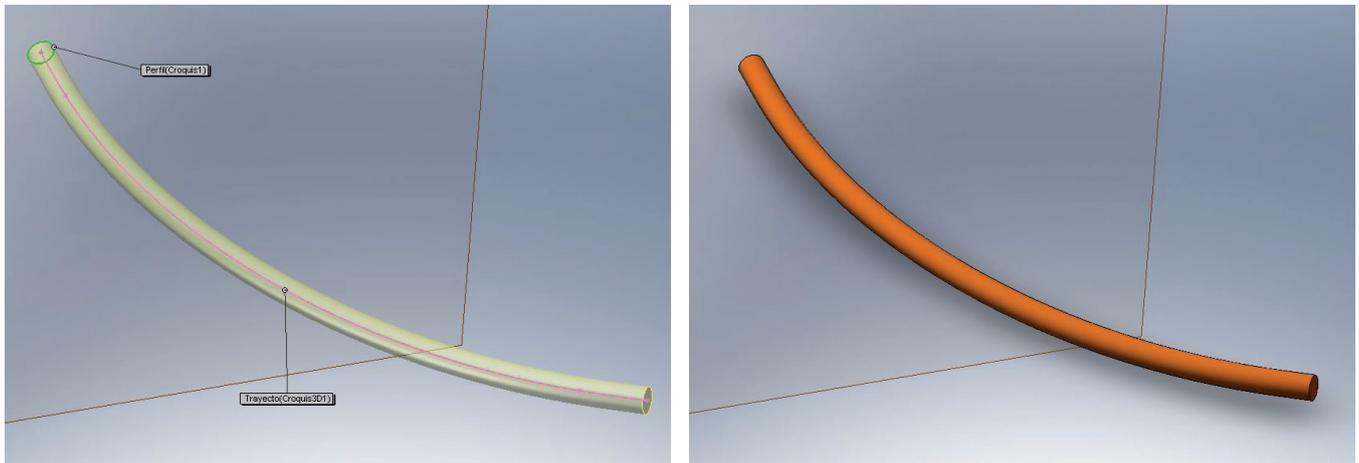


(Fig.21. Ejemplo unión componentes esféricas)

Algunos modelos presentan componentes flexibles, lo cual supone un inconveniente a la hora de trabajar con ellos con Solid Works, ya que el programa supone rígidos todos los componentes. Con tal de poder definir correctamente la geometría de dichos componentes es necesaria la utilización de elementos auxiliares como los puntos y los croquis 3D. La forma de proceder para definir dichos componentes es la siguiente.

Primero se necesita que el resto de componentes con los cuales entra en contacto el componente flexible estén apropiadamente colocados. En este supuesto, conviene fijarlos para evitar que su posición relativa se pueda

perder mientras se trabaja con ellos. En segundo lugar se debe definir una serie de puntos que servirán de referencia para un croquis tridimensional sobre el que se asentará la geometría del componente. El tercer paso consiste en unir los puntos creados anteriormente con el mencionado croquis 3D. Una vez este está correctamente definido se debe exportar a un archivo nuevo vacío. Por último se debe definir la geometría (normalmente circular) que se extruirá a lo largo del croquis, dando forma así al componente necesario.



(Fig.22. Ejemplo procedimiento de creación de componente flexible)

5. COMPACTACIÓN

Al terminar el proceso de ensamblado se obtiene una máquina virtual compuesta de piezas, compuestas a su vez por varios componentes.

Dado que en este proyecto se han realizado montajes de modelos que superan los mil e incluso los dos mil componentes es necesario realizar un proceso de compactación para evitar que el ordenador deba trabajar con toda esa cantidad de componentes lo cual reduciría el rendimiento de la computadora.

En el proceso de compactación, cada pieza (formada por como máximo diez componentes) pasa a ser una única entidad virtual logrando aumentar el rendimiento computacional, organizar de forma más efectiva los archivos y proteger el trabajo realizado en la creación de piezas. Hay que tener en cuenta que una pieza previa a la compactación se puede editar, es decir, es posible manipular los componentes dentro de ella. Una vez la pieza se ha compactado, ya no se tiene acceso a los componentes que la forman, sino que es toda una entidad con una geometría compleja. Esto impide que las piezas se puedan editar por error.

De esta forma el archivo ensamblaje pasa a estar compuesto por componentes y no por piezas obteniendo una máquina virtual que requerirá menos trabajo para el ordenador en las siguientes fases.

6. CREACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO AUTO-ALINEADO

6.1. Presentación y objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el de realizar un modelo cinemático auto-alineado de las máquinas virtuales de los modelos seleccionados. Como se ha comentado con anterioridad, la dificultad de trabajar con máquinas reales impide un correcto aprendizaje de esta materia. Para ello la solución virtual es una propuesta práctica e ingeniosa. Además de permitir trabajar con los modelos mencionados permite realizar de forma teórica la selección de los pares cinemáticos entre piezas que permiten definir el comportamiento normal de la máquina.

Desde el punto de vista del diseño mecánico es posible configurar el modelo cinemático de manera que no aparezcan restricciones en exceso. Para ello se utilizan el complemento CosmosMotion que está basado en el programa ADAMS, referente de la simulación cinemática y dinámica de sistemas multicuerpo desde los años setenta.

Desde el punto de vista del diseño industrial permite hacer la selección de los cojinetes necesarios para poder auto-alinear el mecanismo y así prever las geometrías que se deben preparar a la hora de elaborar las piezas de la máquina real.

6.2. Importancia de las máquinas auto-alineadas.

La elaboración de máquinas auto-alineadas es un valor añadido. Frente a una máquina que presente restricciones en exceso, la máquina auto-alineada dispondrá de una vida útil más larga.

El concepto de auto-alineación representa el sentido de desarrollar este proyecto. El concepto auto-alineación es introducido por el profesor L. Reshetov, en su libro titulado “Mecanismos auto-alineados” siendo uno de los autores que más ha contribuido a la tarea del estudio de los pares cinemáticos y de los mecanismos. En su libro explica que para conseguir una mejora en el funcionamiento de un mecanismo, este debe estar determinado estáticamente, o como él lo denomina: ser auto-alineador. El autor ha desarrollado una teoría aplicada sobre ejemplos a fin de divulgar entre ingenieros y diseñadores como conseguir la auto-alineación entre mecanismos.

6.2.1. Conceptos básicos

Antes de continuar es necesario definir una serie de conceptos básicos que permitan entender el proceso de auto-alineación de mecanismos.

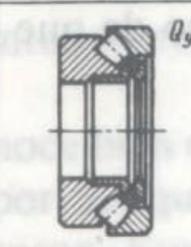
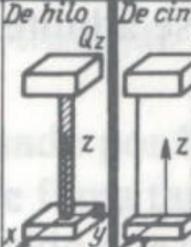
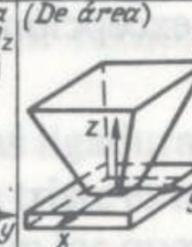
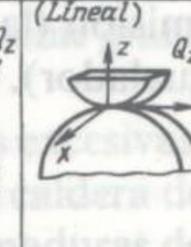
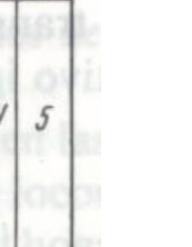
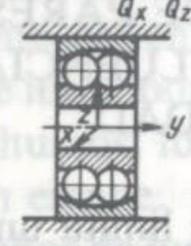
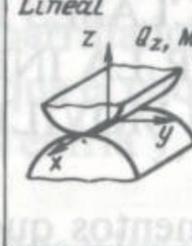
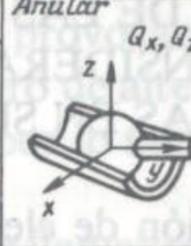
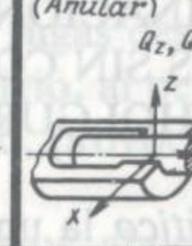
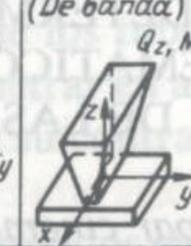
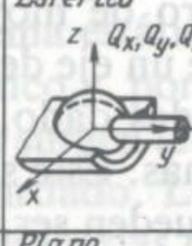
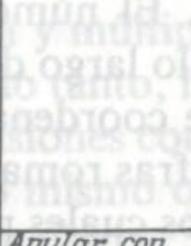
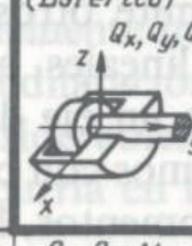
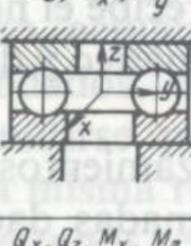
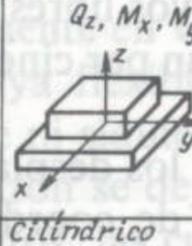
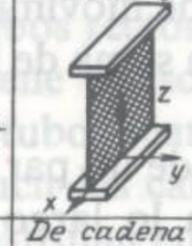
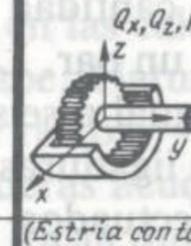
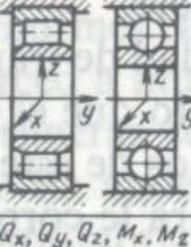
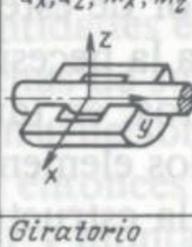
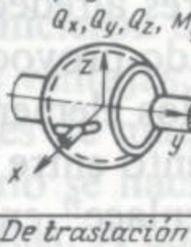
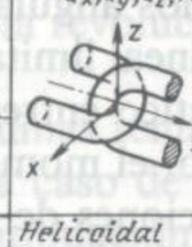
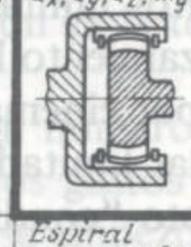
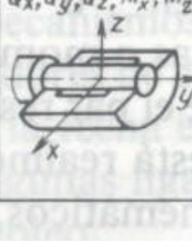
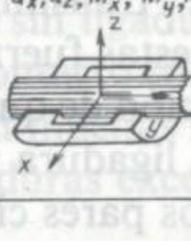
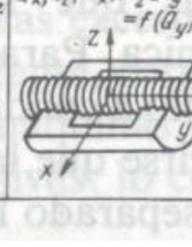
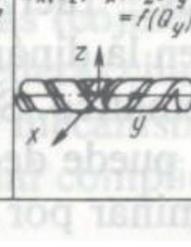
6.2.1.1. Par cinemático

Se entiende por par cinemático la unión de elementos que limitan unos movimientos relativos y admite otros. Al número de movimientos limitados lineales (a lo largo de un eje) o angulares (en torno a un eje) se denomina clase de par. La clase de par hace referencia además al número de fuerzas o momentos que el par puede transmitir. La cantidad de movimientos relativos libres en un par se denomina movilidad del par. Los valores relativos a la clase del par y a su movilidad, suman seis.

6.2.1.2. Restricciones de un par cinemático

Si un par es la unión que limita o permite movimientos relativos, las restricciones de un par cinemático

Tabla 1.1

Clase	1	2	3	4	5	Multiplicidad	
I		Puntiforme Q_z 	De hilo Q_z 	De cinta Q_z 	(De área) Q_z 	(Lineal) Q_z 	5
II		Lineal Q_z, M_y 	Anular Q_x, Q_z 	(Anular) Q_z, Q_x 	(De banda) Q_z, M_y 	4	
III'		Esférico Q_x, Q_y, Q_z 	(Esférico) Q_x, Q_y, Q_z 	(Helicoidal) $Q_x, Q_z [M_y = f(Q_y)]$ 	3		
III''		Plano Q_z, M_x, M_y 	Anular con espiga Q_x, Q_z, M_y 	Q_x, Q_z, M_y 	(Estriado) Q_x, Q_z, M_y 	3	
IV		Cilíndrico Q_x, Q_z, M_x, M_z 	Esférico con espiga Q_x, Q_y, Q_z, M_y 	De cadena Q_x, Q_y, Q_z, M_y 	(Estria contope) Q_x, Q_y, Q_z, M_y 	2	
V		Giratorio Q_x, Q_y, Q_z, M_x, M_z 	De traslación Q_x, Q_z, M_x, M_y, M_z 	Helicoidal $Q_x, Q_z, M_x, M_z [M_y = f(Q_y)]$ 	Espiral $Q_x, Q_z, M_x, M_z [M_y = f(Q_y)]$ 	1	

(Fig.23. Tipo de pares cinemáticos; L. Reshetov, Self-aligning mechanisms, Mir, 1982)

son los desplazamientos relativos limitados, tanto en relación al movimiento a lo largo de un eje como en torno al mismo.

Una restricción del movimiento lineal provoca la existencia de una fuerza de restricción mientras que la limitación de un desplazamiento angular provoca un momento de restricción. Un par, por tanto, debe calcularse (determinar las dimensiones de los componentes que lo conforman) de manera que resista dichas fuerzas y/o momentos.

6.2.1.3. Grados de libertad

El número de grados de libertad hace referencia a las coordenadas independientes necesarias para especificar de forma única la posición de dicho cuerpo respecto a un sistema de referencia.

En este trabajo se utiliza el concepto de grados de libertad (GDL) o “degrees of freedom” en inglés (DOF) de tres formas diferentes pero ligadas entre sí.

La primera utilización es el número de GDL respecto a un sistema de referencia dado, es decir la definición dada anteriormente.

La segunda es el número de grados de libertad de un par cinemático. A efectos de evitar la confusión, a los grados de libertad de un par cinemático se les denominará conectividad.

La tercera es el número de grados de libertad de un mecanismo. A efectos de evitar la confusión, a los grados de libertad de un mecanismo se les denominará movilidad de tal mecanismo.

En la tabla (Fig.23.) se muestran los pares cinemáticos existentes y se relacionan con los conceptos explicados con anterioridad.

La clase del par aparece en la parte izquierda de la tabla, representada mediante números romanos y la movilidad del par aparece en la parte derecha representada mediante números arábigos. Como se puede comprobar, la suma de dichas magnitudes resulta 6. Además, dentro de las representaciones gráficas de cada par se determinan los movimientos que restringe cada uno. Así mismo, hay también una representación del cojinete necesario para la aplicación de cada par en una máquina real.

6.2.1.4. Cálculo de la movilidad de un mecanismo

La movilidad de los mecanismos se puede calcular de una forma similar para mecanismos planos y para mecanismos espaciales.

Los mecanismos planos son aquellos en los que los componentes que lo forman trazan un movimiento en un mismo plano o en planos paralelos entre sí. Así pues un cuerpo en un mecanismo plano tiene tres grados de libertad: dos de traslación en los ejes “x” e “y” y uno de rotación en el eje “z”.

Al considerar un mecanismo plano que se compone de N cuerpos rígidos en el que existen P pares cinemáticos que definen sus uniones, la movilidad M se calcula:

$$M = 3 * (N - P - 1) * \sum_{i=1}^p f_i$$

Esta ecuación recibe el nombre de criterio de movilidad, donde f_i toma el valor 1 para un par inferior y 2 para un par superior.

No obstante no todos los mecanismos tienen el movimiento en planos paralelos, es por ello que hace falta un cálculo específico para los mecanismos espaciales. En estos casos, dado que un cuerpo en el espacio tiene seis grados de libertad, la movilidad de un mecanismo espacial se define de la siguiente manera:

$$M = 6 * (N - P - 1) * \sum_{i=1}^p f_i$$

Esta ecuación se conoce como criterio de Grübler, y es el criterio que utiliza el complemento CosmosMotion para realizar el cálculo de la movilidad. Este es el motivo por el que se utiliza la versión de Solid Works 2007. En versiones posteriores a la mencionada, el complemento CosmosMotion deja de utilizar el criterio de Grübler para el cálculo de los grados de libertad de los mecanismos espaciales, dificultando en gran medida el proceso de creación de mecanismos auto-alineados.

6.2.2. Mecanismos auto-alineados

Para facilitar el montaje de los mecanismos es conveniente que se elija un esquema en el que las dimensiones de los componentes no supongan problema alguno, es decir sin restricciones excesivas (pasivas), que serán los mecanismos auto-alineados. Las restricciones excesivas son aquellas cuya eliminación no aumenta la movilidad del mecanismo.

En un mecanismo las dimensiones de los componentes están sujetas a variaciones, que pueden ser consecuencia del desgaste entre los pares, dilatación térmica, golpes, errores cometidos durante la reparación o el montaje... Un mecanismo estáticamente determinado (sin restricciones excesivas) no está sujeto a la variación de las dimensiones de sus elementos. Así, la determinación estática de un mecanismo resuelve tanto el problema de reducir el gasto de montaje y reparación (ya que éstas serán necesarias menos asiduamente) como de la fiabilidad de su servicio.

En resumen las restricciones excesivas en un mecanismo son un factor perjudicial para el funcionamiento de una máquina mecánica. Es por ello que los mecanismos auto-alineados tienen la importancia que se les da en este proyecto.

A fines de poder manipular los mecanismos de los modelos y poder realizar así la creación de modelos cinemáticos auto-alineados es imprescindible la implementación de modelos virtuales y su posterior auto-alineación.

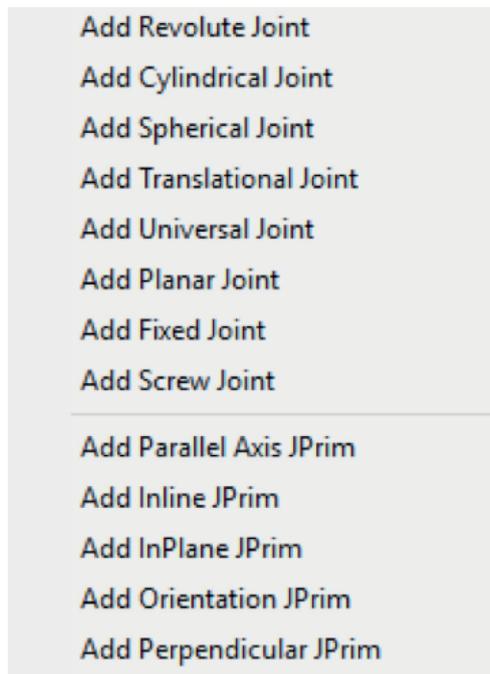
6.3. Proceso de auto-alineación

Para poder realizar un modelo cinemático auto-alineado es necesario, a parte de disponer del modelo

virtual de la máquina en cuestión con sus piezas debidamente compactadas (lo cual se explica en los puntos 4 y 5, respectivamente, de este proyecto), conocer los pares cinemáticos, sus aplicaciones y los cojinetes necesarios para implementarlos.

6.3.1. Pares cinemáticos

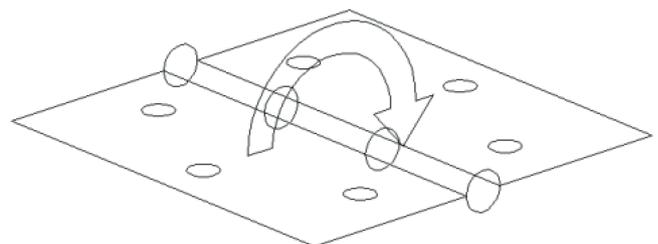
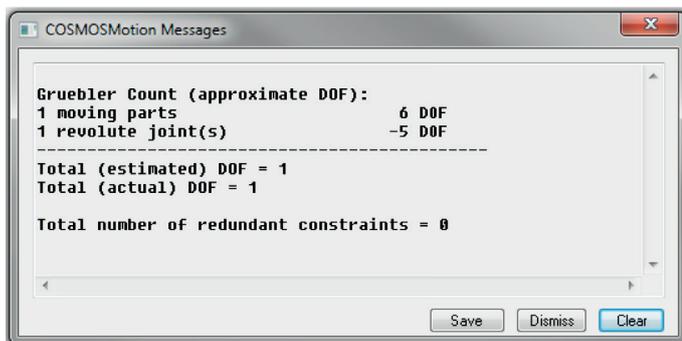
Con el objetivo de dar una coherencia a los pasos seguidos en el proyecto con la información que en él se facilita, se explican los pares cinemáticos en relación a sus homólogos en CosmosMotion denominados “joints”. Además se dará un detalle únicamente de aquellos que se han utilizado en la elaboración de los modelos cinemáticos auto-alineados.



(Fig.24. Pares cinemáticos o Joints CosmosMotion 2007)

6.3.1.1. Revolute

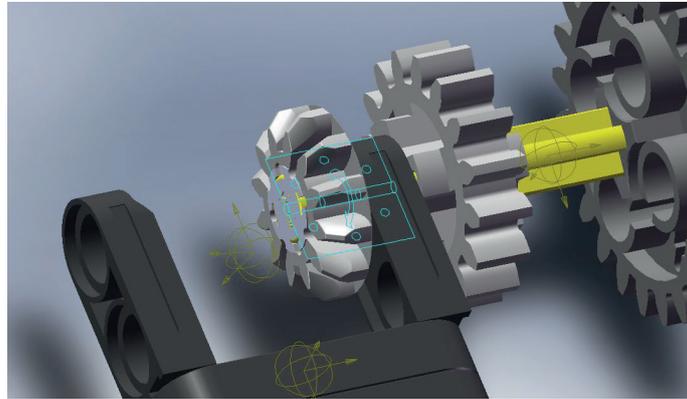
El par de revolución, “revolute” en inglés, define la rotación de un cuerpo rígido respecto a otro alrededor de un eje común. El origen se puede situar a lo largo de cualquier punto del eje, pero una vez determinado el único movimiento posible entre las piezas será el de rotación.



(Fig.25. Revolute joint)

Como se observa en la imagen (Fig.25.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

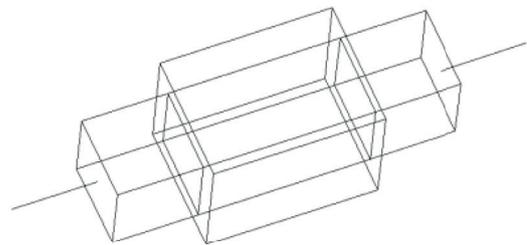
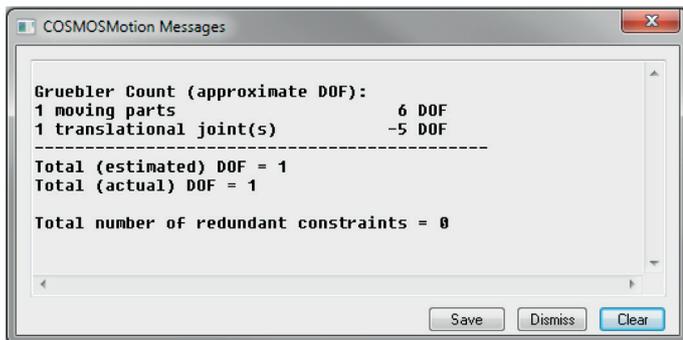
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par de revolución elimina 5 GDL.
- El total es de 1 GDL, sin restricciones redundantes (en exceso).



(Fig.26. Ejemplo revolute joint)

6.3.1.2. Traslational

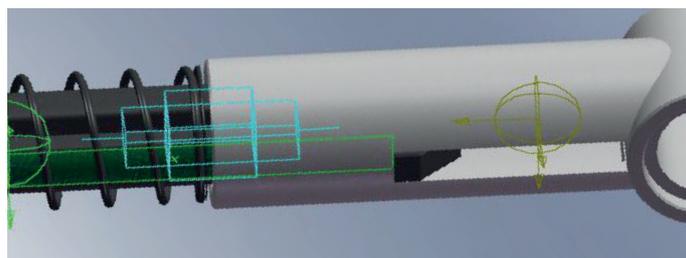
El par prismático, “traslational” en CosmosMotion, define el movimiento de traslación a lo largo de la dirección de un eje de un cuerpo respecto a otro. La orientación del par es la que se encarga de definir la dirección del movimiento.



(Fig.27. Traslational joint)

Como se observa en la imagen (Fig.27.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

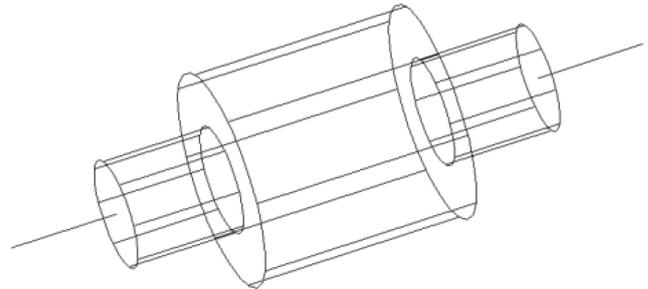
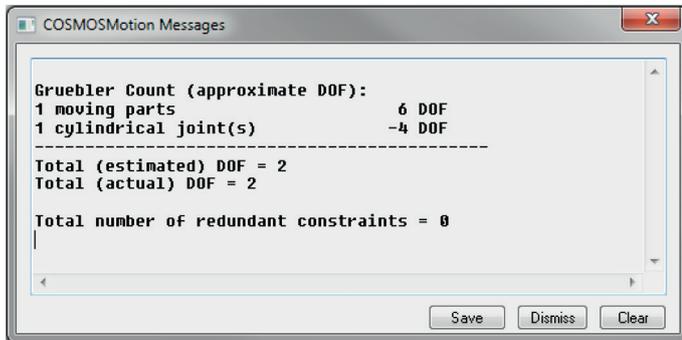
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par prismático elimina 5 GDL.
- El total es de 1 GDL, sin restricciones redundantes.



(Fig.28. Ejemplo traslational joint)

6.3.1.3. Cylindrical

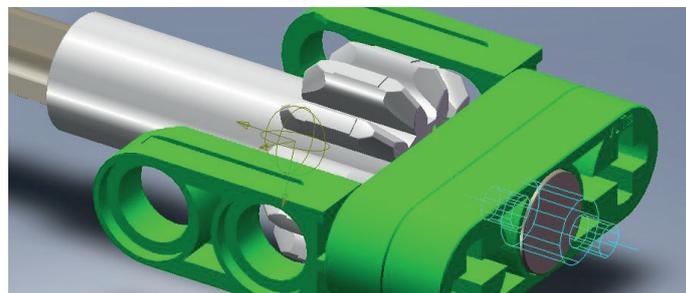
El par cilíndrico une las características de los dos pares anteriores, es decir permite el movimiento de traslación y rotación a lo largo de un eje de un cuerpo respecto de otro cuerpo.



(Fig.29. Cylindrical joint)

Como se observa en la imagen (Fig.28.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

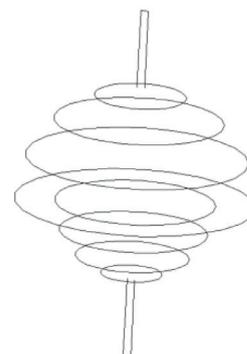
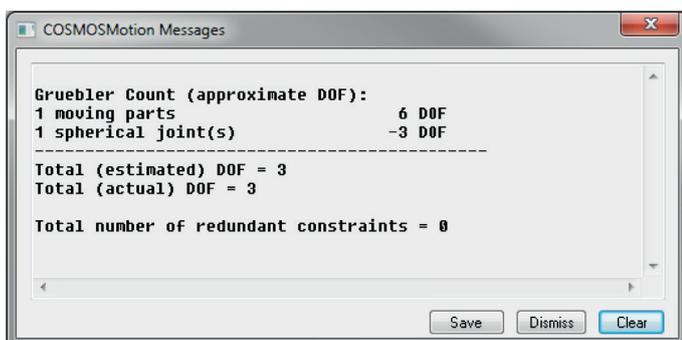
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par cilíndrico elimina 4 GDL.
- El total es de 2 GDL, sin restricciones redundantes.



(Fig.30. Ejemplo cylindrical joint)

6.3.1.4. Spherical

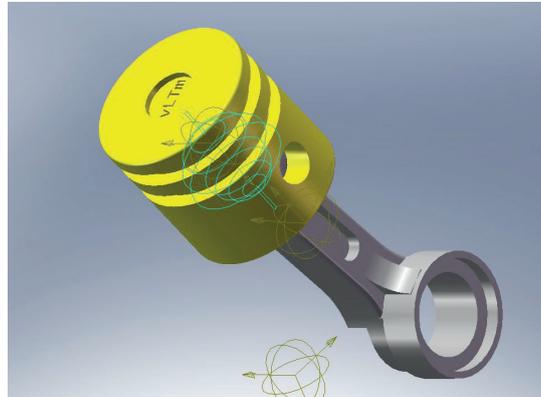
El par esférico pertenece a los pares de clase III 1. Permite los tres movimientos de rotación e impide totalmente la traslación.



(Fig.31. Spherical joint)

Como se observa en la imagen (Fig.31.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

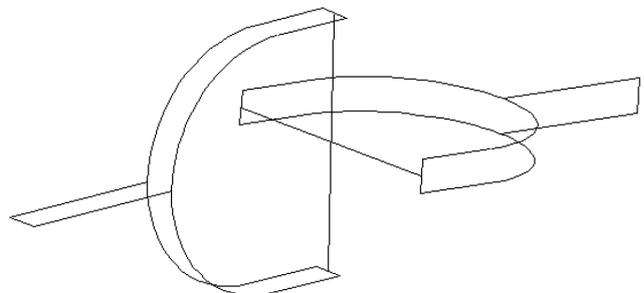
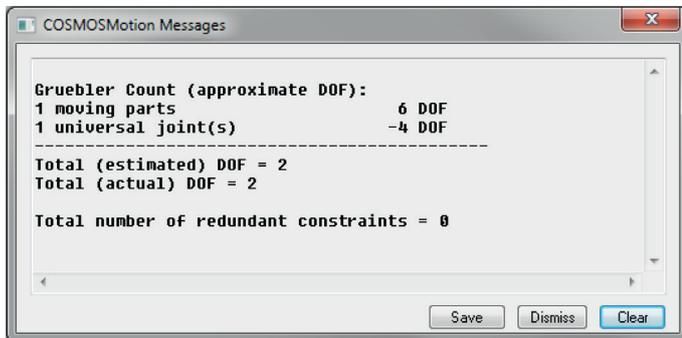
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par esférico elimina 3 GDL.
- El total es de 3 GDL, sin restricciones redundantes.



(Fig.32. Ejemplo spherical joint)

6.3.1.5. Universal

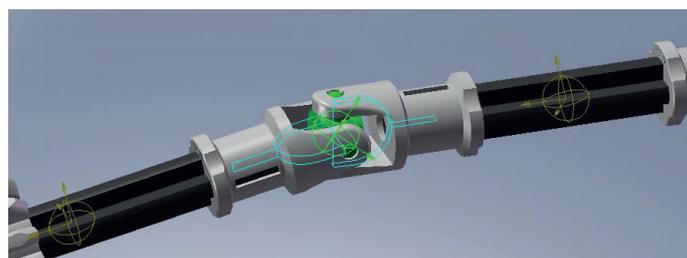
El joint universal no responde a un cojinete en sí mismo y por tanto no responde a un par cinemático por se, sino que es la unión de dos pares cinemáticos que representan la junta Hooke o cardan. Es un join específico que sirve para transmitir la rotación de un cuerpo a otro, siendo especialmente útil en ejes articulados con movilidad entre ellos.



(Fig.33. Universal joint)

Como se observa en la imagen (Fig.33.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

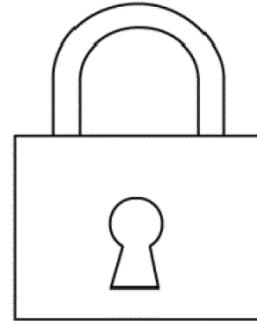
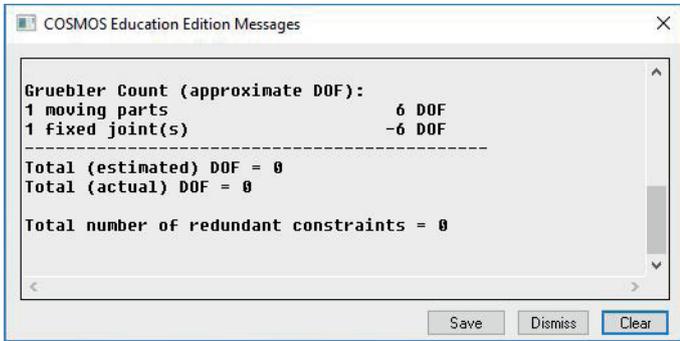
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par universal elimina 4 GDL.
- El total es de 2 GDL, sin restricciones redundantes (en exceso).



(Fig.34. Ejemplo universal joint)

6.3.1.6. Fixed

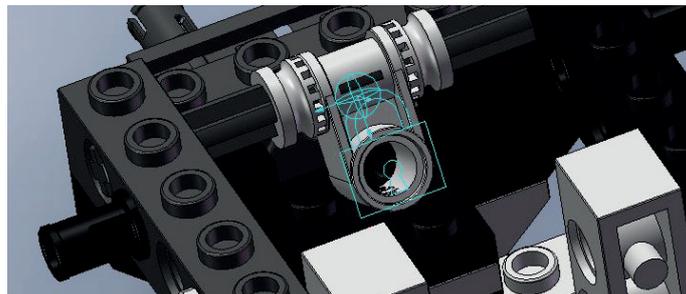
No es un par cinemático real, sino una relación propia de CosmosMotion. Con este “joint” se representan uniones fijas, como podría ser una soldadura, que evidentemente, no permite ningún tipo de movimiento relativo entre los cuerpos en cuestión.



(Fig.35. Fixed joint)

Como se observa en la imagen (Fig.35.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

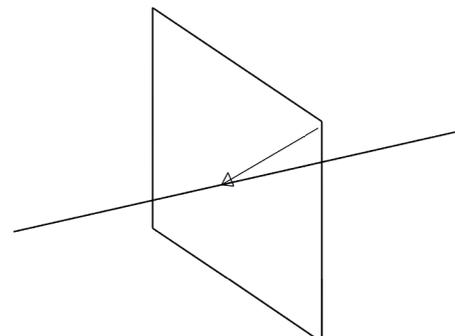
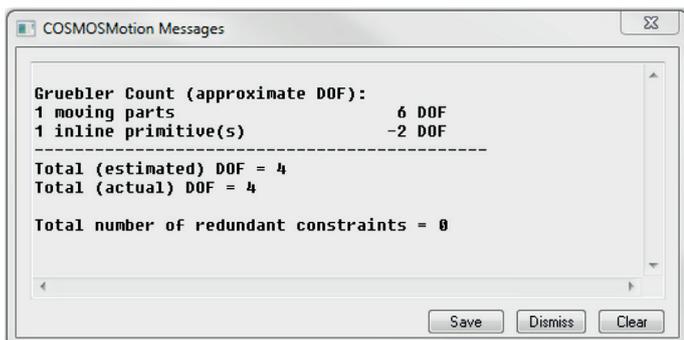
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par de fijación elimina 6 GDL.
- El total es de 0 GDL, sin restricciones redundantes.



