



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR ENGINYERS  
INDUSTRIALS VALÈNCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**DISEÑO MECÁNICO,  
CONSTRUCCIÓN VIRTUAL Y  
SIMULACIÓN CINEMÁTICA DE  
LOS MODELOS LEGO TECHNIC:  
LTm 42008-1, LTm 42000-1, vLTM  
8455-2.**

**AUTOR:**

BEATRIZ CHEN ZHOU

**DIRECTOR/A:**

JOSE LUIS OLIVER HERRERO

CURSO ACADÉMICO: 2014-15





# CONTENIDO

**MEMORIA ..... 5**

**PRESUPUESTO ..... 125**



# MEMORIA

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	9
1.1 Resumen y objeto del proyecto	9
1.2 Competencias a adquirir	10
<b>2. LEGO TECHNIC</b>	11
2.1 El modelo LEGO Technic	11
2.2 El modelo LEGO Technic virtual	11
2.3 Utilidad de los modelos LEGO Technic virtuales	12
2.4 Los componentes LEGO Technic	13
2.5 Máquinas reales y modelos LEGO Technic equiparables	14
2.6 Modelos Isogawa Yoshihito	16
<b>3. ENSAMBLAJE DEL MODELO</b>	17
3.1 Presentación y objetivos	17
3.2 Proceso de montaje	18
3.2.1 Selección del modelo	18
3.2.2 Selección de los componentes	19
3.2.3 Identificación de las piezas	21
3.2.4 Ensamblado	22
3.3 Ensamblajes en SolidWorks	22
3.3.1 Nomenclatura	22
3.3.2 Condiciones	23
3.3.3 Relaciones de posición	24
3.3.4 Sistema LEGO Technic en Solidworks	27
3.3.5 Comprobación	30
<b>4. COMPACTACIÓN</b>	31
<b>5. MODELO CINEMÁTICO AUTOALINEADOR</b>	32
5.1 Presentación y objetivos	32
5.2 Introducción a los sistemas mecánicos	32
5.3 Conceptos básicos	33
5.3.1 Impulsor, seguidor y factor de transmisión	33
5.3.2 Máquina y mecanismo	34
5.4 Estudio cinemático	35
5.4.1 La cadena cinemática	36
5.4.2 Evolución temporal del movimiento en un mecanismo	36
5.5 Pares cinemáticos	37
5.6 Movilidad en los mecanismos	39

5.6.1	Cálculo de la movilidad en mecanismos planos .....	39
5.6.2	Cálculo de la movilidad en mecanismos espaciales .....	39
5.6.3	Diagramas cinemáticos.....	40
5.7	Mecanismo autoalineador.....	41
5.8	Modelo cinemático autoalineador en SolidWorks. Aplicación integrada COSMOS Motion .....	42
5.8.1	Entorno de trabajo .....	42
5.8.2	Piezas .....	43
5.8.3	Pares cinemáticos .....	43
5.8.4	Pares primitivos.....	50
5.8.5	Acoplamientos.....	54
5.8.6	GDL del mecanismo.....	57
<b>6.</b>	<b>SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL.....</b>	<b>59</b>
6.1	Introducción .....	59
6.2	Simulación del movimiento en COSMOS .....	59
6.2.1	Definición del movimiento .....	59
6.2.2	Entorno y parámetros de la simulación.....	60
<b>7.</b>	<b>CREACIÓN DE MODELOS VIRTUALES.....</b>	<b>65</b>
7.1	Mecanismos Isogawa Yoshihito .....	65
7.1.1	Creación modelo virtual TORA – 002 .....	65
7.1.2	Creación modelo virtual TORA – 008 .....	66
7.1.3	Creación modelo virtual TORA – 009 .....	67
7.1.4	Creación modelo virtual TORA – 013 .....	68
7.1.5	Creación modelo virtual TORA – 026 .....	69
7.1.6	Creación modelo virtual TORA – 037 .....	70
7.1.7	Creación modelo virtual TORA – 040 .....	71
7.1.8	Creación modelo virtual TORA – 051 .....	72
7.1.9	Creación modelo virtual TORA – 059 .....	73
7.1.10	Creación modelo virtual TORA – 062 .....	74
7.1.11	Creación modelo virtual TORA – 075 .....	75
7.1.12	Creación modelo virtual TORA – 079 .....	76
7.1.13	Creación modelo virtual TORA – 093 .....	77
7.1.14	Creación modelo virtual TORA – 098 .....	78
7.1.15	Creación modelo virtual TORA – 102 .....	79
7.1.16	Creación modelo virtual TORA – 107 .....	80
7.1.17	Creación modelo virtual T – 1861 .....	81
7.2	Creación modelo virtual vLTm – 8891-1 .....	83
7.3	Creación modelo virtual TnMm – 0250 .....	85
7.4	Creación modelo virtual vLTm – 8872 – 2 .....	87
7.5	Creación modelo virtual vLTm – 8455 – 2 .....	89



7.6	Creación modelo virtual vLTm – 8448 – 1 .....	91
7.7	Creación modelo virtual vLTm – 42008 – 1 .....	95
7.8	Creación modelo virtual vLTm – 42000 – 1 .....	100
<b>8.</b>	<b>SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES</b> .....	<b>114</b>
8.1	Simulación del modelo virtual vLTm – 8816 – 1 .....	114
8.2	Simulación del modelo virtual TnMm – 0367 – 1 .....	116
8.3	Simulación del modelo virtual vLTm – 8854 – 1 .....	117
8.4	Simulación del modelo virtual vLTm – 8862 – 2 .....	119
8.5	Simulación del modelo virtual vLTm – 8837 – 1 .....	121
8.6	Simulación del modelo virtual vLTm – 8455 – 2 .....	122
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>124</b>



# MEMORIA

---

## 1. INTRODUCCI3N

### 1.1 Resumen y objeto del proyecto

El principal objetivo de este proyecto es el conocimiento y aprendizaje de herramientas de diseo en ingenieria mecánica tanto para una escuela de ingenieros industriales como para titulados en esta rama. En este caso, la herramienta de la que estamos hablando es un programa denominado SOLIDWORKS.

Para ello se ha considerado adecuado utilizar como material base un sistema de construcci3n modular muy popular entre personas de todas las edades, y al mismo tiempo de un nivel de sofisticaci3n tècnica notablemente elevado debido al equipo de ingenieros que se encargan de crear y proponer nuevos modelos para su comercializaci3n. Estos son los "Modelos Lego® Technic". Gracias a su simplicidad de montaje y la semejanza con maquinaria real nos ayudarà a comprender mejor el funcionamiento de los programas de CAD para luego extrapolarlos a la vida real.

El planteamiento que se ha utilizado ha venido desarrollàndose desde hace 10 aros como material docente en las asignaturas que el profesor responsable de este proyecto ha impartido en nuestra Escuela, y sigue desarrollàndose actualmente. Consiste en lo siguiente:

- 1) En primer lugar es necesario crear modelos virtuales de los componentes reales que se suministran al comprar cualquier caja LEGO Technic. Para ello es necesario utilizar un programa de CAD.
- 2) Una vez se dispone de un nùmero suficiente de estos componentes virtuales, tras elegir algunos modelos de los que se pueden encontrar en la pàgina web creada al efecto, [www.virtualtechnicmodels.com](http://www.virtualtechnicmodels.com), se procede a la creaci3n virtual con el mismo programa de CAD utilizado anteriormente, o con cualquier otro que nos pueda interesar, de las piezas que a la vista del modelo real, o de sus instrucciones, lo constituyen. El concepto de pieza es el siguiente: conjunto de componentes virtuales que no poseen movimiento entre ellos en el modelo final, o si lo poseen es irrelevante desde un punto de vista operativo. Una fase del proceso de diseo consiste en la identificaci3n de estas piezas.
- 3) Para facilitar la labor de montaje en àmbitos docentes y profesionales se ha considerado adecuado llevar a cabo un proceso de "compactaci3n", de tal forma que cada pieza sea una ùnica entidad virtual, y no un conjunto de entidades (componentes virtuales). Este proceso constituye una innovaci3n en el proyecto y se aplica sistemàticamente a un conjunto de modelos, unos creados durante la realizaci3n del proyecto, otros ya disponibles.
- 4) Partiendo de las piezas que constituyen cada modelo, se procede a montarlas con diferentes programas de CAD, y a realizar una labor tècnica sofisticada en ingenieria mecánica: la elaboraci3n de un modelo cinemático autoalineador. Proceso que tambièn constituye una innovaci3n en el proyecto.

- 5) Con este modelo creado es posible realizar una simulación virtual del modelo, que nosotros denominados “*máquina*”, tanto desde un punto de vista del movimiento, como desde un punto de vista de la simulación resistente de cualquiera de sus piezas, utilizando la técnica de los elementos finitos. Para ello se utilizan los programas que permiten realizar este tipo de simulación en los programas de CAD utilizados, o bien programas específicos.

Como conclusión mostraremos cómo los conceptos adquiridos pueden ser aplicados a la realidad, ya sea creando las máquinas LEGO Technic a escala con productos comerciales como rodamientos, etc. o aplicando las herramientas CAD y de simulación utilizadas a casos reales industriales.

## 1.2 Competencias a adquirir

Las competencias adquiridas tras la realización de este TFG son las siguientes:

- 3E, Conocimientos básicos sobre el uso y programación de ordenadores, sistemas operativos, bases de datos, y programas informáticos con aplicación en la ingeniería.
- 11E, Conocimiento y utilización de los principios de teoría de máquinas y mecanismos de resistencia de materiales.
- 18E, Aplicar conocimientos de ingeniería mecánica y de materiales a conceptos tecnológicos en el ámbito industrial.
- 23E, Capacidad para realizar un trabajo individual que deberá ser defendido ante un tribunal universitario consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías industriales en el que se sintetizen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.
- 32E, Diseñar, calcular y ensayar todo tipo de máquinas y dispositivos industriales, así como de sus sistemas de accionamiento, de seguridad y control.
- 33G, Tomar decisiones y razonar de forma crítica.
- 34G, Desarrollar la creatividad.
- 35G, Resolver problemas con iniciativa propia y con espíritu emprendedor.
- 37G, Gestionar la información procedente de diversas fuentes y, en su caso, las herramientas informáticas de búsqueda y clasificación de recursos bibliográficos o de información mono o multimedia.
- 39G, Aprender de manera autónoma con el convencimiento de que el aprendizaje es continuo a lo largo de la vida.

## 2. LEGO TECHNIC

### 2.1 El modelo LEGO Technic

La serie “Technic” es una línea de juguetes de la compañía LEGO orientada a todo tipo de público, consistente en un conjunto muy amplio de componentes de plástico que se pueden interconectar fácilmente. El propósito de esta línea de Lego es crear modelos más avanzados y sobre todo con partes móviles más complejas, tales como mecanismos de dirección, vehículos con suspensión, grúas con cilindros neumáticos, etc., que los que se pueden construir con las clásicas piezas simples de construcción de Lego clásicas. El concepto fue dado a conocer por esta compañía por primera vez en la serie denominada “*Expert Builder*” en Estados Unidos, que en Europa se denominó “*Technical Lego*” en el año 1977, y se conoce con la denominación “*TECHNIC*” desde 1984.

Las “*cajas*” o “*sets*” LEGO Technic se caracterizan por la presencia de componentes especiales, tales como engranajes, ejes, pasadores, y vigas. Algunas de ellas vienen con componentes neumáticos o motores eléctricos. Todo lo cual permite construir modelos que se asemejan con gran fiabilidad a las máquinas mecánicas reales que nos rodean en nuestro entorno cotidiano.

El estilo de los “*sets*” LEGO Technic ha ido cambiando con el tiempo. Desde el año 2000 se utiliza una metodología de construcción diferente, que en la literatura anglosajona se denomina “*studless construction*”, en la que han desaparecido los botones característicos de los tradicionales “*ladrillos*” Lego. El método actual utiliza vigas y pasadores en su lugar.

MINDSTORMS, la línea de productos robóticos de Lego, también utiliza un conjunto amplio de los componentes LEGO Technic, aunque se vende como una línea separada. La nueva generación de MINDSTORMS, la denominada MINDSTORMS NXT, que salió al mercado en 2006, se basa en la nueva metodología de construcción citada. Desde hace años se utiliza en todo el mundo en tareas docentes relacionadas con la ingeniería de control.

### 2.2 El modelo LEGO Technic virtual

Si el objetivo fundamental de los sistemas de construcción didácticos avanzados, como la línea de juguetes LEGO Technic, es desarrollar la inventiva y las habilidades manuales del sujeto; la construcción de Modelos LEGO Technic Virtuales comparte el objetivo de desarrollar la inventiva, aportando un objetivo adicional muy importante: desarrollar las posibilidades que el uso de la aplicación SolidWorks 2007 (programa empleado en este trabajo), NX 8.0, Solid Edge o cualquier otro programa CAD, proporciona en el diseño y simulación de sistemas mecánicos.

Así como en la construcción tradicional de Máquinas LEGO Technic se dispone del conjunto necesario y suficiente de componentes LEGO Technic reales para que siguiendo las instrucciones se pueda obtener la máquina deseada, en el montaje de Máquinas LEGO Technic Virtuales, tal y como se plantea en este proyecto, se dispone de los Componentes LEGO Technic Virtuales necesarios y suficientes para, con la ayuda de las instrucciones originales de los modelos, documentos virtuales eDrawings o con el modelo real como guía, según el caso, poder crear la Máquina LEGO Technic Virtual equiparable a la real, pero con una característica fundamental: durante el proceso de creación del

modelo virtual, se han identificado como piezas virtuales aquellos conjuntos de componentes LEGO Technic que en la máquina real no tienen movimiento relativo entre ellos.

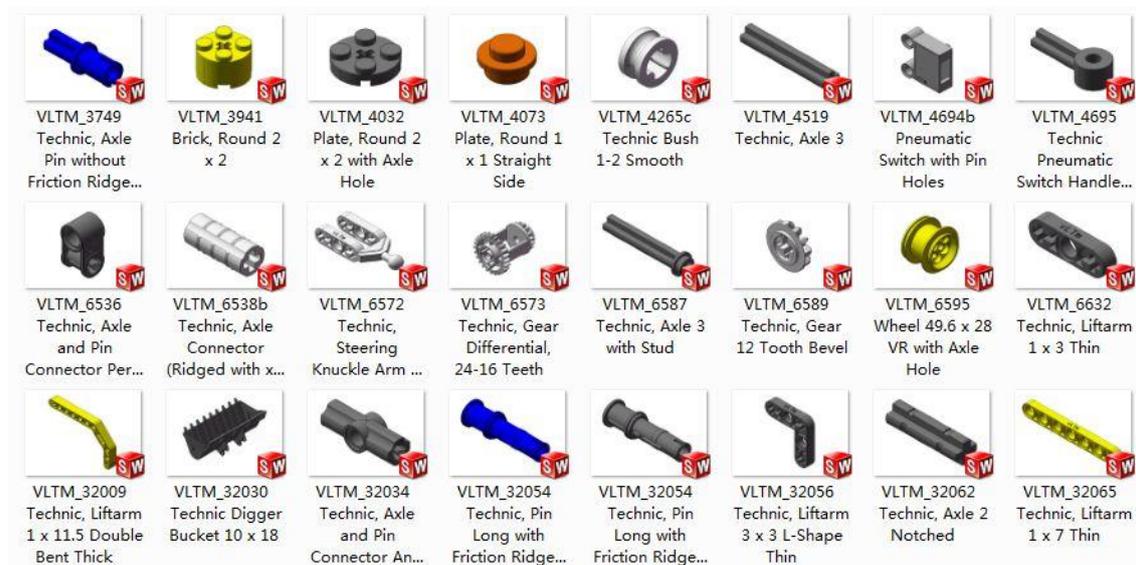


Figura 1. Componentes LEGO Technic virtuales

Cabe destacar la fase de identificación de las piezas que constituyen el modelo virtual, pues es la diferencia fundamental entre el montaje real y virtual: al identificar las piezas que forman el modelo virtual se tiene el mecanismo real al que el modelo LEGO Technic emula.

## 2.3 Utilidad de los modelos LEGO Technic virtuales.

Actualmente el diseño de mecanismos y sus componentes se lleva a cabo con programas informáticos como son SolidWorks, Solid Edge, Catia... Luego para iniciarse en estos programas es necesaria una etapa de formación en sus aspectos más básicos con mecanismos de complejidad no muy avanzada. Así, durante esta formativa, con cuantos más mecanismos y piezas que los formen se trabaje, mejor se desarrollarán trabajos posteriores en los que se aborde la creación de un nuevo mecanismo a partir de otros ya conocidos, optimización de los mismos o innovación.

Considerando esto, la utilidad de una colección de modelos LEGO Technic virtuales es evidente ya que, abarcando mecanismos desde los más simples a modelos de complejidad considerable, se dispone de recursos suficientes para esta etapa formativa, desde la familiarización con los programas de diseño al uso avanzado de los mismos. Además, la mayoría de modelos de la línea LEGO Technic emula máquinas reales, conteniendo el tipo de mecanismos más significativos que en realidad las componen como pueden ser los sistemas de suspensión, dirección, grúas, transmisión... consiguiendo la familiarización con dichos mecanismos.

Existe gran cantidad de textos sobre este tema, pero al tratarse de problemas de diseño de mecanismos reales es muy importante una buena visión e intuición espacial. Así, disponiendo de modelos en un entorno virtual en tres dimensiones, se cubre la necesidad de poder simular virtualmente el movimiento del modelo teórico en cuestión.

## 2.4 Los componentes LEGO Technic.

Seguidamente podemos observar imágenes de algunos de los componentes Lego Technic reales disponibles comercialmente. Su característica fundamental es que las dimensiones que los caracterizan han sido cuidadosamente seleccionadas en cada uno de ellos, de tal forma que puedan encajar unos con otros en cualquier montaje real que se considere. Esta característica es de mucha utilidad cuando han de virtualizarse, pues permite sistematizar esta tarea.

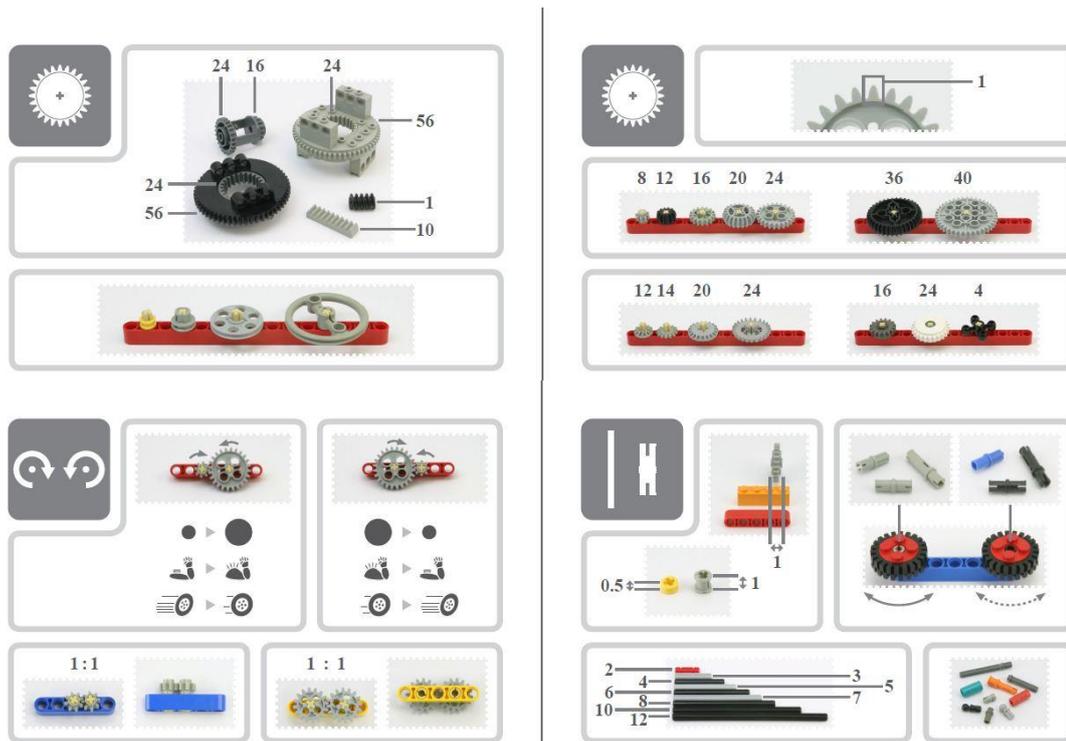


Figura 2. Componentes LEGO TECHNIC



Figura 3. Componentes LEGO Technic y sus equivalentes virtuales

Si quisiéramos hacernos una idea de la cantidad de componentes Lego Technic que existen en la actualidad, deberíamos visitar la página web [www.peeron.com](http://www.peeron.com), donde es posible encontrar información de todos los modelos Lego Technic, así como una lista de los componentes necesarios para cada modelo, muchos de los cuales tienen una imagen real o virtual asociada.