(Fig.36. Ejemplo fixed joint)

6.3.1.7. Inline

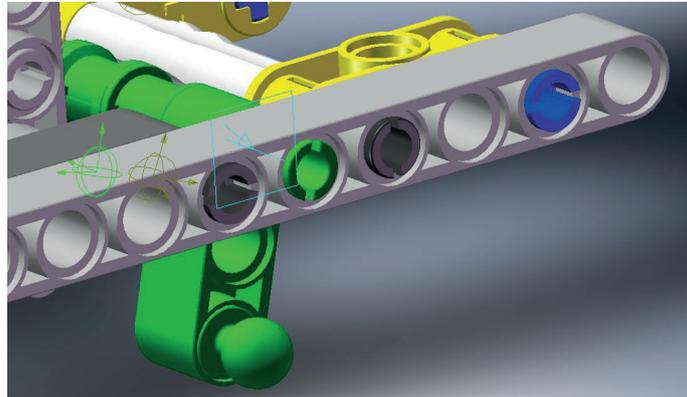
Además de permitir el giro con respecto de los tres ejes permiten el movimiento de traslación respecto a uno de ellos, o dicho otra manera, permite el movimiento de un cuerpo sobre un eje fijo de otro cuerpo. Se corresponde con el par lineal.



(Fig.37. Inline joint)

Como se observa en la imagen (Fig.37.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

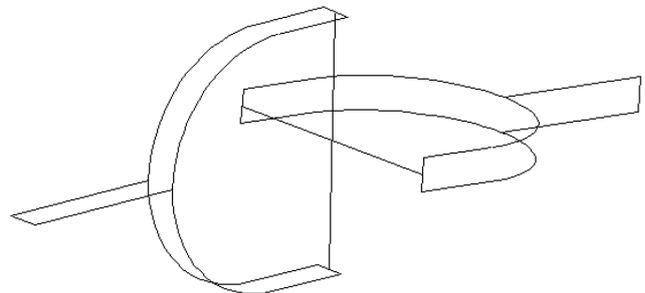
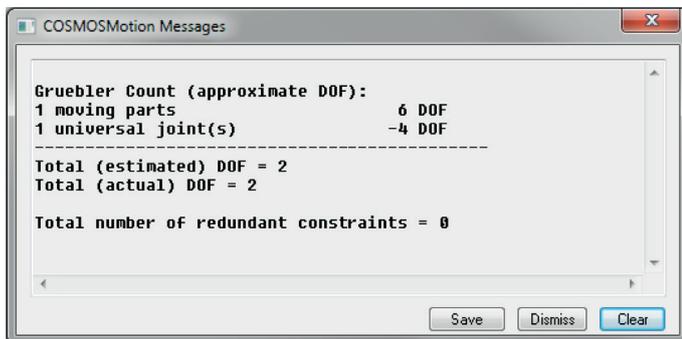
- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par de revolución elimina 2 GDL.
- El total es de 4 GDL, sin restricciones redundantes.



(Fig.38. Ejemplo inline joint)

6.3.1.8. InPlane

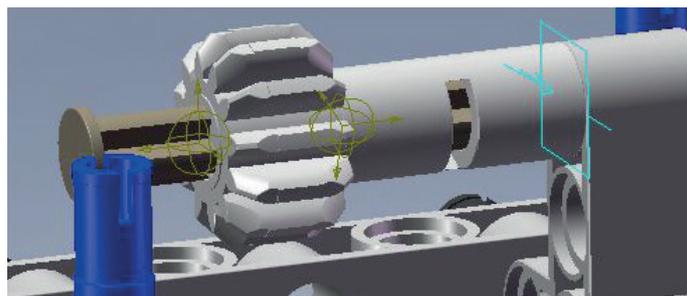
Es la versión de CosmosMotion del par puntiforme. Impide el desplazamiento relativo por la normal común a las superficies de contacto de los cuerpos en cuestión, permitiendo el resto de desplazamientos relativos, dos lineales y tres rotacionales.



(Fig.39. InPlane joint)

Como se observa en la imagen (Fig.39.) el criterio de Grübler proporciona un resultado tal que:

- El cuerpo móvil en el espacio proporciona 6 GDL.
- El par de revolución elimina 5 GDL.
- El total es de 1 GDL, sin restricciones redundantes.



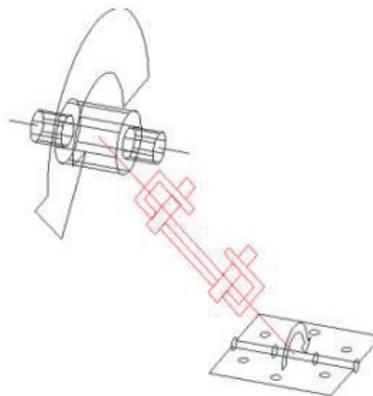
(Fig.40. Ejemplo InPlane joint)

6.3.2. Acoplamientos

Al mismo nivel que los joints, CosmosMotion cuenta con otro sistema para definir los movimientos entre componentes, al que denomina “cuoplers”, acoplamientos. Estos sirven para transmitir de una forma sencilla los movimientos rotativos que van enlazados mediante componentes como engranajes, ruedas dentadas, poleas o juntas de Hooke.

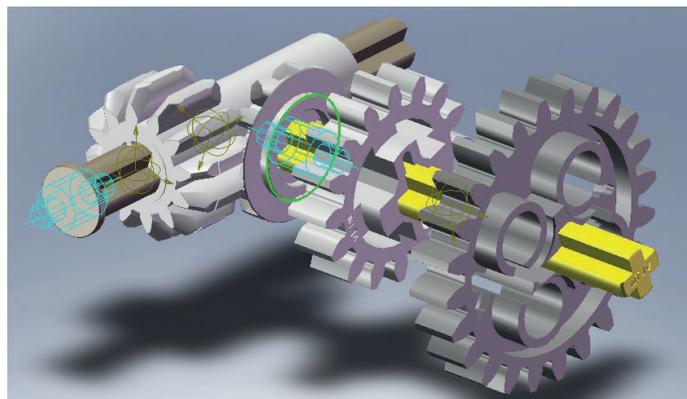
El acoplamiento sirve también para definir la relación existente entre un movimiento de rotación y uno de traslación, como ocurre con las relaciones piñón-cremallera.

Para poder definir un acoplamiento es necesario que los “joints” que se ven involucrados sean de revolución, cilíndricos o de traslación.



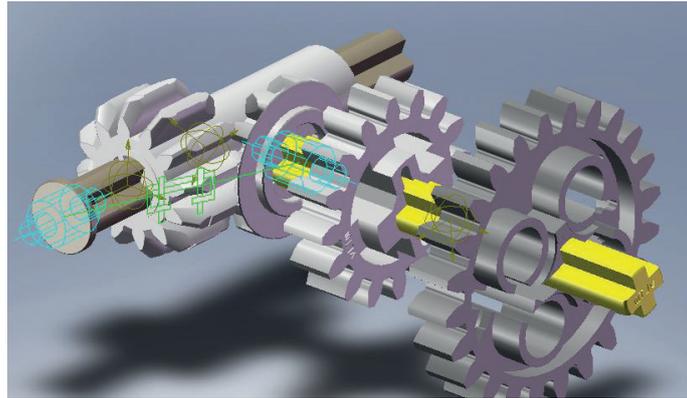
(Fig.41. Acoplamiento)

Si se dispone de dos cuerpos móviles correctamente definidos a un cuerpo estructura sin restricciones en exceso, esto resulta en dos grados de libertad para el mecanismo.



(Fig.42. Ejemplo pre-acoplamiento)

En caso de que estos dos cuerpos estén enlazados por alguno de los mecanismos mencionados anteriormente (verbigracia: engranajes), se debe definir un acoplamiento entre ambos, que garantice un movimiento adecuado, tanto en sentido de giro como en velocidad. El resultado de dicho acoplamiento será que el mecanismo queda con un único grado de libertad ya que el segundo dependerá del giro de uno de los dos componentes.



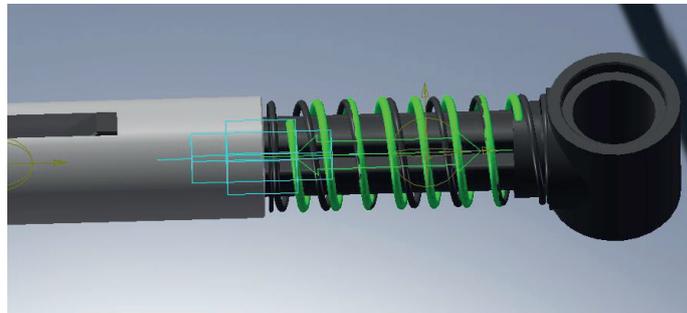
(Fig. 43. Ejemplo acoplamiento)

6.3.3. Muelles y amortiguadores

Además de los elementos mencionados en los puntos anteriores, para la elaboración de este proyecto se han utilizado dos adicionales, como son los muelles y los amortiguadores, presentes en alguno de los modelos a virtualizar.

Ninguna de estas dos relaciones de CosmosMotion añade restricciones al mecanismo, por lo que los pares cinemáticos de los componentes conectados con estas deben estar previamente definidos.

Con el uso de los muelles y amortiguadores se consigue que, a la hora de simular el movimiento del modelo éstos se comporten de una forma adecuada a la realidad, ya que de lo contrario se deberían definir los movimientos relativos entre los componentes que los conforman.

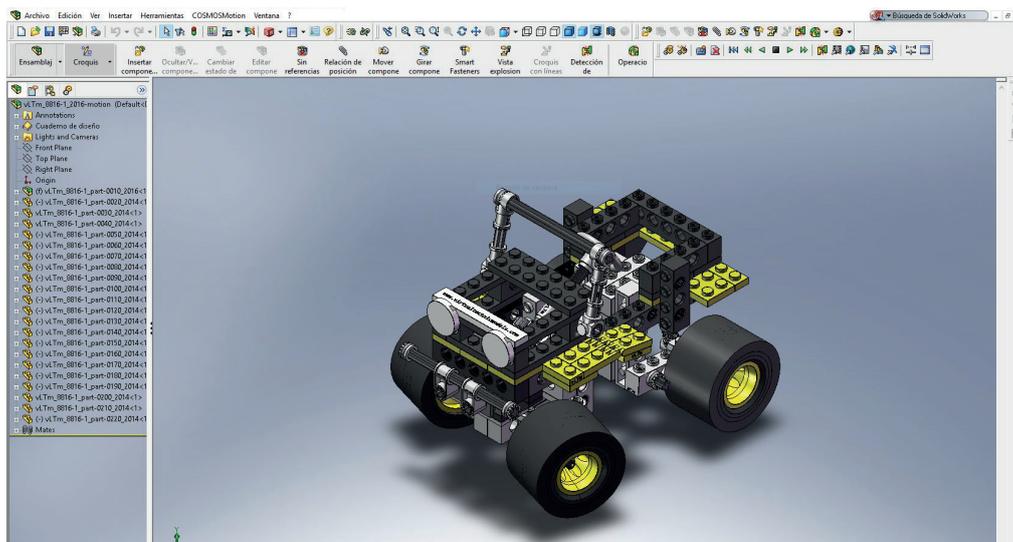


(Fig. 44. Ejemplo muelles y amortiguadores)

6.3.4. Definición del proceso

Con todos los conocimientos necesarios especificados se procede a presentar el procedimiento a seguir. Para ello se hace referencia a uno de los modelos que han sido auto-alineados y simulados durante este proyecto. Se utiliza el modelo vLTm_8816-1 por ser el modelo que se utilizó en la fase de aprendizaje de este proceso. Es decir, el modelo que a continuación se utiliza para ilustrar el proceso ha sido elaborado siguiendo una serie de videos facilitados por el profesor a cargo de este proyecto.

Hay que recordar que se parte de un modelo ya ensamblado y con las piezas que lo conforman debidamente compactadas.



(Fig.45. Modelo 8816-1 ensamblado y compactado)

El primer paso es definir el chasis o la pieza estructura, es decir, la pieza respecto a la cual se van a mover el resto, como cuerpo base, “ground part” en el entorno de CosmosMotion. A continuación, se procede a definir los pares cinemáticos entre las piezas móviles y el cuerpo base o entre ellas.

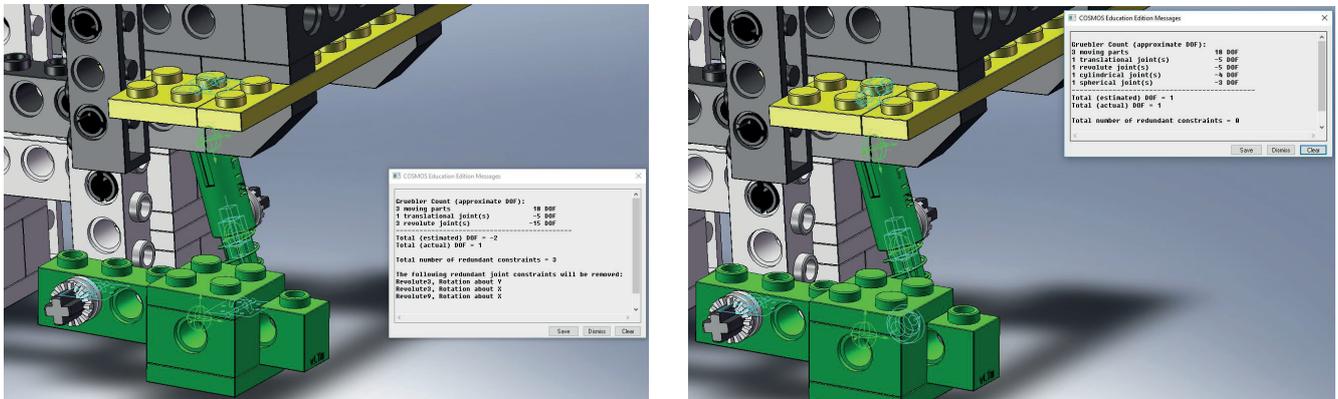
Para ello, primero, cada una de las piezas se debe identificar como “moving part”, parte móvil, de lo contrario, el complemento CosmosMotion no la reconocerá, pese a que sí esté visible en el entorno de trabajo y se pueda manipular en el entorno de Solid Works. Al definir cada pieza como “moving part” hay que prestar especial atención al hecho de que este proceso determina por defecto una serie de “joints” entre las piezas en contacto, que tienen su origen en las relaciones de posición que se han determinado al realizar el ensamblaje del modelo. Durante la elaboración del modelo cinemático se deben eliminar estos “joints” predefinidos, ya que, al estar ligados a las relaciones de posición del modelo ensamblado, no se pueden modificar salvo que se modifiquen estas relaciones. Por tanto, una vez eliminados los “joints” por defecto, se deben crear unos nuevos que satisfagan las relaciones que las piezas deben tener.

Por defecto, la forma de proceder que se sigue durante la elaboración de este proyecto consiste en determinar un par de revolución entre las piezas en cuestión, y luego cambiar las propiedades de este “joint” para hacerlo coincidir con el par real que debería tener.

Se debe definir una “joint” en cada punto en que una pieza entra en contacto con otra, salvo aquellas que entren en contacto más de dos veces. En el caso en que dos piezas estén en contacto en tres puntos o más, solo se deben definir “joints” en dos de estos puntos, seleccionando los más convenientes para la correcta definición del modelo.

Poder modificar los “joints” creados es una condición necesaria para poder auto-alinear el modelo. Convertir, por ejemplo, un “joint” de revolución en uno cilíndrico eliminará una restricción en exceso del modelo (siempre que sea la acción correcta, de lo contrario, la restricción en exceso prevalecerá y el mecanismo estará dotado de un nuevo grado de libertad) permitiendo por tanto la auto-alineación del mismo al alcanzar cero restricciones en exceso.

Se debe seguir un proceso mediante el cual cada pieza definida debe tener únicamente los grados de libertad que tendría en el modelo real, haciendo uso tanto de los “joints” como de los acoplamientos.



(Fig.46. Ejemplo de mecanismo previo auto-alineación y post auto-alineación)

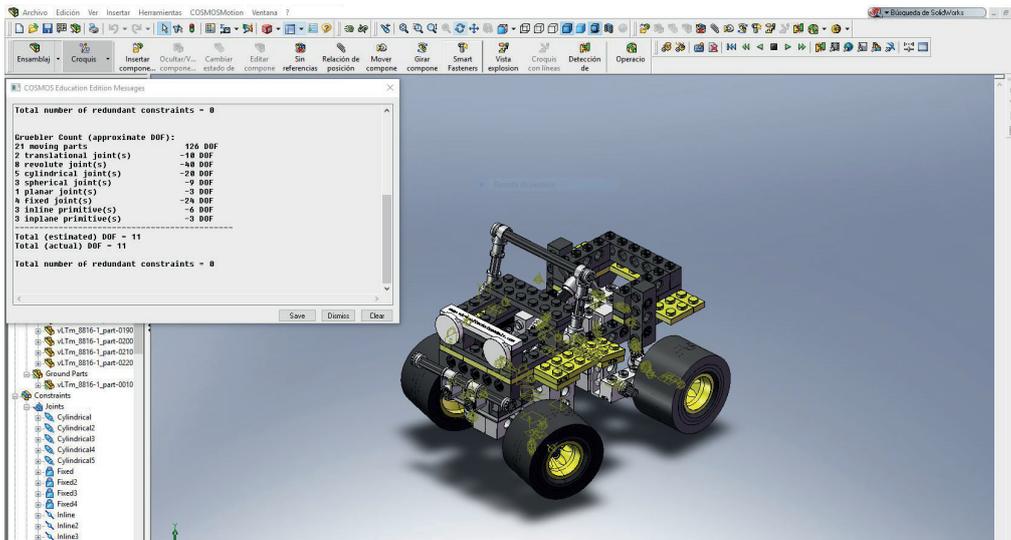
En la imagen (Fig.46.) se puede observar como, a la izquierda, el mecanismo presenta tres restricciones en exceso. Generalmente, al cerrar el lazo de un mecanismo plano en el espacio el número de restricciones en exceso que aparece es de tres. Como se puede ver en la mitad derecha de la imagen (Fig.47), es posible auto-alinear el mecanismo (hacer que las restricciones en exceso desaparezcan) modificando algunos de los “joints” definidos. En este mecanismo no es necesario que todos los pares sean de rotación. Para eliminar las tres restricciones en exceso se debe cambiar alguno de los pares a una configuración que permita tres movimientos más. Hay varias opciones que satisfacen esta necesidad, por ejemplo, cambiar todos los pares de revolución (cuya conectividad es 1) a pares cilíndricos (cuya conectividad es 2). Con ello se conseguiría, en teoría, eliminar las tres restricciones en exceso que aparecen. Sin embargo, al hacerlo se está aumentando en uno la movilidad total del mecanismo, dotándolo de un nuevo grado de libertad que antes no tenía, y es que el mecanismo ya no tendría porqué estar en contacto con la base, ya que se habría eliminado la restricción de movimiento sobre el eje z. Por tanto esta solución no sería aceptable. Es por ello que en el proceso de auto-alineación hay que ser consciente de qué suponen los cambios que se realizan en los pares cinemáticos.

La opción por la que se ha optado consiste en cambiar uno de los pares de revolución (conectividad 1) a un esférico (conectividad 3), y otro de los pares de revolución a uno cilíndrico (conectividad 2), de forma que se reduzcan las tres restricciones en exceso. Al utilizar un par esférico y mantener un par de revolución se elimina la posibilidad de desplazamiento sobre el eje z, de forma que esta solución no aporta más movilidad al mecanismo, así que está correctamente auto-alineado.

En lo que a los grados de libertad se refiere, la imagen (Fig.46) muestra que tanto si está auto-alineado como no, este mecanismo está dotado de un grado de libertad. Es decir que necesita que se actúe sobre una de sus partes para que genere un movimiento.

Cabe destacar que, como se ha visto, una máquina no auto-alineada es capaz de funcionar. Sin embargo, como ya se ha expuesto en este proyecto, esto es perjudicial para su fiabilidad.

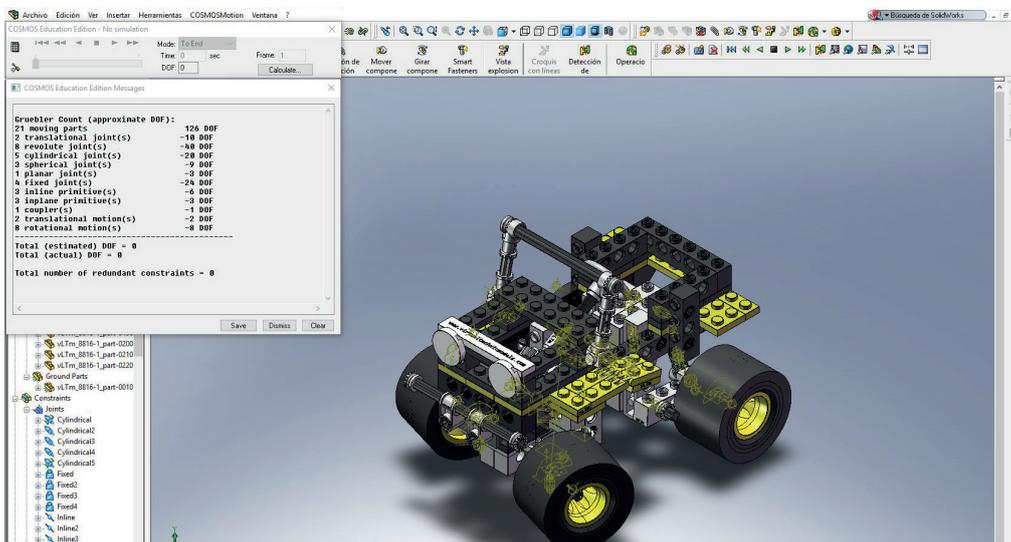
Al final, el modelo debe presentar una movilidad igual al número de mecanismos diferentes sobre los que es necesaria una acción en los actuadores para definir su movimiento.



(Fig.47. Modelo 8816-1 pares cinemáticos definidos)

En la imagen (Fig.47.) se puede apreciar el modelo con los pares cinemáticos definidos y el cálculo del criterio de Gruebler que realiza el programa. El resultado son once grados de libertad y cero restricciones en exceso.

Los grados de libertad restantes, son por tanto los mecanismos sobre los cuales es necesario definir una actuación para que la máquina se mueva. También, al haber un sistema de piñón cremallera es necesario definir un acoplamiento, el cual reducirá en uno el número de grados de libertad.



(Fig.48. Modelo 8816-1 totalmente definido)

En la imagen (Fig.48.) se puede observar que en esta ocasión, el cálculo del criterio de Gruebler da como solución cero restricciones en exceso y cero grados de libertad. Por lo tanto el modelo está correcta y completamente definido y auto-alineado, así que se puede proceder a la simulación de su movimiento.

Cabe destacar que existe la posibilidad de que un modelo auto-alineado y con su movimiento completamente definido presente grados de libertad. Estos son lo que se conocen como grados de libertad inútiles. A efectos prácticos no aportan movilidad el modelo ya que su movimiento no afecta al correcto funcionamiento del

modelo. Ejemplo de esto son piezas cuyas uniones son esféricas. Si una pieza está unida a otras dos por sus extremos con un par esférico en cada uno, el movimiento de esta pieza estará dirigido por las piezas a las que va ligadas, siendo capaz de transmitir el movimiento de una a la otra. Sin embargo, esta configuración hace que la pieza en cuestión pueda rotar libremente, añadiendo un grado de libertad inútil. En los modelos reales estas piezas suelen encontrar un tope que elimina su movimiento de forma natural, sin embargo, los modelos virtuales que se trabajan en este proyecto no están preparados para detectar colisiones entre piezas, por tanto, estas girarán libremente sometidas la acción de la gravedad.

Existen otros motivos por los que, al definir el movimiento de un modelo puedan quedar grados de libertad. Por ejemplo, hay modelos cuyo movimiento está definido por dos de sus ruedas y no por las cuatro, de modo que al completar la definición del modelo tendrá dos grados de libertad, que se hallarán en las ruedas cuyo movimiento se defina por arrastre al entrar en contacto con el suelo.

7. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL

7.1. Introducción

Hasta el momento se ha especificado la forma de obtener un modelo cinemático auto-alineado desde la construcción del mismo hasta la definición del movimiento relativo de sus piezas mediante pares cinemáticos.

En este punto se explica cómo debe desarrollarse el modelo de forma que se pueda simular su movimiento, tanto de forma estática como sobre una base fija.

7.2. Simulación de movimiento en CosmosMotion

Mientras se trabaja en un modelo cinemático auto-alineado es necesario darse cuenta de los grados de libertad finales que este debe poseer para poder definirlos mediante la determinación de su movimiento. Cuando a una pieza que tiene un grado de libertad se le dota de un movimiento posible, ese movimiento está sujeto a las condiciones establecidas, por tanto ya no está libre y se ha eliminado el grado de libertad existente.

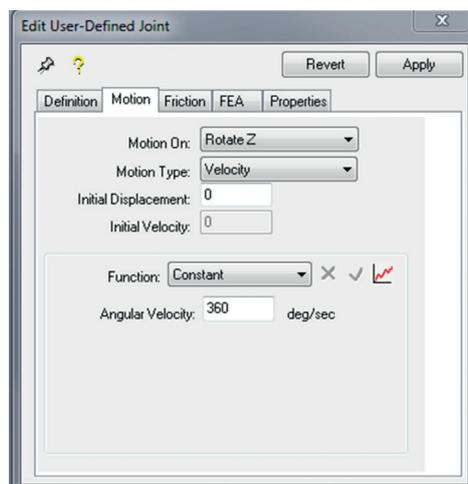
7.2.1. Definición del movimiento

Para proceder a definir el movimiento en un componente es necesario hacerlo en los pares cinemáticos adecuados, entendiendo que por ejemplo, a un par prismático (traslational) no se le puede dotar de movimiento rotatorio.

CosmosMotion cuenta con una serie de posibilidades a la hora de definir el movimiento usando expresiones distintas:

7.2.1.1. Constant

Mediante la definición de un desplazamiento, una velocidad o una aceleración constante se consigue que ésta mantenga su valor a lo largo de la duración de la simulación.



(Fig. 49. Definición de movimiento constante)

7.2.1.2. Harmonic

Utilizando esta función se puede crear una variación senoidal del movimiento. Para ello hay que definir los siguientes aspectos:

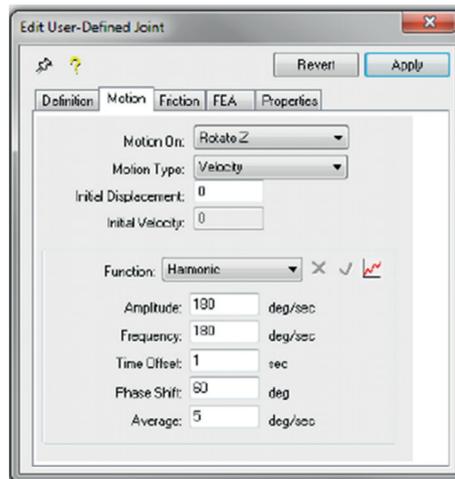
Amplitud: Diferencia entre valor máximo y mínimo de la magnitud.

Frecuencia: Recorrido en la función senoidal por unidad de tiempo.

Desfase temporal: Valor del instante de inicio dentro de la función.

Desplazamiento de fase: Desplazamiento en la dirección del eje de abscisas.

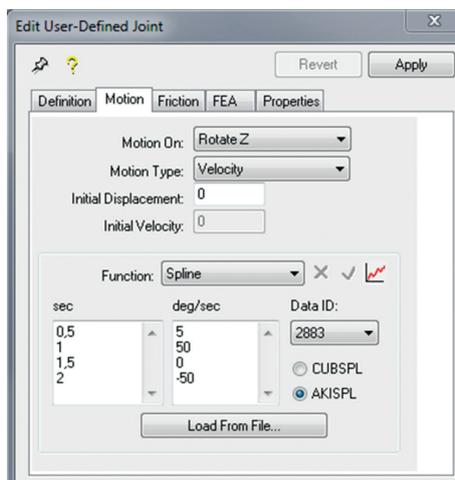
Valor medio: Valor que se encuentra en el centro de la función respecto del cual varía la magnitud.



(Fig.50. Definición de movimiento armónica)

7.2.1.3. Spline

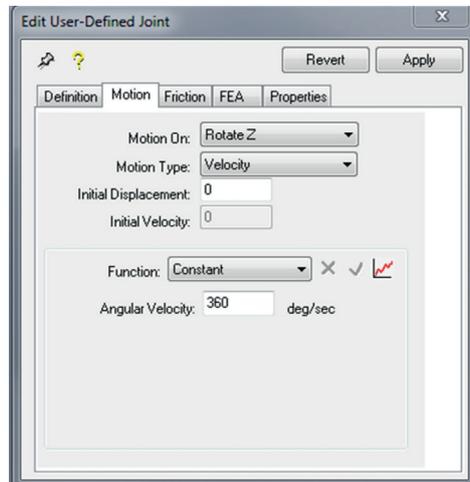
Con el uso de esta expresión es posible realizar simulaciones más elaboradas ya que permite definir el valor de la magnitud en diferentes instantes de tiempo interpolándolos entre los momentos definidos.



(Fig.51. Definición de movimiento spline)

7.2.1.4. Step

Esta expresión permite definir la variación de posición a la que se ve sometido un cuerpo entre dos instantes de tiempo, definiendo valores iniciales y finales tanto de la posición como del tiempo. Esta función permite funciones anidadas para un mayor detalle y control de la simulación.



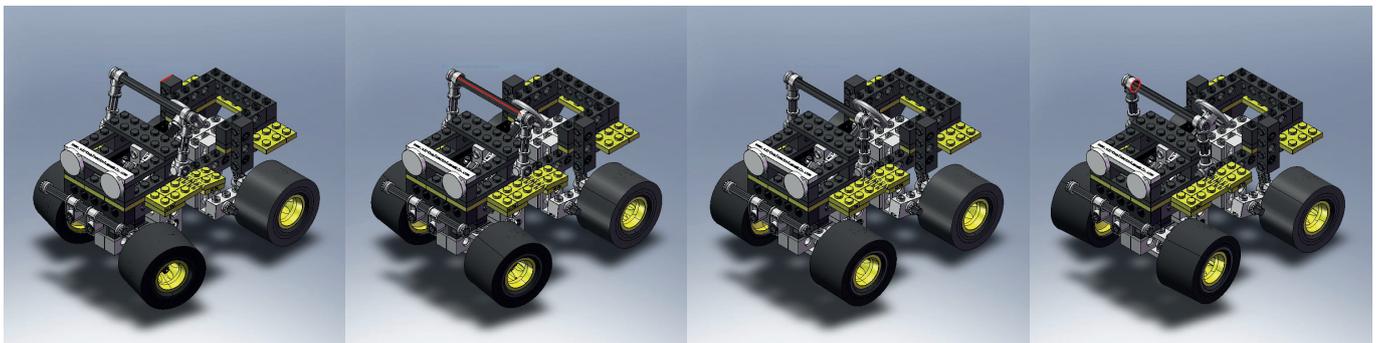
(Fig.52. Definición de movimiento paso)

7.3. Proceso de simulación

Teniendo en cuenta los parámetros de definición de movimiento explicados y partiendo de un modelo ensamblado, con las piezas compactadas y del cual se ha definido el modelo cinemático auto-alineado, se procede al proceso de simulación para poder visualizar el movimiento real de la máquina.

De nuevo, para poder ilustrar el proceso y facilitar su comprensión se recurre al modelo vLTm_8816-1, el cual, como ya se ha comentado, ha servido de guía en la fase de aprendizaje de este proyecto.

El primer paso consiste en la definición de los movimientos de aquellos mecanismos que lo necesitan. Con ello ya se puede recrear el movimiento de los mecanismos de la máquina respecto de la pieza estructura. Cabe destacar que, a la hora de dar valores al movimiento de rotación o traslación de una pieza a través del “joint” correspondiente, es imposible saber de antemano qué sentido tomará. Por ello es recomendable definir los movimientos uno a uno y proceder a su simulación para comprobar que el sentido es el deseado.



(Fig.53. Movimiento del modelo 8816-1 en lapsos de 0,25 segundos)

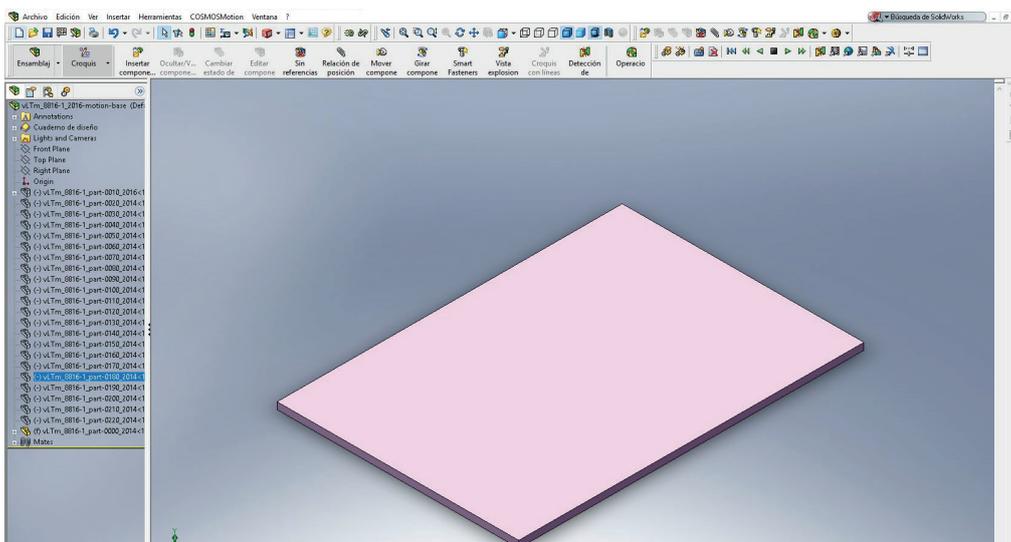
Simplemente definiendo los valores de los movimientos para un tiempo es posible obtener una simulación en la que se observe el funcionamiento del modelo en cuestión.