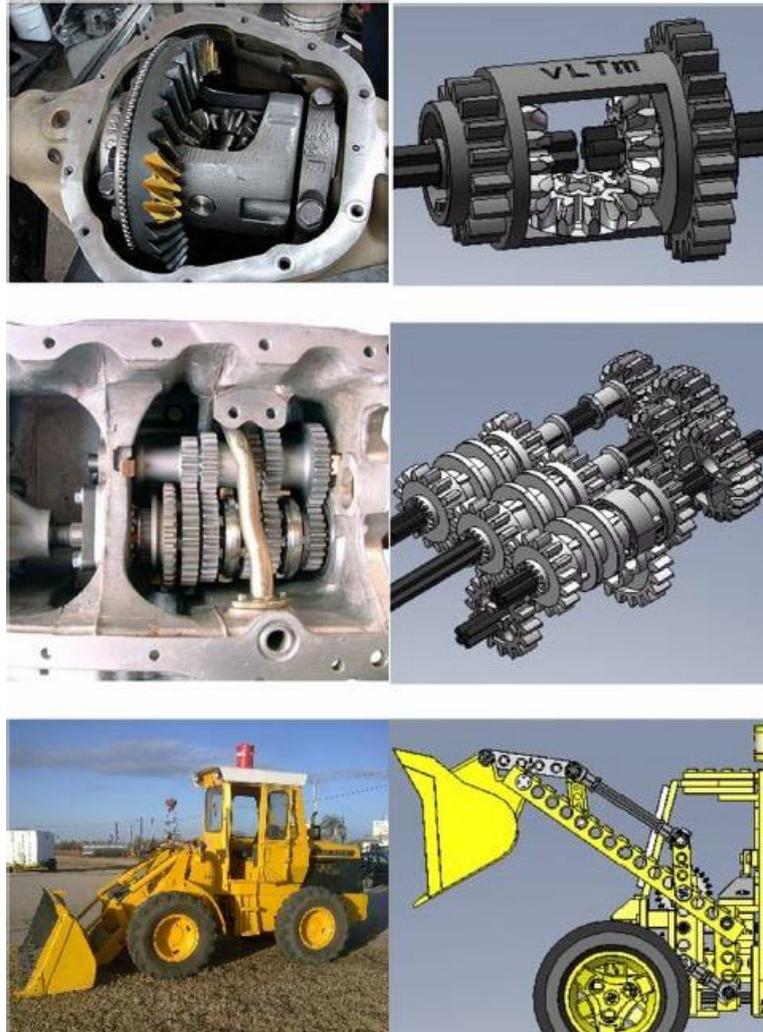
Si nos interesara adquirir cualquier material relacionado con Lego Technic, deberíamos utilizar [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com), lugar en donde se puede encontrar mucha información de los diferentes modelos Lego Technic y un amplio mercado a precios competitivos.

## 2.5 Máquinas reales y modelos LEGO Technic equiparables.

Para dar idea de la amplitud del abanico de posibles mecanismos que se pueden estudiar utilizando los modelos a escala LEGO Technic, se proporciona más adelante una serie de ejemplos. A partir de ella es posible percatarse de la multitud de mecanismos con que a diario entramos en contacto y a los que antes no habíamos prestado ninguna atención, así como de la fiabilidad con que la serie LEGO Technic los reproduce, siendo ello una justificación del interés de enseñar mecanismos en base a ellos.

Utilizando componentes LEGO Technic se pueden construir mecanismos a escala de actuadores neumáticos, deslizaderas, resortes, transmisión de movimiento mediante engranajes, correas, cadenas... Y, al combinar estos mecanismos, se puede emular a escala cualquier máquina real o crear otras similares.

Las figuras siguientes muestran mecanismos reales y sus equivalentes contruidos en el sistema LEGO Technic.



*Figura 4. Mecanismos reales y sus equivalentes virtuales: Transmisión diferencial, caja de cambios y pala cargadora*



*Figura 5. Cilindro hidráulico LEGO Technic y real*

## 2.6 Modelos Isogawa Yoshihito.

*Isogawa Yoshihito* es un escritor japonés del que podemos encontrar varios libros en los que expone y explica de manera sencilla y gráfica modelos mecánicos creados a partir de componentes LEGO Technic.

En concreto se ha utilizado la colección de “*LEGO Technic Idea Book*” que constituye un compendio de montajes convenientemente clasificados, de tal forma que es posible únicamente a través de la observación de las fotografías, localizar los componentes LEGO Technic necesarios y poder construirlos.

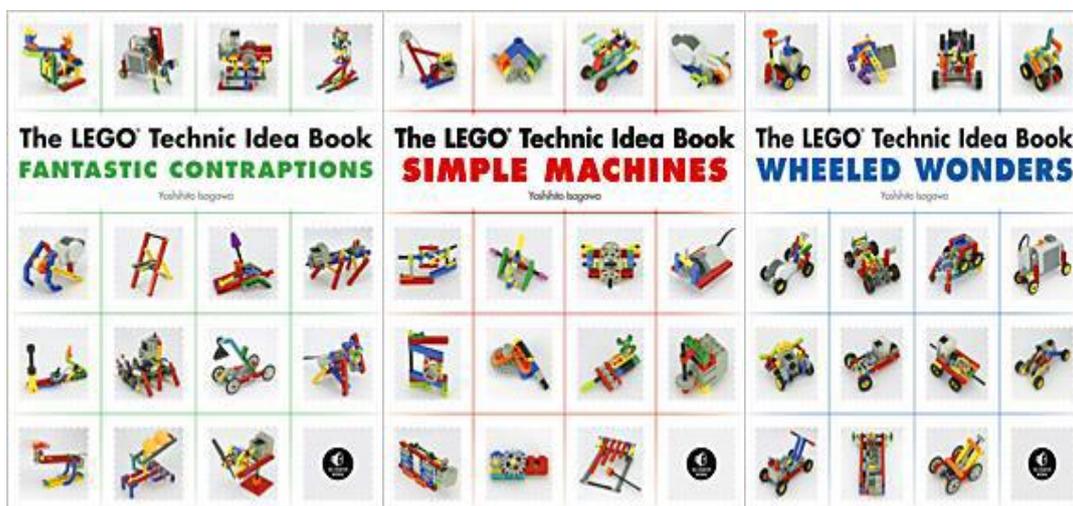


Figura 6. Libros de Isogawa Yoshihito.

En estos libros podemos encontrar ejemplos muy variados, con ruedas, mecanismos andantes, engranajes, poleas, pares prismáticos, modelos muy sencillos y otros mucho más complejos. En los siguientes apartados veremos algunos ejemplos sacados de estos libros y que consideramos de gran interés para el objeto de este proyecto.

## 3. ENSAMBLAJE DEL MODELO

### 3.1 Presentaci3n y objetivos

En la construcci3n tradicional de Máquinas Lego Technic se dispone del conjunto necesario y suficiente de componentes Lego Technic reales de plástico para que, siguiendo las instrucciones, se pueda obtener la máquina deseada. En el montaje de Máquinas Lego Technic Virtuales, tal y como se plantea en este proyecto, se dispone de los Componentes Lego Technic Virtuales necesarios y suficientes para, a la vista del Modelo Lego Technic Real ya ensamblado, de las instrucciones de montaje originales del “set” Lego correspondiente y del documento edrawings, poder crear la Máquina Lego Technic Virtual equiparable a la real, pero con una característica fundamental: durante el proceso de creaci3n del modelo virtual, se han identificado como Piezas Virtuales, aquellos conjuntos de componentes Lego Technic que en la máquina real no tienen movimiento relativo, imponiendo como requisito el mencionado anteriormente de 10 componentes por pieza como máximo.

Es decir, no se propone reproducir virtualmente en un programa CAD una máquina real Lego Technic ya ensamblada, montndola mediante esta aplicaci3n informática a partir de sus componentes Lego virtuales, sino que se va más allá: lo que se propone es identificar durante el proceso las piezas que la máquina mecánica real posee, entendiendo por **Pieza** un conjunto de **Componentes** Lego Technic que no tienen movimiento relativo entre ellas.

Se considera pues el principal objetivo de este apartado obtener una máquina Lego Technic Virtual estructurada de tal modo que podemos diferenciar piezas que tienen movimiento relativo entre ellas. Con el ensamblaje de los primeros modelos empezamos la primera fase, introducida previamente y la cual subdividiremos en dos tareas. En la primera se ensamblar un modelo que ya ha sido virtualizado previamente, con lo que se dispondrá de la ayuda de su documento eDrawings para poder hacerse una idea más fácil de como configurar los componentes de forma 3ptima, para poder trocear el modelo y disponer de las piezas adecuadas (recordemos el significado de pieza descrito en la introducci3n). De esta primera tarea se ensamblar el modelo vLTm 8455-2, y que después, en la segunda fase se simular.

Ahora bien, por lo que se refiere a la segunda tarea, consistirá en ensamblar los modelos reales LTm 42000-1 y LTm 42008-1. Estos modelos aún no han sido virtualizados con lo que no tendremos ninguna referencia salvo el manual de instrucciones del montaje del modelo real. Una vez más haremos uso de nuestro ingenio para trocear correctamente el modelo para conseguir las piezas 3ptimas.

De esta forma podemos concluir que el principal objetivo de esta fase, aparte del aprendizaje en programas de CAD, es la obtenci3n de un modelo Virtual Lego® Technic, el cual estará formado por piezas que tendrán un movimiento relativo entre ellas.

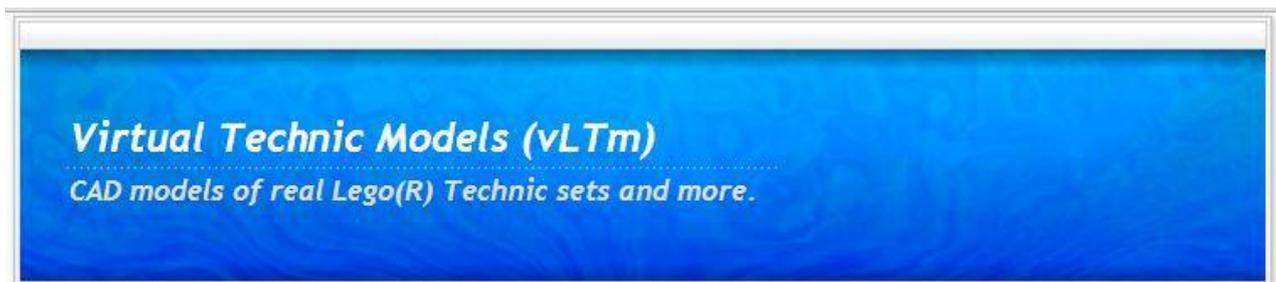
## 3.2 Proceso de montaje

Independientemente del programa CAD utilizado, el procedimiento empleado será el mismo.

Partiendo de la biblioteca virtual de componentes LEGO TECHNIC creada y actualizada, seguiremos los siguientes pasos: elección del modelo, selección de los componentes necesarios, identificación de las piezas y ensamblado.

### 3.2.1 Selección del modelo

En primer lugar, seleccionamos el modelo que queremos montar. Para ello, es aconsejable tener en cuenta el nivel del alumno junto con los conceptos mecánicos a estudiar. Podemos utilizar la página web [www.virtualtechnicmodels.com](http://www.virtualtechnicmodels.com), que el profesor y director de este proyecto ha ido creando a lo largo de estos años. En ella, podemos localizar muchos de los modelos Lego Technic y de Isogawa Yoshihito y demás información sobre los mismos.



También podemos acudir a las páginas web [www.peeron.com](http://www.peeron.com) o [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com), además de la misma página web oficial de LEGO, [www.lego.com](http://www.lego.com), en la sección Technic. En cualquier caso, es posible la construcción de cualquier modelo que se encuentre ya sea en tiendas, internet o que se desee crear.



Dependiendo del nivel de dificultad en cuanto a la complejidad del mecanismo y al número de componentes que forman el modelo, se seguirá un proceso de aprendizaje comenzando con mecanismos simples, elegidos de entre la colección de modelos de Isogawa Yoshihito, para después comenzar la construcción de modelos LEGO Technic cada vez más complejos mecánicamente. Este procedimiento permitirá una familiarización progresiva tanto con el entorno de trabajo de SolidWorks como con el sistema LEGO Technic y con los mecanismos básicos que forman parte de modelos más complejos. La siguiente figura representa un ejemplo de mecanismo creado por Isogawa Yoshihito.



Figura 7. Mecanismo TORA-026, Isogawa Yoshihito

### 3.2.2 Selección de los componentes

En segundo lugar, una vez escogido el modelo que se desea ensamblar, es necesario previamente reunir los componentes imprescindibles, anteriormente creados y disponibles en la biblioteca virtual de LEGO TECHNIC. Para ello, la mejor opción es obtener el inventario de piezas del modelo idóneo en las páginas web mencionadas en el punto anterior. En dichas páginas web se utiliza la misma numeración y nomenclatura para todos los componentes, que es la utilizada en la creación de la biblioteca virtual. De esta forma, facilita la selección de componentes siendo sencilla y simple.

The screenshot shows the BrickLink website interface for the LEGO set 42008-1, 'Service Truck'. The page displays a list of parts required for the set, including a sticker, pneumatic hoses, and a black plate. The parts list is organized into a table with columns for 'Image', 'Qty', 'Item No', 'Description', and 'MID'. The parts listed are:

Image	Qty	Item No	Description	MID
	1	42008st01	Sticker for Set 42008 - (14261/6037767) <a href="#">Catalog</a>   <a href="#">Parts: Sticker</a>	
	1	5102c17	Black Hose, Pneumatic 4mm D. 17L / 13.6cm <a href="#">Catalog</a>   <a href="#">Parts: Hose, Pneumatic 4mm D.</a>	
	1	5102c37	Black Hose, Pneumatic 4mm D. 37L / 29.6cm <a href="#">Catalog</a>   <a href="#">Parts: Hose, Pneumatic 4mm D.</a>	
	2	75c07	Black Hose, Rigid 3mm D. 7L / 5.6cm <a href="#">Catalog</a>   <a href="#">Parts: Hose, Rigid 3mm D.</a>	
	1	3623	Black Plate 1 x 3 <a href="#">Catalog</a>   <a href="#">Parts: Plate</a>	

Figura 8. Ejemplo de inventario extraído de la página [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com) (modelo 42008-1)

Por otro lado, en modelos sencillos como el mostrado en la figura 7, la identificaci3n visual de los componentes es fàcil.



Figura 9. Componentes necesarios para el mecanismo 026 - Isogawa Yoshihito

Para modelos màs grandes se tienen las propias instrucciones del modelo LEGO Technic o, se puede recurrir a documentos **eDrawings (\*.easm)** si el modelo ha sido creado con anterioridad y se dispone de èste documento, en el cual se pueden identificar fàcilmente los componentes necesarios.

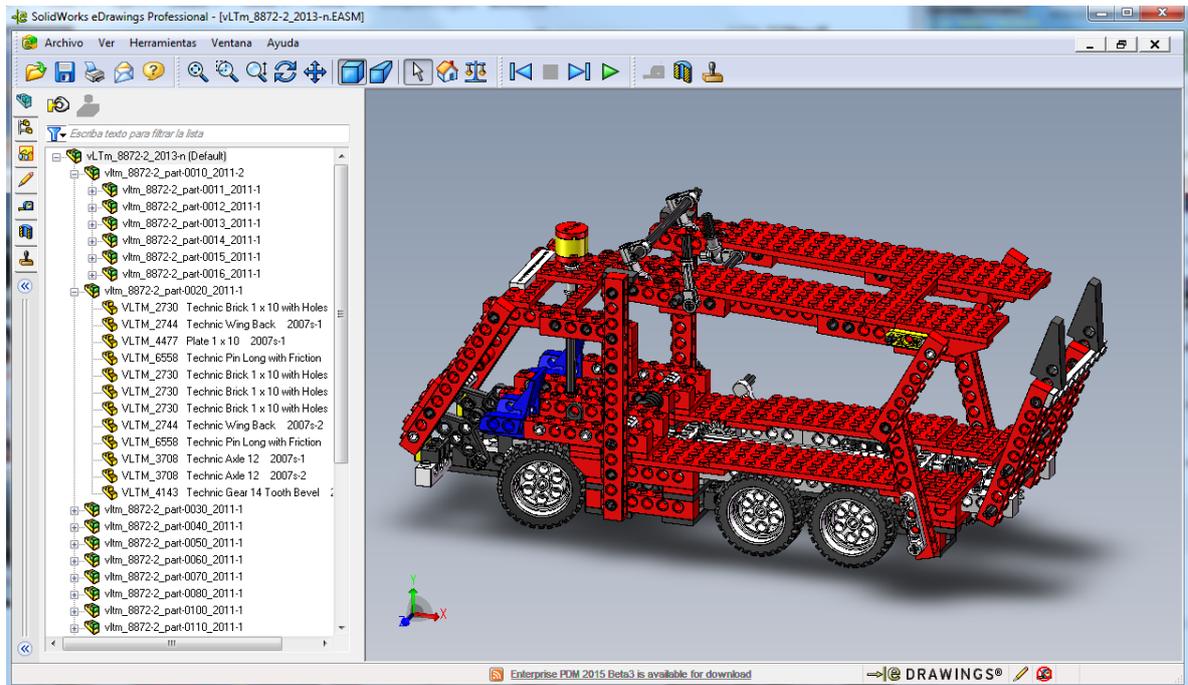


Figura 10. Identificaci3n de componentes por eDrawings del modelo vLTm\_8872-2

### 3.2.3 Identificación de las piezas

El siguiente paso es identificar qué componentes se agruparán en bloques sin movimiento relativo entre ellos y qué movimiento relativo respecto al resto de componentes existirá. Este es un proceso crítico, pues requiere una buena visión espacial. Si bien es fácil identificar el movimiento de un mecanismo sencillo, en modelos avanzado en los que se combinen varios de estos mecanismos simples la tarea es ya complicada.

Como en la identificación de los componentes, una gran ayuda es la disponibilidad del documento **eDrawings** del modelo, pues proporciona una primera idea de las piezas creadas para la construcción del modelo. Si el caso es que no se dispone de este documento, el modelo real montado muestra el movimiento que el mecanismo posee, si bien es más complicado pasar esta información al entorno virtual. Con las piezas identificadas se procede al ensamblado de las mismas, construyendo con componentes virtuales (archivos **\*.sldprt**) las piezas en ensamblajes (archivos **\*.sldasm**). Si bien en archivos tipo ensamblaje se puede incluir repetidas veces un mismo componente virtual, cada pieza que forme el modelo final ha de ser única y por ello, aun cuando existan piezas iguales dentro de un modelo, cada pieza ha de ser guardada en un archivo ensamblaje diferente.



Figura 11. Piezas constituyentes del mecanismo 102 - Isogawa Yoshihito

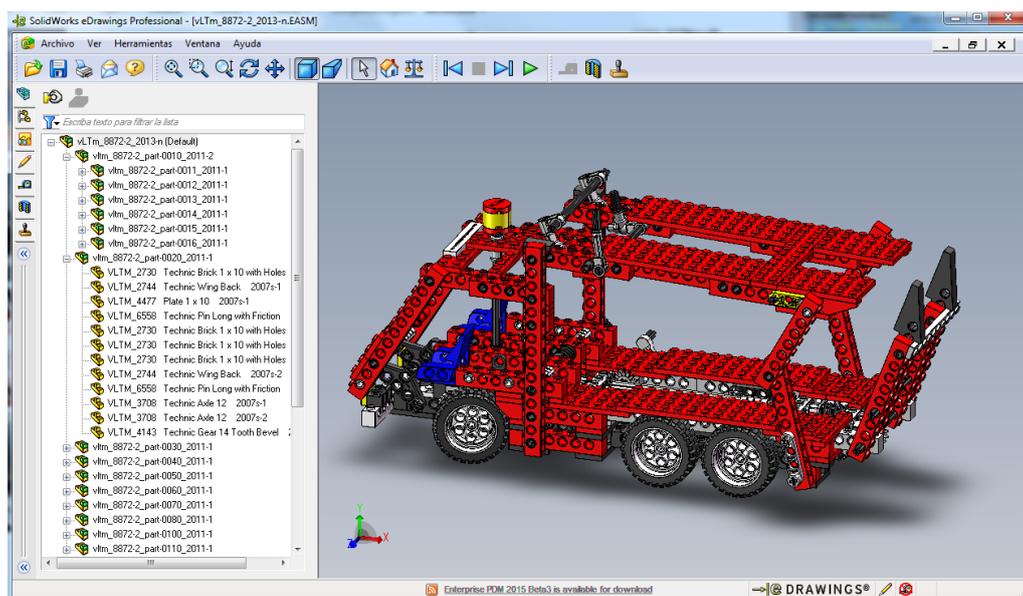
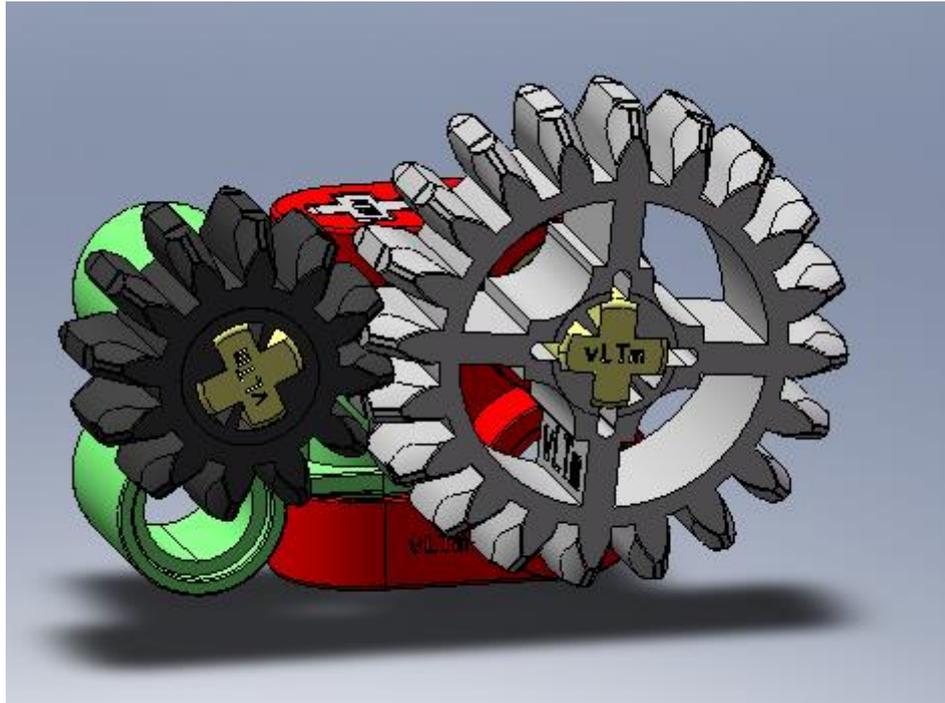


Figura 12. Identificación de piezas por eDrawings del modelo vLTm\_8872-2

### 3.2.4 Ensamblado

Con la creación de las piezas ya se ha realizado un procedimiento de ensamblado mediante componentes entre los cuales no existirá movimiento. Para la creación del modelo restará ensamblar las piezas, definiendo el movimiento y restricciones que formarán el mecanismo, en un archivo tipo ensamblaje.