Sin embargo para una correcta visualización es menester realizar la simulación sobre una base. Para ello es necesario crear dicha base de forma que el vehículo tenga una superficie sobre la que desplazarse. Se deberán tener en cuenta las medidas del modelo a simular y el avance que este tendrá sobre la superficie, para no crear una base demasiado grande, ni demasiado pequeña.

A la pieza creada como base, se la debe denominar de forma similar al resto de piezas del modelo para que exista una coherencia y se mantenga el orden. De esta forma, el nombre que recibe dicha pieza responde al siguiente patrón:

$$vLTm_xxxx-x_part-0yy0_2018$$

En el caso de la pieza base, los valores “yy” se deben sustituir por “00”. Así se consigue homogeneizar el proceso en todos los modelos, en los que la base tendrá el mismo orden de pieza.

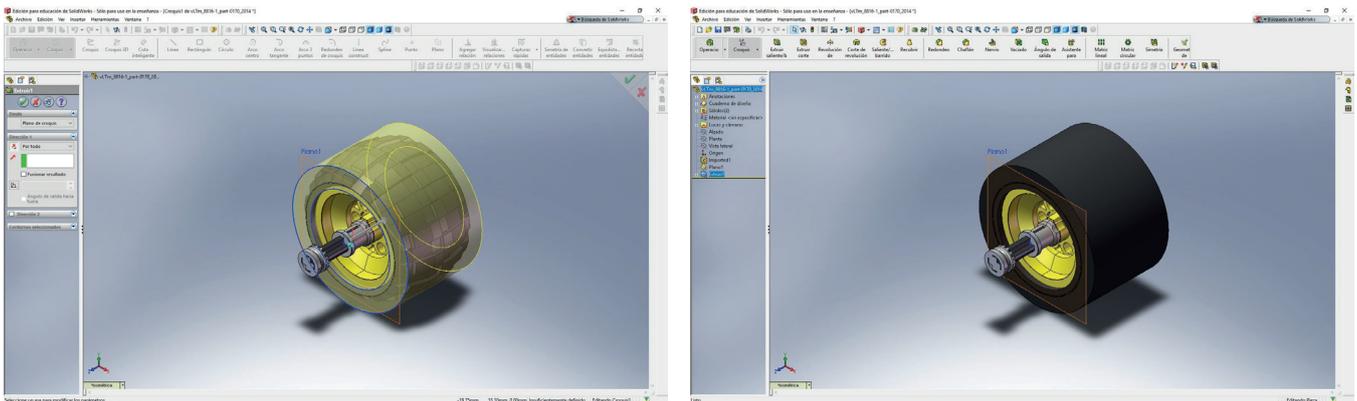


(Fig.54. vLTm_8816-1_part-0000_2018)

Con la pieza creada se debe insertar en el modelo cinemático ya elaborado como cuerpo base “Ground part”.

Al definir esta pieza como cuerpo base, el cuerpo base definido anteriormente (pieza que suele ser el chasis de la máquina) debe pasar a ser un cuerpo móvil, ya que se moverá respecto del cuerpo base.

La relación entre el modelo y la pieza base se establece mediante unos comandos de CosmosMotion denominados contactos o “contact” en inglés. Estos contactos se deben imponer entre la superficie de las ruedas y la pieza base. No obstante la geometría de las ruedas de los modelos Lego® Technic es demasiado compleja para que el ordenador la trabaje con fluidez. Así, es necesario realizar un proceso de cilindrado de la rueda. Dicha modificación consiste en abrir cada una de las piezas a editar y elaborar un croquis que más tarde se procede a extruir, teniendo especial cuidado en no fusionar el resultado. Dicha extrusión abarcará la longitud total de la rueda formando un cilindro que es mucho más fácil de calcular para el ordenador.

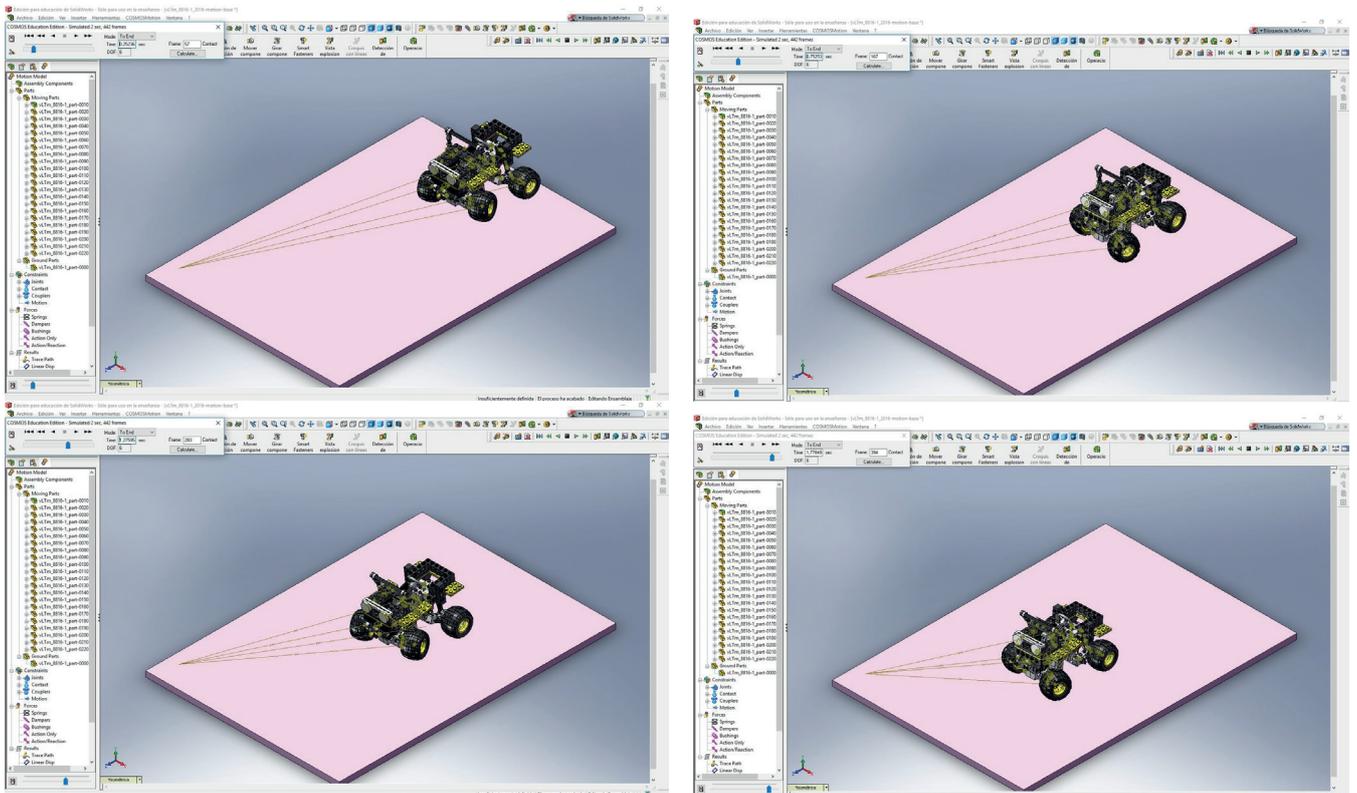


(Fig.55. Proceso cilindrado)

Una vez simplificada la geometría de la rueda, es posible establecer el contacto entre ésta y la base. Con ello se consigue que ambas superficies seleccionadas no se atraviesen durante la simulación, creando así un movimiento del modelo sobre la superficie.

Cuando la relación está implementada, es posible volver a la pieza rueda y ocultar, qué no eliminar ni suprimir, la extrusión que permite el cilindrado. De este modo, el programa sigue teniendo en cuenta el cilindrado para la simulación, pero visualmente se apreciarán las ruedas Lego® Technic. Cabe destacar que este último paso sólo es posible si se ha evitado que la extrusión fusione el resultado con la pieza disponible.

Para finalizar la simulación, únicamente resta comprobar que los movimientos definidos sean coherentes con el movimiento de la máquina real, y dotar a la simulación del tiempo necesario para que todos los movimientos sean apreciables.



(Fig.56. Movimiento modelo 8816-1 sobre base lapsos 0,5 segundos)

El programa Solid Works 2007 y su complemento CosmosMotion son capaces de realizar una simulación virtual dentro del entorno del programa, pero si se desea exportar la simulación es necesario recurrir a una versión más actual. En el desarrollo de este trabajo se ha utilizado la versión 2016, que no es la más actual del mercado, pero sí lo suficiente para lo que se pretende realizar y era de fácil acceso.

Cuando se dispone de la simulación realizada se guarda el documento. La mejor manera de proceder para guardar una copia de la versión de 2007 que poder editar es copiar la carpeta entera en la que se encuentra el modelo realizado y cada una de sus piezas y componentes que los forman y pegar dicha carpeta añadiendo el sufijo de la versión del programa con la que se pretende trabajar, en este caso “-2016”.

Seguidamente se abre el archivo en el que se ha realizado la simulación sobre la base en la versión más actual. Es necesario volver a simularla con esta versión, de modo que lo primero que se debe hacer es proceder a la eliminación de la simulación realizada y volver a calcularla. Una vez el programa ha terminado la nueva simulación se puede guardar el archivo y se puede exportar. El proceso seguido durante la elaboración de este proyecto ha sido exportar la simulación a un fichero eDrawings, programa que sirve para abrir archivos elaborados en programas de CAD y visualizar sus simulaciones.

Con ello se da por concluido el proceso de virtualización y simulación de modelos virtuales Lego© Technic, que se puede aplicar a cualquier máquina real.

8. MODELOS SIMULADOS

Este proyecto consta de dos fases diferenciadas. Durante la primera fase del proyecto se adquieren los conocimientos necesarios para poder realizar los modelos cinemáticos auto-alineados. En esta primera fase se trabaja siguiendo una serie de videos preparados por el profesor a cargo de este proyecto, en los que se detalla punto por punto los pasos a seguir para realizar la virtualización de los modelos y su posterior auto-alineación.

Durante la segunda fase se desarrollan el resto de modelo de forma autónoma, durante la cual se deben aplicar los conocimientos y formas de proceder adquiridos en la primera fase.

Cabe destacar que el proceso mediante el cual se lleva a cabo la completa definición de un modelo consta de cuatro partes, que se han explicado en puntos anteriores de este proyecto (3. Metodología). Siendo así, cada una de estas partes tiene su propia fase de aprendizaje y su fase de trabajo autónomo, siendo que no se accede a la segunda parte del proceso si no se ha completado la primera. Hay que recordar que la parte de compactación de piezas (segunda de la metodología seguida) ha sido completamente desarrollada por el profesor a cargo de este proyecto, por tanto, no cuenta con fase de aprendizaje ni de trabajo autónomo.

A continuación se muestra la colección de modelos que se han desarrollado durante la elaboración de este proyecto.

8.1. Modelos Isogawa Yoshihito

Uno de los objetivos del proyecto es la asimilación de los conocimientos necesarios para poder realizar las simulaciones de modelos complejos, por tanto, es lógico comenzar con los modelos de Isogawa Yoshihito.

El ya mencionado autor ha realizado construcciones de apariencia sencilla que dan solución a grandes retos, siempre haciendo gala de su capacidad creativa y apostando por la simplicidad.

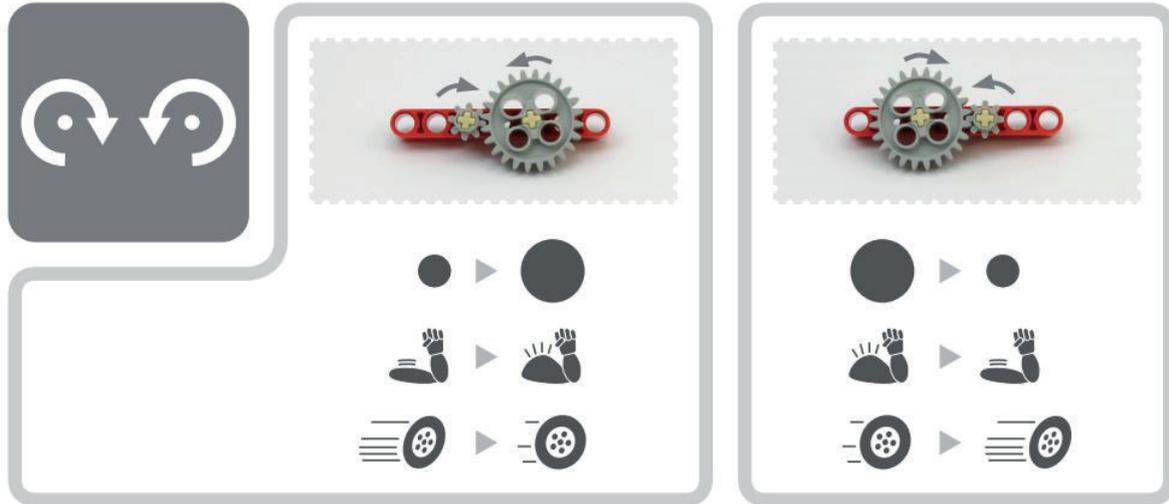
En las publicaciones de Isogawa Yoshihito no aparecen, de forma contraria a lo que son las propuestas de Lego®, instrucciones detalladas explicando paso a paso como llegar al modelo final, sino que facilita, al inicio, una serie de detalles cruciales sobre los cuales se desarrollan los modelos y luego, gracias a fotografías tomadas desde distintos ángulos del modelo real, se puede copiar o utilizarse como referencia.

Como primera actividad práctica, se propone la creación de una serie de modelos simples del autor, 21 concretamente, en los que se pueden adquirir los conocimientos básicos tanto del ensamblaje de componentes como las relaciones existentes entre los componentes Lego® y el funcionamiento de los mecanismos básicos. Durante este ejercicio se realiza únicamente la virtualización del modelo, ni su auto-alineación ni su posterior simulación.

Estos modelos están divididos en 2 tipos diferentes: por una parte los modelos denominados “Tora”, proceden del libro “Lego® Technic Tora no Maki”, donde se presentan soluciones mecánicas en algunos modelos sencillos. Por su parte, los modelos denominados “Ev3” provienen del libro “The Lego® Mindstorms EV3 Idea Book”, donde no se han utilizado solo componentes Lego® Technic, sino también componentes de la serie Mindstorm, como son motores. Cabe mencionar que la serie Mindstorm parte de los mismos componentes base de la serie Technic, con los añadidos de los componentes eléctricos. Estos 21 modelos han formado parte de la fase de aprendizaje, en la que se han seguido videos de como proceder. Los correspondientes a la serie “Tora” son video sin soporte de audio, mientras que los videos referentes a la serie “Ev3” sí disponen de soporte audiovisual.

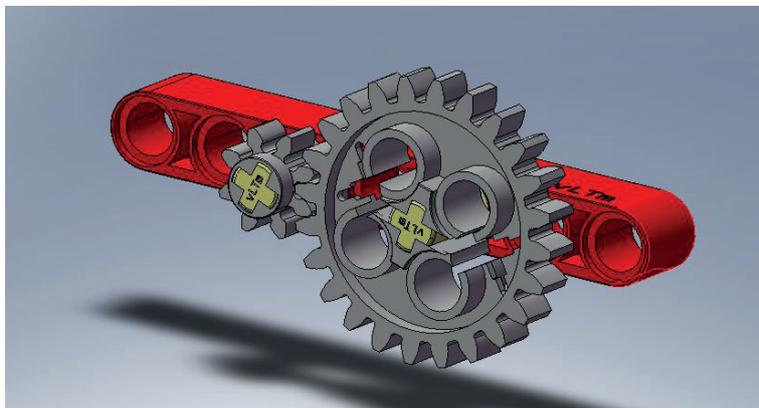
Para finalizar con los modelos de Isogawa Yoshihito se ha realizado un par más de modelos que se han definido de forma más completa que los 21 anteriores, son los llamados Ev3-0108 y pw-085, en los cuales se ha procedido a su virtualización, auto-alineación y simulación como parte de la fase de trabajo autónomo.

8.1.1. Tora 002



(Fig.57. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

Este modelo representa un mecanismo básico de transmisión de movimiento rotatorio mediante el uso de ruedas dentadas. Las ruedas dentadas constan de 8 y 24 dientes, por tanto la ventaja mecánica que presentan es 8:24, o lo que es lo mismo, 1:3

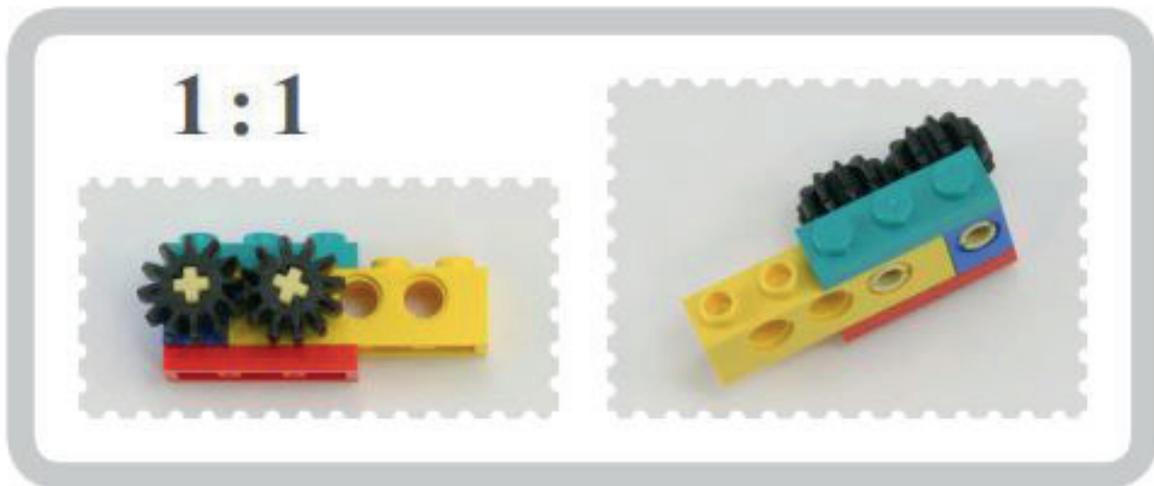


(Fig.58. Modelo tora 002)



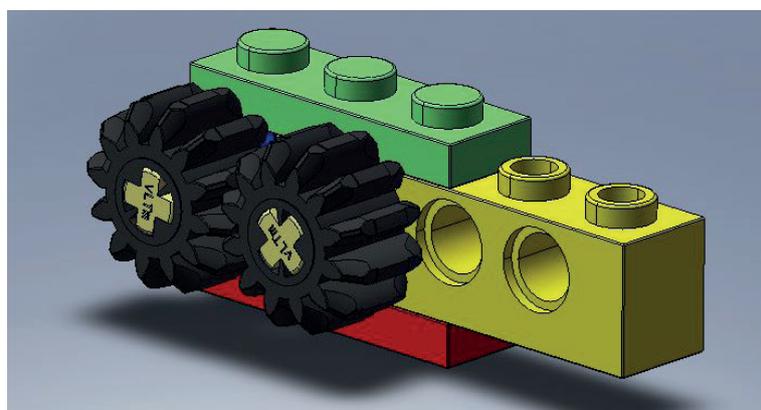
(Fig.59. Componentes modelo tora 002)

8.1.2. Tora 008



(Fig.60. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este modelo se aprecia una configuración similar al anterior. Si bien el anterior tenía como base para los engranajes una viga, aquí es un ladrillo con agujeros. En este caso, las ruedas cuentan las dos con 12 dientes.

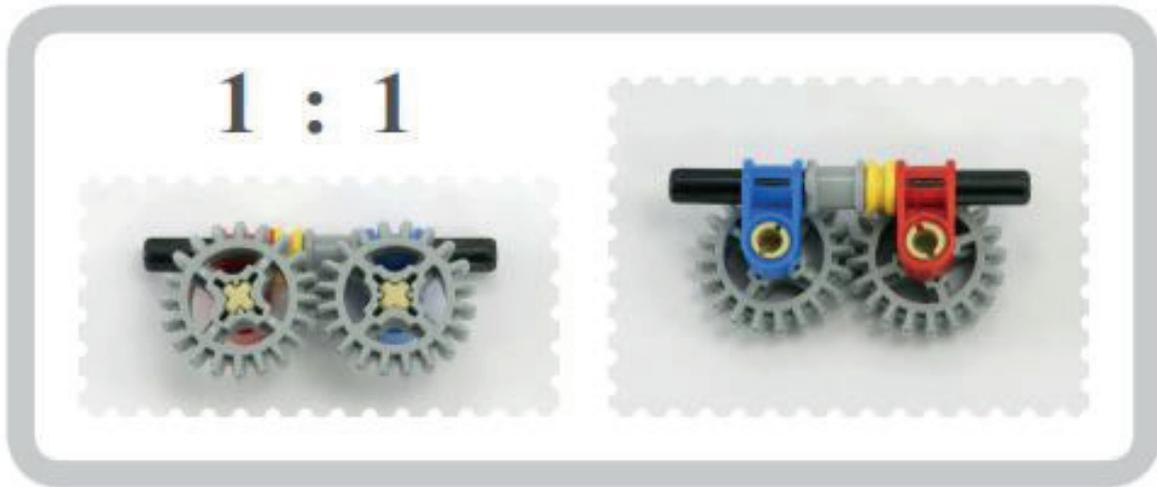


(Fig.61. Modelo tora 008)



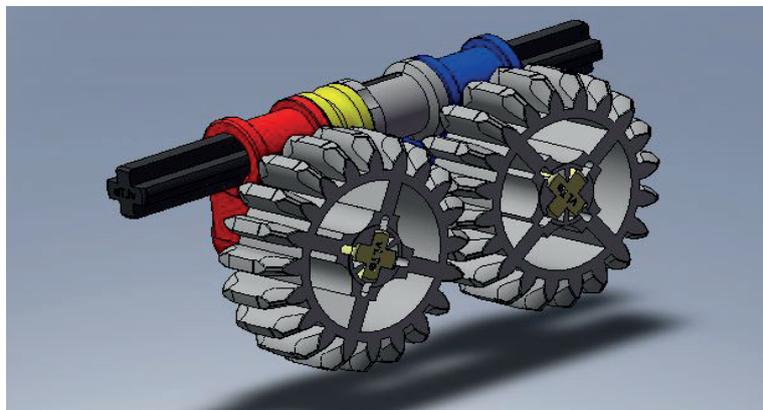
(Fig.62. Componentes modelo tora 008)

8.1.3. Tora 009



(Fig.63. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

Un modelo que, nuevamente, transmite el movimiento rotatorio a través de ruedas dentadas. En este se aprecia una configuración con dos ruedas de 20 dientes en la que es posible advertir la distancia necesaria en unidades Lego© que estos engranajes deben tener para funcionar correctamente.

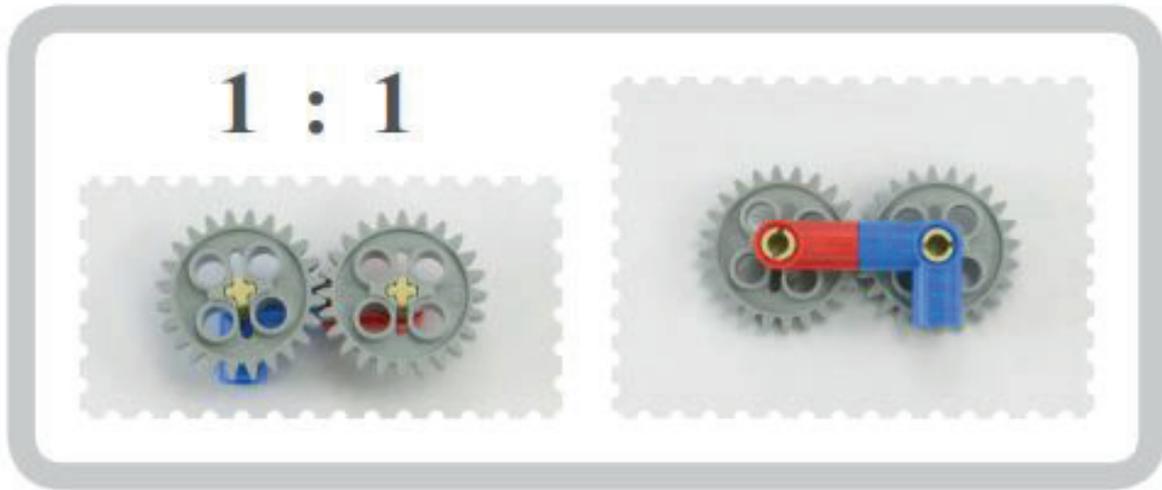


(Fig.64. Modelo tora 009)



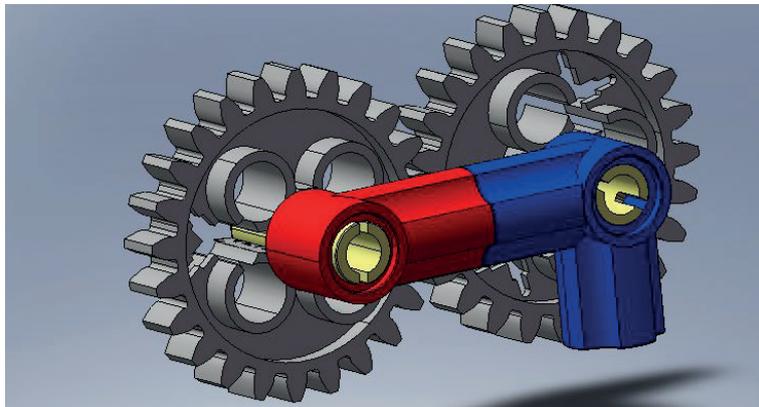
(Fig.65. Componentes modelo tora 009)

8.1.4. Tora 013



(Fig.66. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

De forma similar a los modelos anteriores, el mecanismo representa la transmisión de movimiento rotativo. En este caso se muestra las ruedas que tienen el tamaño necesario (24 dientes) para poder encajar con los componentes que están unidos.

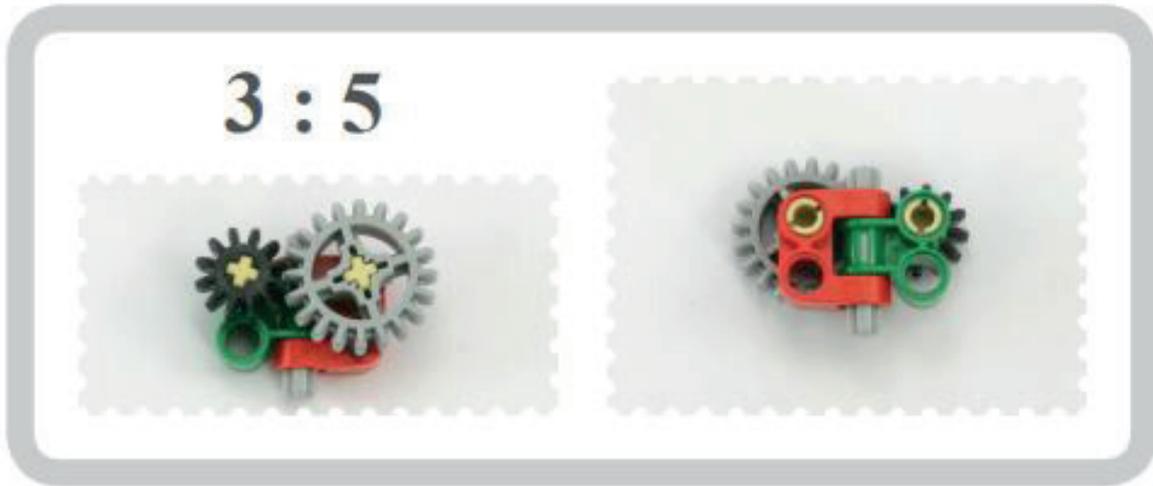


(Fig.67. Modelo tora 013)



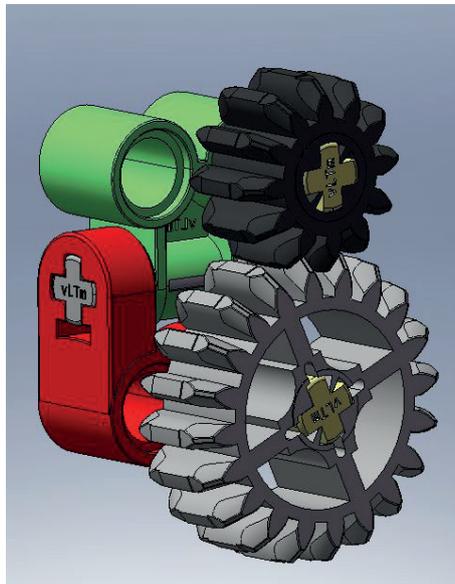
(Fig.68. Componentes modelo tora 013)

8.1.5. Tora 026



(Fig.69. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

El modelo muestra una composición de transmisión de movimiento rotatorio con una ventaja cinemática de 3:5, usando una rueda de 12 dientes y otra de 20.

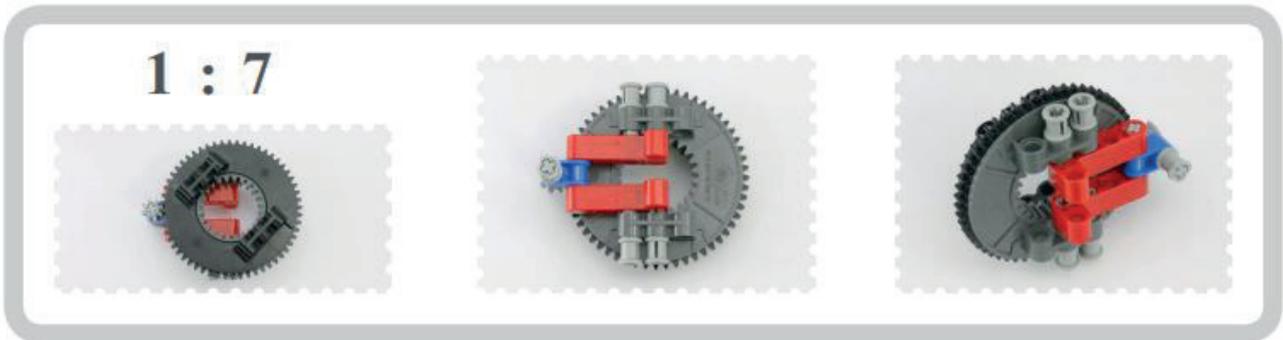


(Fig.70. Modelo tora 026)



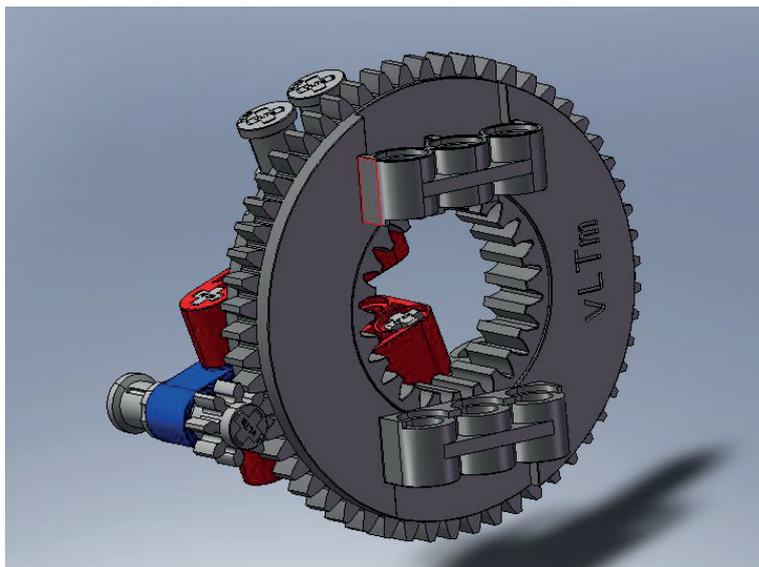
(Fig.71. Componentes modelo tora 026)

8.1.6. Tora 037



(Fig. 72. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este mecanismo comienzan a aparecer componentes distintos que se utilizarán en la elaboración de modelos más complejos. La utilidad de este mecanismo es la misma que los mostrados anteriormente con una ventaja, en este caso de 1:7.

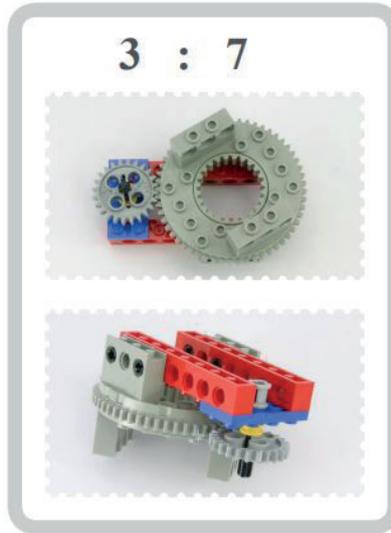


(Fig. 73. Modelo tora 037)



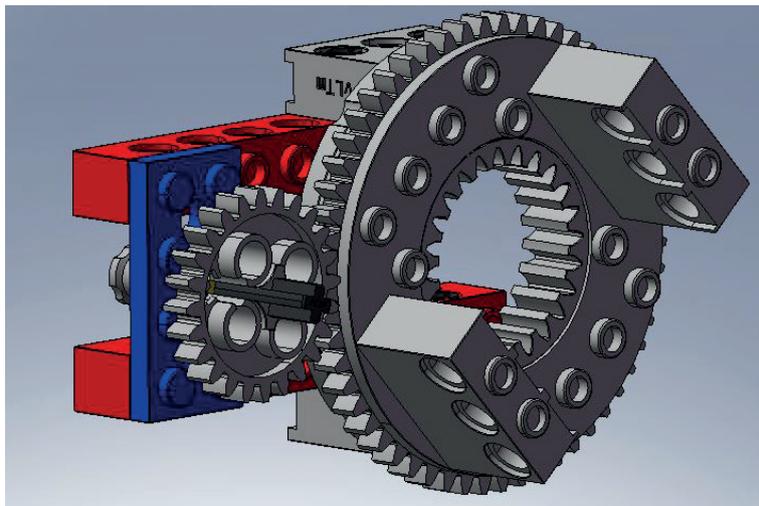
(Fig. 74. Componentes modelo tora 037)

8.1.7. Tora 040



(Fig. 75. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

Este mecanismo es una solución muy similar al anterior pero aportando las dimensiones necesarias para obtener una ventaja de 3:7.



(Fig. 76. Modelo tora 040)



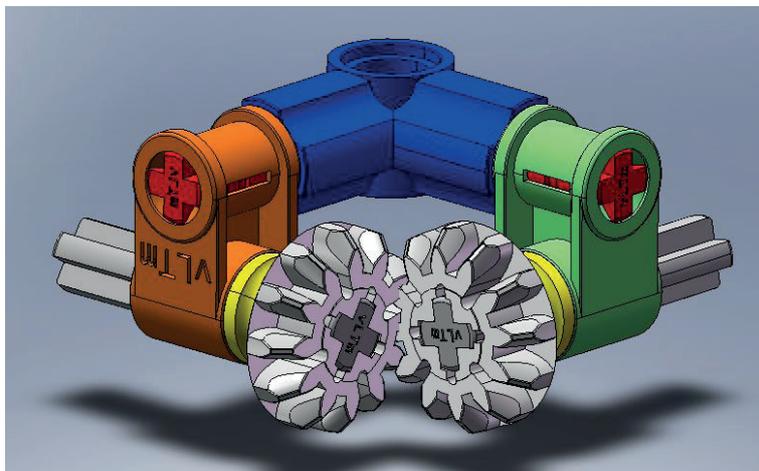
(Fig. 77. Componentes modelo tora 040)

8.1.8. Tora 051



(Fig. 78. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este mecanismo se sigue transmitiendo el movimiento rotatorio, como en los mecanismo vistos hasta el momento, pero en este caso hay un cambio de plano en entre los dos giros. La rueda dentada utilizada en este montaje solo es capaz de transmitir el movimiento a engranajes cuyo eje de rotación sea perpendicular al propio.



(Fig. 79. Modelo tora 051)



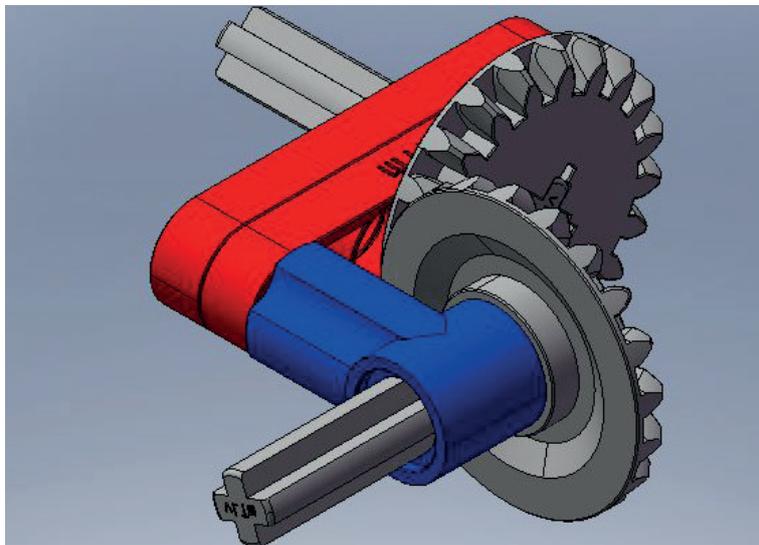
(Fig. 80. Componentes modelo tora 051)

8.1.9. Tora 059



(Fig.81. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

El mecanismo que se presenta ahora tiene una configuración muy similar al anterior, con sendas ruedas iguales que en este caso constan de 20 dientes, a diferencia del caso anterior que poseían 12.

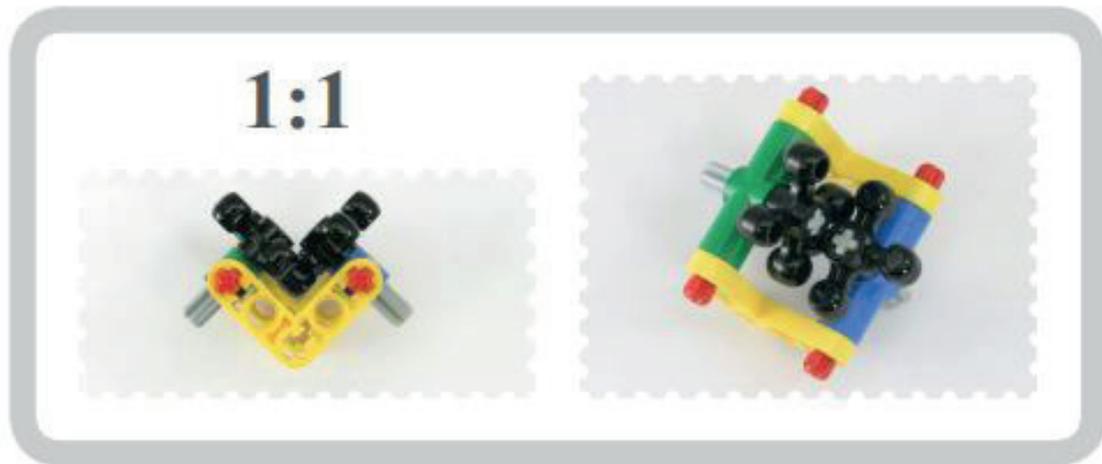


(Fig.82. Modelo tora 059)



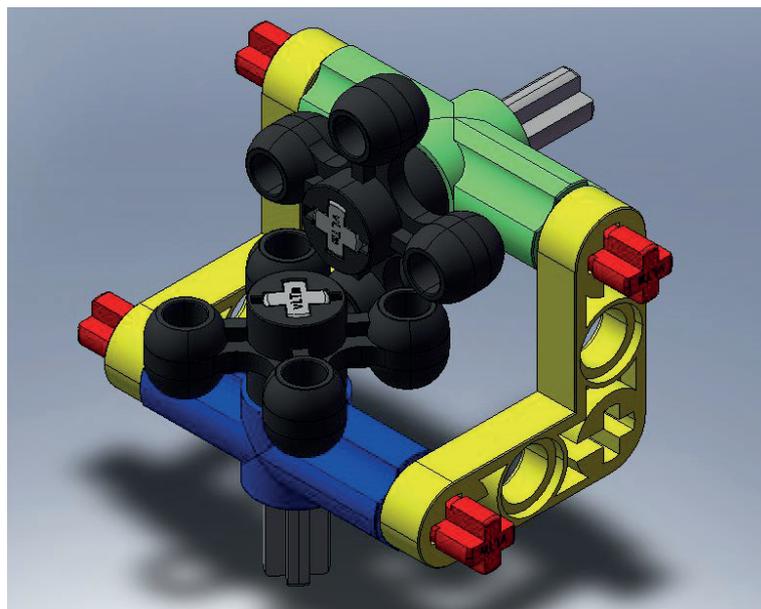
(Fig.83. Componentes modelo tora 059)

8.1.10. Tora 062

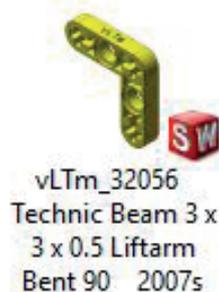


(Fig.84. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

Este mecanismo presenta un nuevo tipo de rueda que permite la transmisión de movimiento rotatorio. A diferencia de las dos anteriores, esta permite dicha transmisión tanto en planos paralelos como perpendiculares.



(Fig.85. Modelo tora 062)



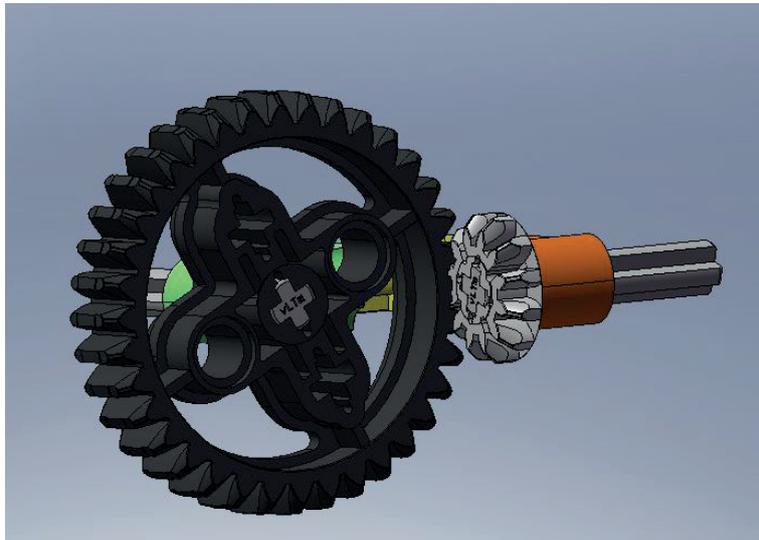
(Fig.86. Componentes modelo tora 062)

8.1.11. Tora 075



(Fig.87. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este mecanismo se aprecia una de las particularidades de las ruedas dentadas de los modelos Lego©, y es que algunos de ellas son capaces de transmitir el movimiento rotatorio tanto en un plano paralelo como en uno perpendicular.

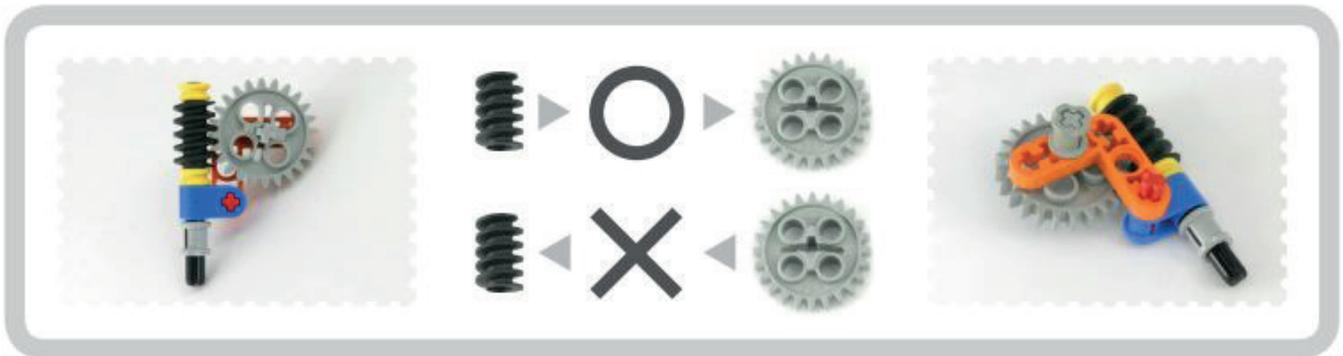


(Fig.88. Modelo tora 075)



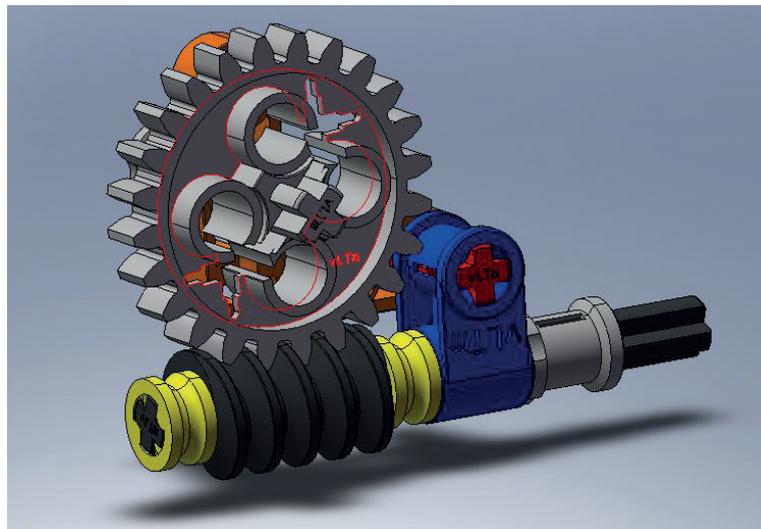
(Fig.89. Componentes modelo tora 075)

8.1.12. Tora 079



(Fig.90. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este modelo se puede observar la configuración de un tornillo sin fin. Cabe destacar que, aunque virtualmente es posible determinar que sea la rueda dentada la que transmita el movimiento al sin fin, esto no es una posibilidad en los mecanismo reales. En este tipo de configuraciones, para que la rueda dentada de una vuelta completa el sin fin debe dar una vuelta por cada diente de la rueda.



(Fig.91. Modelo tora 079)



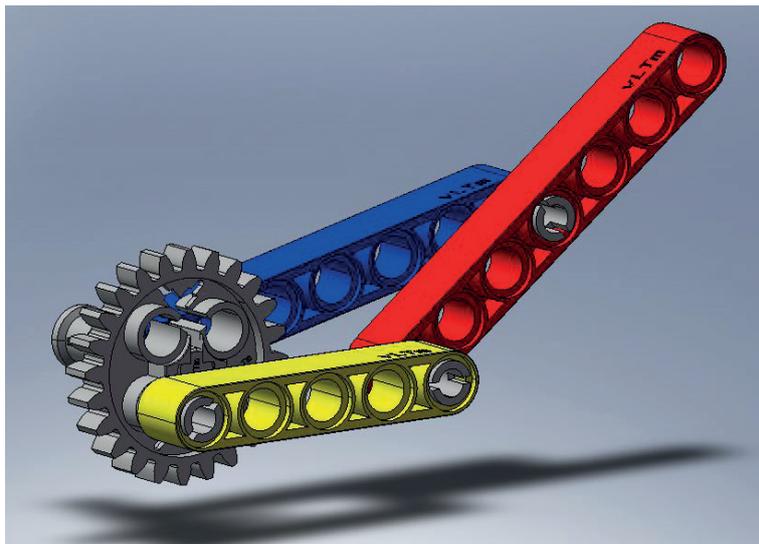
(Fig.92. Componentes modelo tora 079)

8.1.13. Tora 093



(Fig.93. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este modelo la aparición de una rueda dentada es puramente anecdótico. La rueda hace las veces de actuador, transmitiendo el movimiento al componente azul, y este al rojo. En esta configuración la rueda es capaz de dar vueltas completas y como consecuencia, el extremo libre del componente rojo describe arcos con centro en su unión con el componente amarillo.

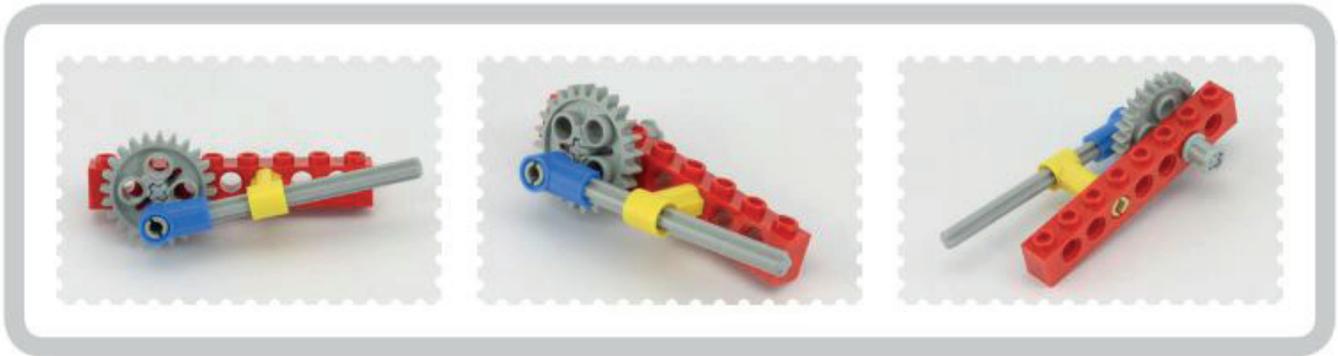


(Fig.94. Modelo tora 093)



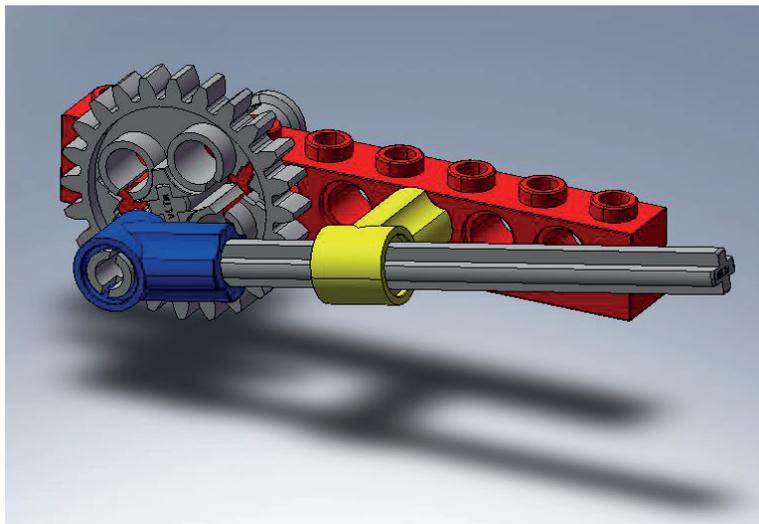
(Fig.95. Componentes modelo tora 093)

8.1.14. Tora 098



(Fig.96. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

El funcionamiento de este mecanismo es similar al anterior, entendiendo que en este caso la rueda dentada es también el actuador. El movimiento que la rueda imprime sobre el componente azul se corresponde con el que efectúa el extremo de la barra conectada al mismo, ya que este caso describe movimientos circulares completos.

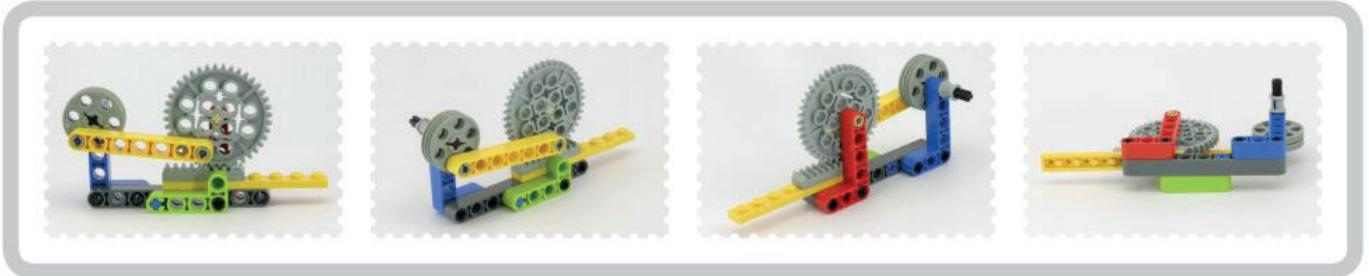


(Fig.97. Modelo tora 098)



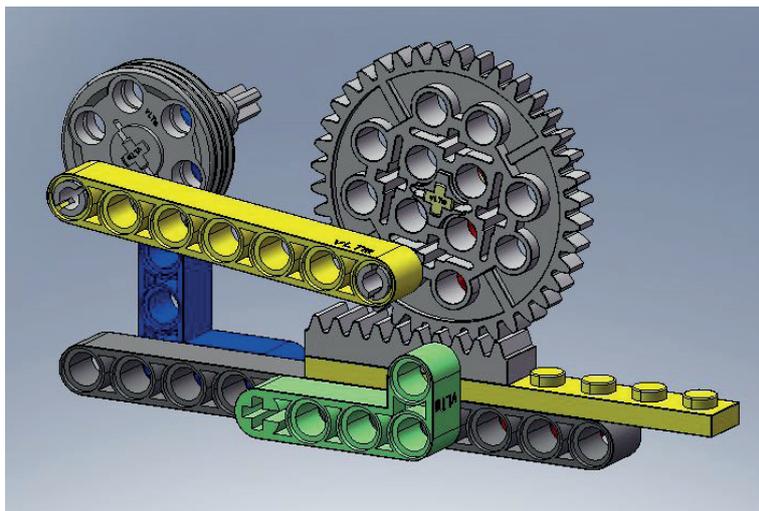
(Fig.98. Componentes modelo tora 098)

8.1.15. Tora 102

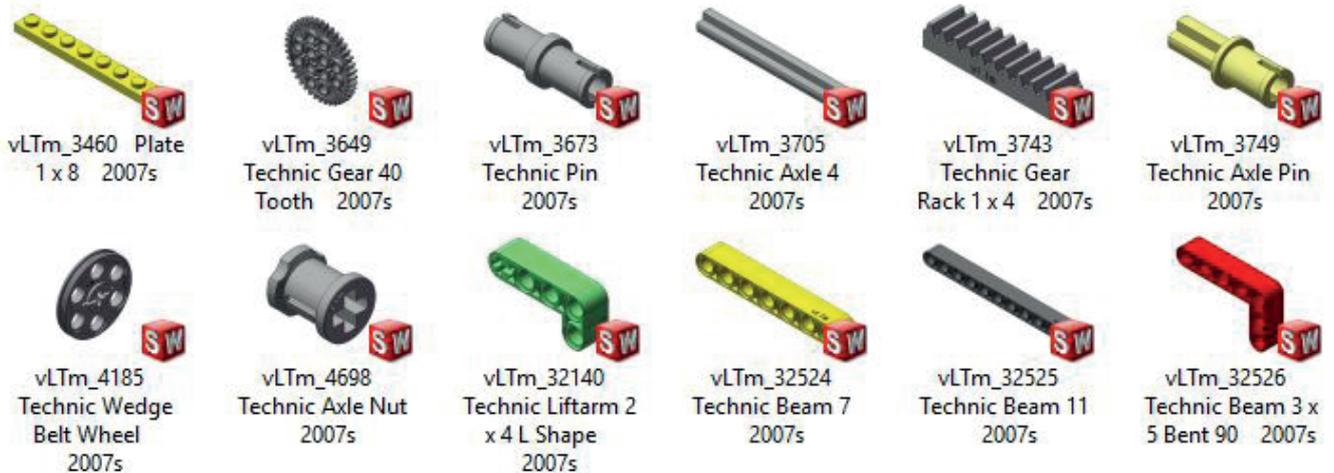


(Fig.99. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

En este mecanismo aparecen dos componentes que tiene una relación de piñón-cremallera entre ellos. La configuración de este mecanismo permite que la aplicación de un movimiento de rotación sobre la rueda pequeña de como resultado un movimiento de vaivén en la pieza que da forma a la cremallera.



(Fig.100. Modelo tora 102)



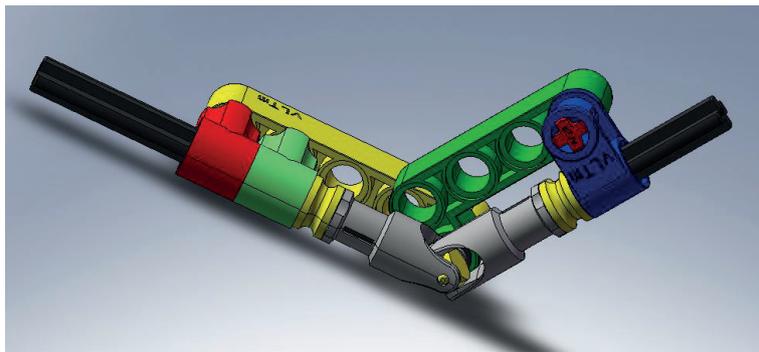
(Fig.101. Componentes modelo tora 102)

8.1.16. Tora 107

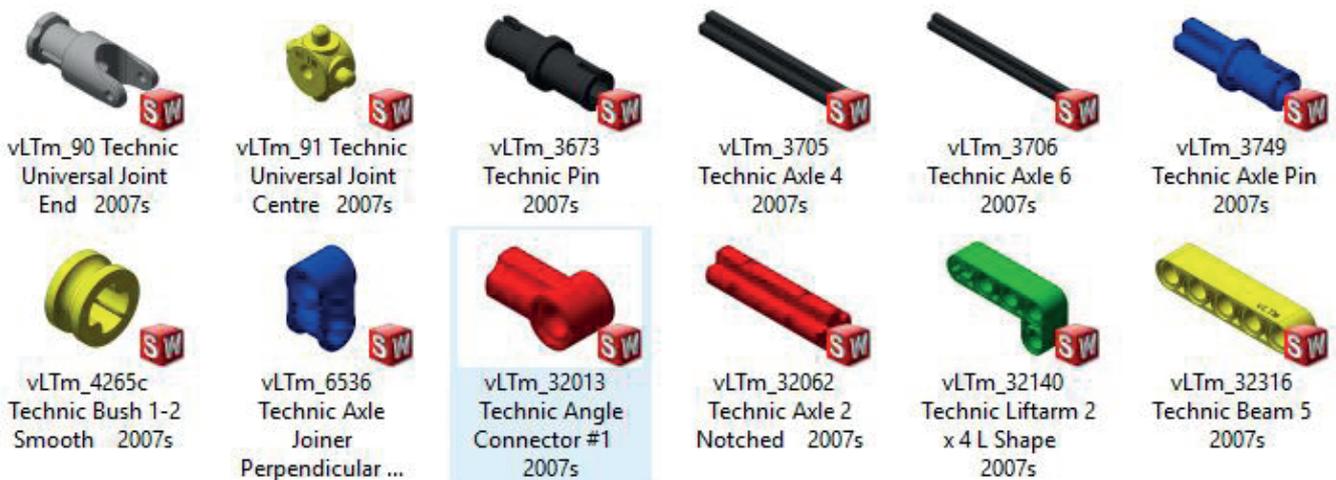


(Fig.102. Imagen extraída de: Y. Isogawa, Lego© Technic Tora no Maki)

Este último mecanismo realizado de la serie “Tora” presenta unos componentes que permiten la transmisión de movimiento de rotación de un eje a otro que presente movilidad sobre este.

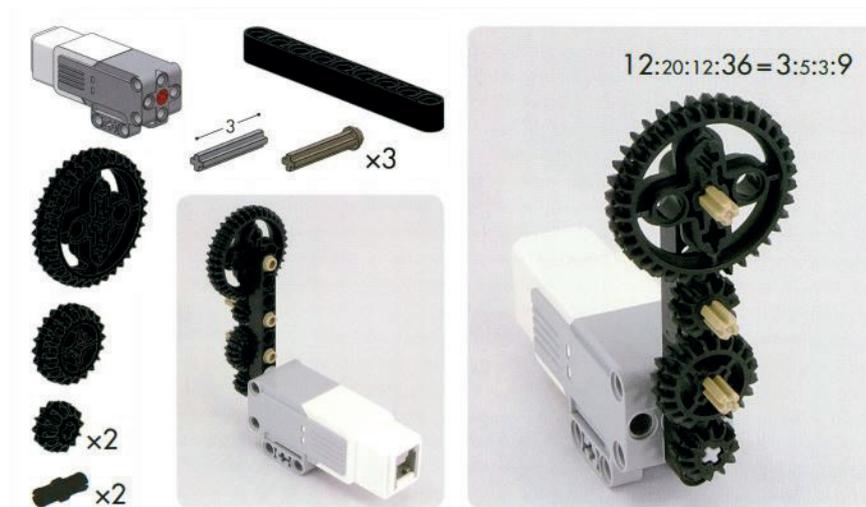


(Fig.103. Modelo tora 107)



(Fig.104. Componentes modelo tora 107)

8.1.17. Ev3-0024

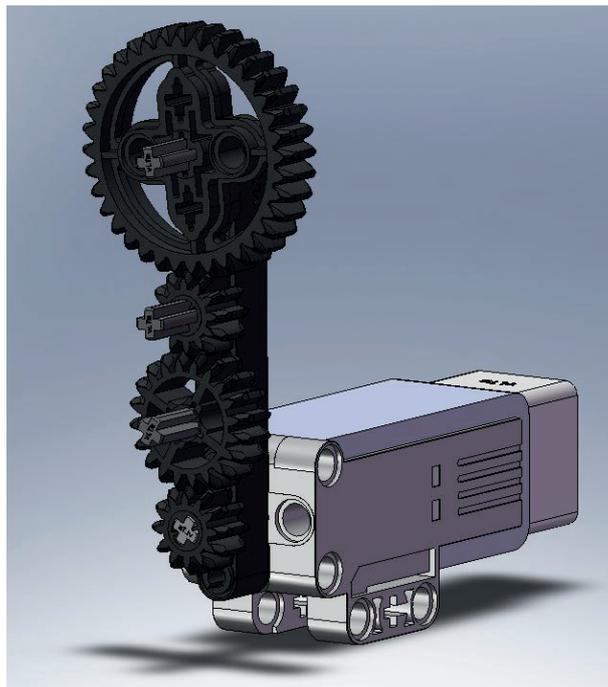


(Fig.105. Imagen extraída de: Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*)

Este modelo pertenece a la serie de Mindstorms, y se puede diferenciar fácilmente de la serie Technic por la aparición de un pequeño motor que se encargará de imprimir el movimiento.

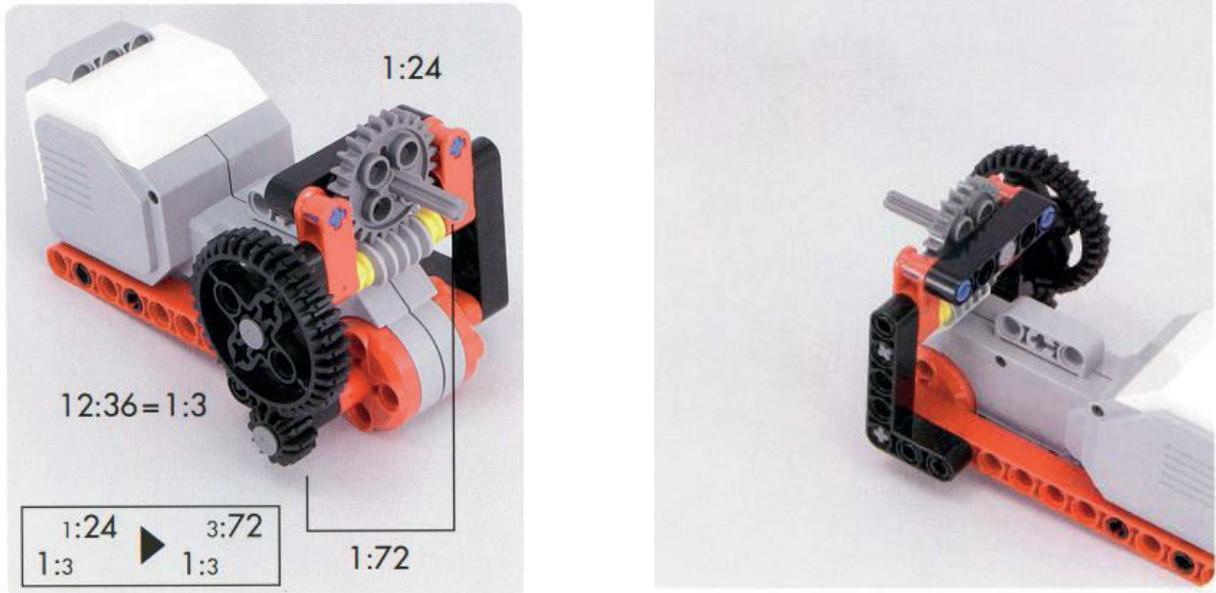
El modelo presenta una serie de engranajes de tamaños distintos en los que se aprecia la distancia necesaria en unidades Lego© para su correcto montaje. En la imagen (Fig. 105) se puede apreciar la ventaja cinemática que otorga en relación al número de dientes de las ruedas que lo componen.

El funcionamiento es simple y fácil de intuir ya que el motor imprimirá un movimiento de rotación en la rueda que está en contacto con él y este se transmitirá por el conjunto de ruedas hasta llegar a la última, que dará una vuelta completa por cada 3 vueltas que dé la rueda pequeña.



(Fig.106. Modelo Ev3-0024)

8.1.18. Ev3-0050

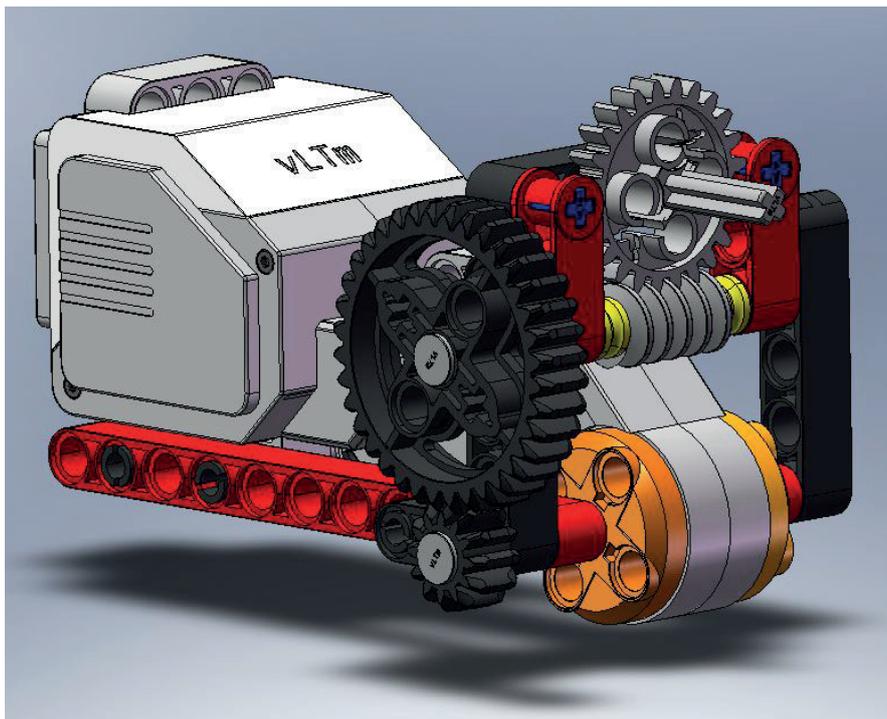


(Fig.107. Imagen extraída de: Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*)

En este modelo se conectan un par de ruedas dentadas que sirven para transmitir el movimiento del motor a un tornillo sin fin. Este último transmite a su vez un movimiento a la rueda dentada que está en contacto con él.