*Figura 13. Ensamblaje del mecanismo 026 - Isogawa Yoshihito*

## 3.3 Ensamblajes en SolidWorks

Antes de exponer cómo se crea un ensamblaje en el entorno de trabajo de SolidWorks sentaremos la nomenclatura que se dará a los ensamblajes que se creen así como las condiciones establecidas para dar como válido un ensamblaje.

### 3.3.1 Nomenclatura

Las piezas se nombrarán siguiendo el siguiente formato: vltm\_ xxxx-x\_part-0yy0\_2014.sldasm. Donde “xxxx-x” responde al código del modelo LEGO Technic (la última cifra tras el guión muestra en qué configuración se monta el modelo, pues según el modelo, los *sets* comercializados permiten montar el modelo en su configuración principal o secundaria, dando como resultado una máquina similar). Las cifras “yy” responden al número de orden de la pieza dentro del montaje.

Habrán ocasiones en las que una pieza se deberá formar a su vez de otras piezas con lo que la cifra “0” tras “yy” reflejará el orden de cada ensamblaje dentro de la pieza “yy”. Más adelante se explican las condiciones en las que se deberá proceder de tal modo. Se creará entonces el ensamblaje del montaje final así como un ensamblaje que muestre las piezas necesarias sin conexión entre ellas para una inmediata visualización de las piezas que forman el modelo. Se nombrarán respectivamente, y siguiendo el criterio anteriormente expuesto:

vLTm\_xxxx-x\_2014.sldasm

vLTm\_xxxx-x\_parts\_2014.sldasm

### 3.3.2 Condiciones

Por motivos de coste computacional cada pieza no deberá superar los 10 componentes. En el caso habitual de tener piezas compuestas por un elevado número de componentes (como suele ser el caso del chasis en los modelos LEGO Technic) se crearán piezas tipo “trozo” que serán a su vez ensamblajes compuestos únicamente por componentes, sin superar los 10. Así, la pieza que debería contener un elevado número de componentes estará formada únicamente por ensamblajes tipo “trozo” que no superarán los 10 componentes cada uno. Fuera de esta excepción, las piezas deberán estar compuestas únicamente por componentes.

Respecto al montaje, se establece la condición de que la pieza “chasis”, que será la pieza estructural más grande del modelo, se numerará la primera en el orden del montaje, siendo la pieza fija del mismo. Así, con el modelo montado, se comprobará que el movimiento del mismo es el adecuado accionando las piezas consideradas como “impulsores”.

Con todo lo expuesto anteriormente ya se puede proceder al montaje del modelo. Para ello, sobre el ensamblaje del modelo final (“vLTm\_xxxx-x\_2014.sldasm”) se van añadiendo las piezas definiendo qué relaciones de posición existirán entre ellas.

En el entorno de trabajo de SolidWorks 2007 se pueden definir éstas relaciones desde el menú “Relaciones de posición”.

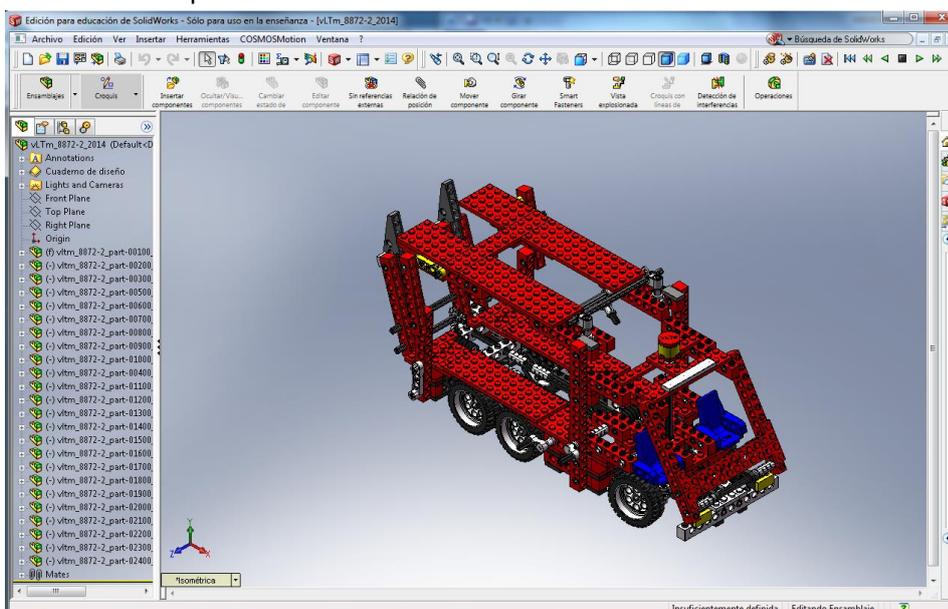


Figura 14. Entorno de Trabajo de SolidWorks 2007

### 3.3.3 Relaciones de posici3n

Una vez reunidos los componentes y los documentos que permiten intuir como se ensamblan (libro de instrucciones y archivo edrawings), se crearán las diferentes restricciones necesarias para definir, la posici3n de cada componente, en su pieza correspondiente y posteriormente, de cada pieza en el modelo. A lo largo del montaje, es importante diferenciar los diferentes componentes que conformarán cada pieza, por lo tanto desde el primer momento, es fundamental tener en mente el funcionamiento del modelo y realizar un estudio previo del movimiento.

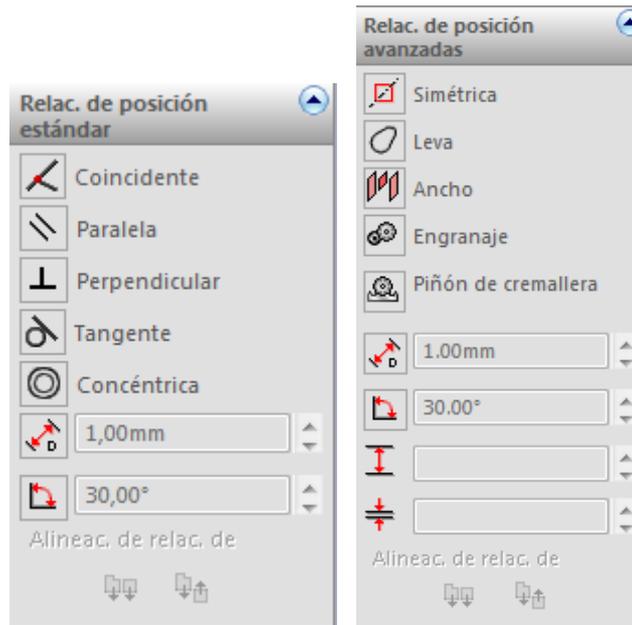


Figura 15. Menú de relaciones de posici3n avanzadas y estandar en SolidWorks 2007

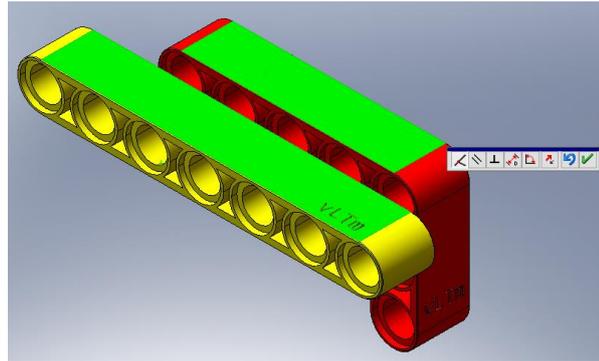
#### 3.3.3.1 Relaciones de posici3n estandar

Por una parte, cabe destacar que no existe una única manera de determinar la posici3n de un componente en el espacio y, por otro, indicar que, el primer componente deberá ser fijo en el espacio para mayor comodidad y evitar que la pieza se mueva más de lo necesario.

A continuaci3n, pasaremos a nombrar y explicar brevemente las relaciones de posici3n estandar, utilizadas para determinar la posici3n de cada componente o pieza:

- COINCIDENTE

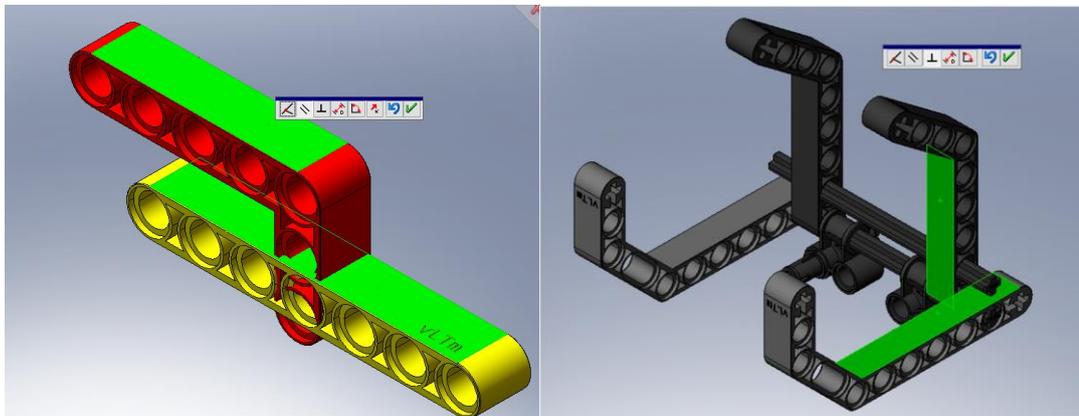
Con esta relaci3n se consigue que superficies, puntos o rectas contengan la una a la otra o que pasen a ser un único elemento si son del mismo tipo.



*Figura 16. Ejemplo de relación de posición coincidente en Solidworks 2007*

- **PARALELO/ PERPENDICULAR**

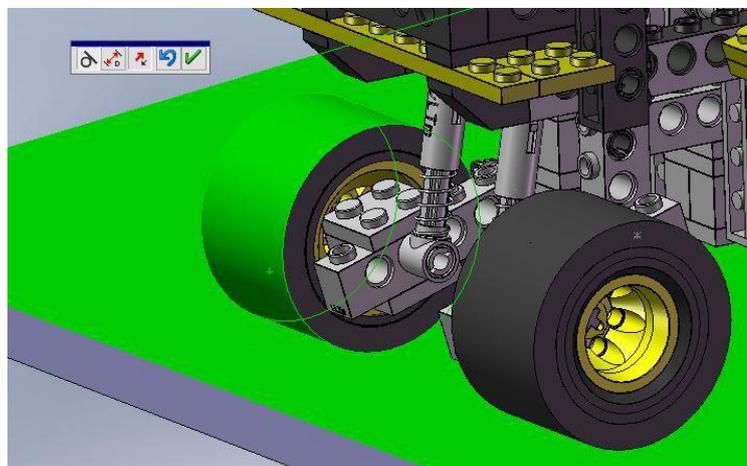
Permite definir paralelismo o perpendicular entre los planos definidos por dos caras planas, recta-plano o dos rectas.



*Figura 17. Ejemplo de relación de posición paralelo y perpendicular en Solidworks 2007*

- **TANGENTE**

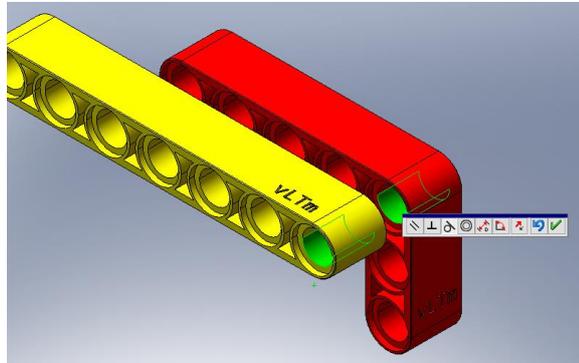
Permite que dos superficies o curvas mantengan una relación de tangencia sobre toda la superficie. Útil cuando se quiere conseguir un deslizamiento.



*Figura 18. Ejemplo de relación de posición tangente en Solidworks 2007*

- **CONCÉNTRICA**

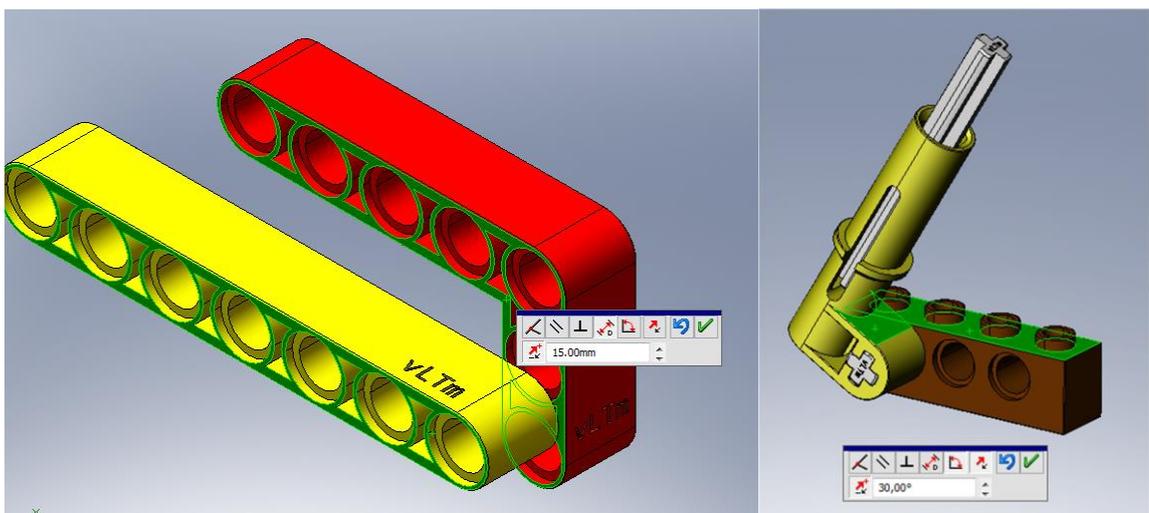
Muy utilizada por la manera en que los componentes se insertan unos en otros. Hace que dos superficies circulares sean concéntricas, es decir, su centro o líneas centrales coincidan en el espacio.



*Figura 19. Ejemplo de relación de posición concéntrica en Solidworks 2007*

- **DISTANCIA/ ÁNGULO**

Restringe a dos elementos (líneas, puntos o caras) de diferentes componentes a permanecer a la distancia o ángulo especificado.



*Figura 20. Ejemplo de relación de posición de distancia y ángulo en Solidworks 2007*

### 3.3.3.2 Relaciones de posición avanzadas

Las relaciones de posición avanzadas se utilizarán para determinar relaciones entre diferentes componentes móviles. Las utilizadas en este proyecto son:

- **ENGRANAJE**

Permite relacionar el giro de un eje con otro mediante una relación que, en este trabajo, se determina por el número de dientes de cada rueda dentada. En el caso de transmisión entre dos ruedas por contacto se puede emplear la relación entre sus diámetros. También se puede definir la relación engranaje-tornillo sin fin relacionando una vuelta del tornillo con el número de dientes del engranaje.

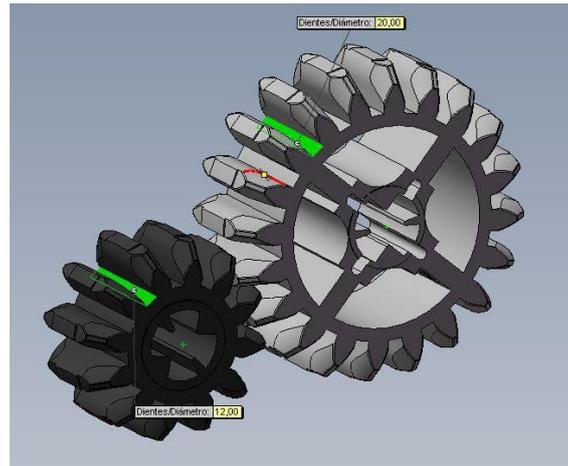


Figura 21. Ejemplo de relación de engranaje en Solidworks 2007

- PIÑÓN-CREMALLERA  
Análogamente al caso de engranaje, define el desplazamiento lateral de la cremallera por vuelta completa de la rueda dentada.

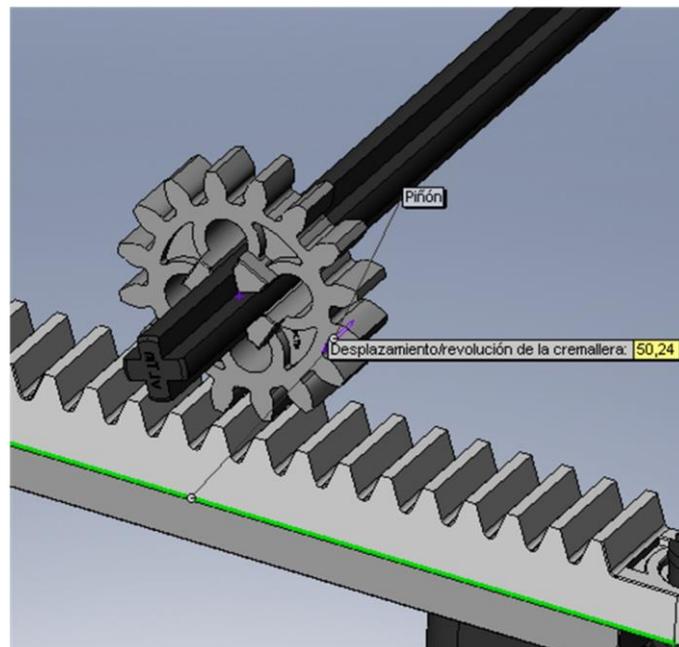
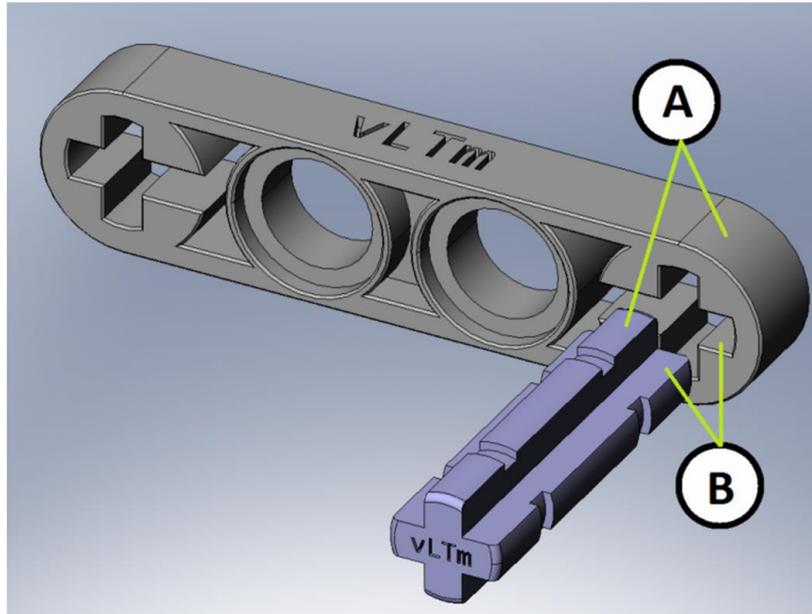


Figura 22. Ejemplo de relación de posición de piñón-cremallera en Solidworks 2007

### 3.3.4 Sistema LEGO Technic en Solidworks

El sistema de montaje de los modelos LEGO Technic, como se expuso en la introducción, se basa en el sistema viga-pasador para crear sus estructuras. A continuación se propone cómo crear las uniones que caracterizan a este sistema, si bien otras formas son viables ya que no existe una única forma de definir la posición relativa entre componentes.

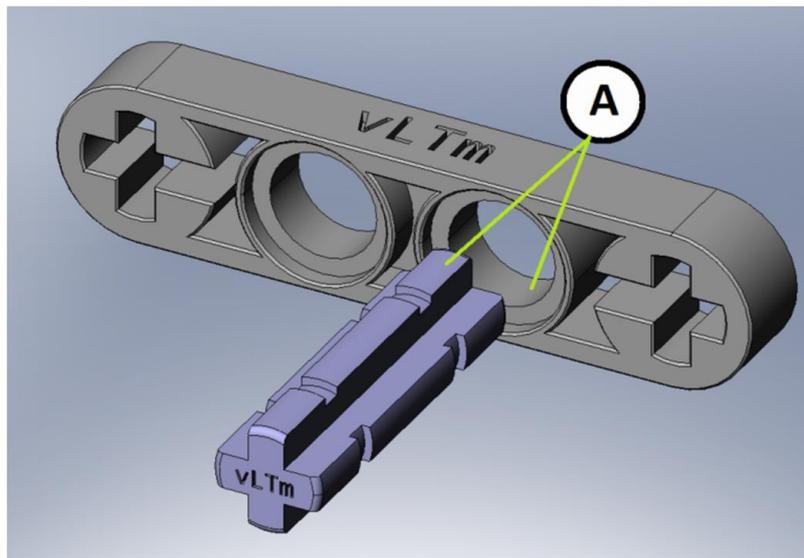
- Eje-componente sin rotación:
  - A) Relación de concentricidad
  - B) Relación de paralelismo



*Figura 23. Unión eje-componente sin rotación*

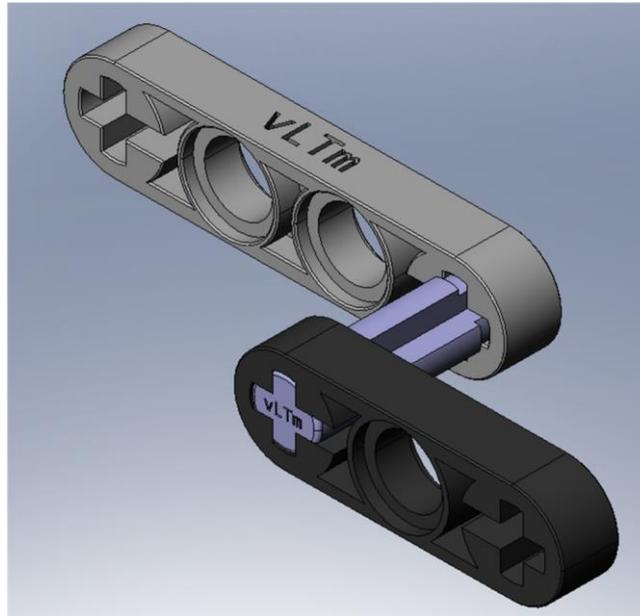
Una vez así definido, es posible fijar el eje en una posición concreta utilizando la coincidencia de una de sus bases con otra cara o con la relación de distancia.

- Eje-componente con rotación:
  - A) Relación de concentricidad



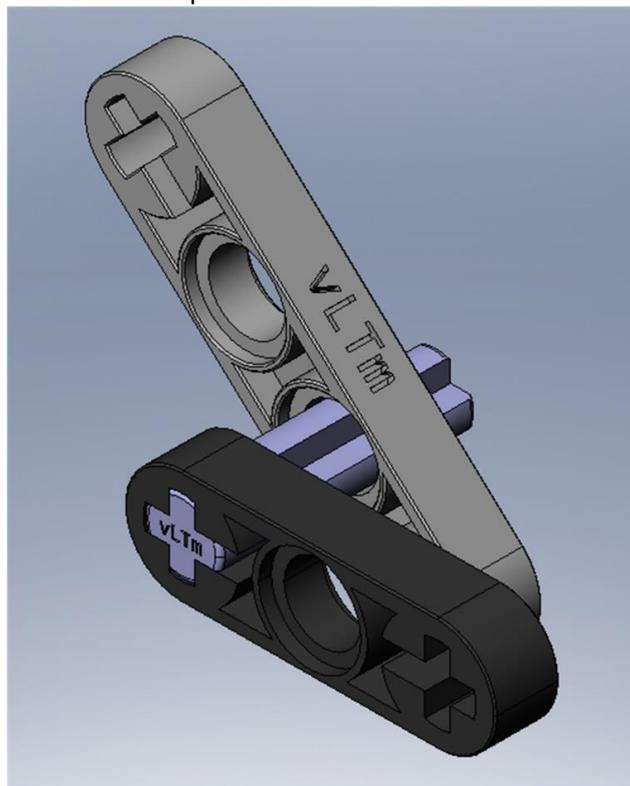
*Figura 24. Unión eje-viga con rotación*

- **Componente-componente sin rotación:**  
Utilizando la unión eje-componente sin rotación se consigue que dos componentes queden unidos sin existir rotación relativa entre ellos.



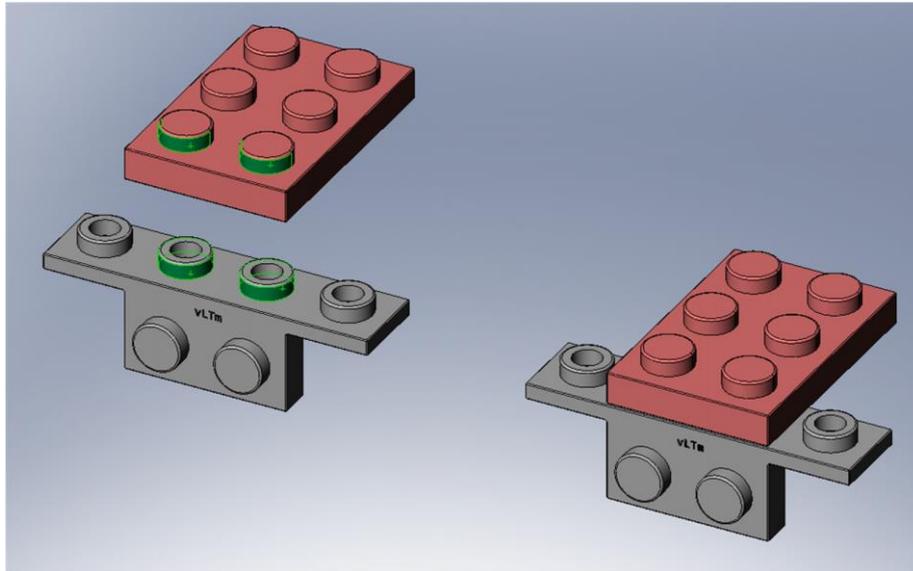
*Figura 25. Unión componente-componente sin rotación*

- **Componente-componente con rotación:**  
Partiendo de un eje definido se consigue, mediante la unión eje-componente con rotación, que exista giro relativo entre dos componentes.



*Figura 26. Unión componente-componente con rotación*

- Unión de componentes del sistema de botones:  
Es posible que se aborde la construcción de un modelo que emplee componentes del anterior sistema de LEGO Technic, el sistema clásico de botones. Para unir este tipo de componentes, una manera válida consiste en definir como concéntricos dos botones del componente superior con dos del componente a unir en la parte inferior. Después se hará coincidir la cara superior de uno con la inferior del otro.



*Figura 27. Unión de componentes del sistema de botones*

Siguiendo estas técnicas se pueden construir la mayoría de modelos LEGO Technic, recordando que el papel de eje lo pueden realizar distintos tipos de componentes, consiguiendo ruedas solidarias a un eje, deslizaderas de tipo émbolo, uniones entre vigas para crear una placa, etc. En el apartado referente a los modelos montados se detallarán uniones de mecanismos específicos más complicadas.

### 3.3.5 Comprobación

Una vez el montaje ha finalizado se debería comprobar que el movimiento es el adecuado. En modelos avanzados el elevado número de relaciones de posición entre piezas que forman parte del mecanismo puede llevar a errores en la definición de las diferentes relaciones a lo largo de la cadena cinemática que no son evidentes durante la construcción.

Así pues, se procederá a accionar cada mecanismo independiente del modelo para comprobar que funciona como lo haría el modelo real, actuando sobre los impulsores.

## 4. COMPACTACIÓN

Para facilitar la labor de montaje en ámbitos docentes y profesionales, se ha considerado adecuado llevar a cabo un proceso de “compactación”, de tal forma que cada pieza sea una única entidad virtual, y no un conjunto de entidades, sus componentes virtuales. Este proceso constituye una innovación en el proyecto y se aplica sistemáticamente a un conjunto de modelos, unos creados durante la realización del proyecto, otros ya disponibles.

Este proceso no es obligado llevarlo a cabo, pero las ventajas obtenidas son varias. Una de las principales es la protección de los componentes al compactar las piezas, de tal manera que al suministrar un modelo no se puedan obtener los componentes directamente, ya que en ese caso nuestra labor no tendría continuidad.

Otra de las ventajas es que tras llevar a cabo el proceso, los archivos que se obtienen son menos “pesados” y más fáciles de manejar por el ordenador, permitiendo así que los requisitos de los ordenadores necesarios no sean tan elevados. Además el número de archivos necesarios es menor.

Una vez hemos conseguido tener el modelo montado componente a componente siguiendo la estructura anteriormente comentada, se procede a llevar a cabo la compactación de cada una de las piezas. Posteriormente será necesario ensamblar el modelo de nuevo con las piezas compactadas, pero siendo esta labor mucho más sencilla y llevadera que en el montaje componente a componente.

El proceso consiste en unir los componentes y someter a un proceso de traducción pasando a través de diferentes archivos neutros para, finalmente obtener un único sólido de la pieza.

## 5. MODELO CINEMÁTICO AUTOALINEADOR

### 5.1 Presentación y objetivos

Dada la imposibilidad física y material de montar máquinas mecánicas reales en un laboratorio con un grupo de alumnos, realizar esta actividad virtualmente supone una solución práctica e ingeniosa. Por tanto, este apartado tiene como finalidad, familiarizar al alumno con el montaje de máquinas mecánicas, que incluyan todos los tipos de elementos de los que disponen las mismas en la realidad. La serie de máquinas a escala de Lego Technic cumple con tales expectativas.

Otra de las finalidades fundamentales de este apartado desde el punto de vista del diseño mecánico, no es otro que mostrar cómo es posible llegar a configurar el modelo cinemático de una máquina virtual, de tal manera que no existan restricciones en exceso. Es decir, como poder construir un **modelo cinemático autoalineador**. Para ello, se utiliza una de las aplicaciones más utilizadas actualmente para estos menesteres:

- La aplicación integrada en SolidWorks **Cosmos Motion**, basado en el programa clásico **ADAMS**, referente de la simulación cinemática y dinámica de sistema multicuerpo desde los años 70.

Este tipo de modelos permiten un posterior análisis de resistencia de algunas piezas, que constituyen la máquina mediante la técnica de elementos finitos. Aunque esa parte no pertenece al alcance de este proyecto.

### 5.2 Introducción a los sistemas mecánicos

El diseño de mecanismos constituye una parte fundamental de la ingeniería mecánica. En nuestra universidad, sería interesante que cualquier estudiante de ingeniería mecánica, tuviera que realizar a lo largo de su periodo de formación en esta disciplina, un proyecto que incluyese el diseño cinemático y dinámico de una pequeña máquina, así como la fabricación de las piezas necesarias, para finalmente montarla y poder comprobar su funcionamiento.

Así, en ingeniería mecánica hay ciertos campos que se comparten con otras disciplinas de la ingeniería, pero no es el caso del diseño de mecanismos. Únicamente la ingeniería mecánica lo trata en toda su extensión.

A pesar de ser un tema que posee una larga historia, es más, los primeros estudios se remontan a los tiempos de los romanos, el diseño de mecanismos sigue siendo un componente vital del diseño práctico de la máquina moderna. Precisamente por el hecho que sigue siendo un componente vital en el diseño de la maquinaria moderna, al igual que sucede con otros campos de la ingeniería, la aplicación práctica de los contenidos incluidos en ella, está continuamente cambiando con el desarrollo de nuevas tecnologías.

Nuevas tecnologías que han cambiado dramáticamente la forma de realizar el diseño mecánico, han realizado cambios fundamentales en la naturaleza de las máquinas que hoy en día se diseñan, y lo más importante desde nuestro punto de vista, han realizado cambios sustanciales en la forma en que los estudiantes deben aprender los contenidos de esta especialidad. Ésta, es una de las razones que justifican la realización de este proyecto.

Hasta hace relativamente pocos años, los mecanismos se diseñaban utilizando técnicas manuales de tipo gráfico. La llegada de los ordenadores ha revolucionado la metodología. Las herramientas CAD, permiten la automatización directa de algunos métodos gráficos tradicionales. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones es más productivo utilizar la geometría cinemática fundamental con el fin de desarrollar formulaciones analíticas sobre las que es posible programar algoritmos que permiten obtener la solución más adecuada. Esto, constituye la base de algunos paquetes de software de propósito especial que se han desarrollado para llevar a cabo las operaciones de diseño de mecanismos más usuales, como el considerado para la creación del Módulo Cinemático Autoalineador, El **COSMOSMotion** integrado en **SolidWorks**.

Recientemente, se han conseguido avances notables en la manera en que los ingenieros llevan a cabo los cálculos rutinarios en este campo de la ingeniería. Actualmente, los lenguajes de programación orientados a procedimientos, han sido sustituidos por paquetes de computación numérica especializados, y por paquetes de matemáticas simbólica.

La influencia de los ordenadores también ha resultado vital en otros dos aspectos de este campo de la ingeniería. En primer lugar, actualmente resulta mucho más práctico el diseño de mecanismos tridimensionales, ya que los paquetes de modelado sólido y los simuladores tridimensionales permiten, salvar la dificultad de visualizar un sistema tridimensional a partir de los planos tradicionales realizados a tinta. En segundo lugar, los avances en la tecnología de los actuadores (generadores del movimiento), en el control digital y en las técnicas de comunicación, han permitido liberar al diseñador de la máquina tradicional en la que todos sus componentes estaban mecánicamente coordinados, a partir de un único actuador o generador de movimiento que, en la mayoría de las ocasiones era un motor. Actualmente, es posible utilizar una máquina mecánicamente simple que posee múltiples actuadores que están electrónicamente coordinados.

## 5.3 Conceptos básicos

### 5.3.1 Impulsor, seguidor y factor de transmisión

Para poder lograr obtener un movimiento diferente del aplicado a un mecanismo y poder comprobar que se ha logrado crear el diseño teórico es necesario introducir los conceptos de **impulsor**, **seguidor** y **factor de transmisión**. Ya que de un mecanismo se espera obtener un movimiento diferente (ya sea en sentido, dirección o ubicación) del aplicado, deberá pues incluir una pieza que reciba este primer movimiento (**impulsor**) y otra que proporcione el segundo (**seguidor**). Desde un enfoque matemático se puede equiparar el impulsor a la variable independiente, y el seguidor a la variable dependiente en una ecuación.

Luego, al igual que en una ecuación se pueden combinar varias variables independientes y dependientes, en un mecanismo pueden existir diferentes impulsores y seguidores. Cabe introducir pues el **concepto de factor de transmisión**, que es la relación existente entre la magnitud del movimiento aplicado en el impulsor y el obtenido en el seguidor, pudiendo ser cualquiera de estos de traslación, rotación o una combinación de ambos. Así, este factor se expresa con un escalar con signo, dando idea el escalar sobre el cambio en la magnitud del movimiento y el signo, el cambio en el sentido.

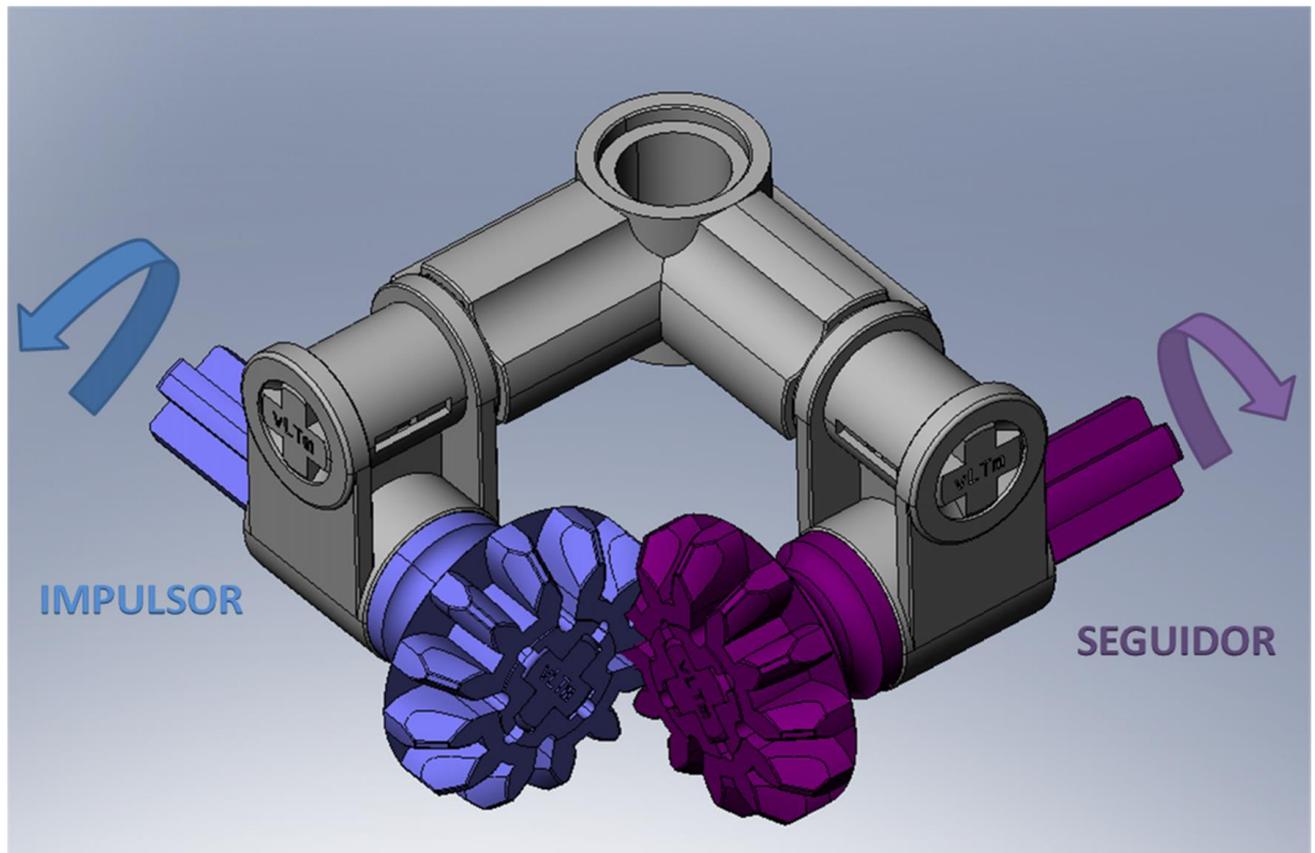


Figura 28. Conceptos de impulsor y seguidor

### 5.3.2 Máquina y mecanismo

Para poder introducir estos conceptos es necesario antes entender qué son y en qué se diferencian la **cinemática** y la **dinámica**: la **cinemática** se encarga del estudio del movimiento y de la transmisión de éste entre los cuerpos sin atender a las causas del mismo, mientras que la **dinámica** incluye el análisis de las fuerzas que intervienen. Así pues, un **mecanismo** es un sistema capaz de transmitir y transformar el movimiento, mientras que una **máquina** transforma y transmite potencia. En este TFG se aborda el estudio de la cinemática de los modelos virtuales, es decir, del mecanismo del modelo si bien el modelo real es una máquina. Así, se aborda la construcción del modelo atendiendo a la posición, desplazamiento, rotación, velocidad y aceleración de cada una de sus piezas y cómo han de transformar y transmitir el movimiento entre ellas.

Para poder realizar el análisis del movimiento en un mecanismo sin atender a las fuerzas que intervienen se debe tratar a las piezas que componen el mecanismo como **cuerpos rígidos**, esto es, cuya geometría es invariable independientemente de las fuerzas involucradas en el proceso. Como toda simplificación, el tratarse cada pieza como cuerpo rígido se está introduciendo una restricción en cuanto al comportamiento real de la máquina, pues todo componente es en realidad flexible en cierta medida. No obstante, en el caso de máquinas LEGO Technic, introducir esta simplificación no conlleva una importante restricción en cuanto a la fiabilidad de los resultados obtenidos, pues son máquinas ideadas para trabajar con fuerzas que no afectan de forma significativa a la geometría de sus piezas.

## 5.4 Estudio cinemático

La cinemática es el estudio de la posición de los cuerpos y de sus derivadas temporales. Específicamente, trata con las posiciones, velocidades y aceleraciones de puntos, y con las posiciones angulares, velocidades angulares, y aceleraciones angulares de cuerpos rígidos. Todas estas entidades juntas son suficientes para describir las posiciones, velocidades y aceleraciones de los cuerpos rígidos. La posición de un cuerpo puede definirse indicando la posición de uno de sus puntos, y la posición angular del cuerpo.

En algunas circunstancias, se está interesado no solo en conocer la posición, sino también las derivadas temporales correspondientes, ya que el estudio cinemático no es sino el estudio geométrico añadiendo el factor tiempo. Para poder realizar el estudio cinemático es necesario comprender una serie de conceptos.

Si el movimiento de una pieza es tal que durante el proceso todos sus puntos permanecen a planos que se mantienen paralelos, se dice que dicha pieza está dotada de un **movimiento plano**. Este concepto puede ampliarse al concepto de **mecanismo plano**, en el cual todos sus puntos mantienen esta condición. El movimiento de estos mecanismos puede proyectar en un plano paralelo a los mencionados anteriormente, eliminando del estudio la dirección perpendicular a éste.

Cabe apuntar que es posible el estudio de un mecanismo tridimensional como mecanismo plano, abordando cada mecanismo plano del mismo por separado.



*Figura 29. vLTm-8466 con detalle del mecanismo plano de la grúa*

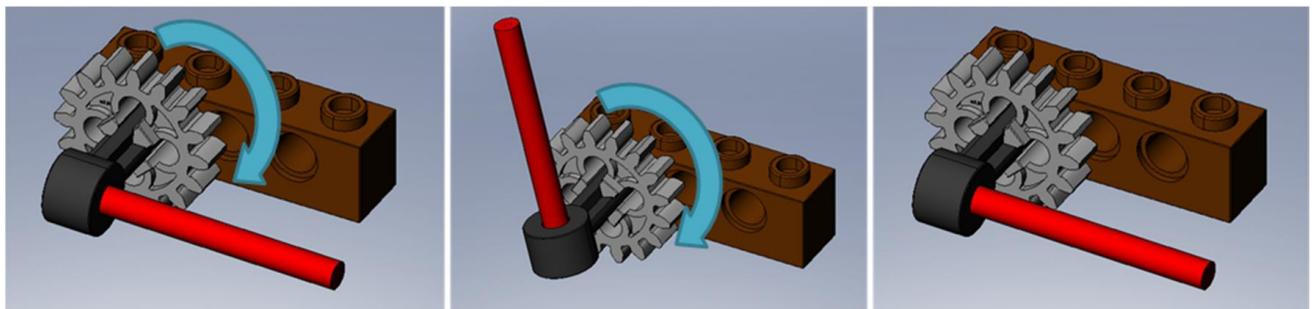
Así, en un mecanismo plano se puede hablar de **traslación** y **rotación** de sus piezas. Existirá movimiento de **traslación** si una pieza se mueve de tal forma que una recta contenida en ella se mantiene paralela a sí misma en el origen del movimiento. En el caso de variar la dirección de dicha recta diremos que existe **rotación**.

### 5.4.1 La cadena cinemática

Si un cuerpo no está unido materialmente al resto de tal forma que su trayectoria queda definida por las acciones externas sobre éste, se dice que posee **movimiento libre**. En los casos que nos ocupan se da la situación en la que todas las piezas están unidas en algún punto al resto, quedando entonces definido su movimiento debido a las relaciones de posición respecto al resto. Se dice en este caso que las piezas poseen **movimiento desmodrómico**. Así, la unión de cuerpos poseedores de este tipo de movimiento forma una **cadena cinemática**. En una cadena cinemática existirá un cuerpo fijo, dando lugar a un mecanismo distinto según qué cuerpo se fije.

### 5.4.2 Evolución temporal del movimiento en un mecanismo

Si el mecanismo parte de un estado determinado de la posición relativa de todas sus piezas y, tras iniciar el movimiento y habiendo pasado todas sus piezas por todas las posiciones que permita su trayectoria, vuelven éstas a su posición inicial, se dice que el mecanismo ha completado un **ciclo cinemático**. El tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento hasta el fin del ciclo se denomina **periodo**. Cualquier configuración intermedia del mecanismo durante un ciclo se denomina fase.