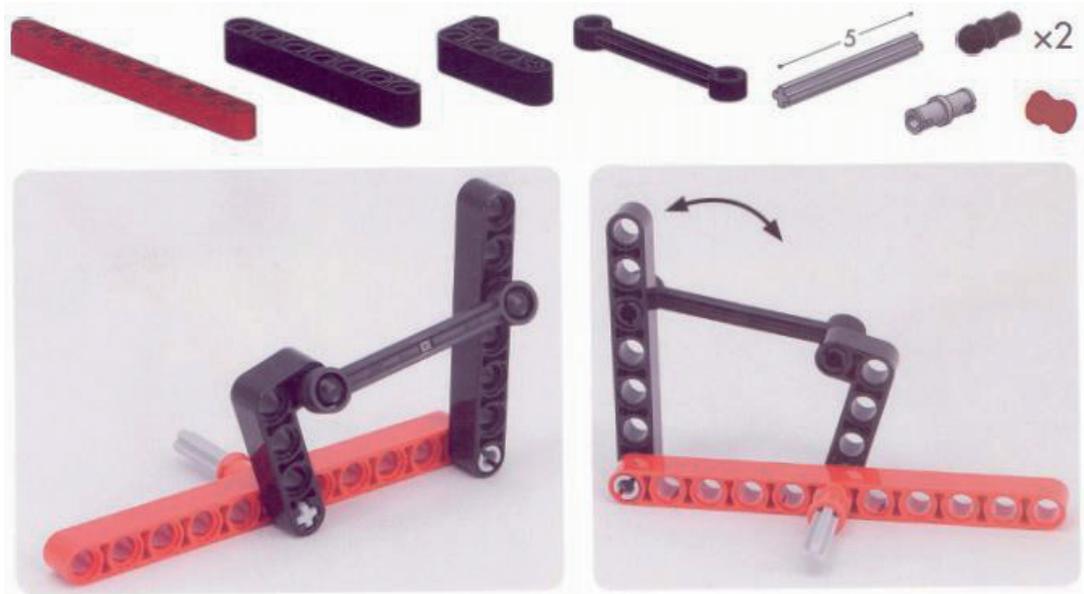
El modelo resuelve una serie de cambios de plano en la transmisión del movimiento.

Además, como se puede observar en la imagen (Fig.107) la ventaja que se obtiene de la relación entre los distintos componentes es de 1:72.



(Fig.108. Modelo Ev3-0050)

8.1.19. Ev3-0053



(Fig.109. Imagen extraída de: Y. Isogawa, The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book)

Este mecanismo cuenta con una configuración similar a la que se ha visto en el modelo tora 093. El atractivo de virtualizar este modelo se debe a la aparición de un componente que cuya forma de montaje con los componentes con lo que entra en contacto es esférica.

De forma análoga al modelo mencionado, cuando el componente con forma de L da vueltas completas, la viga negra describe arcos de circunferencia.



(Fig.110. Modelo Ev3-0053)

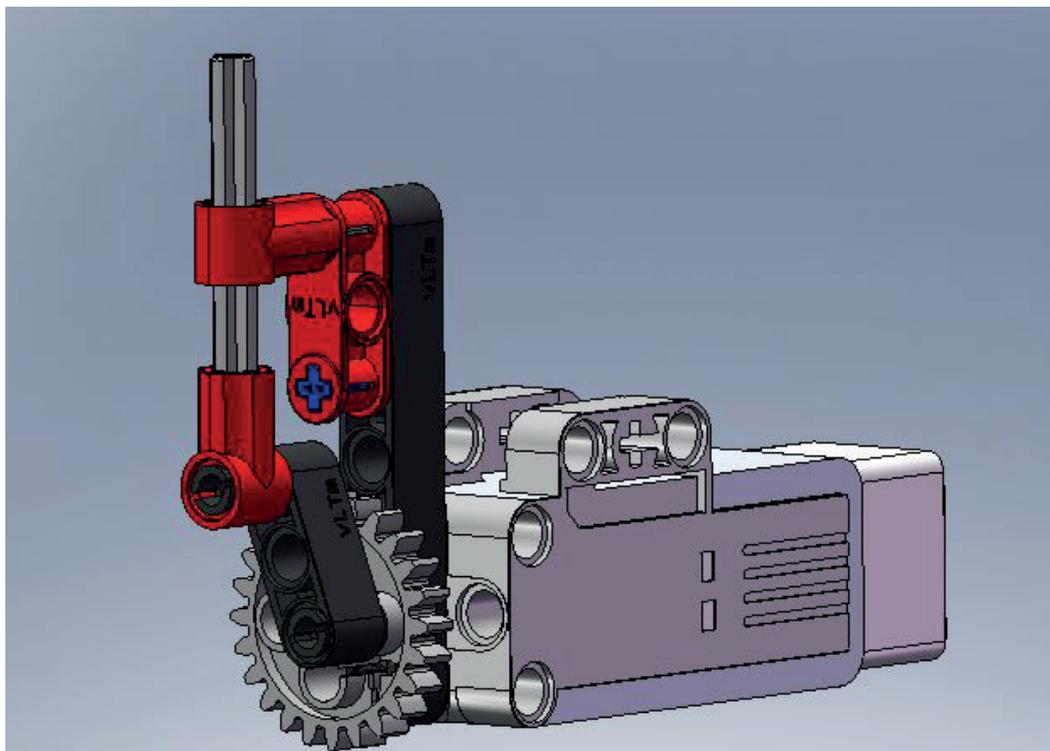
8.1.20. Ev3-0069



(Fig.111. Imagen extraída de: Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*)

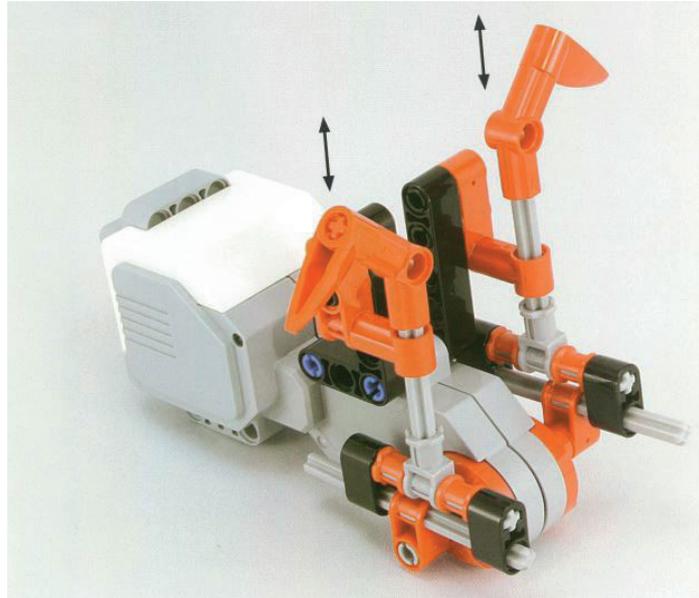
Este modelo presenta un mecanismo que convierte un movimiento de rotación en uno de traslación. Los motores están limitados a este primer tipo de movimiento, por ello este tipo de mecanismo resulta realmente útil.

El movimiento se genera en la rueda, que empieza a girar, y por la disposición de las piezas la barra gris describe un movimiento de vaivén vertical.



(Fig.112. Modelo Ev3-0069)

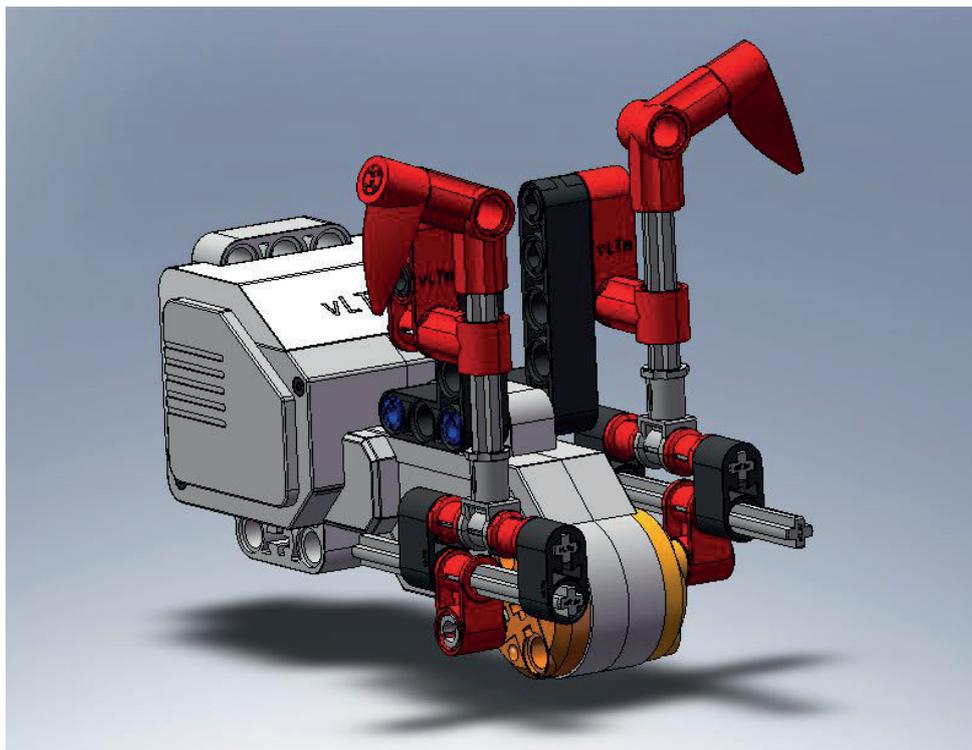
8.1.21. Ev3-0134



(Fig.113. Imagen extraída de: Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*)

Este modelo da solución al mismo problema que se ha visto en el modelo anterior, la conversión de un movimiento de rotación a uno de traslación.

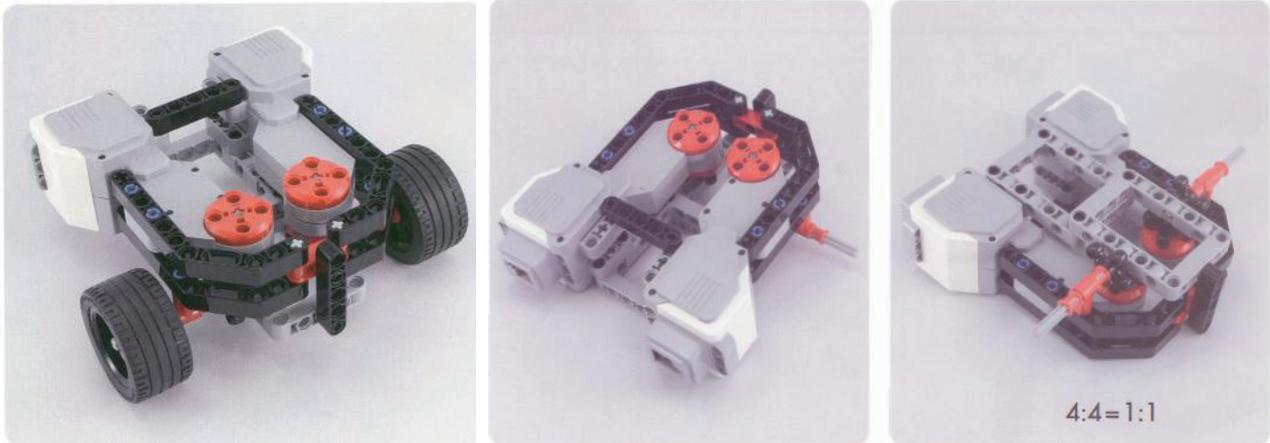
No obstante, en este caso el movimiento de traslación está duplicado respecto al movimiento de rotación, con un desfase entre ellos de 180 grados. De esta forma, cuando una de las piezas que efectúan el movimiento de vaivén está en su punto máximo, la otra está en el mínimo.



(Fig.114. Modelo Ev3-0134)

8.1.22. Ev3-0108

El modelo Ev3-0108 no solo se ha virtualizado como en el resto de modelos visto hasta ahora, sino que también se ha procedido a su auto-alineación y a su simulación.



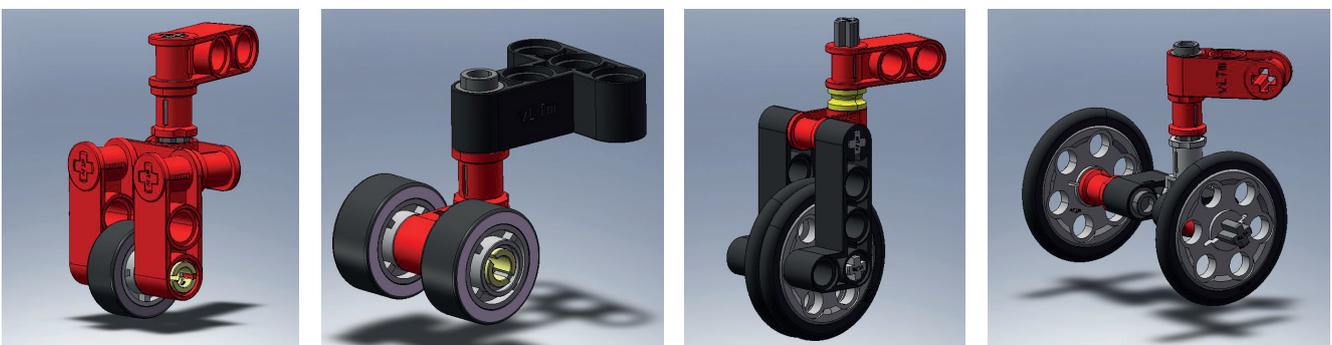
(Fig.115. Imagen extraída de: Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*)

A diferencia de los modelos vistos hasta ahora, el modelo Ev3-0108 presenta dos motores, con sendos mecanismo de transmisión idénticos (aunque simétricos) del movimiento del motor a la rueda. Con este tipo de configuración se consigue que determinando la velocidad de giro de los motores, el modelo avance, retroceda o pueda girar a izquierda y derecha.

No obstante el modelo no está completo por sí solo, ya que en este estado, al disponer solo de dos ruedas, la parte trasera del modelo está en contacto con el suelo. Para ello es necesario dotar al modelo de un tercer punto de apoyo mediante lo que en los libros de Isogawa Yoshihito se denominan “caster wheels”.

El primer paso para la construcción de este modelo es proceder con la fase de ensamblaje del propio modelo Ev3-0108, apoyado por las imágenes que isogawa proporciona en su libro.

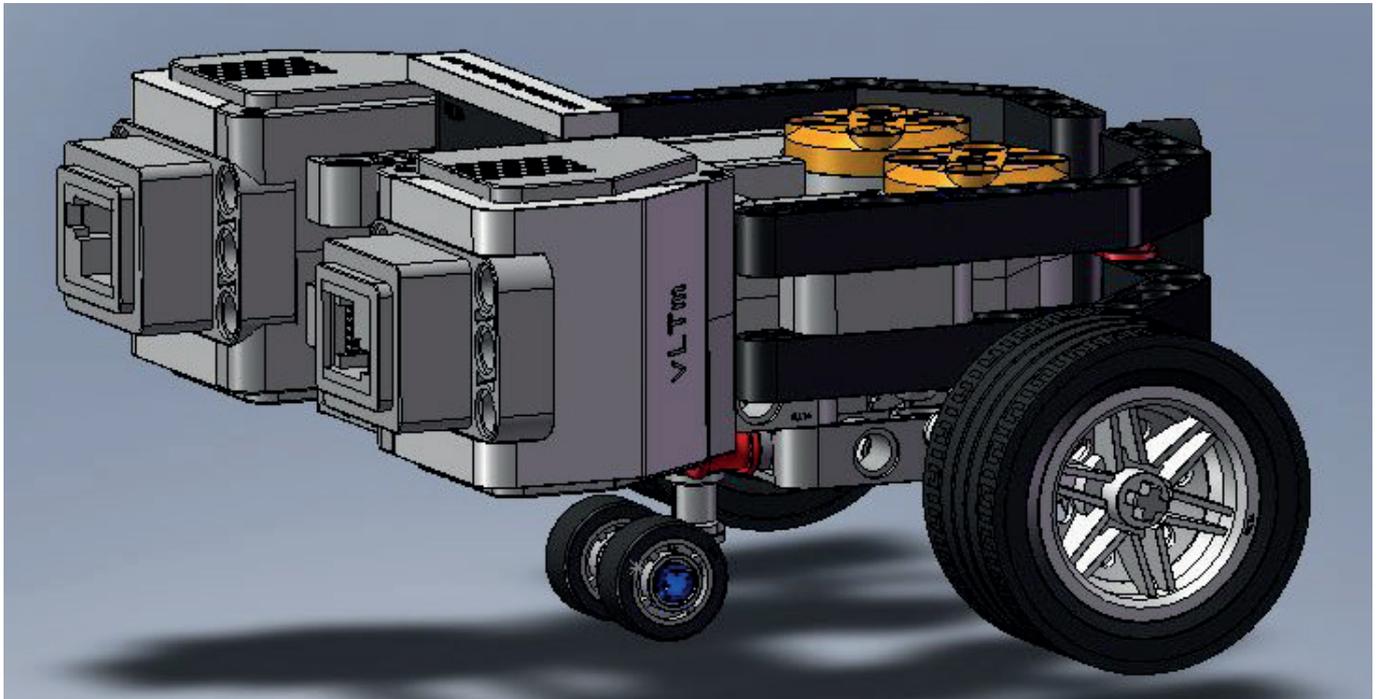
Para completar este modelo se dispone de cuatro opciones de “caster wheels”, que se corresponden con los modelos Ev3-0111, Ev3-0112, Ev3-0113 y Ev3-0114.



(Fig.116. Modelos “caster wheel” Ev3-0111, Ev3-0112, Ev3-0113 y Ev3-0114)

Una vez virtualizados los modelos de las ruedas auxiliares se insertan en el modelo inicial y se procede a evaluar cada solución.

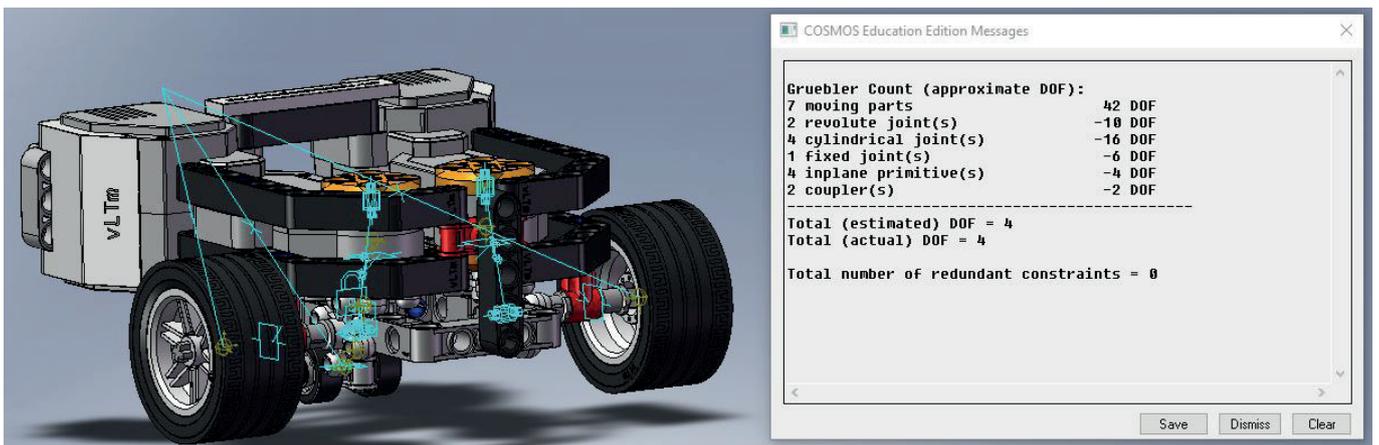
Al final se opta por utilizar el modelo Ev3-0112 por ser el que mantiene una mayor horizontalidad en el modelo cuando se implanta.



(Fig.117. Modelo Ev3-0108 completado con Ev3-0112)

Una vez completado el ensamblaje, se procede, como se ha explicado, a compactar las piezas.

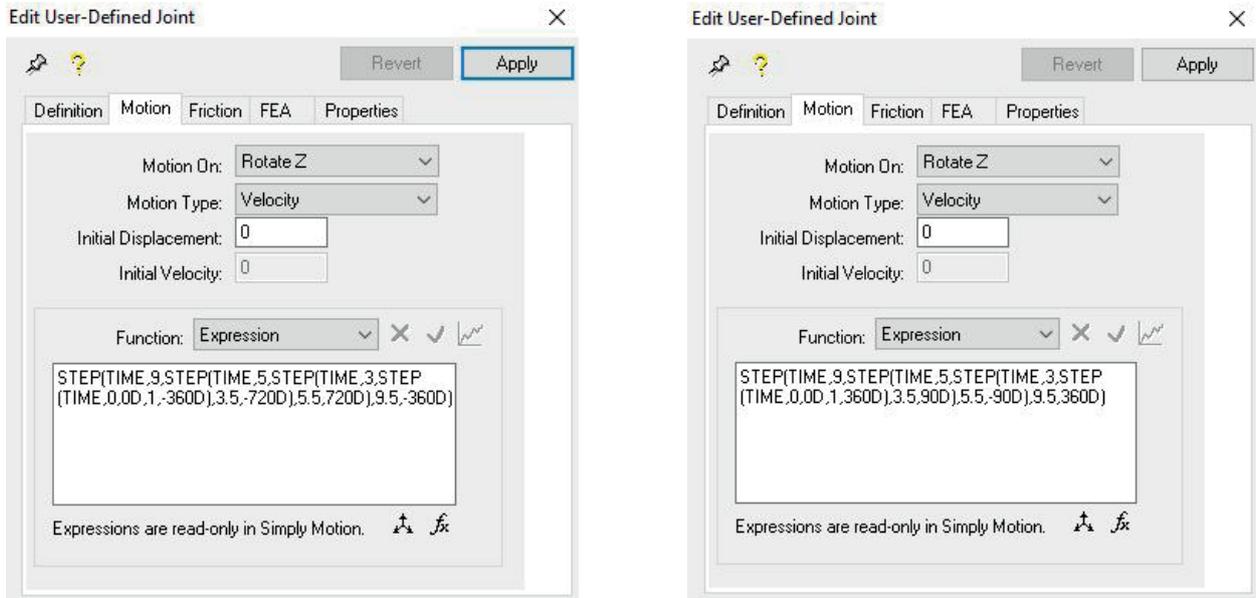
Con las piezas compactas se procede a la auto-alineación del modelo.



(Fig.118. Modelo Ev3-0108 auto-alineado)

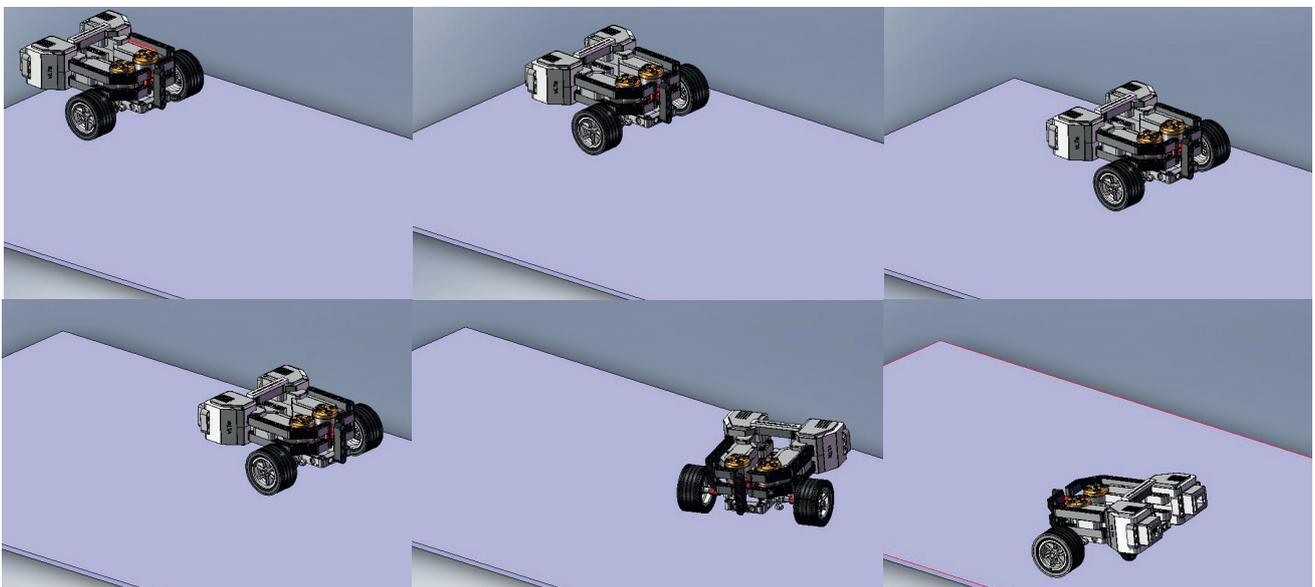
Los cuatro GDL que presenta el modelo auto-alineado se deben a que el movimiento en los dos motores aún no está definido, lo cual otorga dos de los cuatro GDL. Los otros dos están presentes en la rueda de apoyo, uno es el que permite a las ruedas girar sobre su propio eje durante los movimientos de avance y retroceso y el último es el que permite que estas ruedas cambien de dirección, siguiendo la que marcan los motores.

Por último se define el movimiento, que como ya se ha comentado, en este caso se debe definir en cada uno de los motores, para que el movimiento que presenta la simulación sea lo más similar posible al movimiento del modelo real.



(Fig.119. Definición movimiento de los motores del modelo Ev3-0108)

Y con ello se consigue tener el modelo perfectamente definido para poder realizar la simulación del movimiento del mismo.



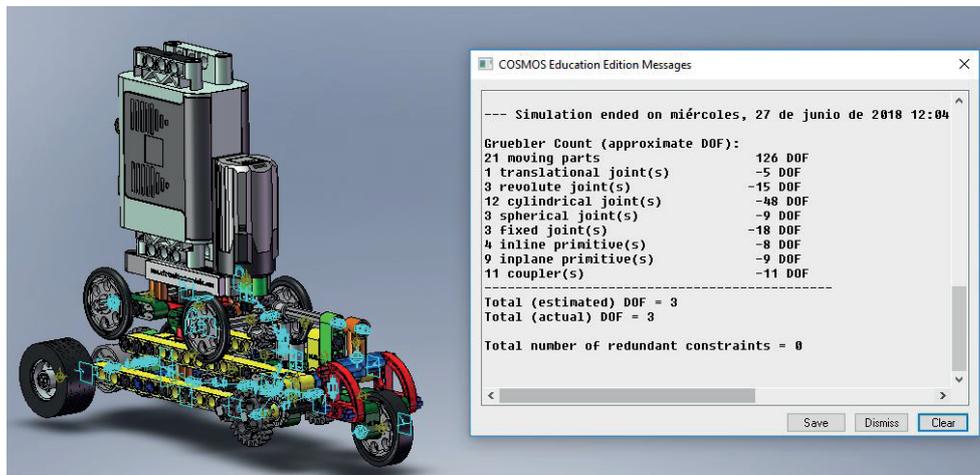
(Fig.120. Simulación movimiento del modelo Ev3-0108 en lapsos de 1 segundo)

8.1.23. pw-085

El modelo pw-085 es el último modelo realizado por Isogawa Yoshihito que se ha estudiado en este proyecto.

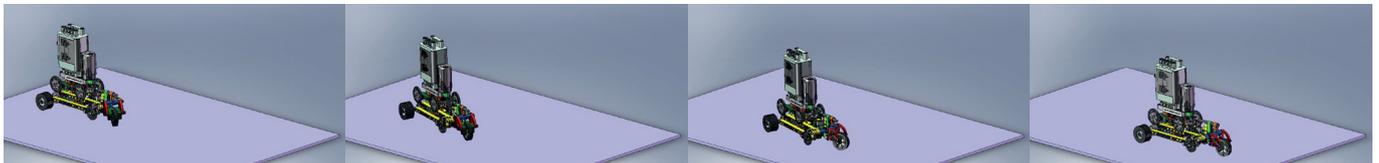
Parte de un modelo de auto-moción básico que se puede completar de 5 formas distintas. Se ha seleccionado una que presenta un sistema de propulsión en las ruedas traseras y dirección en la rueda delantera, alimentado todo por el mismo motor, de forma que el modelo avance describiendo un movimiento sinuoso.

Siguiendo los pasos marcados por la metodología, se virtualiza el modelo, se compactan sus piezas y se auto-alinea.



(Fig. 121. Modelo pw-085 auto-alineado)

Como se puede observar en la imagen (Fig. 121.) el modelo presenta tres GDL, pese a que en la presentación del modelo se ha especificado que el movimiento viene totalmente delimitado por el único motor del modelo, lo que significa que, previamente a definir dicho movimiento, sólo debería aparecer un GDL. El segundo se encuentra en la rueda delantera del modelo, cuyo movimiento se ve definido al entrar en contacto con la base, ya que seguirá el movimiento de las ruedas traseras. El tercero se encuentra en las ruedas traseras del modelo inicial, las cuales están preparadas para seguir el movimiento al entrar en contacto con el suelo, cosa que no hacen cuando se completa el modelo con una de las 5 posibilidades.



(Fig. 122. Simulación movimiento del modelo pw-085 en lapsos de 1 segundo)

8.2. vLTm_8047-1

A continuación se presenta el modelo Lego© Technic 8047-1. Este modelo solo ha sido virtualizado, no se ha procedido a su auto-alineación ni simulación. Esto se debe a que la creación de este modelo era un paso de aprendizaje para comprender cómo se debe virtualizar uno de los componentes que está presente en el mismo y que forma parte de uno de los modelos posteriores: las cadenas.

El modelo virtualizado no tiene mayor complejidad, que un brazo articulado accionado por dos sistemas de engranajes, uno que se encarga de la elevación del brazo y otro del accionamiento de la pala excavadora. También es capaz de girar sobre su base. Por ello, si bien es un modelo de aprendizaje, la virtualización del modelo se ha llevado a cabo por el alumno, salvo la virtualización de las cadenas.

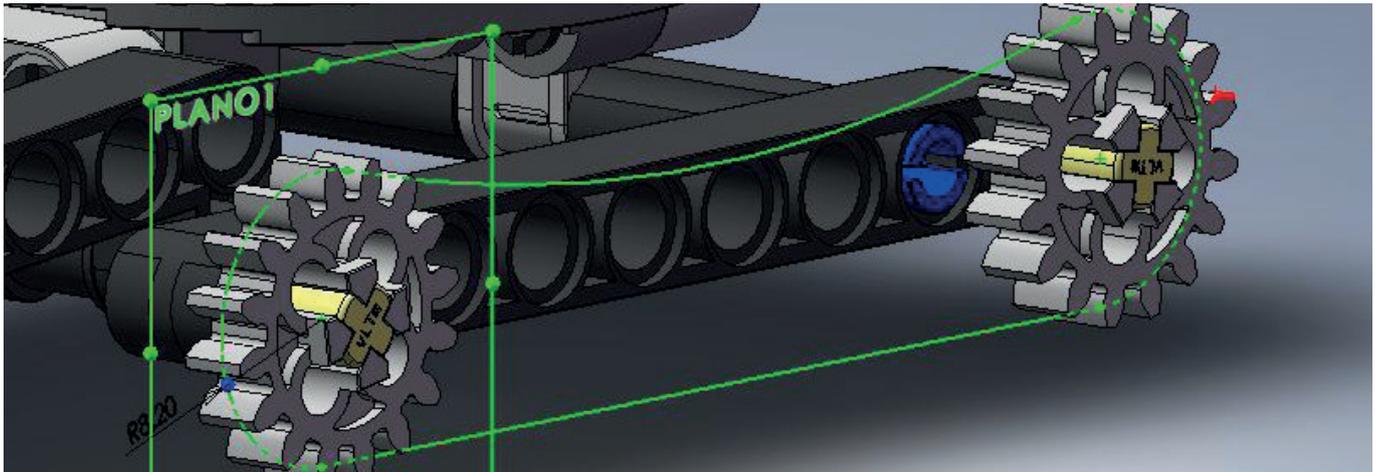


(Fig.123. Modelo vLTm_8047-1)

Mientras que la tarea de virtualización ha sido parte de la fase de trabajo autónomo, la tarea de montar las cadenas, por ser un componente nuevo hasta el momento, ha sido guiada por el profesor a cargo de este proyecto gracias a una serie de videos donde se detalla paso a paso el sistema a seguir para proceder con la virtualización de las cadenas. A continuación se resume dicho tarea:

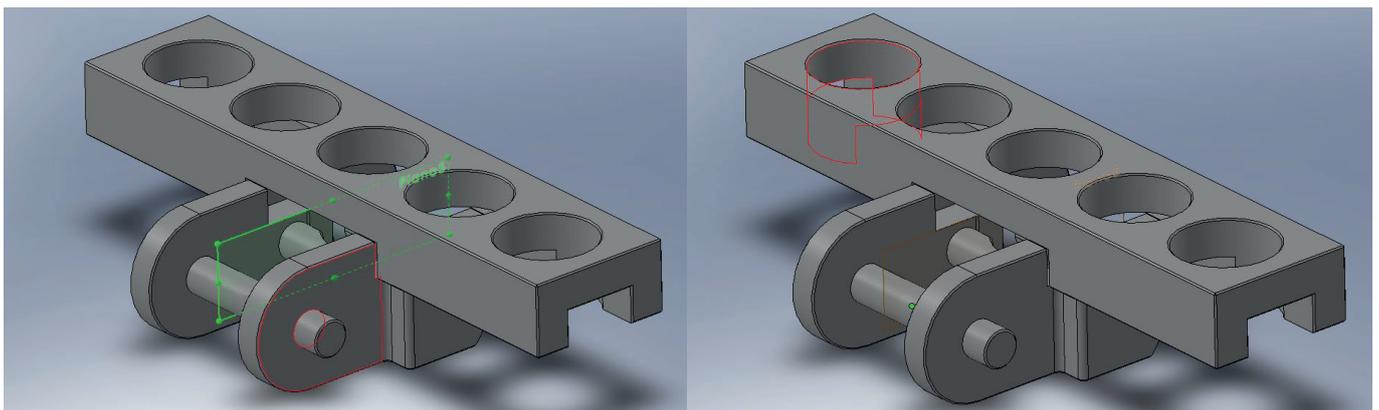
En primer lugar hay que tener en cuenta de cada uno de los eslabones que conforman la cadena está conectado a otros dos y que tiene movimiento relativo con respecto a estos, por tanto, cada eslabón debe formar una pieza diferente.

Para poder disponer las cadenas en su lugar es necesario definir un croquis dentro del ensamblaje a lo largo del cual se ubicarán los eslabones. Primero se debe crear un plano en el que definir dicho croquis. Este plano se ubica en el centro de las catalinas.



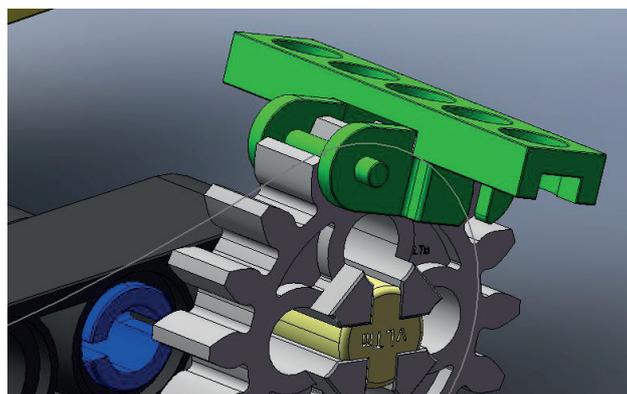
(Fig.124. Plano y croquis)

El siguiente paso es editar las piezas que contienen los eslabones. Los objetivos son, primero, crear un plano en el centro de la pieza que sirva para conectarlas con el plano creado en el centro de la catalina, de forma que la cadena ocupe su lugar correspondiente. Y en segundo lugar, dentro del plano creado en la pieza, crear un croquis y en él, ubicar un punto donde el eslabón conectará con el siguiente.



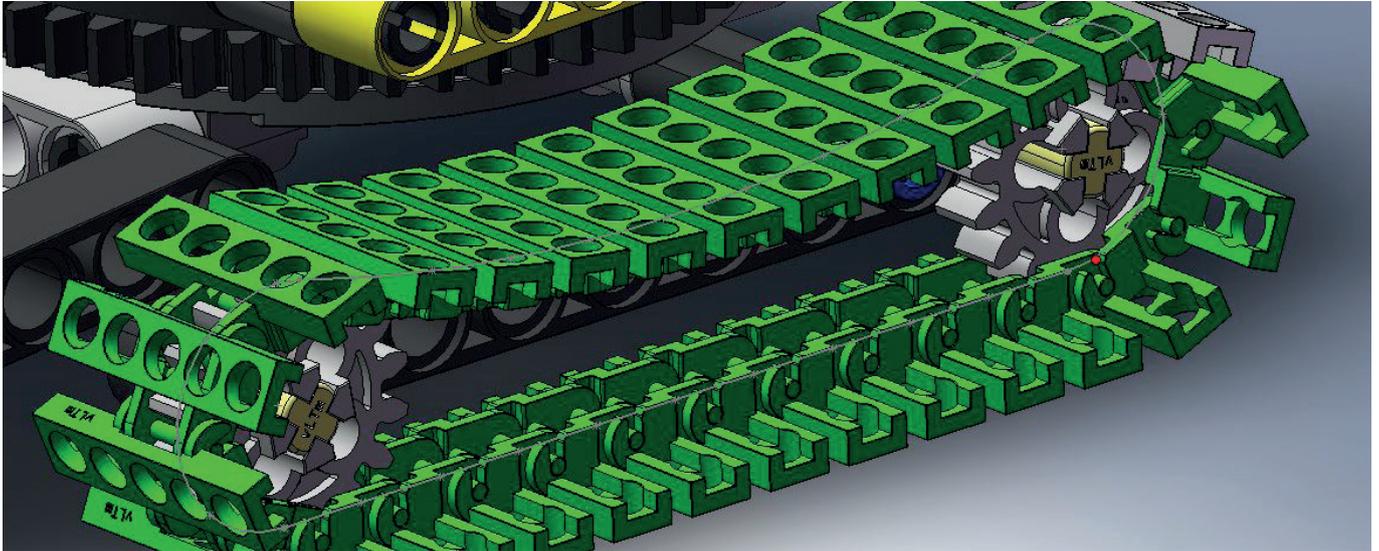
(Fig.125. Edición del eslabón)

Después, se debe insertar el primer eslabón en el ensamblaje final y establecer las relaciones de posiciones tales que: el plano de la pieza del eslabón debe coincidir con el plano que se ha creado en el centro de la catalina; y el punto que se ha creado en el eslabón debe coincidir con el croquis que se ha creado en el ensamblaje. Hay que prestar atención a la hora de colocar las catalinas, para que visualmente no interfieran con los eslabones.



(Fig.126. Colocación del primer eslabón)

Para terminar, solo queda colocar el resto de eslabones siguiendo el mismo proceso, asegurándose de crear la relación de posición entre las uniones de los mismos.



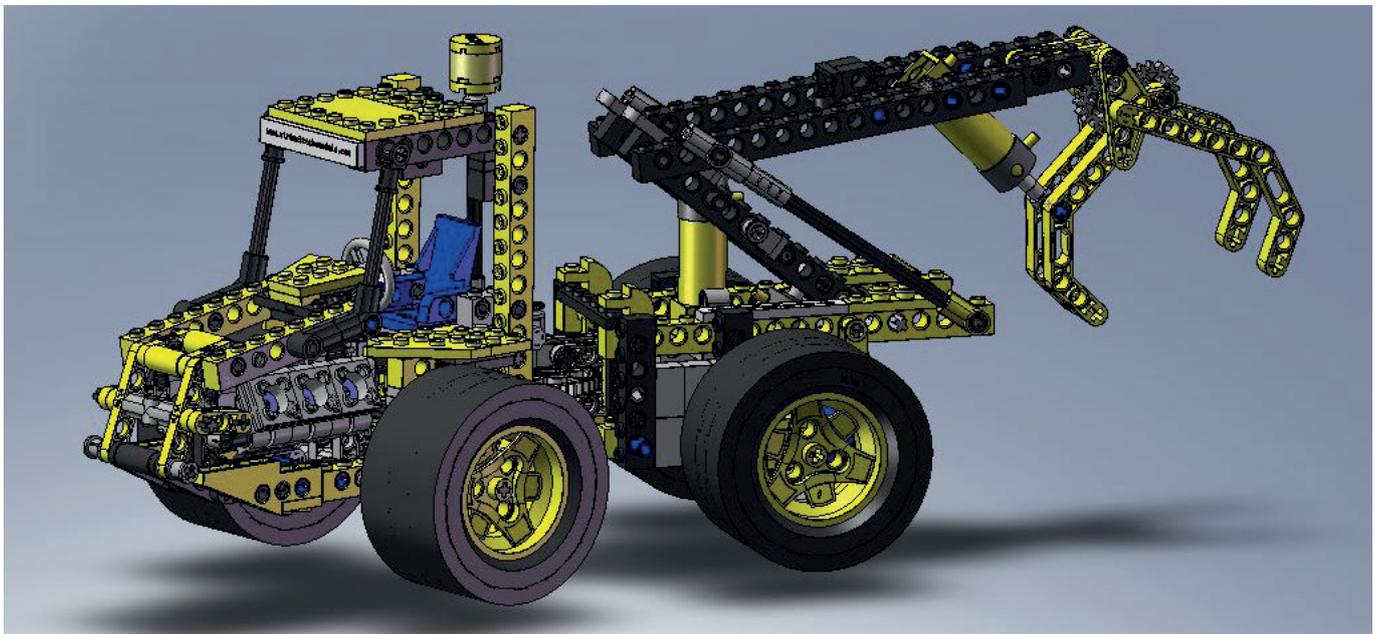
(Fig.127. Cadena completa)

8.3. vLTm_8459-2

El modelo Lego© Technic 8459-2 no ha sido virtualizado durante la elaboración de este proyecto, sino que ha sido auto-alineado y posteriormente se ha simulado su movimiento.

A tal fin, el profesor a cargo de este trabajo ha facilitado las piezas debidamente compactadas y el modelo virtualizado.

El motivo de que este modelo no se haya virtualizado responde al hecho de que este modelo, como el anterior, forma parte de la fase de aprendizaje, durante la cual, siguiendo una serie de videos realizados por el profesor a cargo del proyecto, se ha procedido a auto-alinear y a simular el modelo.

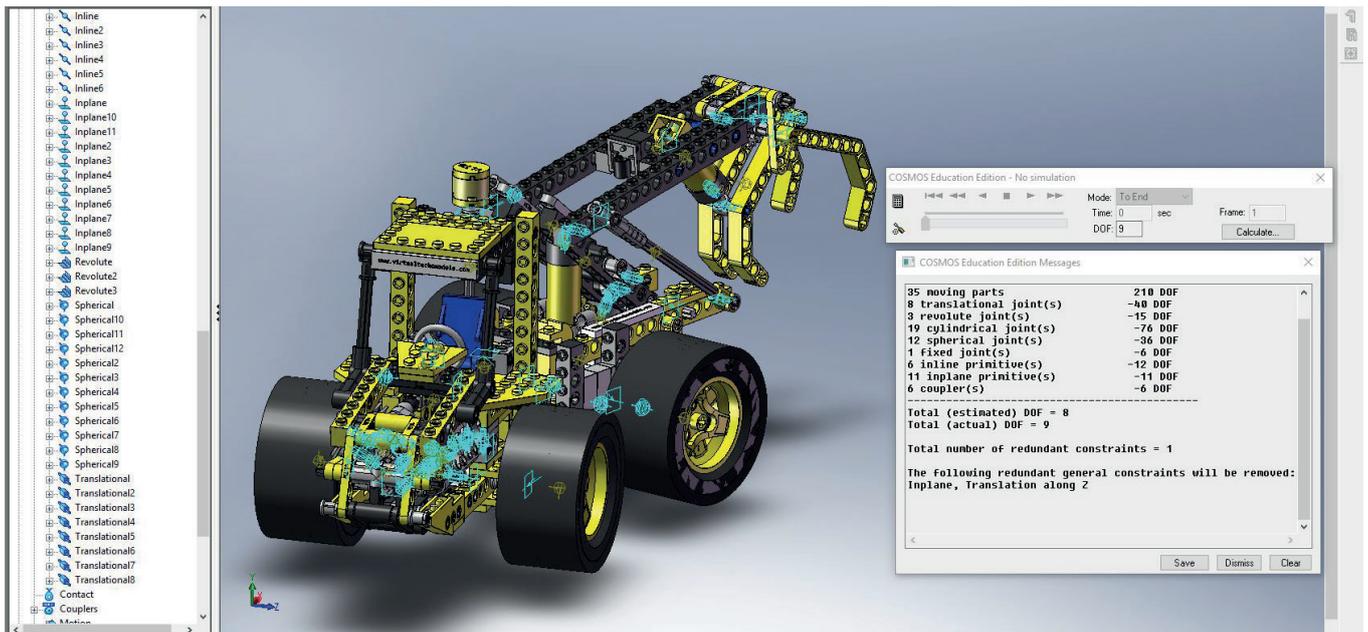


(Fig.128. Modelo vLTm_8459-2)

En lo que al aprendizaje respecta, este modelo tiene un par de puntos interesantes. Por una parte el movimiento de los cilindros hidráulicos, cómo realizar sus relaciones y cómo definir su movimiento. Y por otra parte, el proceso de auto-alineación del brazo articulado.

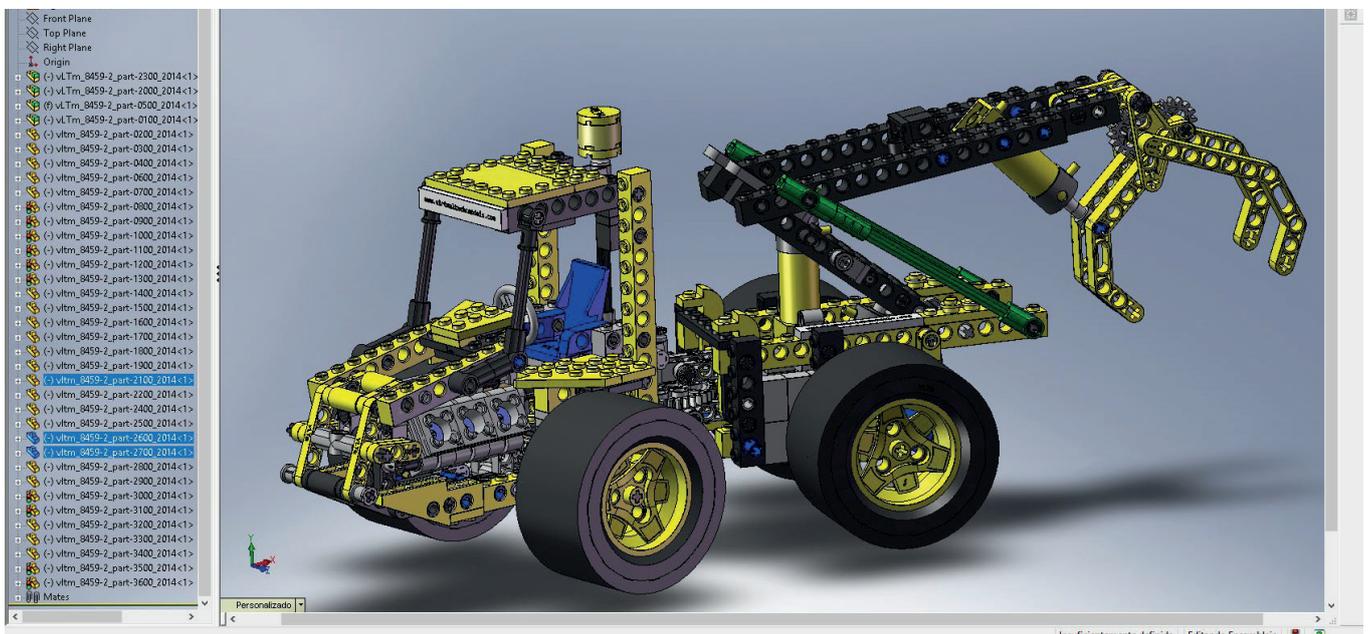
El modelo, una vez auto-alineado presenta nueve GDL. De estos, dos pertenecen a las ruedas traseras, otros dos al movimiento de las ruedas delanteras. Uno pertenece a la pieza que permite ajustar el volante, el sexto pertenece al sistema de dirección que maneja la posición entre la parte delantera y la trasera. Y los tres restantes pertenecen a los cilindros hidráulicos del brazo articulado, uno de los cuales sería el encargado de, en el modelo Lego© Technic real, insuflar el aire a los otros dos para dotarlos de movimiento.

No obstante, como se puede observar en la imagen (Fig.129.) también aparece una restricción en exceso. Eso se debe a que el brazo articulado tiene una de sus piezas duplicadas. El mecanismo de este brazo es un mecanismo plano, es decir, todos los movimiento que en él se producen se pueden dan en un mismo plano o en planos paralelos.



(Fig.129. Modelo vLTm_8459-2 auto-alineado)

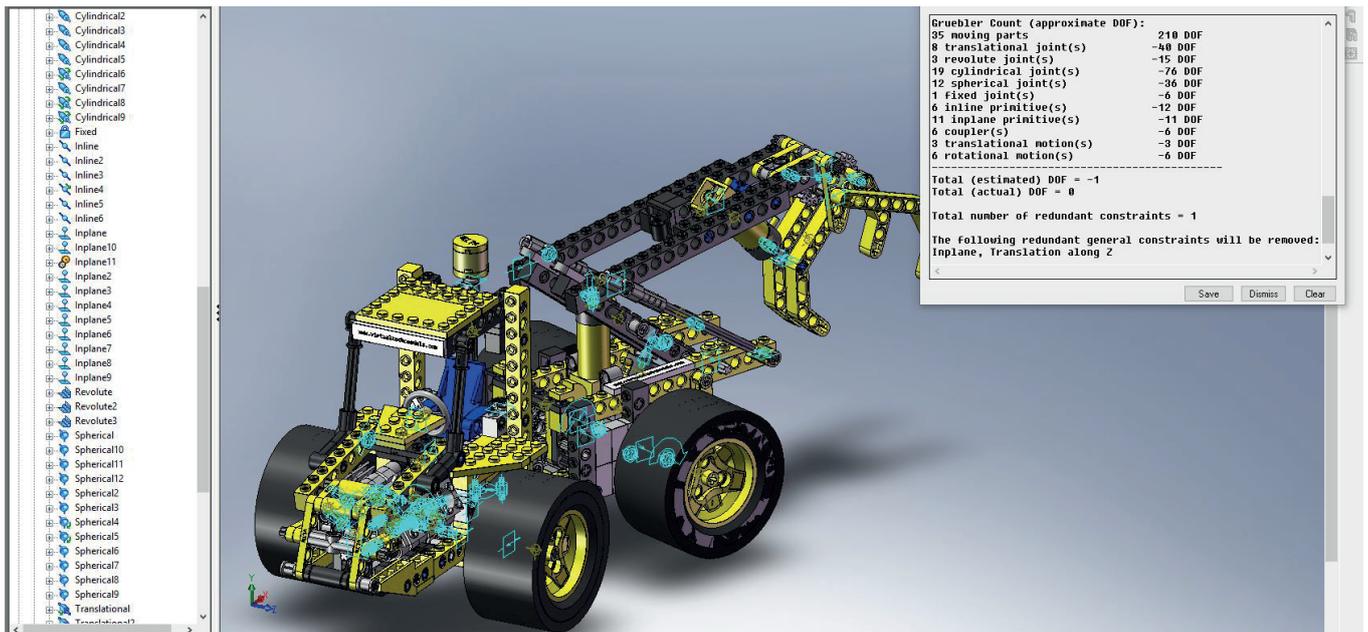
En este caso, las piezas 26 y 27, que en la imagen (Fig.130.) aparecen resaltadas en color verde, cumplen exactamente la misma función pero tienen movilidad relativa entre ellas. Es esta duplicación de esa pieza dentro del mecanismo lo que hace que aparezcan restricciones en exceso. La única forma de eliminar esta restricción sería eliminando una de las dos piezas duplicadas. Para conseguirlo, una opción es fijarlas entre sí para que se muevan siempre juntas. Otra posible solución es sustituir las dos piezas por una sola que cumpla la misma función.



(Fig.130. Piezas duplicadas)

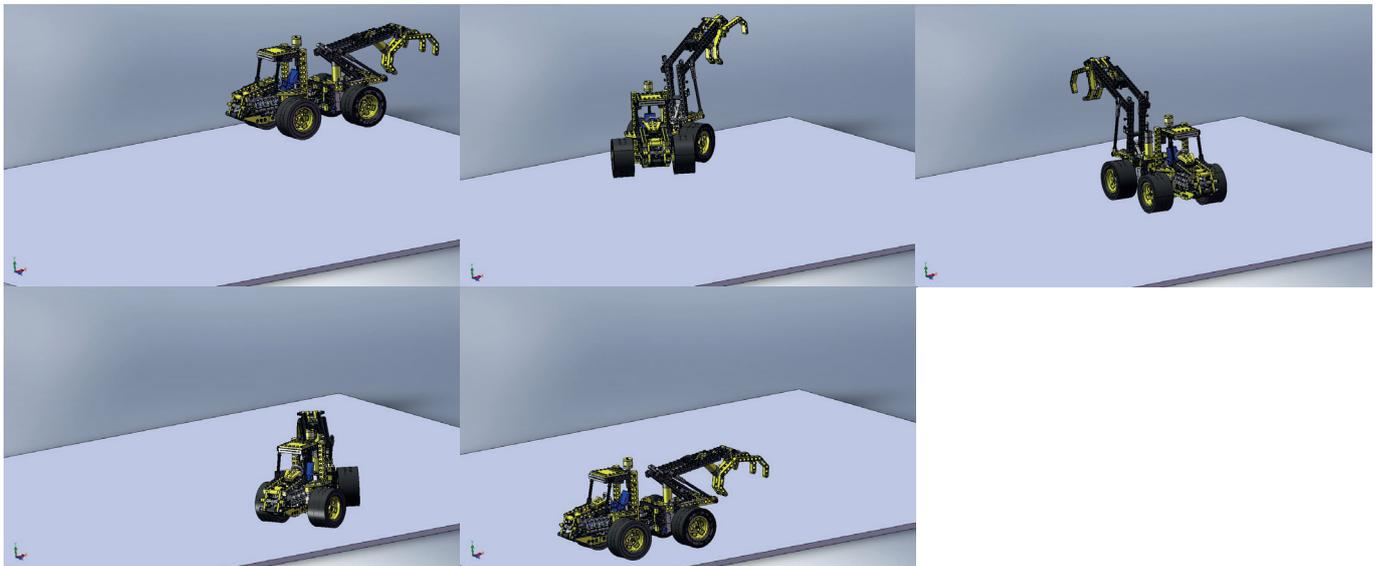
Teniendo claro que tal como está definido este modelo conseguir cero restricciones en exceso es imposible, se procede a la definición de los movimientos necesarios para simular el funcionamiento del modelo.

Al definir todos los movimientos del modelo, este pasa a tener cero grados de libertad y mantiene la restricción en exceso.



(Fig.131. Modelo vLTm_8459-2 completamente definido)

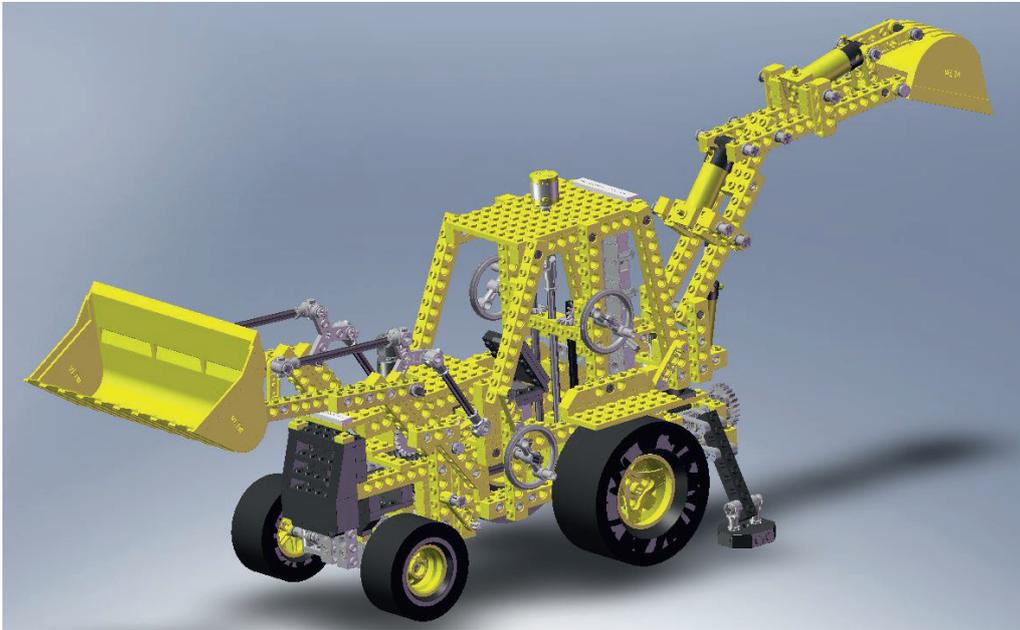
Solo queda realizar los cambios oportunos para simular el movimiento sobre una base para observar su funcionamiento completo.



(Fig.132. Simulación del movimiento del modelo 8459-2 a lapsos de 1 segundo)

8.4. vLTm_8862-1

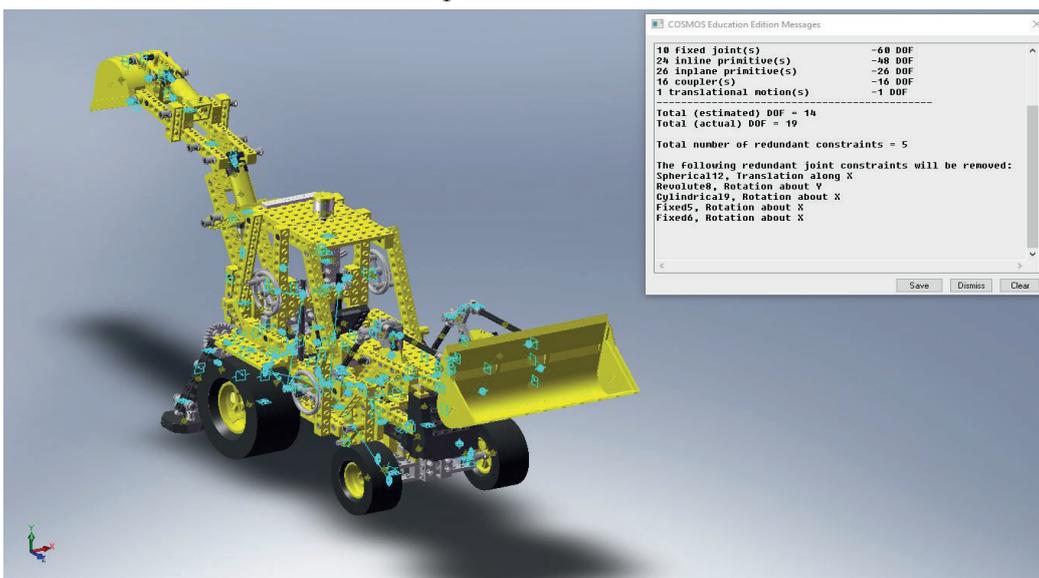
El modelo Lego© Technic 8862-1 ha sido completamente virtualizado, auto-alineado y se ha simulado su movimiento durante el desarrollo de este proyecto.



(Fig.133. Modelo vLTm_8862-1)

Es un modelo con un grado de dificultad mayor que los vistos hasta el momento por poseer una mayor cantidad de piezas móviles.

Es el último modelo que se ha realizado durante la fase de aprendizaje. Cabe destacar que esta fase ha abarcado la virtualización completa del modelo, pero solo parte de la auto-alineación. El resto de la auto-alineación y la simulación se ha realizado de forma autónoma por el alumno.

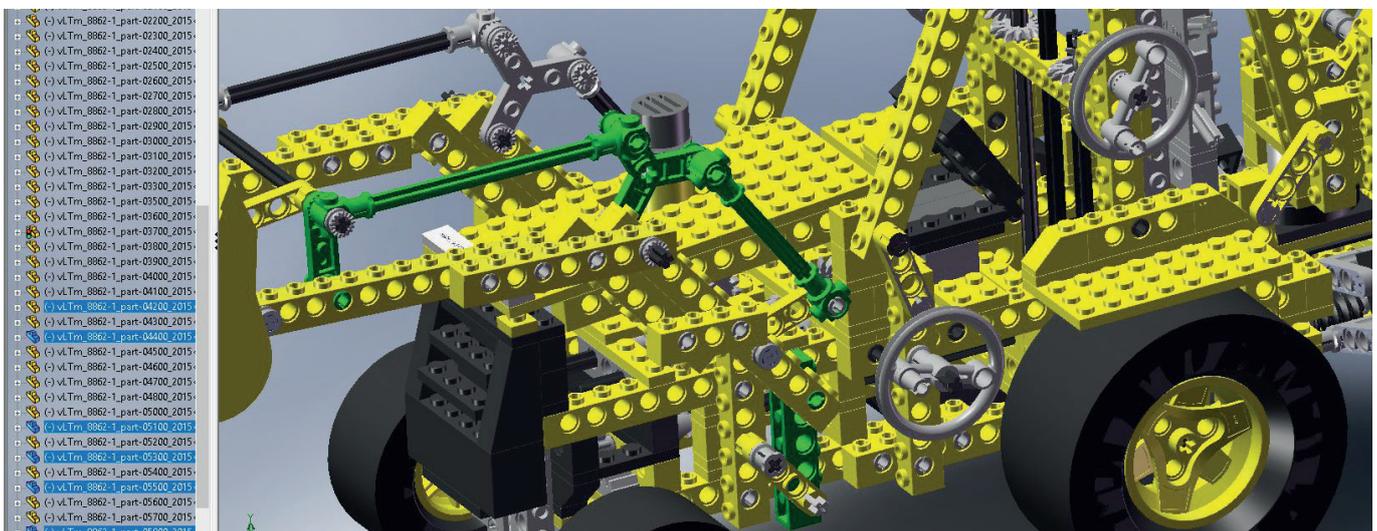


(Fig.134. Modelo vLTm_8862-1 auto-alineado)

Al auto-alinear el modelo aparecen x grados de libertad. Estos se localizan en:

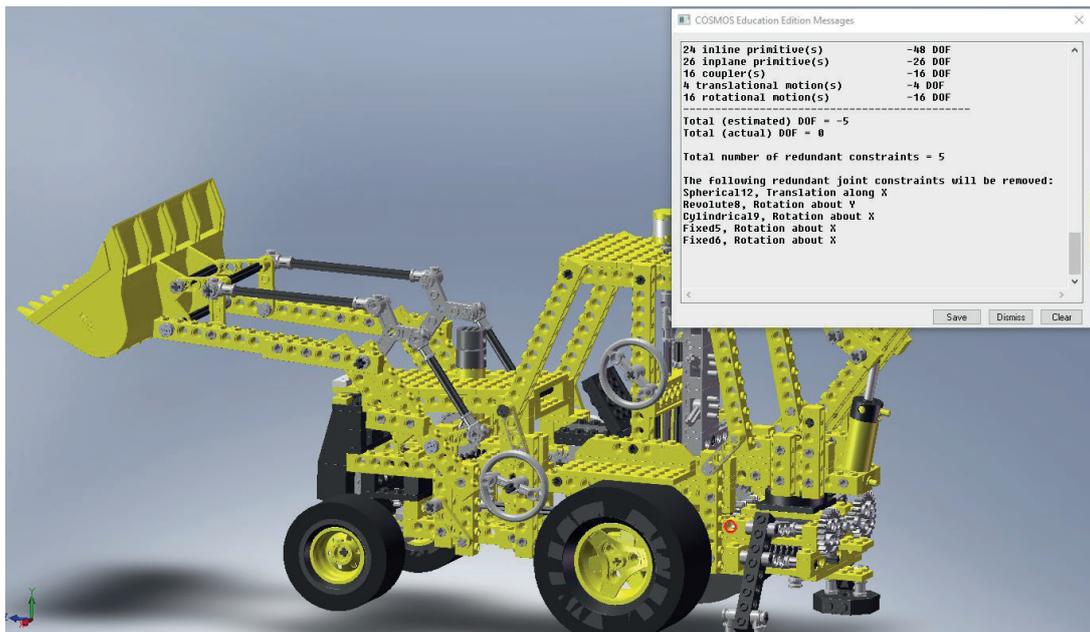
- 1) El mecanismo que permite girar el brazo articulado de la pala trasera.
- 2) El mecanismo que permite extender o recoger las patas de fijación al suelo.
- 3) El mecanismo que controla la dirección.
- 4) El mecanismo que controla la elevación de la pluma de la pala delantera.
- 5) El mecanismo que controla la posición de la pala delantera.
- 6, 7, 8 y 9) Las 4 ruedas.
- 10, 11 y 12) Las piezas que, en el modelo real, se encargan de insuflar aire a los cilindros hidráulicos.
- 13 y 14) El movimiento entre los pies y las patas traseras de fijación al suelo.
- 15) El capó.
- 16) La regulación del asiento.
- 17, 18 y 19) Los cilindros hidráulicos que se encargan del movimiento del brazo articulado de la retroexcavadora.

Sin embargo también aparecen 5 restricciones en exceso. Estas se deben a un problema similar al que ocurre en el modelo 8459-2, que se ha mostrado con anterioridad. Como se puede ver en la imagen (Fig. 135) el mecanismo a cargo de la posición de la pala delantera está prácticamente duplicado al completo. Esto hace que aparezca una restricción en exceso por cada una de las cuatro piezas duplicada, ya que se trata de un mecanismo plano. La quinta restricción en exceso aparece en el mecanismo que se encarga de controlar la elevación de la pala. La pieza resaltada en verde tiene su simétrica, aunque en la imagen no se ve, y al tratarse nuevamente de un mecanismo plano, duplicar una pieza incurre en la aparición de una restricción en exceso.

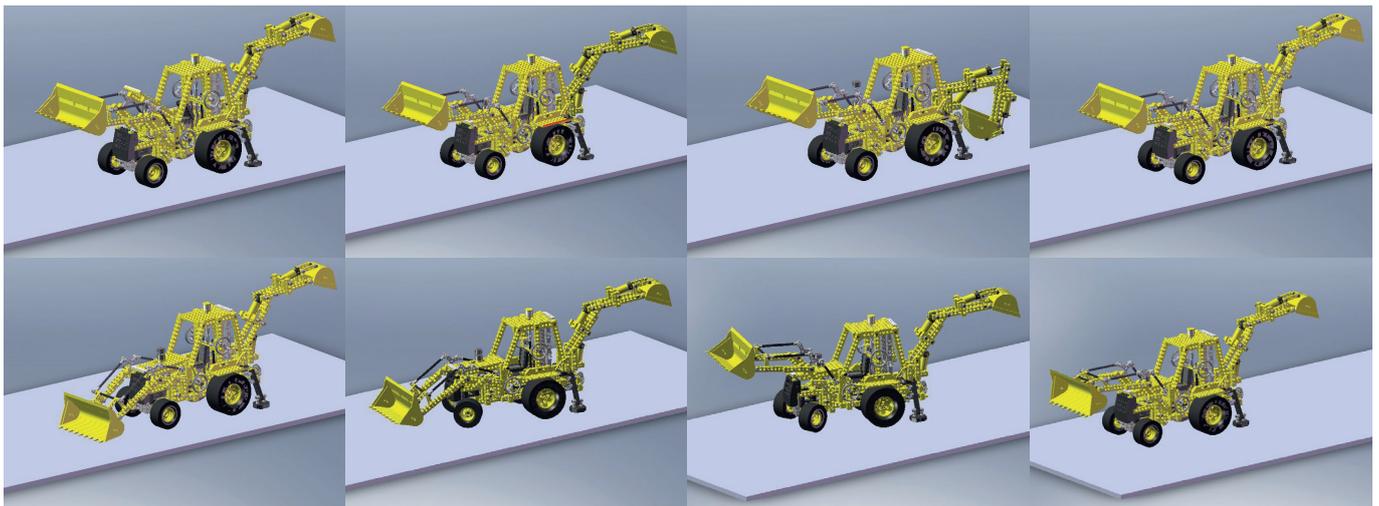


(Fig. 135. Piezas duplicadas)

Aunque aparezcan estas restricciones en exceso, si las piezas están perfectamente la máquina puede funcionar, de forma que se procede a la definición de los movimientos de cada uno de los mecanismos libres y a su posterior simulación.



(Fig.136. Modelo vLTm_8862-1 completamente definido)



(Fig.137. Simulación del modelo vLTm_8862-1 en lapsos de un segundo.)