*Figura 30. Posición en el inicio del movimiento; configuración del mecanismo en una fase intermedia; configuración tras completar un ciclo*

Atendiendo al movimiento de una pieza durante un ciclo, se dice que éste es **continuo** si no se detiene ni invierte su sentido, **intermitente** si detiene su movimiento durante un tiempo finito o **alternativo** si invierte el sentido de su movimiento al menos una vez. En el movimiento de rotación es común denominar al movimiento alternativo como **oscilatorio**. Una restricción evidente es que, atendiendo a la definición de ciclo, una barra con movimiento de traslación rectilíneo, en el que todos sus puntos trazan sus trayectorias en rectas paralelas, no se puede dar que sea continuo, pues entraría en conflicto con esta definición.

## 5.5 Pares cinemáticos

Se ha presentado al mecanismo como un ensamblaje de cuerpos rígidos (piezas) que permite transmitir y transformar el movimiento. Estas piezas están unidas entre sí mediante conexiones o uniones cinemáticas. Estas uniones se conocen con el nombre de **pares cinemáticos** y estos se clasifican en pares *superiores* e *inferiores*.

Un **par inferior** es aquel en el que el contacto entre los dos sólidos rígidos que conecta tiene lugar a través de una superficie.

Conectividad (Nº de gdl)	Denominaciones	Símbolo literal	Forma típica	Representación esquemática (Diagrama cinemático)
1	Par Giratorio Articulación de pasador	R		 (Planar) (Spatial)
1	Par prismático Deslizadera Par de deslizamiento	P		 (Planar) (Spatial)
1	Par helicoidal Par de tornillo	H		 (Spatial)
2	Par cilíndrico	C		 (Spatial)
3	Par esférico	S		 (Spatial)
3	Par plano	P <sub>L</sub>		 (Spatial)

Figura 31. Pares cinemáticos inferiores

Un **par superior** es aquel en el que el contacto teórico entre los dos sólidos rígidos que conecta tiene lugar a través de una arista o punto.

Conectividad (Nº de gdl)	Denominación	Forma típica	Comentarios
1	Rodadura sin deslizamiento Rodadura simple		El rodillo gira alrededor de la línea señalada con la flecha en el instante considerado. El rodillo no desliza sobre la superficie sobre la que gira.
2	Par leva Rodadura con deslizamiento		La leva gira y desliza sobre el seguidor.
3	Bola con rodadura sin deslizamiento		La bola gira pero no desliza.
4	Bola dentro de cilindro		La bola puede girar alrededor de cualquier eje que pase por su centro geométrico, y desliza a lo largo del eje del hueco cilíndrico.
5	Contacto puntual espacial		El cuerpo puede girar alrededor de cualquier eje que para por el punto de contacto, y deslizar en cualquier dirección en el plano tangente.

Figura 32. Algunos pares superiores

Existen también los denominados **pares compuestos**, combinación de pares superiores e inferiores.

Conectividad (Nº de gdl)	Denominación	Forma típica
1	Cojinete de bolas Cojinete antifricción Cojinete de contacto por rodadura	
2	Junta Universal Junta Hooke Junta Cardan	
1	Deslizadera de rodillos	

Figura 33. Pares compuestos

Un par cinemático se caracteriza por el número de rotaciones y desplazamientos relativos entre los dos sólidos que conecta restringidas, referidos a cada uno de los ejes coordenados con origen en la unión.

Un sólido libre tiene en el espacio 6 **grados de libertad (GDL)**, esto es, tiene permitidos tanto desplazamientos como rotaciones respecto a cada eje coordinado. Así, un par cinemático tendrá tantos grados de libertad como movimientos relativos permita por lo que restringirá el resto de movimientos. Según la cantidad de movimientos relativos que un par cinemático restrinja, éste será de clase I, II, III, IV, V o VI (unión rígida).

## 5.6 Movilidad en los mecanismos

Hemos definido los grados de libertad de un sólido como la cantidad de movimientos (traslaciones y rotaciones) libres posee. Otra forma de verlo es que un cuerpo en el espacio necesita de tantas coordenadas independientes como GDL tenga para conocer su posición y orientación exactas. Se entiende como **movilidad** de un mecanismo como la cantidad de GDL posee, esto es, el número de movimientos independientes que es necesario aplicar en los impulsores para definir completamente la posición relativa de cada una de sus piezas.

Con esto, es fácil apuntar que un mecanismo precisa tener una movilidad de al menos 1. Si la movilidad es 0 o negativa se tiene una **estructura**.

### 5.6.1 Cálculo de la movilidad en mecanismos planos

Recordemos que un mecanismo plano es aquel en el que los cuerpos que lo componen trazan la trayectoria de su movimiento en un mismo plano o planos paralelos. Así, un cuerpo libre en el plano tiene 3 GDL: dos de traslación en dirección de los ejes que definen el plano y uno de rotación alrededor el eje perpendicular a éstos.

Si consideramos un mecanismo plano, compuesto de **N** cuerpos rígidos en el que existen **P** pares cinemáticos que definen las uniones entre ellos. La movilidad **M** se calcula:

$$M = 3 * (N - P - 1) * \sum_{i=1}^P f_i \quad (\text{Ec. 1})$$

Ecuación que recibe el nombre de **criterio de movilidad**, donde  $f_i$  toma el valor **1** para un par inferior y **2** para un par superior.

### 5.6.2 Cálculo de la movilidad en mecanismos espaciales

Dado que en el espacio un sólido libre tiene 6 GDL, la movilidad **M** de un mecanismo espacial se define de manera análoga al caso del mecanismo plano según la ecuación:

$$M = 6 * (N - P - 1) * \sum_{i=1}^P f_i \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta ecuación Ec. 2 se conoce como **Criterio de Grübler**, criterio que emplea la aplicación **COSMOS Motion**.

### 5.6.3 Diagramas cinemáticos

Una manera habitual de representar esquemáticamente un mecanismo plano (también aplicable a mecanismos espaciales) es mediante **diagramas cinemáticos**. En ellos se representa de forma simplificada cada cuerpo, o **barra**, que compone el mecanismo y, de la forma expuesta en la Fig. 28, cada uno de los pares. Los cuerpos con dos pares activos se denominan **binarios** y se representan mediante líneas que unen estos pares. Los que poseen tres se denominan **ternarios** y se representan mediante triángulos cuyos vértices se sitúan en cada uno de estos pares. Se sigue esta regla para cuerpos con número de pares sucesivos. Esta manera de representar las barras no es obligatoria, según el mecanismo una barra puede ser representada de diversas maneras con el fin de visualizar fácilmente de qué mecanismo se trata.

Las barras se numerarán partiendo del número 1, reservado a la barra fija o **bancada**, y los pares se identificarán de la manera expuesta en la siguiente figura, donde  $i$  corresponde a la numeración del par,  $X$  representa el tipo de par y  $b$  y  $b'$  identifican a las barras que dicho par une, comenzando con la de menor numeración.

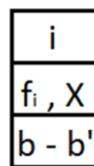


Figura 34. Cajetín de identificación de pares

La creación de diagramas cinemáticos permite intuir de manera más fácil cómo se moverá cada una de las piezas y qué configuración alcanzará el mecanismo según qué movimiento se aplique en los impulsores.

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, el diagrama cinemático de un mecanismo sencillo, como es el de una lámpara tipo flexo, del cual, si quisiéramos comprobar su movilidad, aplicando la Ec. 1, siendo 4 el número de barras, y 3 el número de pares (todos ellos inferiores, giratorios R), tendríamos que el mecanismo tiene movilidad 3. Este es un caso en el que la movilidad es inmediatamente deducible con sólo observar el mecanismo, pues es fácil deducir que la configuración quedará determinada al determinar el giro en cada una de sus articulaciones (3 giros).

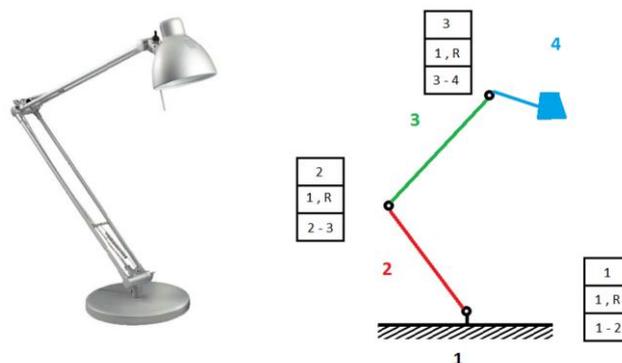


Figura 35. Diagrama cinemático del mecanismo de una lámpara tipo flexo

En otros mecanismos más sofisticados, como se verá más adelante, la deducción de la movilidad no es inmediata, lo que resalta la utilidad de emplear diagramas cinemáticos junto con el criterio de movilidad.

## 5.7 Mecanismo autoalineador

Si hubiese que indicar un concepto mecánico que representara el sentido docente de lo que se pretende desarrollar en este módulo, este sería el de “Mecanismo Autoalineador”. Veamos brevemente como se explica en base a algunos párrafos del libro que lo presentó, estando desarrollados los detalles en las siguientes secciones.

La teoría de mecanismos y máquinas es la ciencia que estudia los pares cinemáticos (articulaciones) de los mecanismos. Debe proporcionar recomendaciones acerca de los tipos de pares cinemáticos y su empleo. Uno de los autores que más han contribuido a esta tarea fue el Profesor L. Reshetov, con su libro titulado “Mecanismos Autoalineadores”. Una de las conclusiones de este trabajo es que para conseguir una mejora esencial en el funcionamiento del mecanismo, este último debía estar determinado estáticamente, o como el propio autor indica: “ser autoalineador”. En su libro desarrolla una teoría y la aplica sobre ejemplos, con el fin de mostrar a los diseñadores e ingenieros como conseguir que los mecanismos que tengan que utilizar sean autoalineadores.

Para facilitar el montaje de los mecanismos es conveniente que se elija un esquema tal que el hecho que las dimensiones de los distintos componentes no sean las teóricas, no suponga problema alguno. Es decir, lo más conveniente es emplear mecanismos estáticamente determinados, es decir sin restricciones excesivas (pasivas), a los que llamaremos mecanismos autoalineadores (llámese excesivas, pasivas, a las restricciones cuya eliminación no aumenta la movilidad del mecanismo).

Las dimensiones de los componentes de un mecanismo pueden variar también durante el servicio de las máquinas, lo cual puede suceder a consecuencia del hundimiento de la cimentación, el desgaste y la regulación del “juego” en los pares cinemáticos, las deformaciones elásticas, la dilatación térmica, así como a causa de los errores cometidos durante la reparación y el montaje. Un mecanismo estáticamente determinado no está sujeto a la variación de las dimensiones de sus elementos. Por lo tanto, la determinación estática de un mecanismo no solo resuelve el problema de reducir el gasto de montaje, sino que también resuelve al mismo tiempo el problema de elevar su fiabilidad en servicio.

En una palabra, según el libro del Profesor Reshetov, la existencia de restricciones excesivas en un mecanismo es un factor **perjudicial**. Por ello esta solicitud lo que persigue es disponer de un conjunto de mecanismos manejables tanto físicamente como en el ordenador (virtualmente), con los que poder practicar la creación de **modelos cinemáticos autoalineadores**, es decir sin restricciones en exceso. Para ello es imprescindible tener un modelo virtual en SolidWorks, con el que se pueda definir y comprobar el modelo cinemático autoalineador mediante la aplicación integrada denominada COSMOS MOTION.

## 5.8 Modelo cinemático autoalineador en SolidWorks. Aplicaci3n integrada COSMOS Motion

COSMOS Motion es una aplicaci3n que permite simular y evaluar sistemas mecánicos sin necesidad de construir un prototipo del mecanismo en cuesti3n, lo cual convierte permite ganar en eficiencia y eficacia a la hora de aplicar diseños te3ricos. El hecho de estar integrado en SolidWorks facilita el trabajo con los modelos virtuales, ya que utiliza el mismo entorno de trabajo en el que se ha diseñado el mecanismo, evitando además la conversi3n entre archivos informáticos para poder utilizar la aplicaci3n.

Con esto, dado que el diseño mecánico suele conllevar un proceso iterativo diseño-comprobaci3n-rediseño, la existencia y conocimiento de estas tècnicas de diseño informático evidencian su propia importancia.

### 5.8.1 Entorno de trabajo

La siguiente figura muestra el entorno de trabajo de la aplicaci3n COSMOS Motion, donde se puede apreciar la ventana de visualizaci3n del modelo (1) en la que, delineados en color azul celeste, se pueden diferenciar los pares cinemáticos creados sobre un modelo virtual; el listado de piezas (2) fijas y móviles; el listado de restricciones (3), fuerzas (4), resultados de la simulaci3n (5) y el panel de simulaci3n (6).

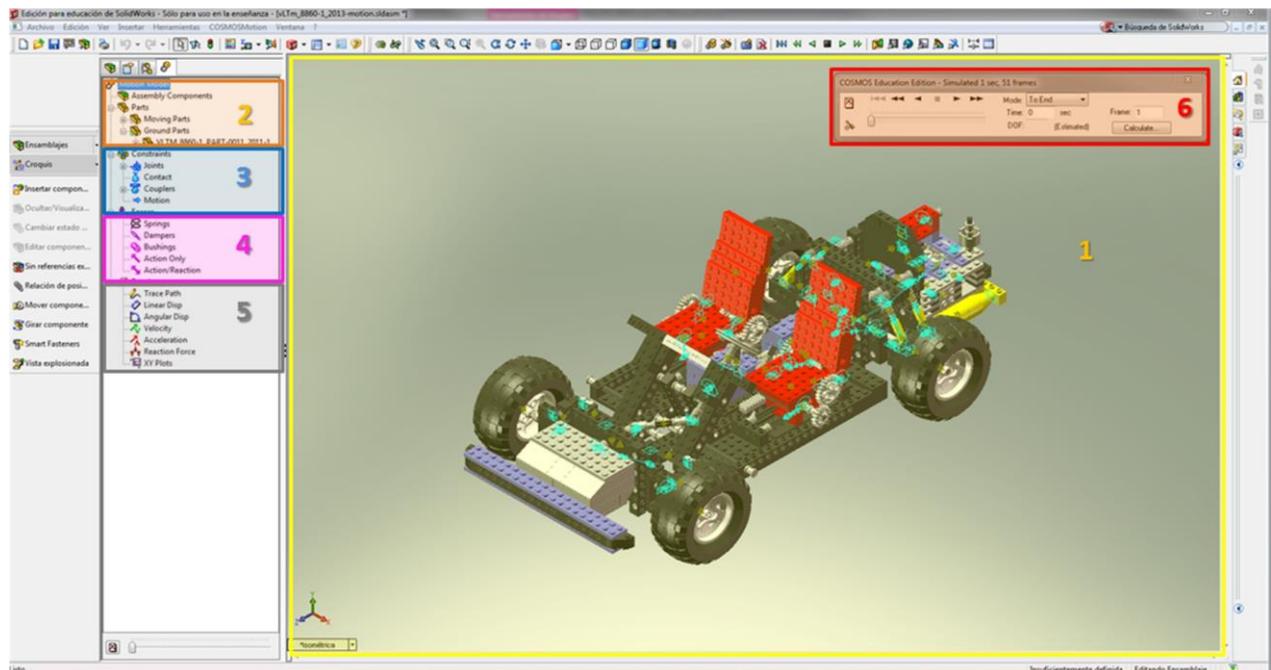


Figura 36. Entorno de trabajo de COSMOS Motion

## 5.8.2 Piezas

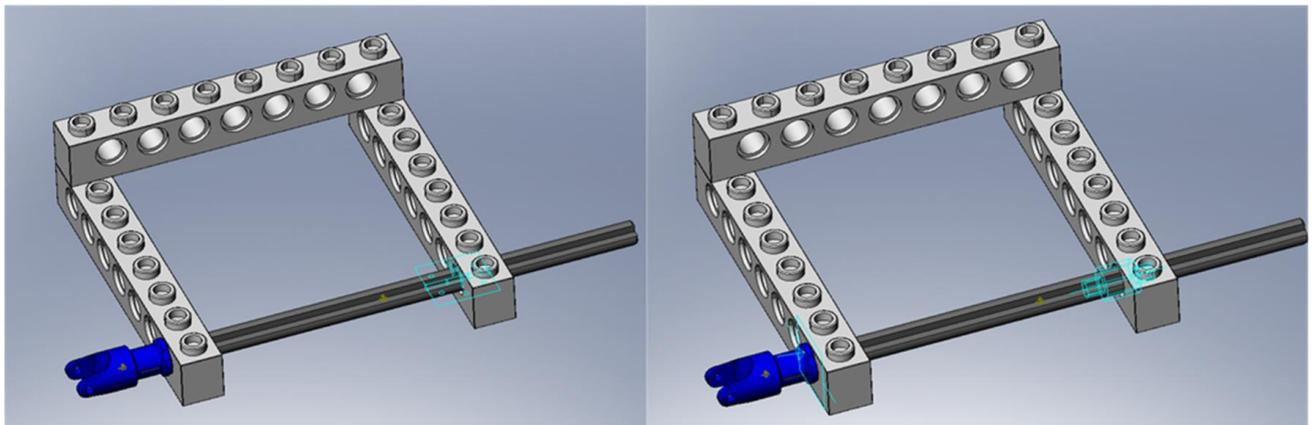
Es necesario, al igual que era conveniente en la construcción del modelo virtual, fijar una pieza como fija, pues un mecanismo precisa de que una de sus piezas sea fija respecto a la cual el resto de ellas poseen movimiento relativo. Así, tras definir una pieza como fija, el resto se definirán como piezas libres, con lo que tendrán 6 GDL al ser así definidas.

Al definir una pieza del mecanismo como libre, éste gana 6 GDL con cada nueva pieza así definida y no hemos de perder de vista que el objetivo es conseguir un modelo cinemático autoalineador, esto es, con 0 GDL. Para lograr este objetivo será necesario definir los pares cinemáticos adecuadamente, con lo que conseguiremos ir restando GDL al mecanismo.

## 5.8.3 Pares cinemáticos

Parte del trabajo de la definición de los pares cinemáticos consiste en distribuirlos correctamente, pues si bien hay varias formas de conseguir un mecanismo bien definido en el entorno virtual, desde el punto de vista real de la máquina se deben colocar los pares en los puntos donde la máquina tendrá los contactos.

Esto es importante pues si se abordase el análisis dinámico, en el cual intervienen las fuerzas, es importante tener información en los puntos de unión entre las piezas y, así, se obtiene información más cercana al caso real. Atendiendo a este aspecto es también determinante el punto donde se definan los pares, pues aunque para el movimiento existen casos en el que no afecta esta elección, para el estudio dinámico es necesario situar el punto exacto donde se transmitirán los esfuerzos.



*Figura 37. Formas equivalentes de definir un par de revolución con uno (izda.) o dos (dcha.) puntos de apoyo*

A continuación se detalla cada uno de los pares cinemáticos que COSMOS Motion permite introducir en el mecanismo.

### 5.8.3.1 Revolución

Con el par de revolución se permite el giro relativo entre dos piezas alrededor de un eje común. El origen donde se defina será cualquiera perteneciente a dicho eje, siendo la dirección del mismo la que determina la orientación de este par.

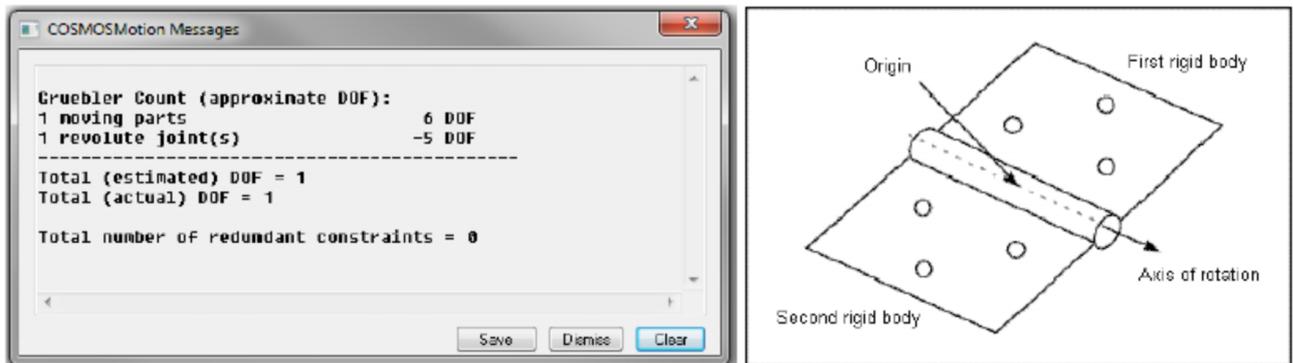


Figura 38. Análisis de la movilidad del par de revolución y esquema del mismo

Para definir un par de revolución se ha de seleccionar una arista cuyo centro de curvatura vaya a estar contenido en el eje de revolución, pues con dicho punto y la dirección perpendicular al plano que contiene dicha arista se define el eje de revolución. De esta forma se tendrá el primer cuerpo y el eje de revolución; queda pues seleccionar el segundo cuerpo. En los pares que permitan el giro es conveniente revisar en qué punto se ha creado el origen, ya que si no es el correcto, el movimiento diferirá significativamente del ideado y siempre se puede volver a definir la posición desde la misma ventana de edición del par.

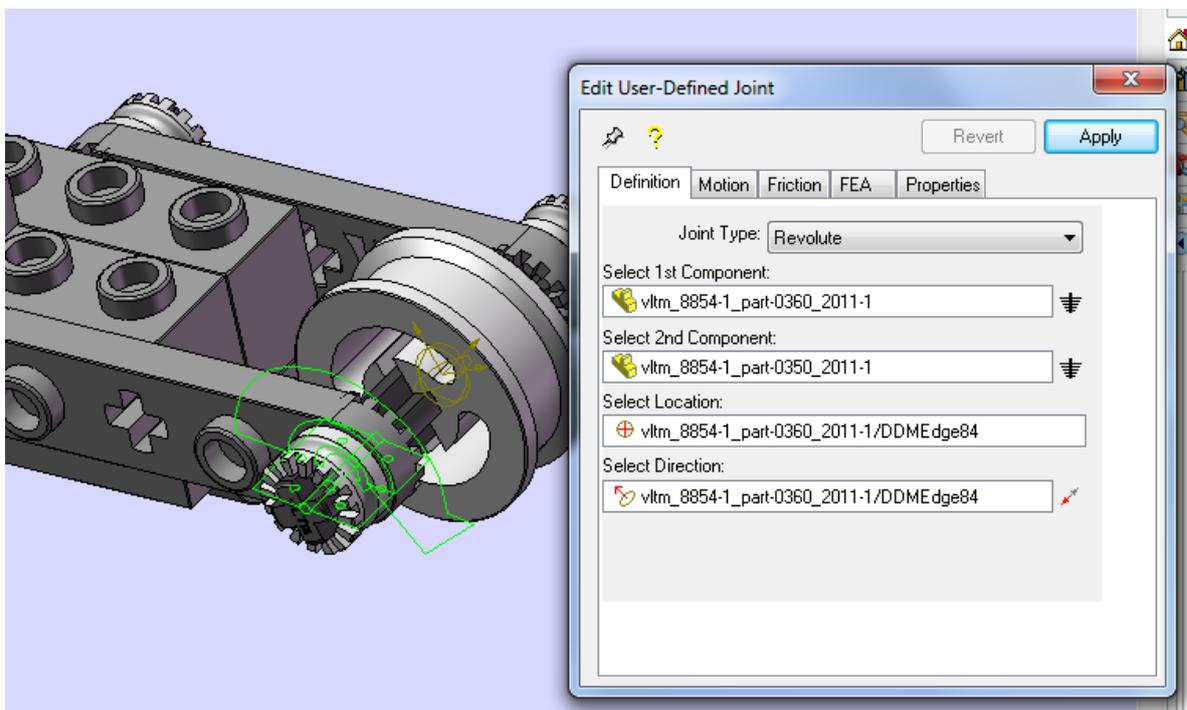


Figura 39. Ventana de edición del par de revolución y aspecto del mismo dentro de la aplicación

### 5.8.3.2 Traslacional

El par traslacional permite que un cuerpo se desplace siguiendo una única dirección rectilínea sin posibilidad de giro.

Para definir este par se seleccionará una cara o arista de uno de los cuerpos (creando la dirección del movimiento como la propia arista, si es rectilínea) y después el segundo cuerpo. En este par la ubicación y dirección no se crean de manera tan intuitiva como en el anterior, luego es conveniente seleccionar manualmente el origen y dirección del mismo.

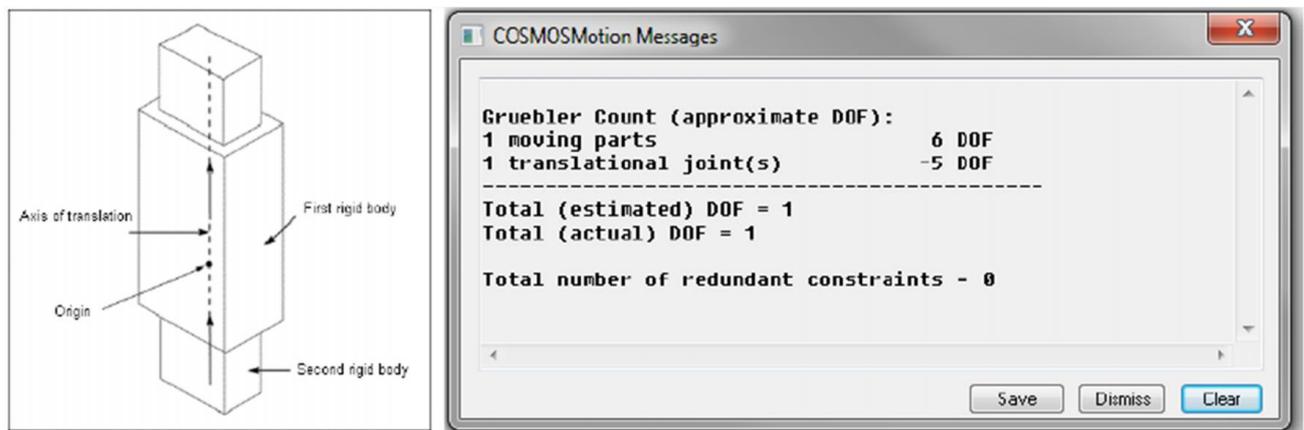


Figura.40. Análisis de la movilidad del par traslacional y esquema del mismo

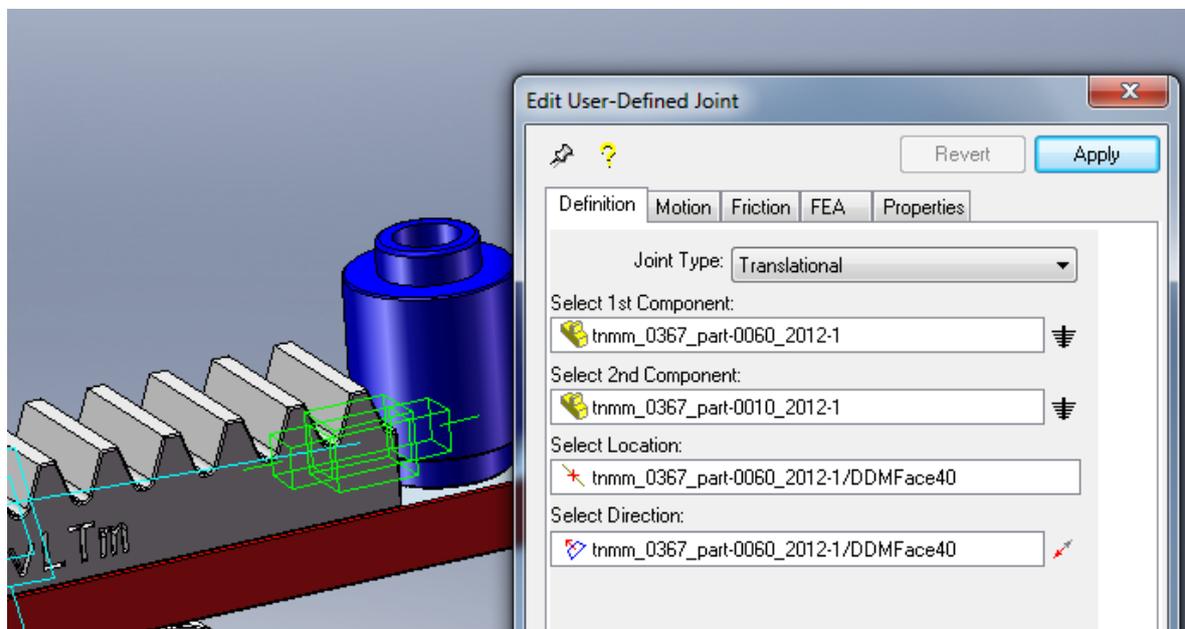


Figura 41 Ventana de edición del par traslacional y aspecto del mismo dentro de la aplicación

### 5.8.3.3 Cilíndrico

Este par es una combinación de los dos anteriores, permitiendo la traslación en una dirección rectilínea a la vez que el giro alrededor de ésta, de un cuerpo sobre el otro.

El modo de definición es análogo al caso del par de revolución.

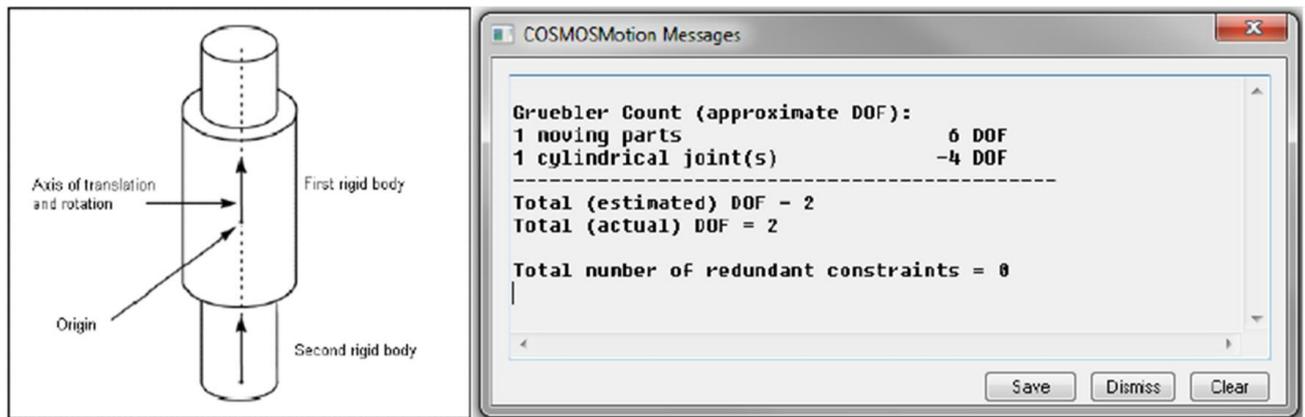


Figura 42. Análisis de la movilidad del par cilíndrico y esquema del mismo

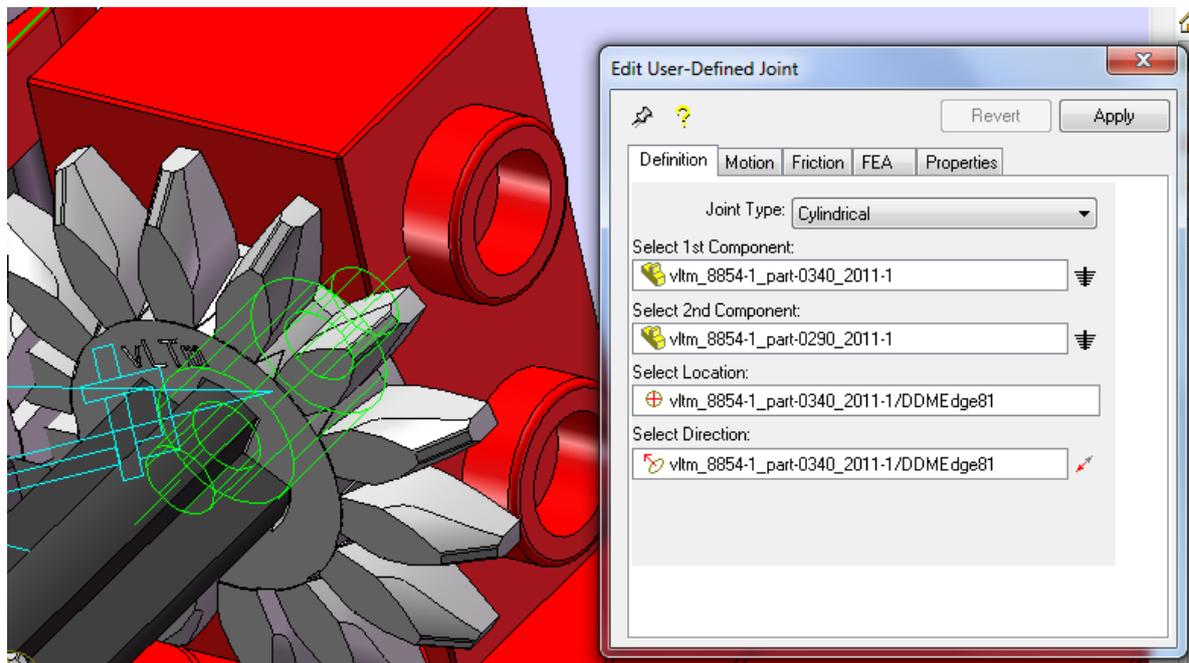


Figura 43. Ventana de edición del par cilíndrico y aspecto del mismo dentro de la aplicación

### 5.8.3.4 Esférico

Este par define el punto en el cual un cuerpo puede pivotar respecto al otro. Esto se consigue restringiendo los tres movimientos de traslaci3n y permitiendo los tres de rotaci3n.



Figura 44. Anàlisis de la movilidad del par esférico y esquema del mismo

En este tipo de par la elecci3n del origen sí es determinante, ya que será el propio punto donde tendrá lugar el contacto y alrededor del cual existirá el giro relativo entra ambas piezas.

Así, seleccionando una arista o superficie curvas de uno de los cuerpos, el par se situará en el centro de ésta, restando únicamente seleccionar el segundo cuerpo. Si la primera selecci3n no se hace en una arista o superficie curvas, el origen quedará determinado en el punto donde se haya pulsado. Recordemos que siempre se puede editar esta operaci3n a posteriori desde la ventana de edici3n.

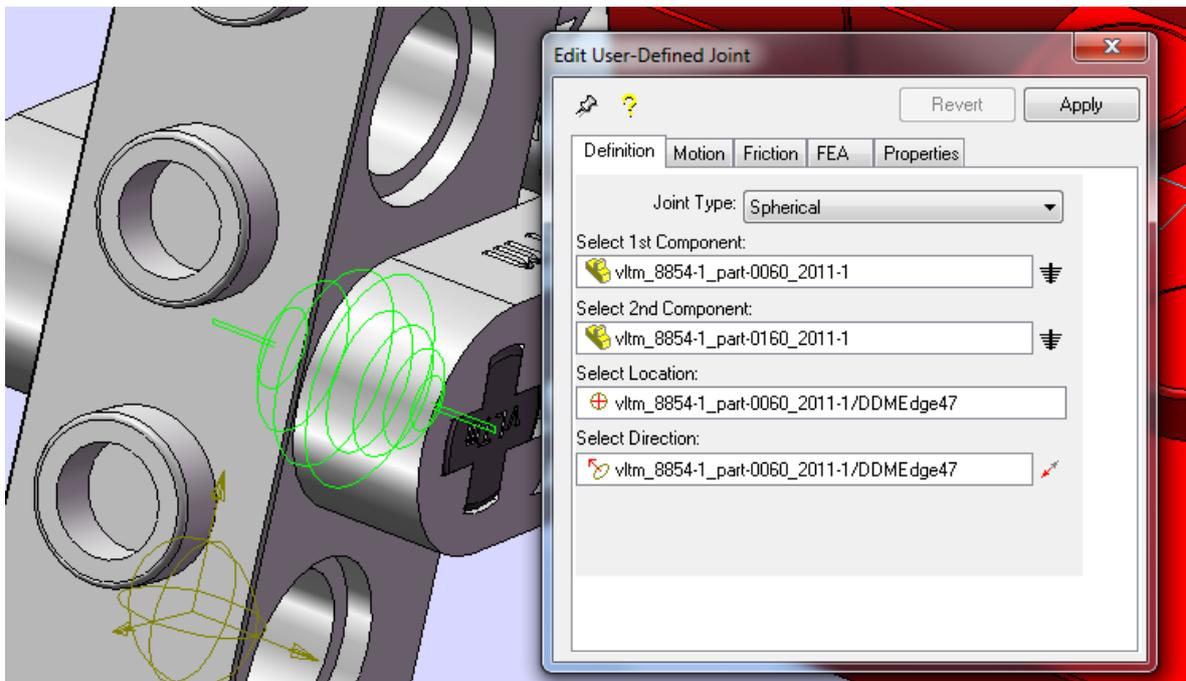


Figura 45. Ventana de edici3n del par esférico y aspecto del mismo dentro de la aplicaci3n

### 5.8.3.5 Universal

La unión universal representa a la junta Hooke o cardan. Esta junta se utiliza para la transmisión de rotación entre cuerpos, de aplicación en situaciones en los que un eje consta de varios tramos entre los que puede existir un ángulo fijo o variable. Este par se puede sustituir físicamente por una junta Hooke, debiendo definir entonces los pares necesarios entre esta nueva pieza y los dos ejes que conecta.

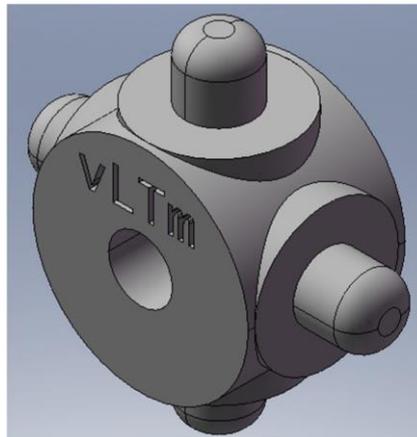


Figura 46. Componente vLTm "junta Hooke"

Para definir este par es necesario seleccionar primero cada cuerpo. Después se selecciona el punto de origen de la junta para luego seleccionar los ejes de revolución de cada pieza.

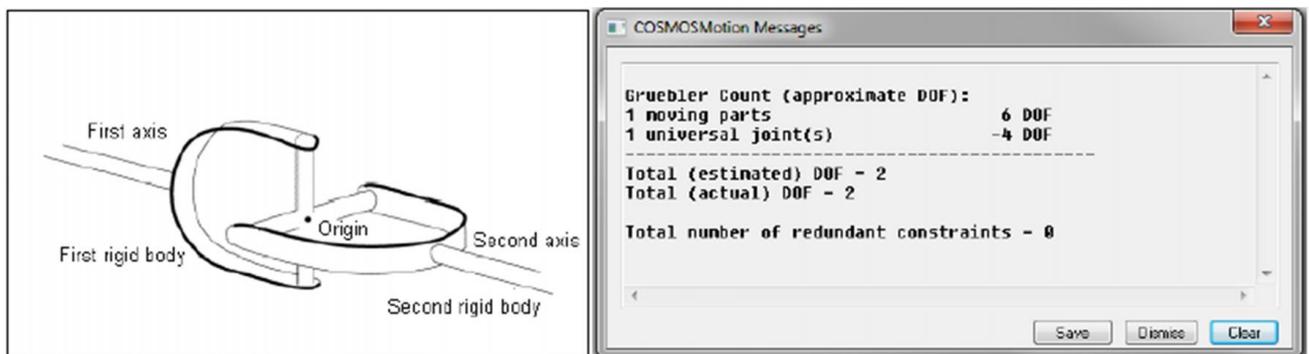


Figura 47. Análisis de la movilidad del par universal y esquema del mismo

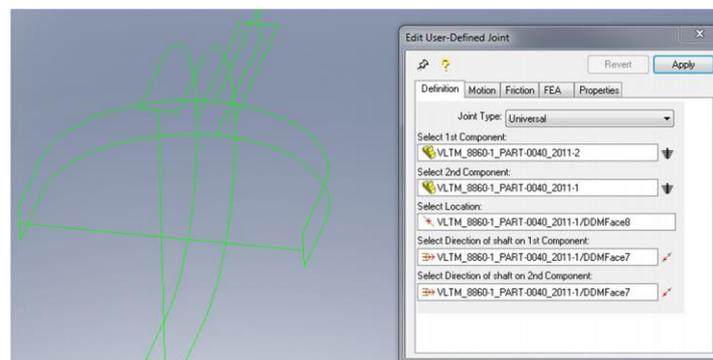


Figura 48. Ventana de edición del par universal y aspecto del mismo dentro de la aplicación

### 5.8.3.6 Tornillo

Con este par se determina que un cuerpo se desplace en una direcci3n rectilínea a la vez que gira respecto a esa direcci3n. Este par posee un GDL, ya que aunque existen dos movimientos, uno queda determinado por el otro, por lo que se reparte como 0.5 GDL debido al giro y 0.5 debido al desplazamiento (en total, 1).

Para definirlo se procede de igual manera que en el caso cilíndrico, debiendo introducir la relaci3n de desplazamiento respecto al giro.

### 5.8.3.7 Planar

Mediante este par se permite que un cuerpo se deslice libremente sobre la superficie de otro. Así, se permitirá el desplazamiento en dos direcciones (que determinan el plano de la superficie sobre la que se desliza), y un giro respecto a la direcci3n normal a las dos anteriores.

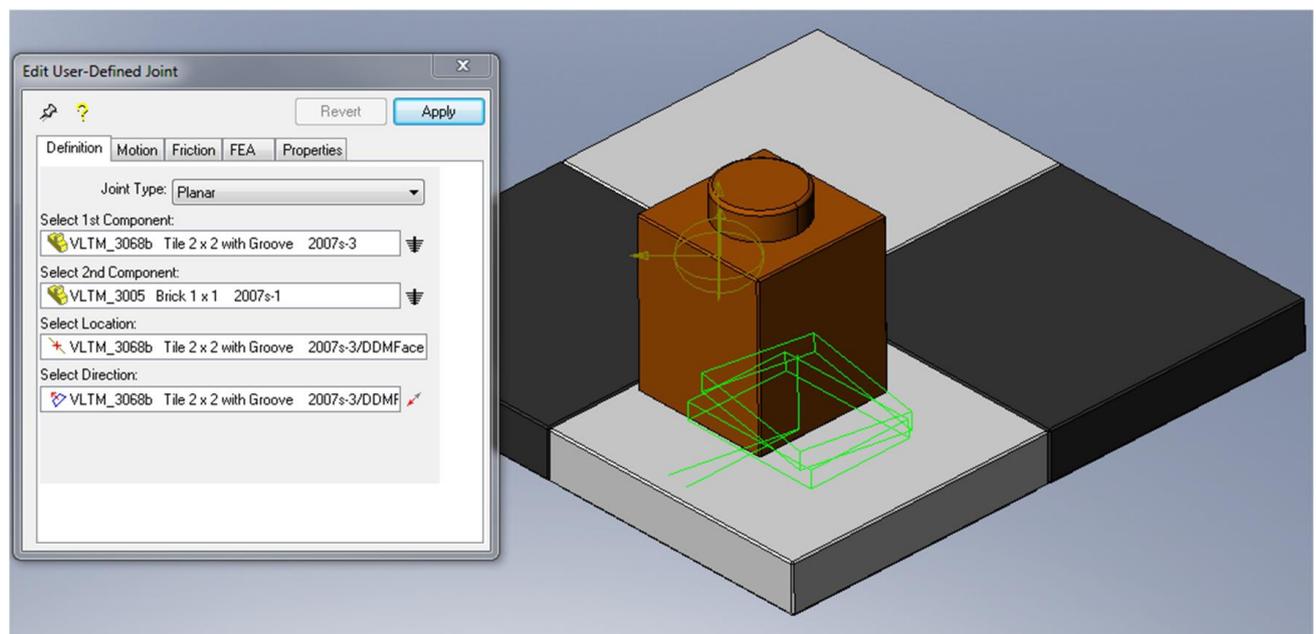


Figura 49. Ventana de edici3n del par planar y aspecto del mismo dentro de la aplicaci3n

### 5.8.3.8 Fijo

No se entiende como par cinemático, pues no permite el movimiento relativo entre los dos cuerpos que conecta. Es una manera de fijar el par de cuerpos en un punto, cuyo significado es el de una soldadura.