8.5. vLTm_jkbw-flying

Uno de los motivos por los que la compañía Lego© ha seguido creciendo es por la implicación que la comunidad tiene en el desarrollo de nuevos modelos. No es necesario trabajar para Lego© para poder crear un modelo propio y que este acabe siendo fabricado. Existe la posibilidad de someter un modelo creado por una persona ajena a la empresa a concurso y, de ser elegido, poderse construir.

Es por ello que existen muchos modelos no oficiales desarrollados por multitud de personas de distintos ámbitos profesionales.

En este proyecto ya se ha visto un ejemplo de esto con la participación de Isogawa Yoshihito, dado que los modelos que él propone en sus libros no son modelos oficiales de Lego©.

El siguiente modelo es un ejemplo más de esta tendencia de la comunidad a desarrollar nuevos modelos ingeniosos y creativos. Es el caso de Jason Allemann, que ha desarrollado un modelo de la máquina voladora de Leonardo Da Vinci.



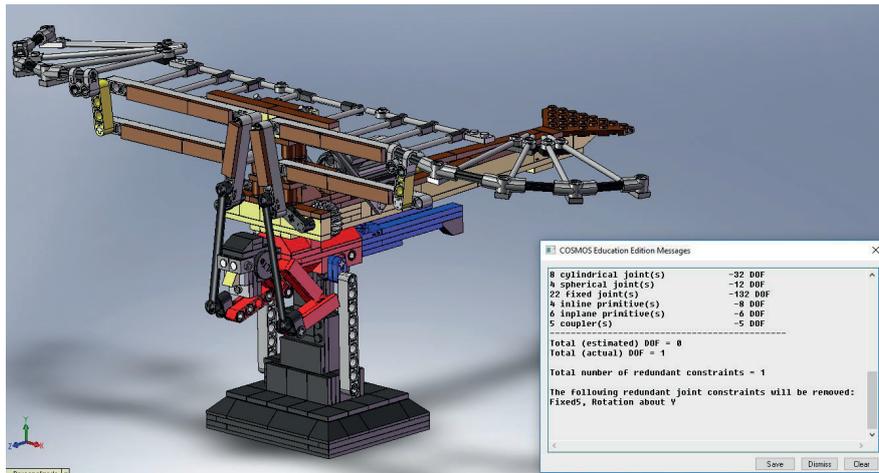
(Fig.138. Modelo vLTm_jkbw-flying)

En el siguiente enlace: <https://jkbrickworks.com/da-vinci-flying-machine/> es posible encontrar un video detallando el funcionamiento del modelo, varias fotografías del mismo y un pdf descargable con las instrucciones completas como si de un modelo oficial se tratase.

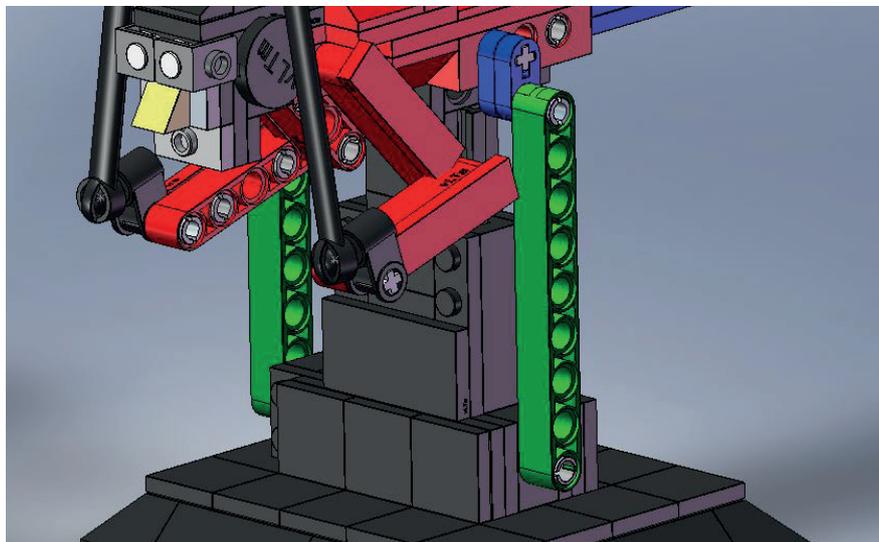
Este modelo forma parte de los que han sido virtualizados, auto-alineados y simulados completamente por el alumno.

Como en el resto de casos se ha procedido siguiendo la metodología explicada, creando las piezas en primer lugar, ensamblándolas en un modelo completo y posteriormente auto-alineando el mecanismo.

El modelo cuenta con un único grado de libertad y dos formas de accionarlo. El creador del modelo ha querido dar la opción tanto de poderlo accionar mediante una manivela como de accionarlo aplicándole un motor que transmite un movimiento a un sin fin y este a todo el mecanismo.

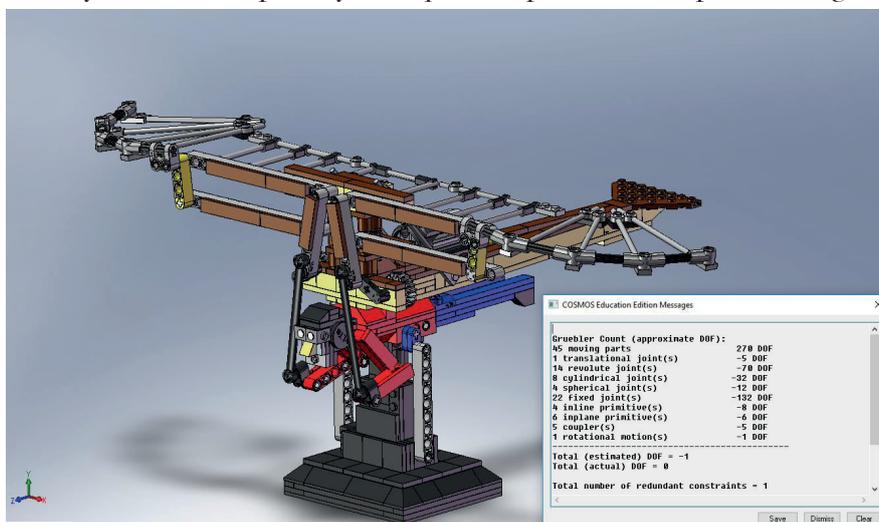


(Fig.139. Modelo vLTm_jkbw-flying auto-alineado)



(Fig.140. Restricciones en exceso)

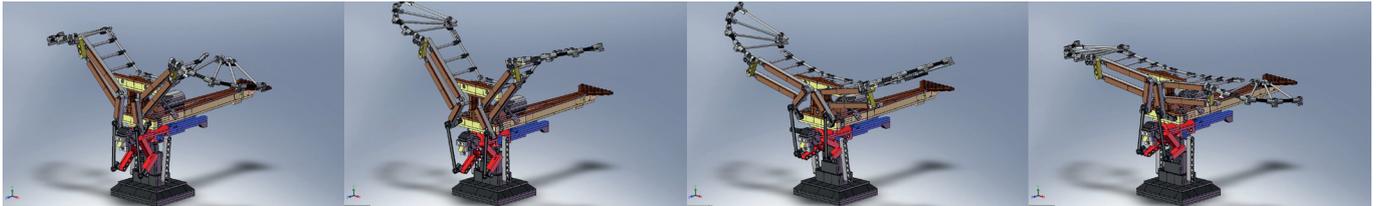
También se puede observar que el modelo tiene una restricción en exceso. De nuevo, aparece una pieza duplicada en un mecanismo plano. En la imagen (Fig.140) se observa que las dos vigas tiene la misma función, que en este caso es la de elevar y descender al piloto y la máquina respecto del cuerpo base (negro).



(Fig.141. Modelo vLTm_jkbw-flying completamente definido)

Dado que este modelo solo tiene un grado de libertad, para definir el movimiento del mismo solo es necesario definir el movimiento de un par. En este caso se ha comentado que existe la posibilidad de determinar el origen del movimiento de dos formas. En este proyecto se ha decidido que la forma más coherente de hacerlo con el montaje realizado era definiendo el movimiento en el motor.

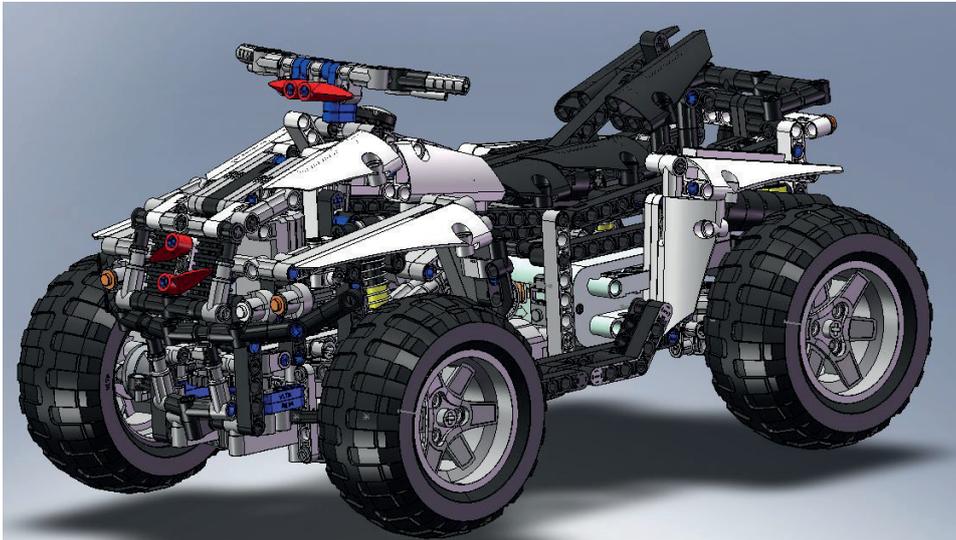
Además, a fin de que la máquina diese un aleteo por segundo de simulación, se ha calculado la velocidad que se debería imprimir en el motor, que es de 9600 grados por segundo.



(Fig. 142. Simulación del modelo vLTm_jkbw-flying en lapsos de 0,25 segundos)

8.6. vLTm_nico-quad

El siguiente modelo es un ejemplo más de lo que se ha comentado en el punto anterior con respecto a la participación de la comunidad en el desarrollo de modelos. No obstante, este no cuenta con el mismo grado de definición que el modelo anterior.

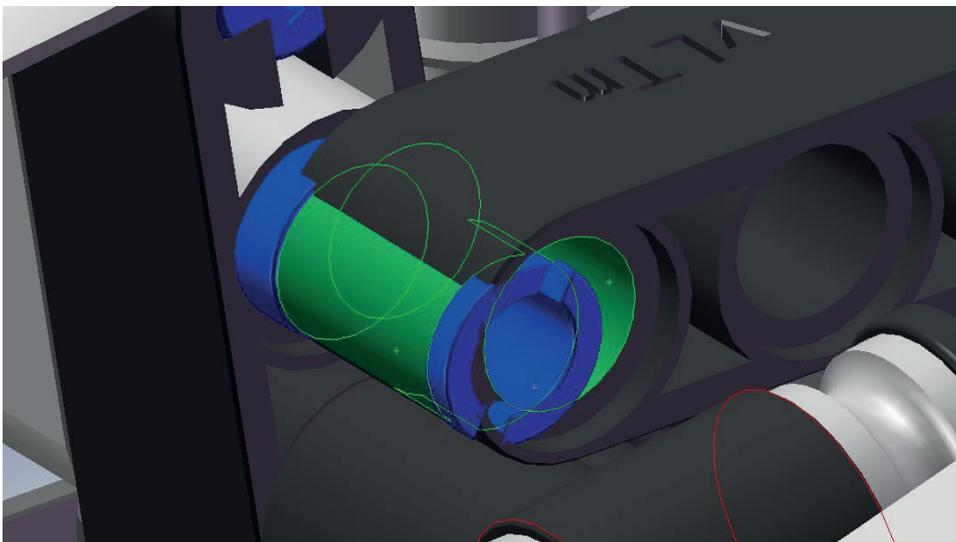


(Fig.143. Modelo vLTm_nico-quad)

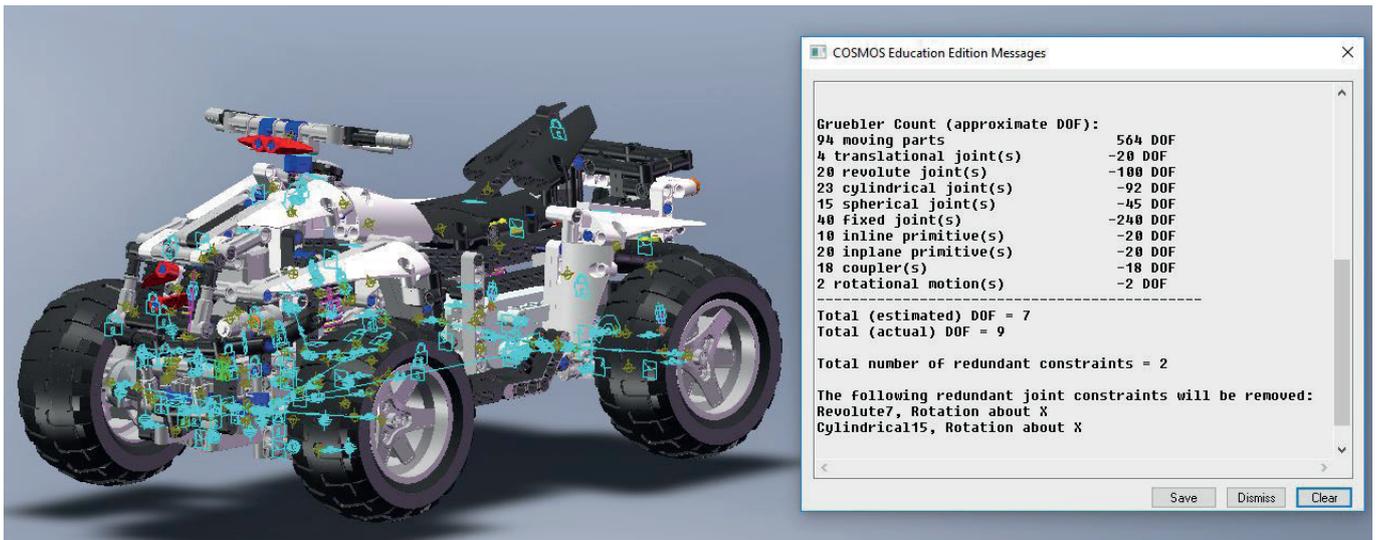
En la página web del autor (<http://www.nico71.fr/motorized-4x4-quad/>) se puede encontrar la información pertinente al modelo, en la que se detalla el contenido del mismo y su funcionalidad, además de un pdf a modo de instrucciones en las que se recopilan una serie de fotografías tomadas del proceso de montaje físico.

Este modelo también ha sido virtualizado, auto-alineado y simulado por completo por parte del alumno.

El proceso de virtualización de este modelo ha presentado algunos problemas debido a la forma en que han sido utilizados algunos componentes. Hay que recalcar que los componentes reales Lego© están fabricados en plástico y tienen cierta elasticidad, sin embargo, Solid Works considera todas las piezas perfectamente rígidas. Esto provoca que uniones que sí son posibles en el modelo físico, no lo sean en el virtual.



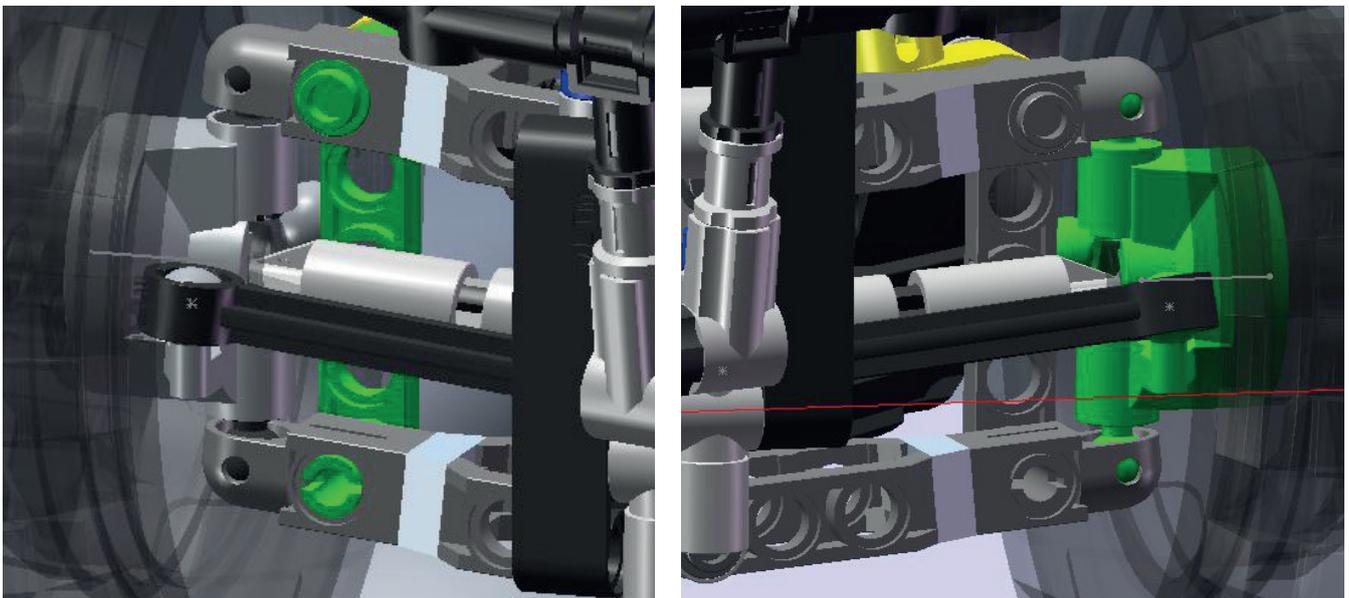
(Fig.144. Incompatibilidad de algunos componentes)



(Fig.145. Modelo vLTm_nico-quad auto-alineado)

A pesar de estos problemas, es posible desarrollar completa y correctamente el modelo. El cual presenta, una vez auto-alineado, nueve grados de libertad y dos restricciones en exceso.

Las restricciones en exceso se encuentran en el sistema de amortiguamiento de las ruedas delanteras. La pieza que se resalta de verde en la zona izquierda de la imagen (Fig. 146) tiene como función asegurar que la pieza que se resalta en verde en la parte derecha se mueva siempre con la misma inclinación. No obstante, el mecanismo es un cuadrilátero articulado al que se le ha añadido esta barra, lo cual es una redundancia ya que el propio mecanismo se encarga de que la pieza correspondiente se mueva manteniendo siempre la misma inclinación. Dado que hay dos cuadriláteros con la pieza sobrante, hay dos restricciones en exceso en todo el modelo.

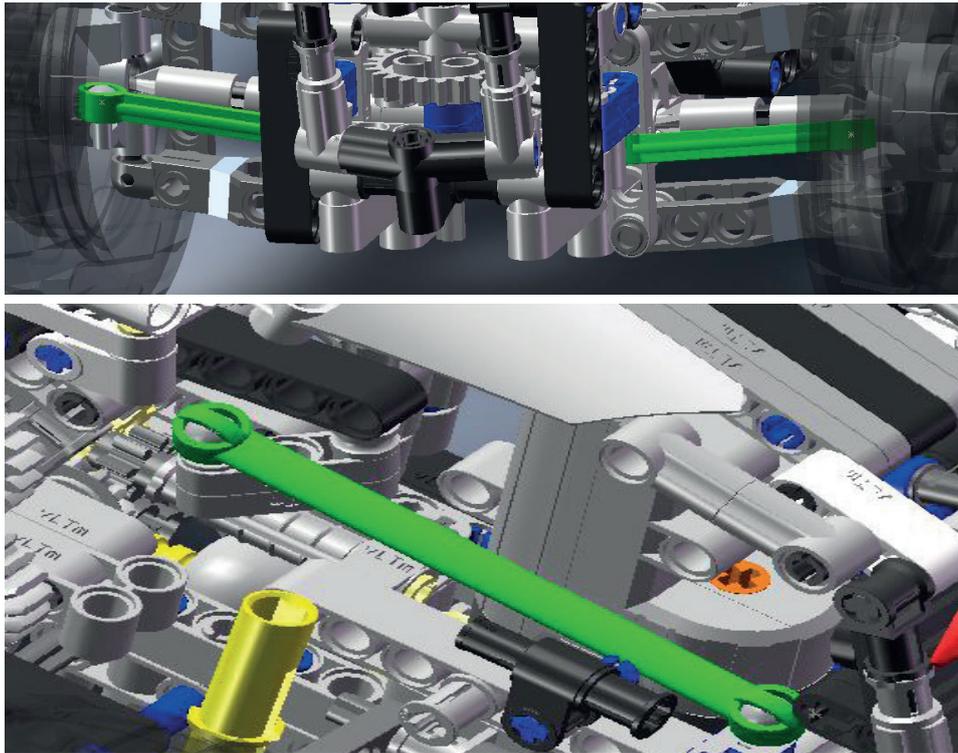


(Fig.146. Restricciones en exceso)

El cálculo de la movilidad del modelo indica que este tiene nueve grados de libertad, sin embargo, solo consta de dos motores para definir el movimiento, por tanto, debería de tener solo dos grados de libertad.

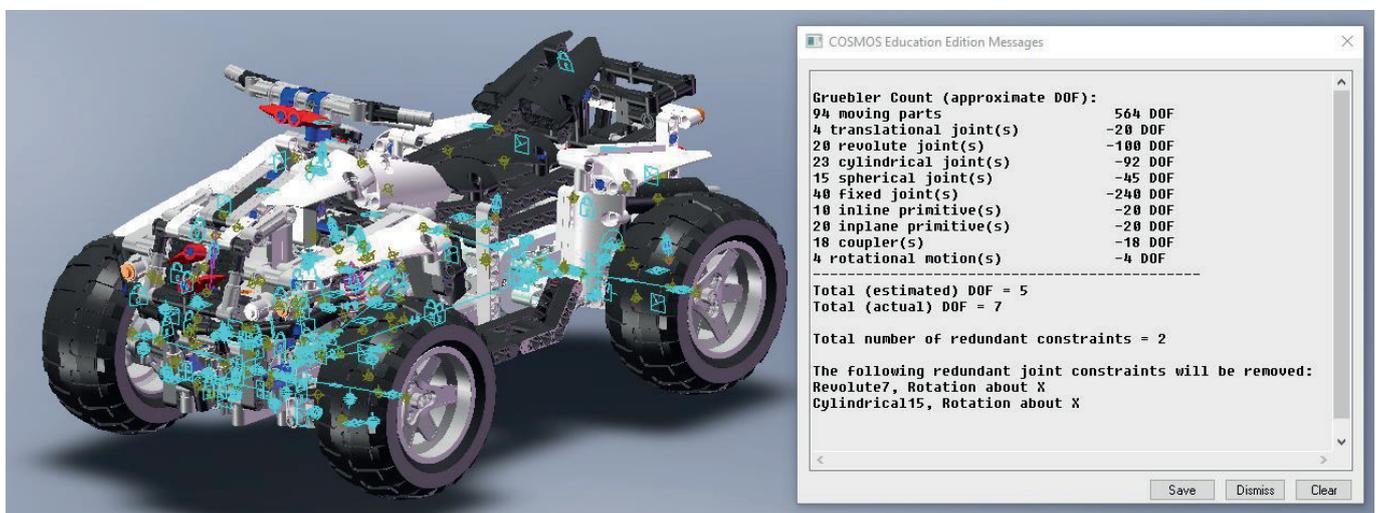
Los grados de libertad del modelo son:

- 1) El mecanismo de dirección de las ruedas, que está accionado por un motor.
- 2) El mecanismo de movimiento de las ruedas, que se acciona por un motor.
- 3, 4, 5 y 6) El movimiento de los amortiguadores, que se deja libre en esta simulación para que puedan actuar de forma similar a la real.
- 7, 8 y 9) Tres grados de libertad inútiles de tres componentes, cuyos únicos contactos con otros componentes son esféricos y por tanto no hay nada que limite su giro.

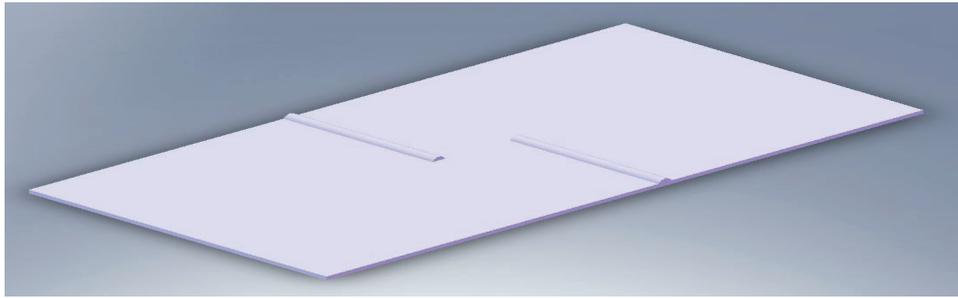


(Fig.147. Grados de libertad inútiles)

Al definir completamente el movimiento del modelo, se observa que quedan siete grados de libertad, que son los cuatro de los amortiguadores y los tres inútiles que se han comentado con anterioridad.

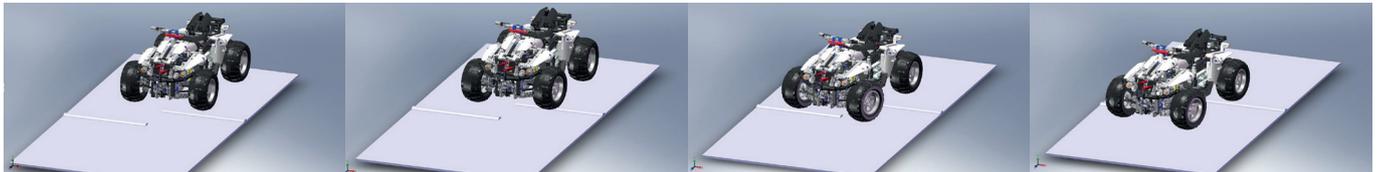


(Fig.148. Modelo vLTm_nico-quad completamente definido)



(Fig.149. Base)

El hecho de que no se defina el movimiento de los amortiguadores, sino que se deje libre de forma que este pueda actuar de forma similar a un amortiguador real, hace necesario un cambio en la forma de la base. Si se simulara el movimiento sobre una base plana, los amortiguadores no tendrían ninguna actuación posible, ya que mantendrían una posición fija durante todo el tiempo de la simulación. Por ello se realiza una base que presenta unas irregularidades para que se vea la acción de los amortiguadores al pasar sobre ellas.



(Fig.150. Simulación del modelo vLTm_nico-quad en lapsos de 1 segundo)

8.7. vLTm_42056

El modelo Lego© Technic 42056 es una recreación del Porsche 911 GT3 RS. ha sido virtualizado, auto-alineado y se ha simulado su movimiento completamente en el desarrollo de este proyecto. Además, debido a la gran cantidad de componentes del mismo (2704) se ha realizado el montaje del modelo físico también para poder tener una referencia más clara de qué piezas interactúan con otras y como lo hacen.

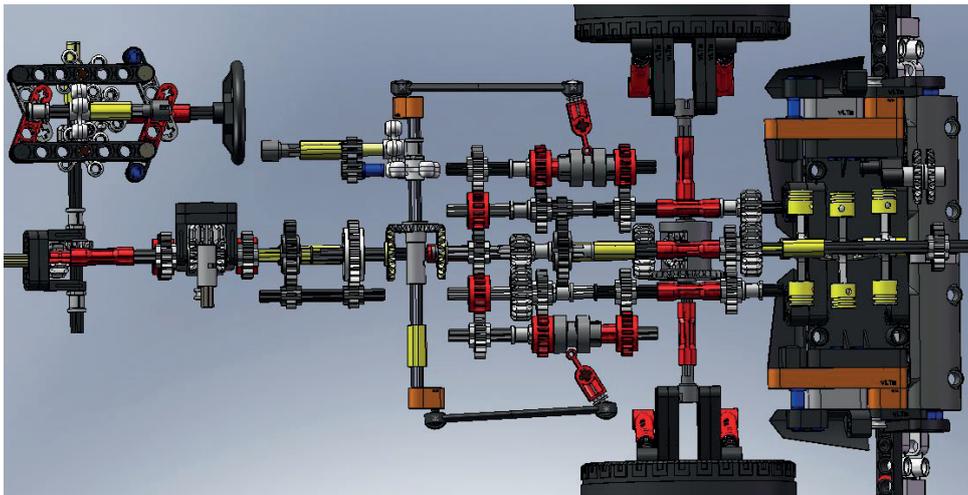


(Fig. 151. Modelo Lego© Technic 42056 físico)



(Fig. 152. Modelo vLTm_42056)

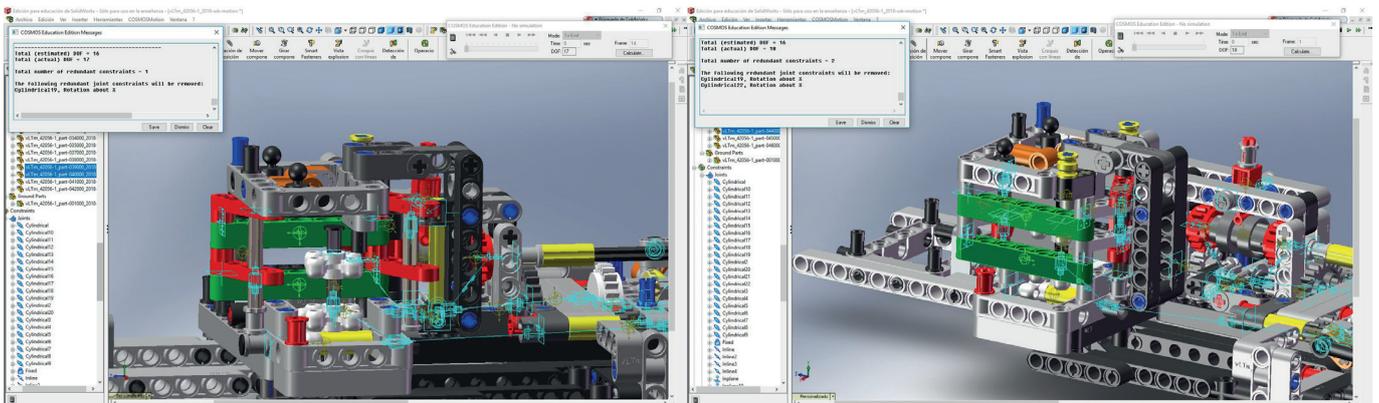
Se trata de un modelo con un nivel de dificultad elevado, con una gran número de mecanismo y buen nivel de detalle sobre los mismos, especialmente en el sistema motriz del modelo, donde se puede implementar un sistema de 4 marchas, punto muerto y marcha atrás.



(Fig.153. Tren de engranajes modelo vLLm_42056)

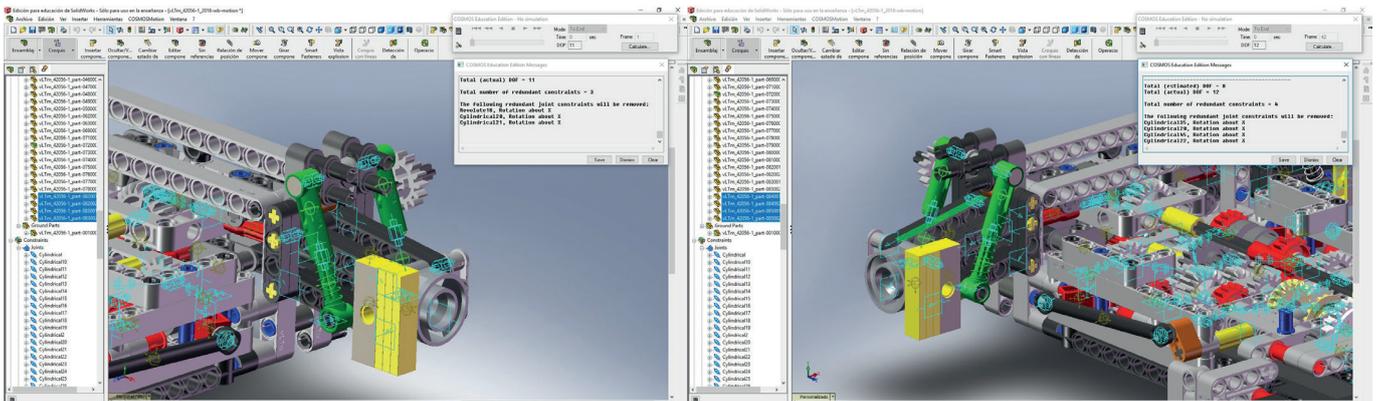
Durante la auto-alineación del modelo han surgido una serie de restricciones en exceso que no son posibles eliminar.

Las dos primeras surgen en el mecanismo a cargo del cambio de marchas. En la imagen (Fig.154) se puede observar que las piezas destacadas en verde están repetidas, ya que tanto la superior como la inferior tienen como función asegurar el movimiento del cuadrilátero articulado en el que aparecen.



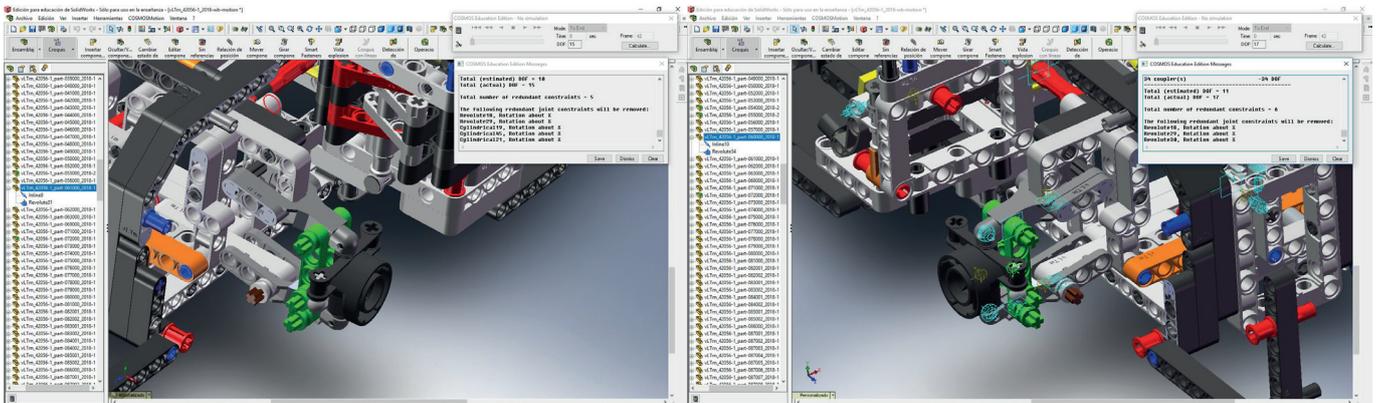
(Fig.154. Restricciones en exceso 1 y 2)

Las dos siguientes restricciones en exceso aparecen al duplicar los amortiguadores de las ruedas traseras.