Como en otras ocasiones, esto no parece ser de utilidad en el estudio del modelo, pero si se quisiese abordar el estudio dinámico de esta manera se tiene un punto de unión de dos cuerpos donde habrá una transmisión de esfuerzos.

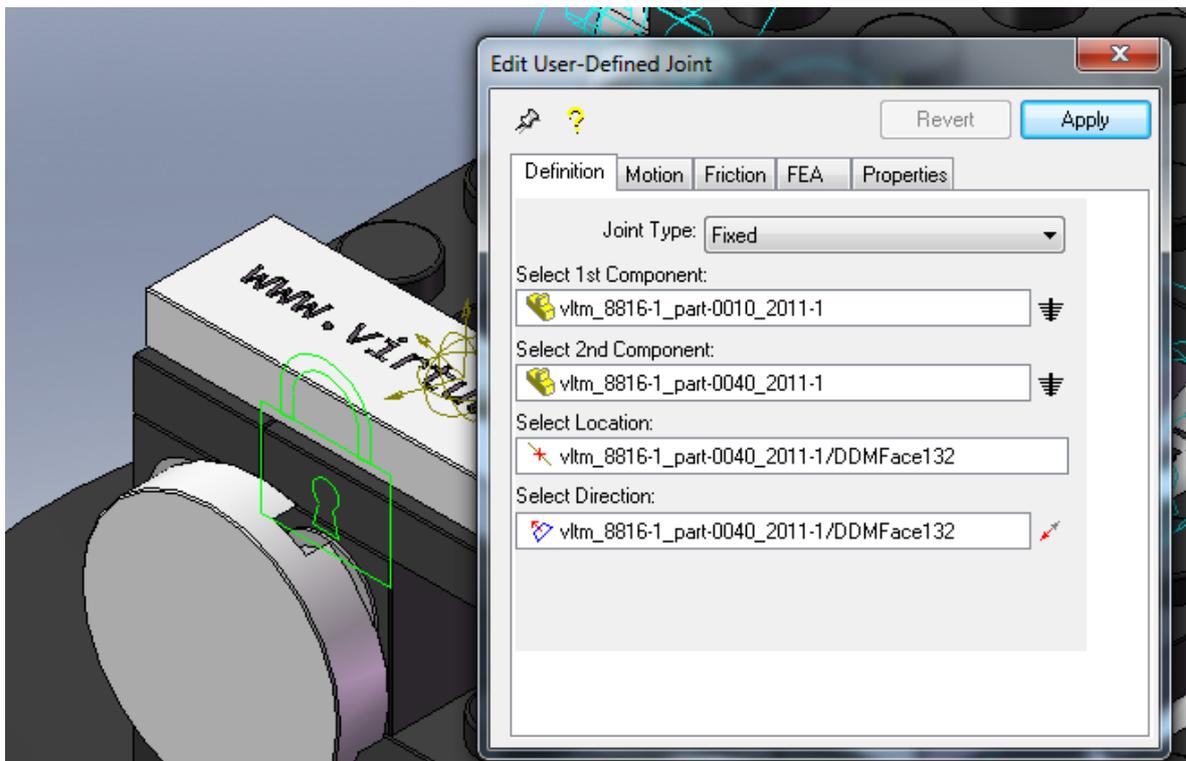


Figura 50. Ventana de edición del par fijo y aspecto del mismo dentro de la aplicación

## 5.8.4 Pares primitivos

Para conseguir los mismos resultados que con los pares cinemáticos se pueden combinar pares primitivos junto con otro tipo de par cinemático, así conseguimos el mismo efecto con más de un punto de apoyo.

### 5.8.4.1 En la línea

Permite el movimiento de un cuerpo respecto del otro a lo largo de un eje, sin limitar la rotación. Así este par tiene 4 GDL, restringiendo únicamente la traslación sobre el plano perpendicular a este eje.

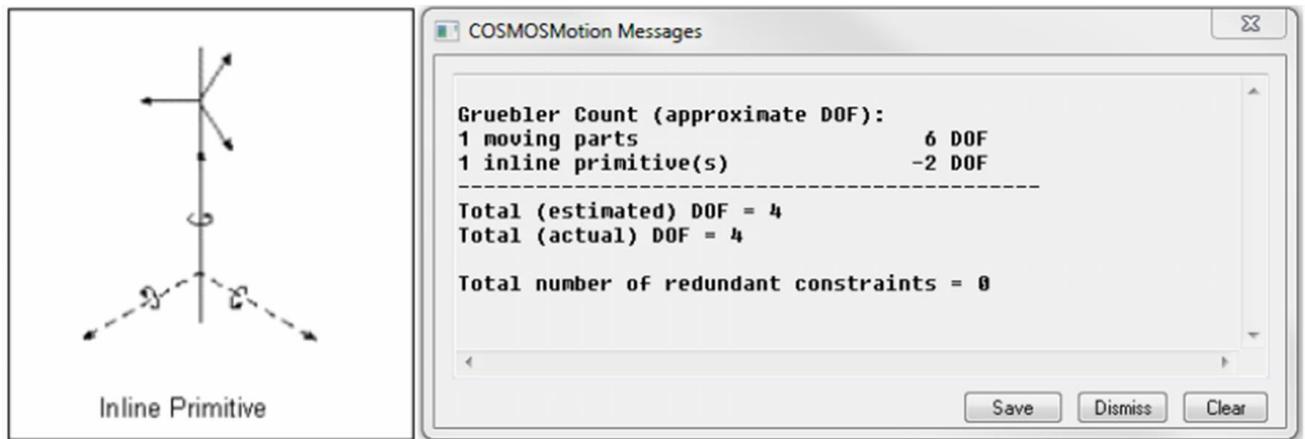


Figura 51. Análisis de la movilidad del par “en línea” y esquema del mismo

Una aplicación de este par primitivo es la de convertir un par de revolución en una combinación par primitivo en la línea – par esférico, con los mismos resultados pero consiguiendo dos puntos de aplicación.

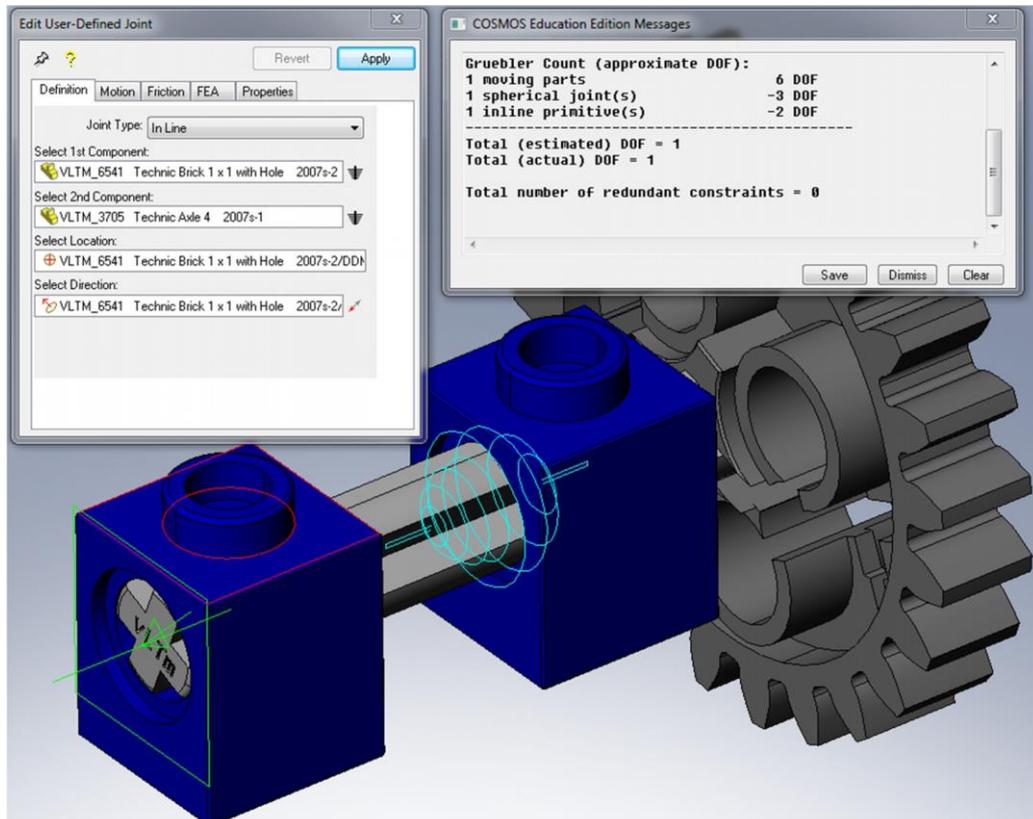


Figura 52. Ventana de edición del par “en línea” y aspecto del mismo dentro de la aplicación, en combinación con un par esférico

### 5.8.4.2 En el plano

Únicamente restringe un GDL de traslación, permitiendo el movimiento relativo de un cuerpo respecto a otro sobre un plano, sin restricción sobre la rotación.

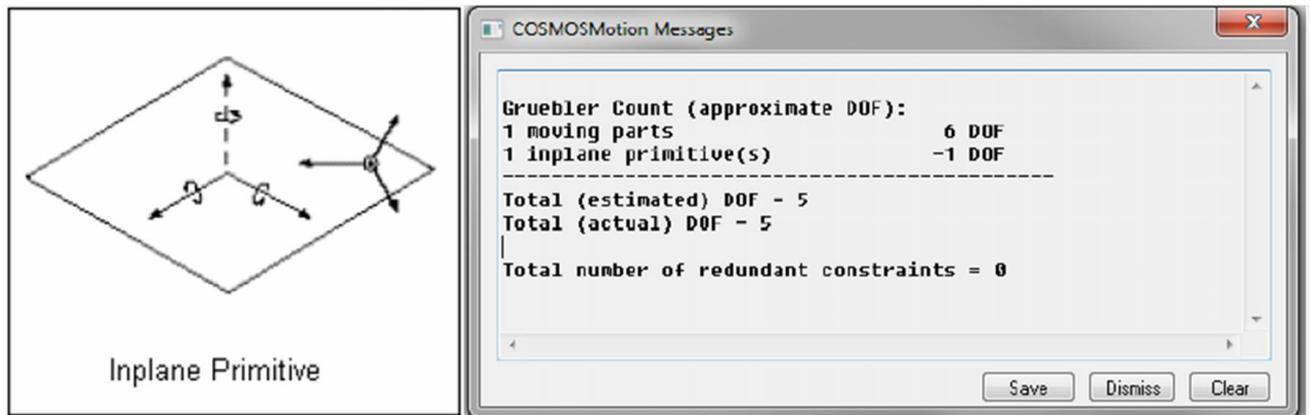


Figura 53. Análisis de la movilidad del par “en plano” y esquema del mismo

Una aplicación de este par persigue el mismo objetivo que la expuesta en el anterior caso: combinado con un par cilíndrico se consigue el mismo resultado que con uno de revolución, solo que con dos puntos de apoyo.

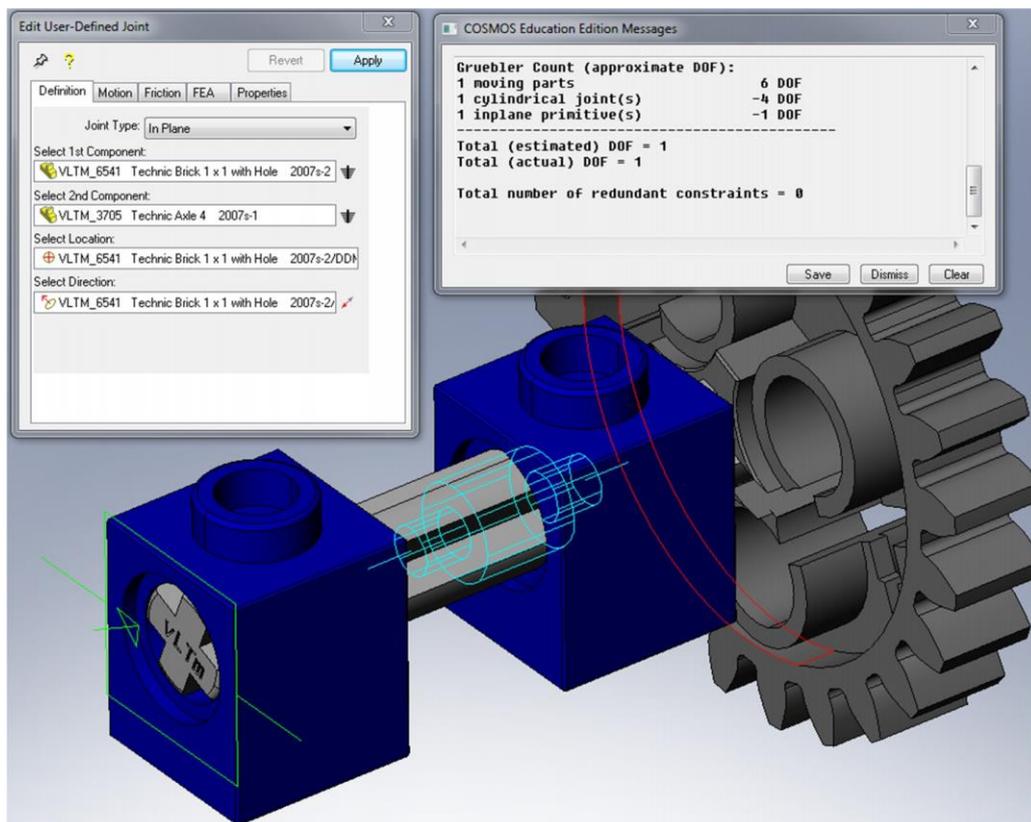


Figura 54. Ventana de edición del par “en plano” y aspecto del mismo dentro de la aplicación, en combinación con un par cilíndrico

### 5.8.4.3 Orientación

Impide cualquier movimiento de rotación de un cuerpo respecto al otro, permitiendo la traslación en cualquier dirección.

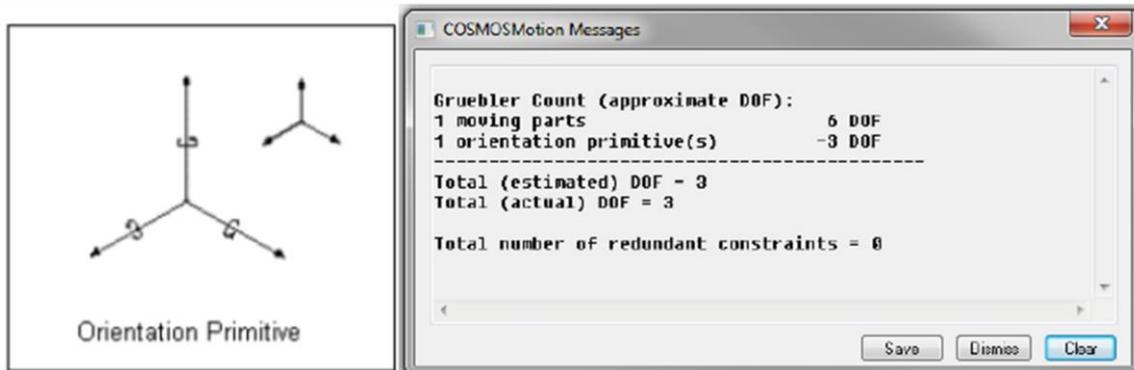


Figura 55. Análisis de la movilidad del par "orientación" y esquema del mismo

### 5.8.4.4 Paralelismo

Con este par primitivo se determina que un eje perteneciente a cada uno de los cuerpos se mantengan paralelos, restringiendo dos GDL de rotación.

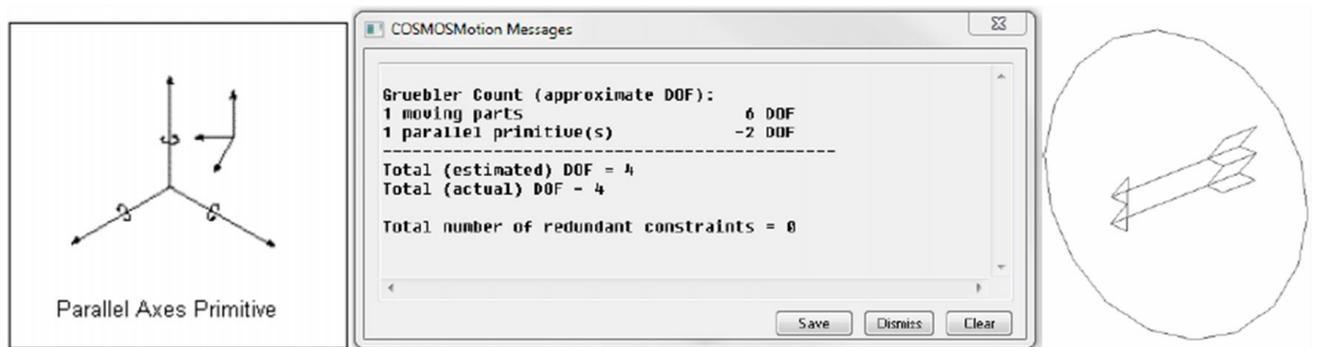


Figura 56. Análisis de la movilidad del par "paralelismo", esquema y simbología del mismo

### 5.8.4.5 Perpendicularidad

Con la restricción de perpendicularidad, dos ejes, cada uno perteneciente a uno de los cuerpos, se mantengan perpendiculares, restringiendo pues un GDL de rotación.

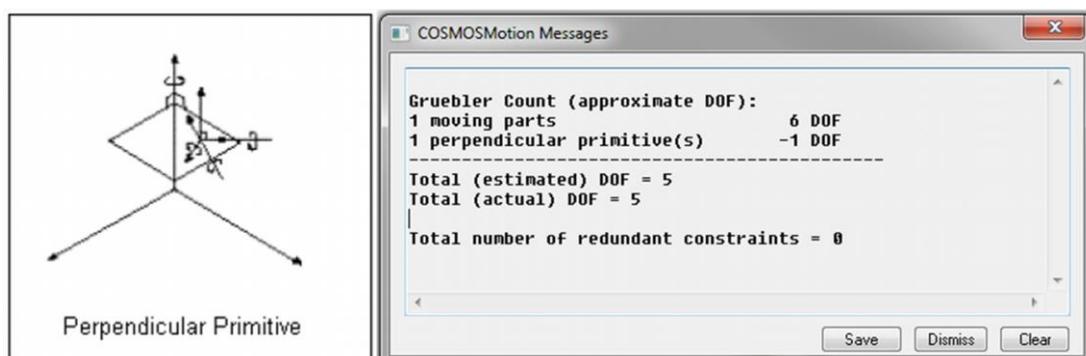


Figura 57. Análisis de la movilidad del par "perpendicularidad" y esquema del mismo

Para finalizar con el apartado referente a los pares cinemáticos, la siguiente tabla resume los GDL restringidos y permitidos por cada tipo de par, ya que es conveniente trabajar ayudándose de tal resumen si no se está familiarizado con el proceso de definición de pares.

PAR	RESTRICCIONES TRASLACIONALES	RESTRICCIONES ROTACIONALES	GDL RESTRINGIDOS
REVOLUCIÓN	3	2	5
TRASLACIONAL	2	3	5
CILÍNDRICO	2	2	4
ESFÉRICO	3	0	3
UNIVERSAL	3	1	4
TORNILLO	2.5	2.5	5
PLANAR	1	2	3
FIJO	3	3	6
EN LA LÍNEA	2	0	2
EN EL PLANO	1	0	1
ORIENTACIÓN	0	3	3
PARALELO	0	2	2
PERPENDICULAR	0	1	1

*Tabla 1. GDL restringidos y permitidos según par*

### 5.8.5 Acoplamientos

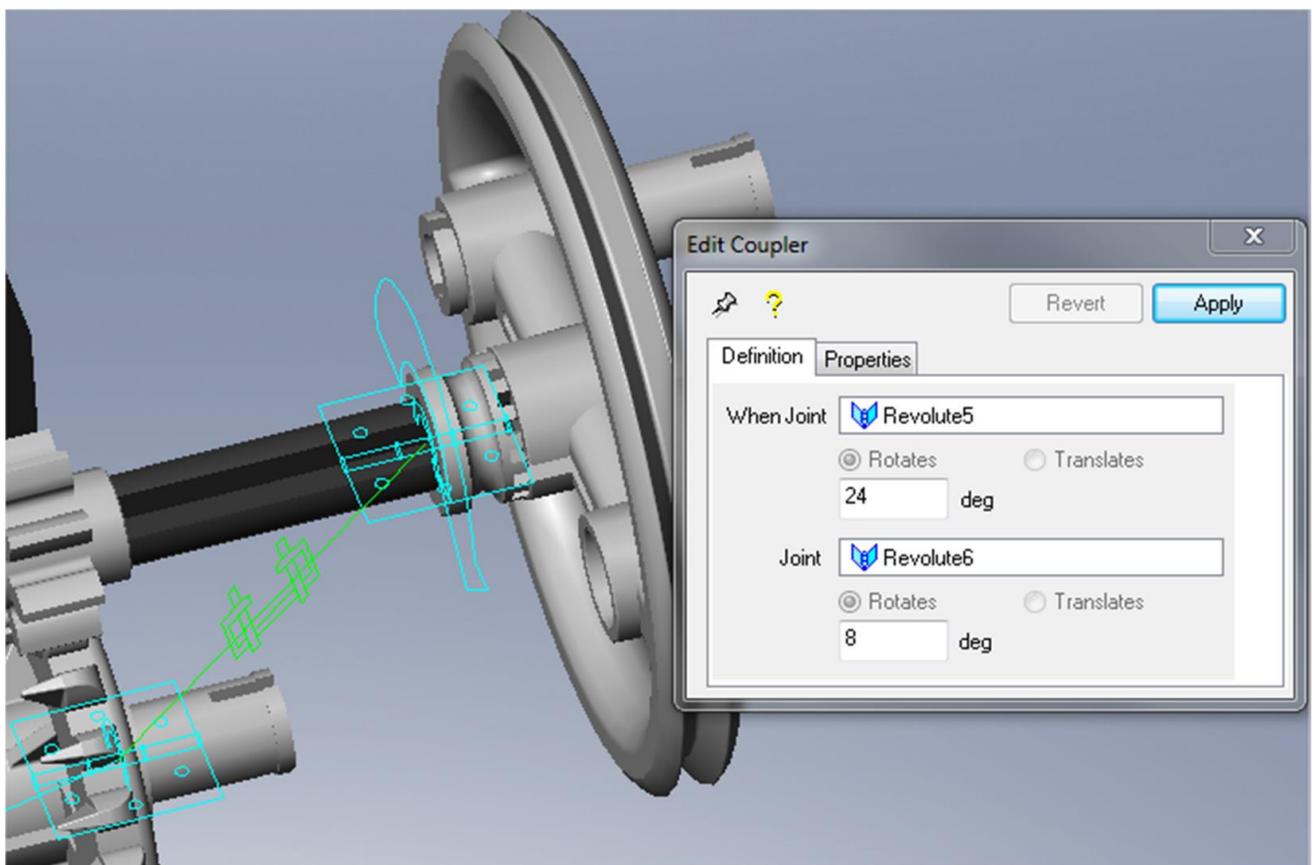
Para poder simular la transmisión de movimiento es necesario definir los acoplamientos entre los distintos pares de la cadena cinemática.