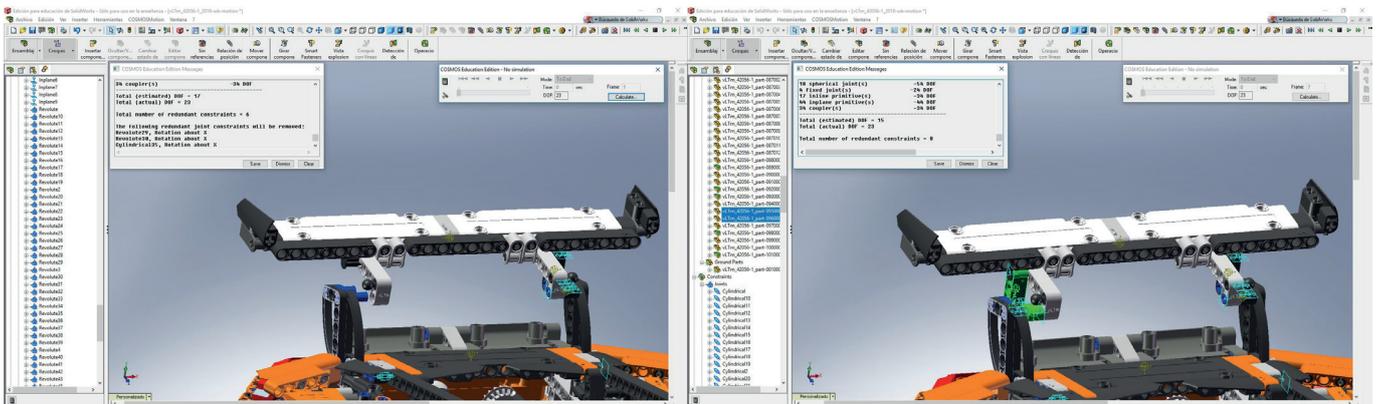
(Fig.155. Restricciones en exceso 3 y 4)

Las restricciones en exceso quinta y sexta tienen su origen en el mismo punto que el modelo anterior. En la parte izquierda de la imagen (Fig. 156) se puede observar resaltado en color verde el cuadrilátero sin restricciones excesivas. En la parte central y derecha se resaltan las piezas que dan lugar a sendas restricciones, en la zona del amortiguador de las ruedas delanteras.



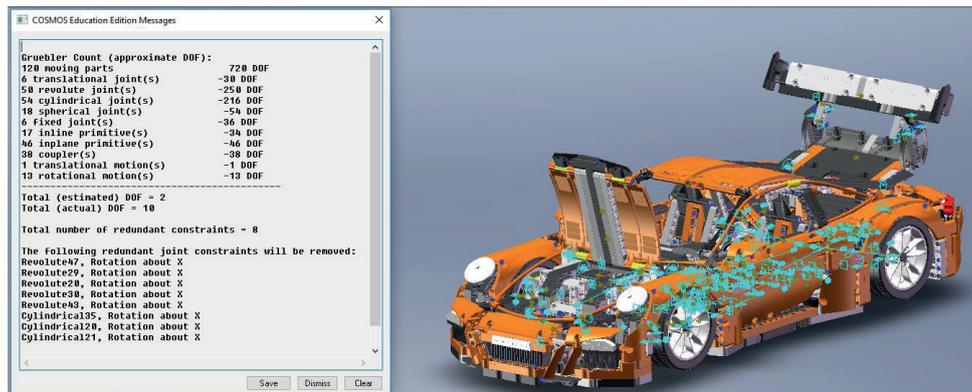
(Fig. 156. Restricciones 5 y 6)

Aparecen dos restricciones en exceso más en el mecanismo que permite nivelar el alerón. Las piezas resaltadas en verde tienen exactamente la misma función que sus homólogas simétricas. En definitiva se trata de dos cuadriláteros articulados que comparten dos de sus piezas. La repetición de las dos restantes es lo que da lugar a las restricciones en exceso.



(Fig. 157. Restricciones 7 y 8)

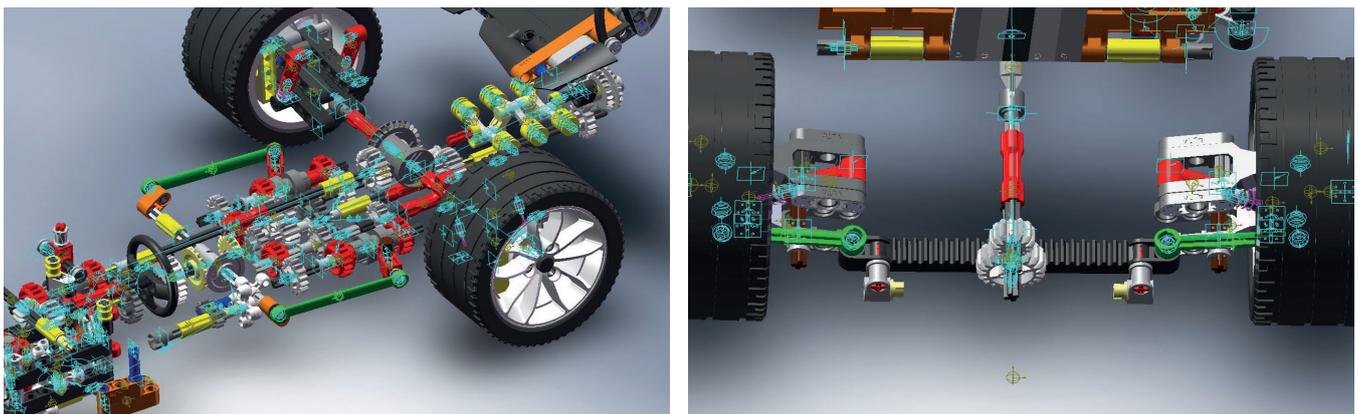
Al final del proceso de auto-alineación y de definición de los movimientos necesarios para la simulación, el modelo queda con diez grados de libertad y ocho restricciones en exceso. Para ello, se han tenido que relacionar las 120 partes móviles con la parte fija, definiendo casi 200 pares cinemáticos, 38 acoplamientos entre pares y 14 movimientos.



(Fig.158. Modelo vLTm_42056 completamente definido)

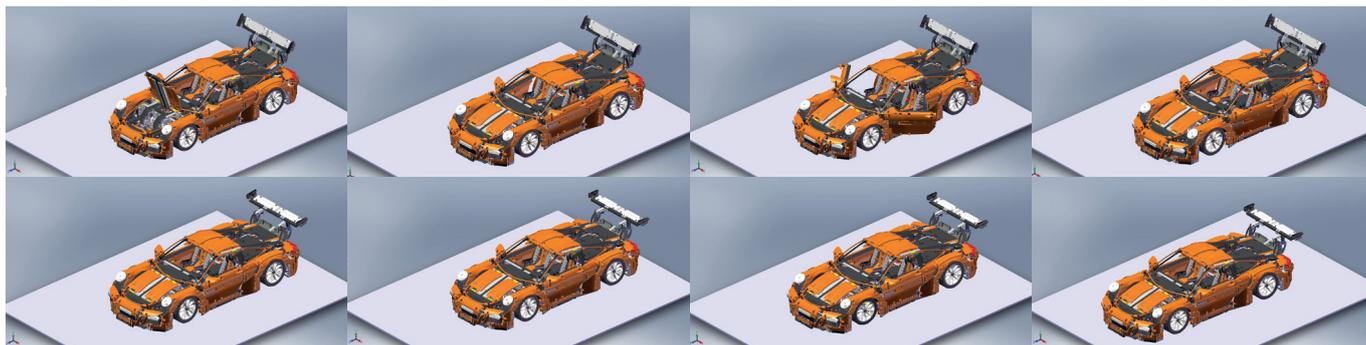
Los grados de libertad necesarios para determinar el movimiento del modelo ya han sido definidos. Entre ellos se encuentran el movimiento del capó y del alerón, el movimiento de las ruedas traseras generado en el motor, la dirección de las ruedas delanteras y la apertura y el cierre de las puertas. Los diez restantes responden a:

- 1 y 2) Las dos ruedas delanteras, cuyo movimiento viene dado cuando entran en contacto con el suelo, puesto que seguirán el movimiento de las ruedas tractoras traseras, donde se origina el movimiento.
- 3, 4, 5 y 6) Los amortiguadores. Pese a ser seis amortiguadores solo otorgan cuatro grados de libertad, ya que dos están repetidos y el movimiento que permiten es el mismo que aquellos a los que duplican.
- 7, 8, 9 y 10) Responden a grados de libertad inútiles fruto de la unión de piezas únicamente por pares esféricos. Dos de ellos están ubicados en el sistema de transmisión de las marchas (Fig.159, izquierda) y los otros dos forman parte del sistema de dirección de las ruedas delanteras (Fig.159, derecha).



(Fig.159. GDL inútiles)

Teniendo en cuenta estos resultados es posible realizar la simulación sobre una base para mostrar el movimiento del modelo.

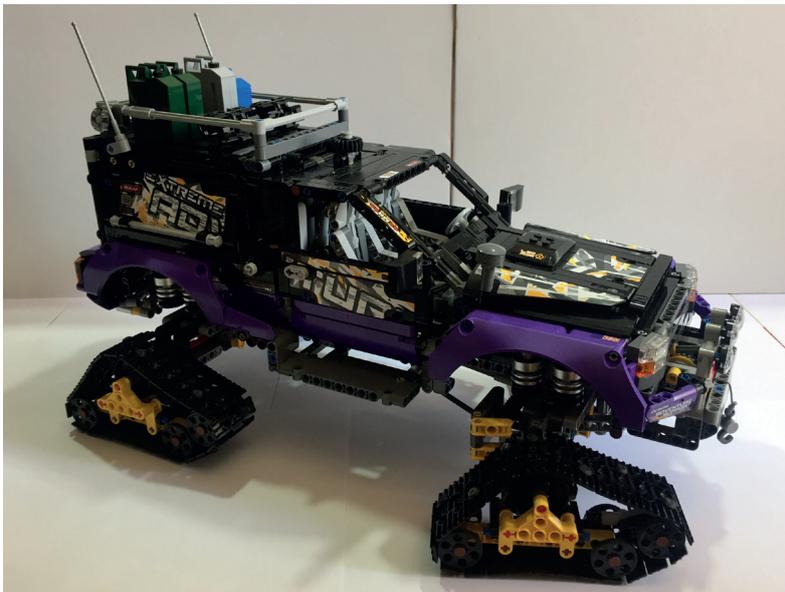


(Fig.160. Simulación del modelo vLTm_42056 en lapsos de 1 segundo)

8.8. vLTm_42069-1

El “set” Lego© Technic 42069 tiene la posibilidad de construir dos modelos diferentes partiendo de los mismos componentes. Para el desarrollo de este proyecto se ha realizado la primera forma, un vehículo que cuenta con cuatro orugas para agarrarse al terreno, suspensión funcional y un cabestrante entre sus mecanismos más destacados.

De nuevo se trata de un modelo de dificultad elevada que cuenta con un gran número de piezas (2382). Del mismo modo que con el modelo anterior, este también ha sido construido físicamente para tener un modelo manipulable que permita una mayor comprensión del comportamiento de las diferentes piezas entre sí.



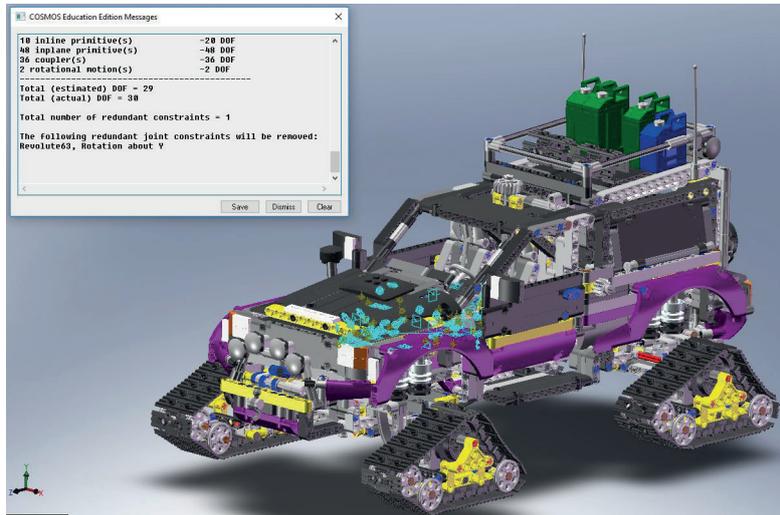
(Fig.161. Modelo Lego© Technic 42069 físico)



(Fig.162. Modelo vLTm_42069)

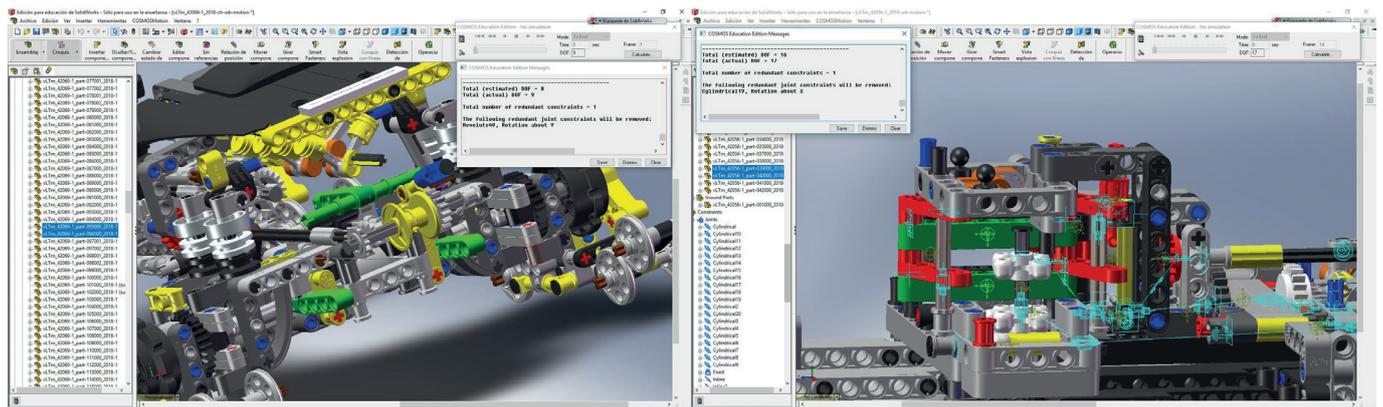
Este modelo ha sido virtualizado, auto-alineado y se ha simulado su movimiento en el desarrollo de este proyecto.

Al terminar el proceso de auto-alineación del modelo, este cuenta con treinta grados de libertad y dos restricciones en exceso.



(Fig.163. Modelo vLTm_42069 auto-alineado)

Ambas restricciones se encuentran en los sistemas de suspensión (tanto delantero como trasero) y se deben al mismo problema. Ambas están conectadas con el chasis mediante un cuadrilátero articulado que cuenta con una pieza duplicada. En la imagen (Fig.165) se puede observar que las piezas destacadas en verde realizan la función de actuadores del cuadrilátero mientras que la pieza en la que se ubica todo el sistema suspendido actúa de seguidor. La parte inferior del cuadrilátero está duplicada en ambos casos, siendo el motivo por el que aparecen ambas restricciones en exceso.

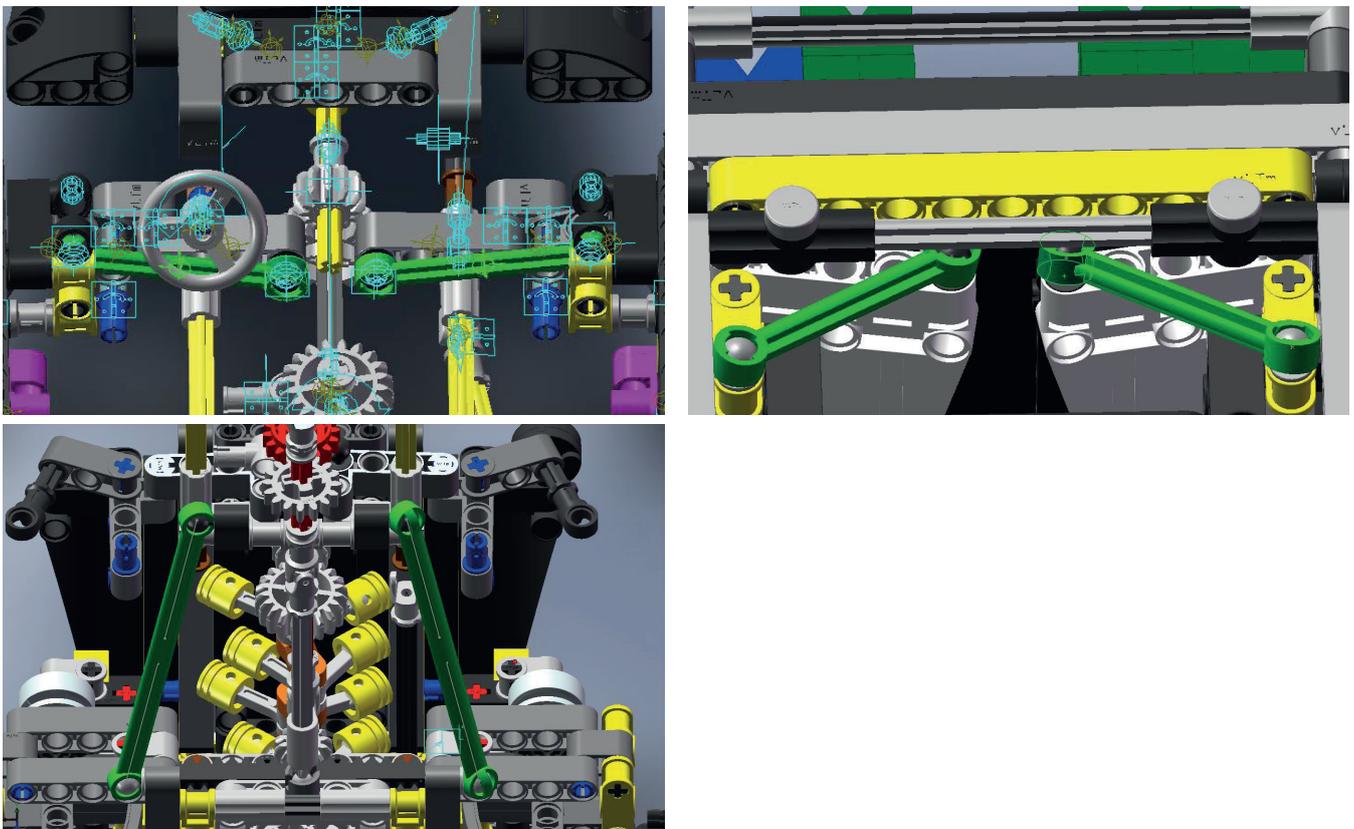


(Fig.164. Restricciones 1 y 2)

Los grados de libertad del mecanismo se deben a:

- 1 y 2) El mecanismo del cabrestante, el cual tiene dos grados de libertad por 1) el mecanismo que permite la recogida del cable y 2) el mecanismo que impide que el cable se mueva libremente.
- 3) El mecanismo que se encarga de la dirección de las catalinas delanteras.
- 4) El mecanismo que se encarga de la elevación del techo de la parte trasera.

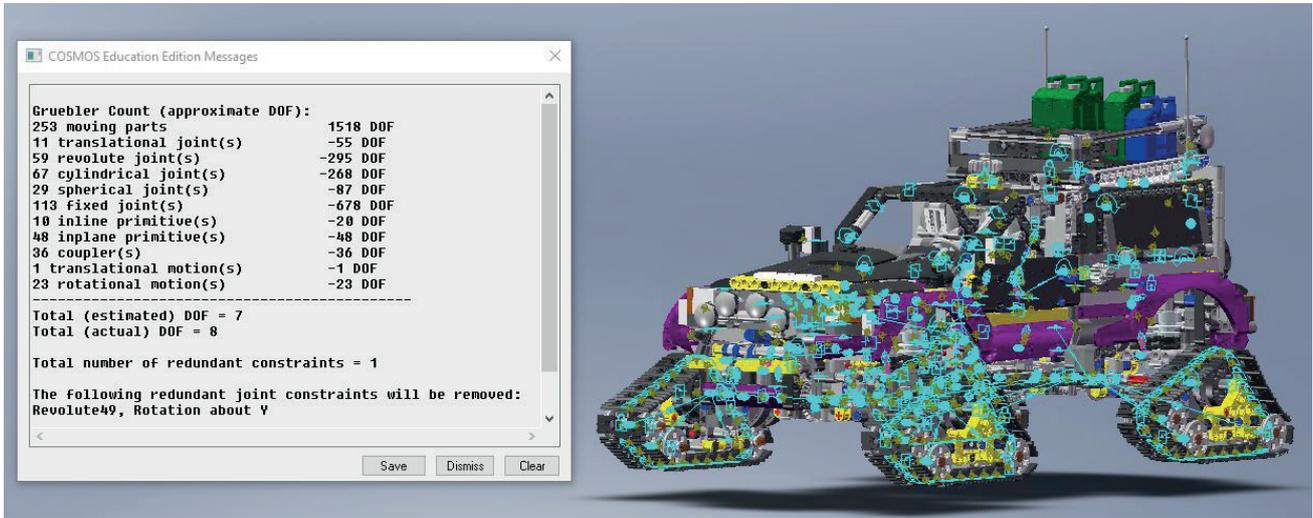
- 5) El sistema de movimiento de las catalinas.
- 6) El capó.
- 7) La tapa del botiquín.
- 8 y 9) Las aberturas laterales que resguardan el botiquín y los extintores.
- 10 y 11) Las puertas de apertura de gaviota.
- 12) La puerta trasera de acceso al maletero.
- 13, 14, 15 y 16) El movimiento de rotación del apoyo de las catalinas respecto al eje de rotación de estas que permite que las cadenas se adapten el terreno.
- 17) El movimiento de la palanca de cambio de marchas.
- 18) El movimiento del volante.
- 19 y 20) El movimiento de las antenas superiores.
- 21) El sistema de cierre de la puerta del maletero.
- 22) El movimiento del cajón del maletero que contiene la pala.
- 23 y 24) El movimiento de los dos sistemas de suspensión.
- 25, 26, 27, 28, 29 y 30) Grados de libertad inútiles fruto de la unión de piezas exclusivamente mediante pares esféricos que no pueden limitar el movimiento de rotación que existe. Están ubicados por parejas, la primera en el sistema de apertura de las puerta, la segunda pareja en el sistema de elevación del techo trasero, y la última pareja en el sistema de suspensión frontal.



(Fig. 165. GDL inútiles)

Cuando se definen los movimientos necesarios para visualizar el correcto comportamiento del modelo quedan 8 grados de libertad, que pertenecen a los grados de libertad inútiles y los sistemas de suspensión, que se

dejan libres para poder simular su comportamiento real.

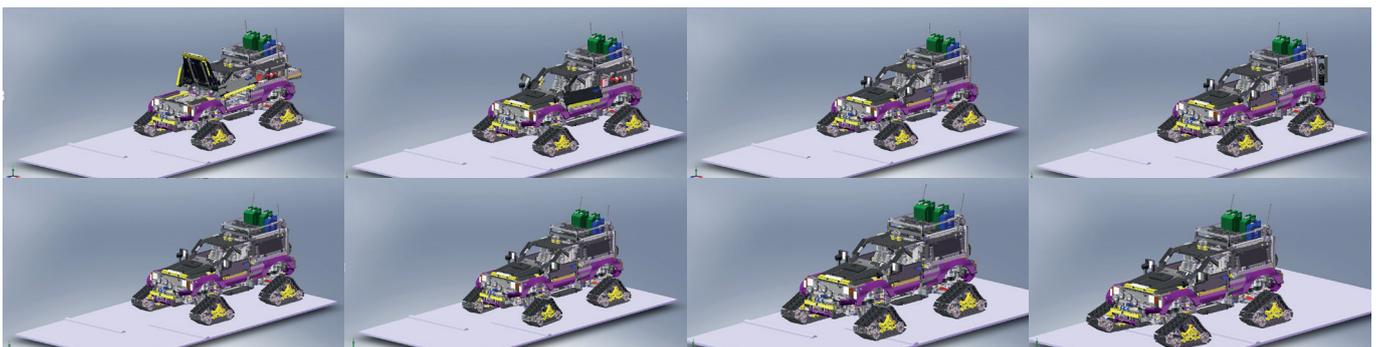


(Fig.166. Modelo vLTm_42069 completamente definido)

En este caso, ha sido necesario establecer 337 pares cinemáticos, 36 acoplamientos y 24 movimientos para definir de forma completa el funcionamiento del modelo.

Para poder simular la acción de los amortiguadores se utiliza una base con irregularidades, como se ha explicado en apartados anteriores.

Cabe destacar que Solid Works y su componentes CosmosMotion no son capaces de simular el comportamiento de las cadenas de una forma adecuada. Por ello, en la simulación del movimiento que se ha realizado el conjunto eslabones que forma una cadena se ha supuesto fijo en relación a su catenaria correspondiente, de forma que sí se pueda apreciar como las cadenas siguen el movimiento del cuerpo al que están unidas, tanto el movimiento propiciado por la suspensión como por el giro del sistema de dirección delantero.



(Fig.167. Simulación del modelo vLTm_42069-1 en lapsos de 0,5 segundos)

9. CONCLUSIONES

Durante la elaboración de este proyecto se han adquirido los conocimientos necesarios para realizar la virtualización, auto-alineación y simulación de un modelo de máquina mecánica; conocimientos relevantes en el ámbito de la ingeniería que se han adquirido mediante el uso de herramientas propias del ámbito, con las cuales se ha adquirido una gran soltura.

Durante el proceso de auto-alineación se ha llegado a la conclusión de que cualquier máquina puede ser auto-alineada si se diseña apropiadamente para ello. En algunos de los modelos propuestos se ha visto como resultado cero restricciones en exceso y en los que no ha sido posible obtener la auto-alineación completa, se ha especificado el motivo por el que no era posible. Por tanto, si bien un modelo predefinido puede no ser auto-alineable, dicho modelo se puede rediseñar para que lo sea.

También se ha tomado conciencia del valor de los mecanismos y máquinas auto-alineados, ya que eliminan en gran medida la obsolescencia programada, siendo, por tanto un esfuerzo muy útil y un paso adelante en la sostenibilidad medioambiental en el entorno del diseño de máquinas.

por último, cabe destacar que ha sido necesario el desarrollo e interiorización de una metodología práctica para la elaboración del proyecto.

10. BIBLIOGRAFÍA

- L. Reshetov, *Self-aligning mechanisms*, Mir, 1982
Y. Isogawa, *Lego© Technic Tora no Maki*, 2010
Y. Isogawa, *The Lego© Mindstorms Ev3 Idea Book*, 2015

www.lego.com

<http://www.lego.com/en-us/technic>

www.brickset.com

www.bricklink.com

www.technicbricks.com

www.virtualtechmodels.com

<http://www.nico71.fr/motorized-4x4-quad/>

<http://jkbrickworks.com/da-vinci-flying-machine/>

PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN.....	pág. 102
I. Capítulo 1º: Software.....	pág. 102
II. Capítulo 2º: Equipo informático.....	pág. 103
III. Capítulo 3º: Modelos Lego© Technic.....	pág. 104
IV. Capítulo 4º: Modelos virtuales Lego© Technic.....	pág. 104
2. RESUMEN.....	pág. 105

1. INTRODUCCIÓN

Para contabilizar el coste total de este proyecto se desglosa el presupuesto en 4 capítulos que engloban los bloques independientes de recursos empleados en su realización. El cómputo global se obtendrá al final, como suma de cada bloque.

Se parte del supuesto en que un solo cliente es el demandante de la totalidad del trabajo, con lo que es este mismo el que asume la totalidad de los gastos. Como se presenta en la memoria, el enfoque profesional de este trabajo es el de que un cliente ha contruido un modelo de máquina y demanda saber los cojinetes que necesita colocar y dónde para obtener una máquina auto-alineada. Al cliente se le presentará, al término del proyecto: 1) Un modelo virtual de la máquina a escala operativo en el entorno Solid Works. 2) Un modelo en CosmosMotion con la identificación del tipo de cojinete que se debería colocar en cada par cinemático. Y 3) una simulación para visualizar el funcionamiento del prototipo.

I. Capítulo 1º: Software

En la elaboración del proyecto se ha hecho uso del programa Solid Works 2007 y de su complemento CosmosMotion. Se supone la amortización de la licencia en el año en que se adquiere. También se supone que dicha licencia no va a servir solo para la realización de este proyecto, sino que, al tratarse de una herramienta muy versátil y utilizada en el ámbito del diseño industrial, se entiende que se utilizará en más proyectos a lo largo del año. Por tanto, el precio a aplicar en el presupuesto se tomará en función de las horas dedicadas al proyecto del total de las horas laborales del año.

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Horas laborables anuales	Amortización anual	Horas TFG	Coste (€)
Solid Works 2007 + CosmosMotion	1	5300	2000	100%	335	887,75
					Total:	887,75

Tabla 1. Presupuesto software

II. Capítulo 2º: Equipo informático

Para la realización de este trabajo es necesario disponer de un que cumpla los requisitos mínimos para poder soportar la herramienta Solid Works 2007. Sin embargo, el volumen de trabajo hace que los requisitos mínimos sean considerablemente mayores que los especificados para el propio programa. Se presenta, como ejemplo, los siguientes:

Procesador Intel® Core™ de séptima generación

Frecuencia/velocidad 3.4GHz.

Memoria RAM 8GB

En el presupuesto se listan los componentes del ordenador adquirido y el valor por el que se adquirieron, además de sumar el precio de la mano de obra propia en la labor de montaje.

Se supone una amortización del ordenador de 4 años.

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Horas laborables anuales	Amortización anual	Horas TFG	Coste (€)
Intel i7-4770	1	272	2000	25%	335	11,39
ASUS Z97-P	1	95,95	2000	25%	335	4,017906
DDR3 8/1600	1	78,95	2000	25%	335	3,306031
Coolermster Hyper	1	32,95	2000	25%	335	1,379781
Thermaltake Versa G2	1	43,95	2000	25%	335	1,840406
GTX 970 4GB	1	352	2000	25%	335	14,74
LG GH24NSB0 DVD-Rw Sata	1	15,95	2000	25%	335	0,667906
Samsung SSD 840	1	116	2000	25%	335	4,8575
1T WD CaviarBlue	1	50,95	2000	25%	335	2,133531
Tacens Radix-VI	1	64,95	2000	25%	335	2,719781
Tacens Anima ACR2	1	7,95	2000	25%	335	0,332906
Montaje PC	1	39,95	2000	25%	335	1,672906
Cab SA	1	1,95	2000	25%	335	0,081656
Genius DX 7100	1	9,95	2000	25%	335	0,416656
Total:		1183,45			Total:	49,56

Tabla 2. Presupuesto equipo informático

III. Capítulo 3º: Modelos Lego® Technic

Durante la elaboración de este proyecto ha sido necesaria la compra de dos de los modelos virtualizados. El importe de estos repercute directamente en el supuesto usuario final, dado que no tienen mayor utilidad una vez terminado el trabajo.

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Coste (€)
Modelo 42056	1	310,25	310,25
Modelo 42069	1	139,99	139,99
		Total:	450,24

Tabla 3. Presupuesto modelos Lego® Technic

IV. Capítulo 4º: Modelos virtuales Lego® Technic

A continuación se presenta el desglose del coste de la realización del proyecto en sí. Para dar a conocer el tiempo completo destinado a la realización del proyecto se presentan tanto la fase de aprendizaje como la fase de trabajo autónomo. Pero como no sería ético cobrar el tiempo destinado al aprendizaje y con el objetivo de que se diferencien fácilmente, estas están contabilizadas con un precio de cero euros por hora.

Descripción	Tarea	Horas	Precio hora (€)	Precio tarea (€)	Coste modelo (€)
Modelos Tora	Virtualización	3,5	0	0	0
Modelos Ev3	Virtualización	1	0	0	0
Modelo Ev3-0108	Virtualización	4	30	120	240
	Auto-alineación	1	30	30	
	Simulación	3	30	90	
Modelo pw-085	Virtualización	5	30	150	277,5
	Auto-alineación	3	30	90	
	Simulación	1,25	30	37,5	
Modelo 8816	Auto-alineación	2	0	0	0
	Simulación	1	0	0	
Modelo 8047-1	Virtualización cadenas	2	0	0	150
	Virtualización	5	30	150	
Modelo 8459-2	Auto-alineación	7,5	0	0	0
	Virtualización	2	0	0	
Modelo 8862-1	Virtualización	19,5	0	0	307,5
	Auto-alineación guiada	7,5	0	0	
	Auto-alineación	6,25	30	187,5	
	Simulación	4	30	120	
Modelo jkbw-flying	Virtualización	10	30	300	675
	Auto-alineación	11	30	330	
	Simulación	1,5	30	45	
Modelo nico-quad	Virtualización	43	30	1290	1950
	Auto-alineación	20	30	600	
	Simulación	2	30	60	
Modelo 42056	Virtualización	47	30	1410	2550
	Auto-alineación	30	30	900	
	Simulación	8	30	240	
Modelo 42069-1	Virtualización	40	30	1200	2520
	Auto-alineación	37	30	1110	
	Simulación	7	30	210	
Total:		335		Total:	8670

Tabla 4. Presupuesto modelos virtuales Lego® Technic

2.RESUMEN

A continuación se presenta el sumatorio del presupuesto del proyecto total, aplicando un 21% de IVA y un 6% en concepto de beneficio industrial.

Capítulo	Coste (€)
I. Software	887,75
II. Equipo informático	49,56
III. Modelos Lego© Technic	450,24
IV. Modelos virtuales Lego© Technic	8670
SUBTOTAL	10057,55

Tabla 5. Resumen del presupuesto

Concepto	Coste (€)
Subtotal	10057,55
Beneficio industrial (6%)	10661,00
IVA (21%)	12899,81
TOTAL	12899,81

Tabla 6. Total del presupuesto