Hemos de tener presente que con la simulación no se persigue recrear de forma rigurosa la manera en que se consiguen tales transmisiones en el modelo real. Así, para conseguir que un movimiento sobre un impulsor de como resultado un cierto movimiento en un seguidor, no hay una manera única de definir los acoplamientos.

### 5.8.5.1 Engranajes y poleas

Al definir este acoplamiento entre dos pares que permitan la rotación a lo largo de un eje (revolución y/o cilíndrico), se consigue que el par del engranaje (o rueda) conducido gire alrededor de su eje un cierto ángulo por cada unidad de ángulo girado en el par del eje conductor, según la relación de transmisión. Para ello seleccionaremos ambos pares y, utilizando la relación entre el número de dientes o diámetros, crearemos la relación de transmisión. Se ha de definir bien los sentidos de giro, pues según cómo estén orientados cada uno de los pares será necesario cambiar el sentido de giro mediante el cambio de signo en la relación de transmisión.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de simulación de una transmisión entre engranajes. Como se observa, se ha utilizado el número de dientes de cada rueda para definir la relación de transmisión.



*Figura 58. Ventana de edición de un acoplamiento entre pares de revolución para simular la transmisión entre engranajes y aspecto del mismo dentro de la aplicación*

### 5.8.5.2 Piñón – cremallera

Para simular la traslación que experimenta la cremallera respecto a la rotación del engranaje y viceversa, habrá que seleccionar un par de revolución o cilíndrico en el eje del engranaje y el par que permita la traslación de la cremallera.

La relación se definirá utilizando la distancia entre puntos homólogos de dos dientes consecutivos de la cremallera y el número de dientes de la rueda dentada. En la siguiente figura se muestra una transmisión piñón-cremallera entre una rueda dentada de 24 dientes y una cremallera de paso 3.14 mm, en la que se ha definido que una vuelta de la rueda dentada conlleva un desplazamiento de  $24 * 3.14 = 75.36$  mm.

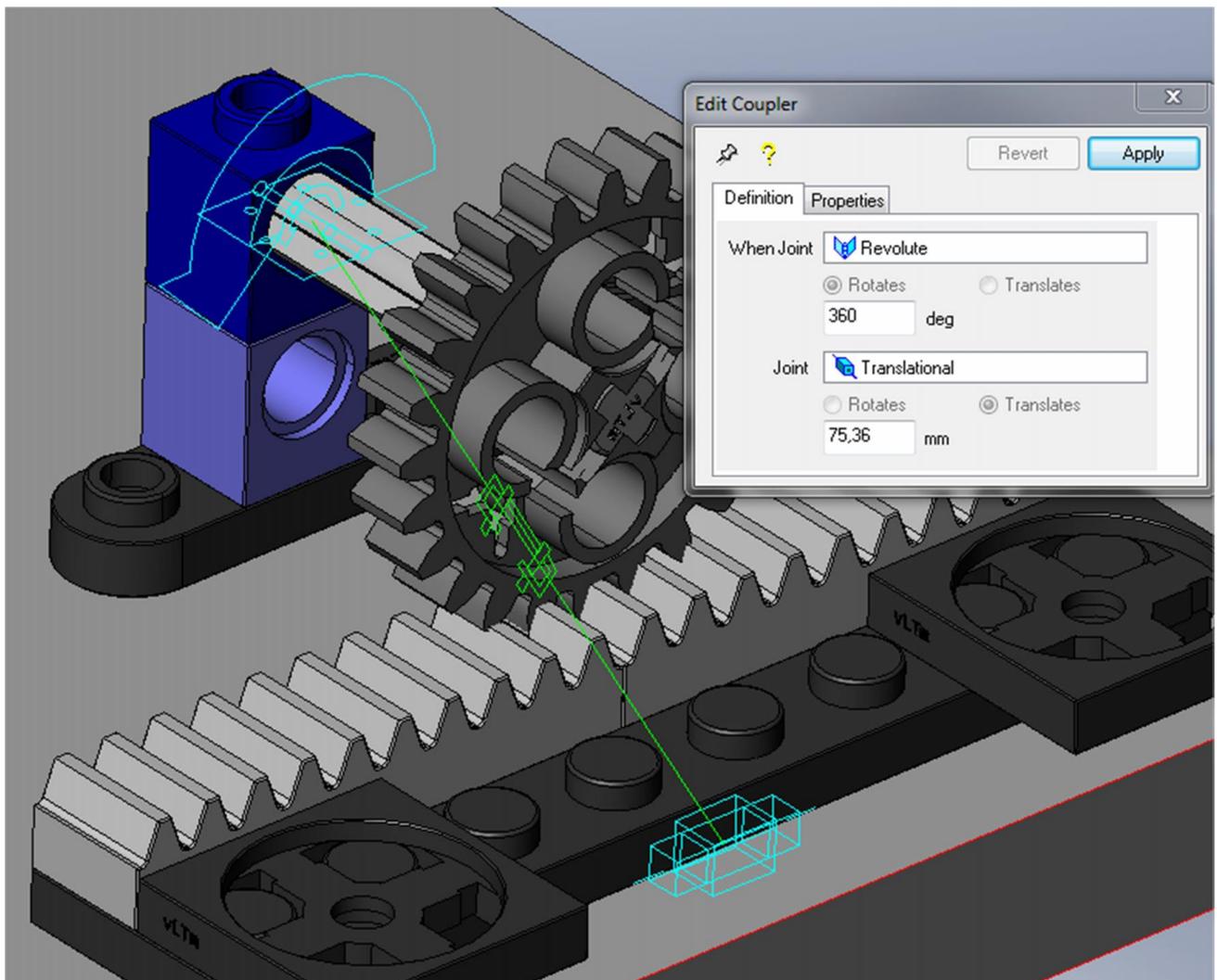


Figura 59. Ventana de edición de un acoplamiento para simular la transmisión piñón - cremallera

### 5.8.5.3 Tornillo sin fin

Este caso se define de manera similar al caso de transmisión entre engranajes, teniendo en cuenta cuantas revoluciones necesita el par del tornillo para lograr una revolución en el par del engranaje.

En la figura 59 se ha definido la relación de transmisión para que por una revolución de la rueda dentada, el tornillo deba completar 24, que es el número de dientes de la rueda.

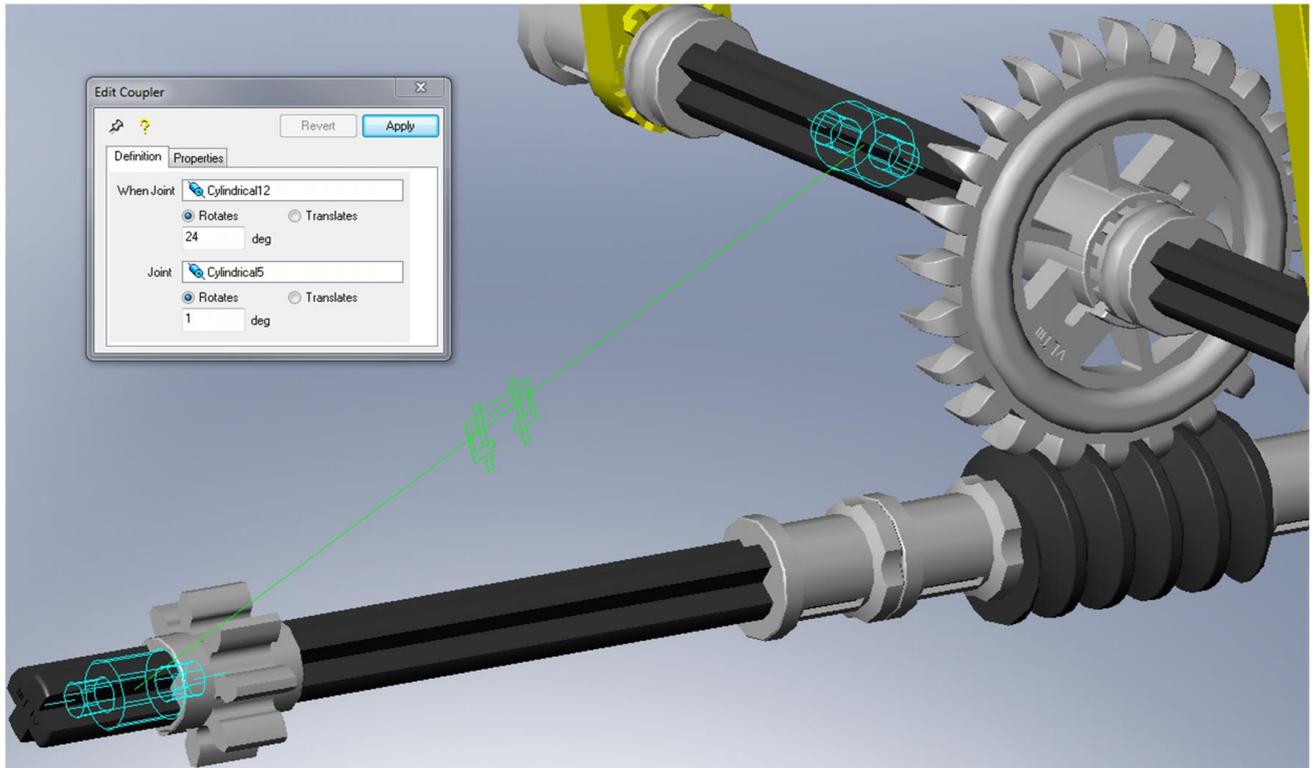
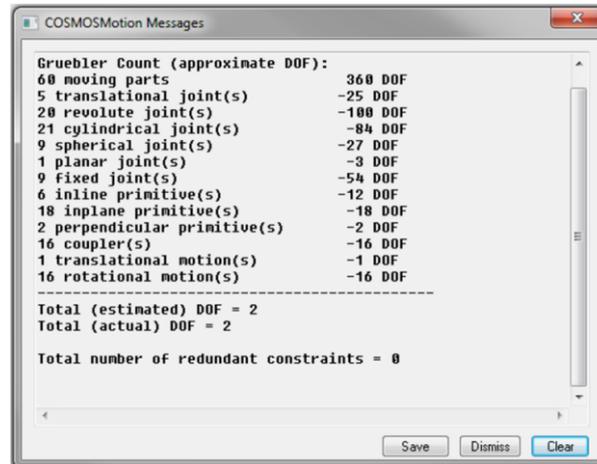


Figura 60. Ventana de edición de un acoplamiento para simular la transmisión tornillo sin fin

### 5.8.6 GDL del mecanismo

Una vez se han definido los pares cinemáticos y los acoplamientos, se puede comprobar que el mecanismo posee los GDL esperados, uno por cada acción necesaria sobre los actuadores para definir la configuración del mecanismo.

Si el trabajo de definición de los pares y acoplamientos ha sido satisfactorio, el análisis de la movilidad de COSMOS debe reflejar tantos GDL como los que se esperan del mecanismo sin, y esto es determinante, restricciones en exceso. Siendo el caso, se tiene el modelo cinemático autoalineador y se puede proceder a la simulación del movimiento.



*Figura 61. Ejemplo de análisis de movilidad de un mecanismo en COSMOS sin restricciones en exceso*

## 6. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL

### 6.1 Introducción

Hasta ahora hemos visto cómo obtener un modelo cinemático autoalineador, desde la construcción del mismo hasta la definición de las uniones de sus piezas.

El capítulo anterior finalizó con un mecanismo con un cierto número de GDL, que son los movimientos de los que se necesita dotar a los impulsores del mismo para definir completamente la configuración del mecanismo en cada instante.

Durante este capítulo se mostrará el proceso mediante el cual se han definido durante este trabajo tales movimientos sobre los impulsores en el modelo virtual, para comprobar que el funcionamiento del mecanismo es el correcto. Procediendo de esta manera, se deducirá qué tipo de actuadores harán falta en el modelo real para ponerlo en funcionamiento.

### 6.2 Simulación del movimiento en COSMOS

Trabajando sobre el modelo cinemático autoalineador en cuestión, primero será necesario identificar qué grados de libertad posee el modelo para poder restringirlos mediante la determinación de su movimiento: al definir qué movimiento tienen, el GDL asociado desaparece, pues ese movimiento ya no es libre, está sujeto a las condiciones impuestas de **desplazamiento**, **velocidad** o **aceleración**.

#### 6.2.1 Definición del movimiento

Para crear estos movimientos es necesario definirlos en los pares de la cadena cinemática adecuados.

COSMOS permite la definición del movimiento en los pares con diferentes tipos de expresiones:

- Constante  
De esta manera, el valor de desplazamiento, velocidad o aceleración definidas, mantendrán su valor a lo largo de toda la simulación.
- Armónica  
Con este tipo de expresión se puede crear una variación senoidal del movimiento a definir, mediante los siguientes parámetros:
  - Amplitud (Amplitude): diferencia entre el valor máximo y mínimo de la magnitud.
  - Frecuencia (Frequency): recorrido en la función senoidal en una unidad de tiempo.
  - Desfase temporal (Time Offset): valor que adopta el instante de inicio dentro de la función senoidal.
  - Desplazamiento de la fase (Phase Shift): desplazamiento de la función senoidal en la dirección del eje de abscisas.
  - Valor medio (Average): valor respecto al cual varía la magnitud.

- Spline

Con este tipo de expresión se pueden crear simulaciones muy elaboradas, pues permite definir el valor de la magnitud en diferentes instantes de tiempo dentro de la simulación, interpolando ésta entre los puntos definidos.

- Escalón

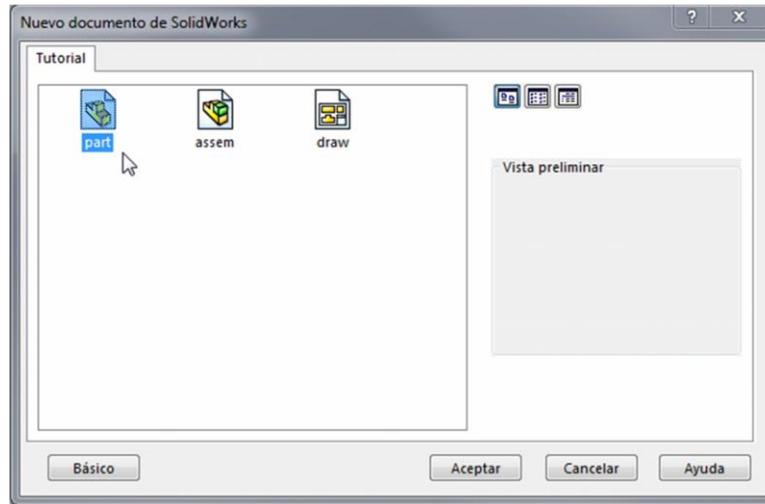
De esta manera se define la variación de la magnitud entre dos instantes de tiempo, definiendo valores inicial y final y el intervalo durante el que ocurre la variación.

## 6.2.2 Entorno y parámetros de la simulación

En este módulo se han realizado simulaciones de modelos de vehículos que se desplazan sobre ruedas. Así, habrá que definir en qué entorno queremos realizar la simulación.

### 6.2.2.1 Entorno: creación de la base

Ya que se pretende que los vehículos se desplacen sobre una superficie, será necesario una pieza fija que haga las veces de superficie por la cual se desplace el vehículo. Para ello se creará un nuevo archivo tipo “part” en SolidWorks.



**Figura 62. Crear nuevo archivo tipo part**

Seleccionando el plano de planta del espacio de trabajo, se creará un croquis -> rectángulo, el cual crearemos mediante cotas inteligentes para realizar los cambios de dimensiones según sea necesario para que sustente al modelo durante su desplazamiento en la simulación.

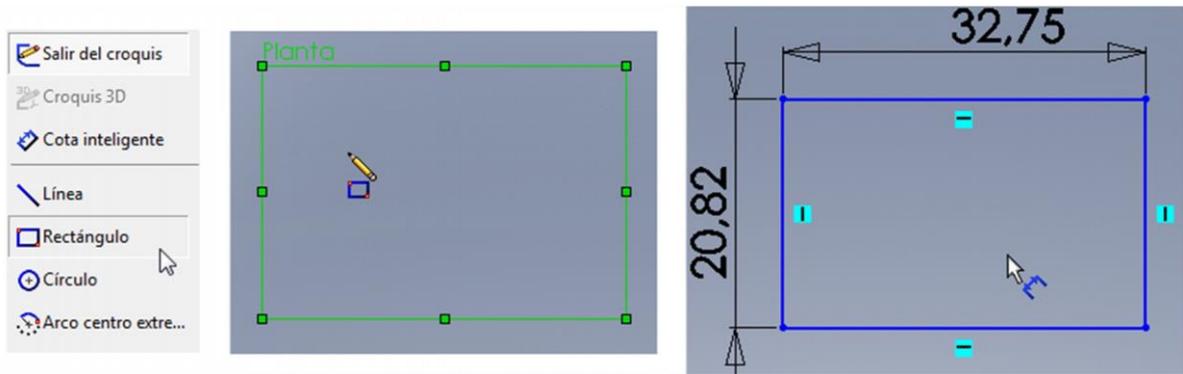


Figura 63. Creaci3n del croquis rectángulo

Tras este paso se crea una extrusi3n de espesor 10mm para crear un nuevo componente con aspecto s3lido.

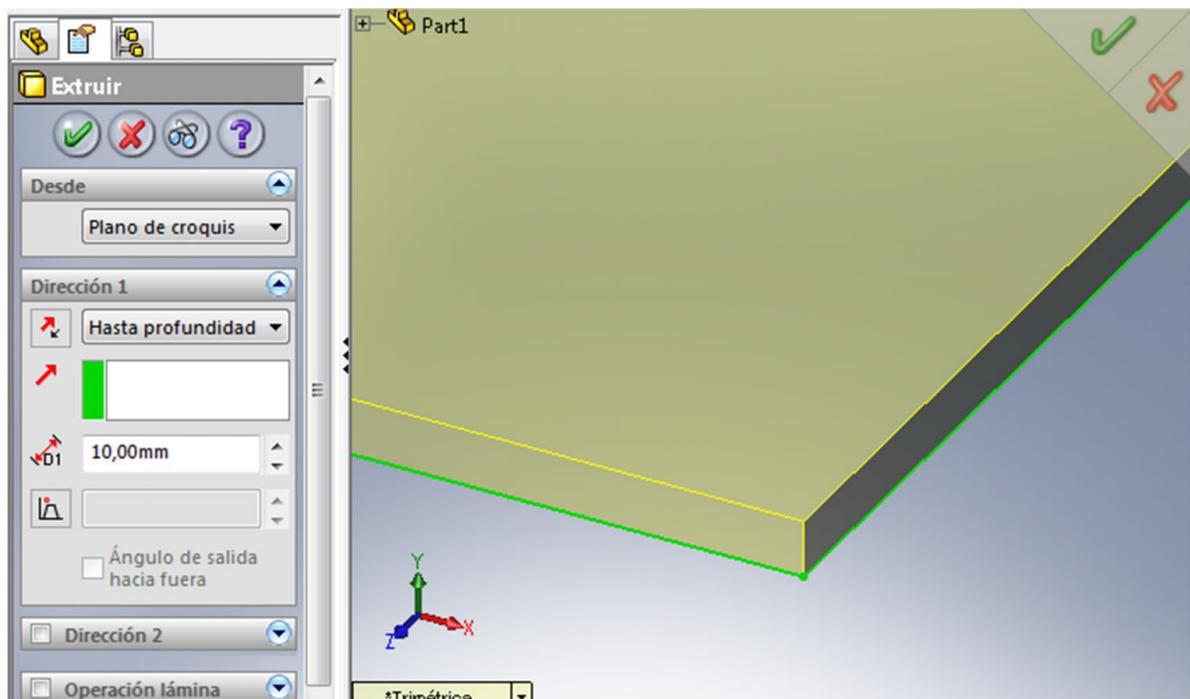


Figura 64. Extrusi3n sobre el croquis rectángulo

Finalmente le daremos color y lo guardaremos en un ensamblaje con la enumeraci3n 0, reservada exclusivamente para la base:

vltm\_xxxx-x\_part-0000\_2014.sldasm

### 6.2.2.2 Entorno: creaci3n del contacto rueda – base

Debido a que los componentes que representan a los neumáticos suelen tener una geometría más o menos compleja en el área de contacto con la base, debido al dibujo del mismo, habrá que realizar una modificaci3n en estas piezas para evitar problemas en la simulaci3n debido al contacto entre la base y la superficie irregular del neumático.

La modificaci3n consistirá en crear una extrusi3n envolvente al neumático, consiguiendo una superficie completamente lisa alrededor del mismo. Para ello se creará un anillo mediante don círculos en el mismo croquis, sobre un plano perteneciente al lateral del neumático. Después, se creará la extrusi3n hasta el lateral contrario, desactivando la funci3n “Fusionar resultado”.

Más adelante esta extrusi3n se modificar para hacerla transparente y así conservar el aspecto de los neumáticos originales.

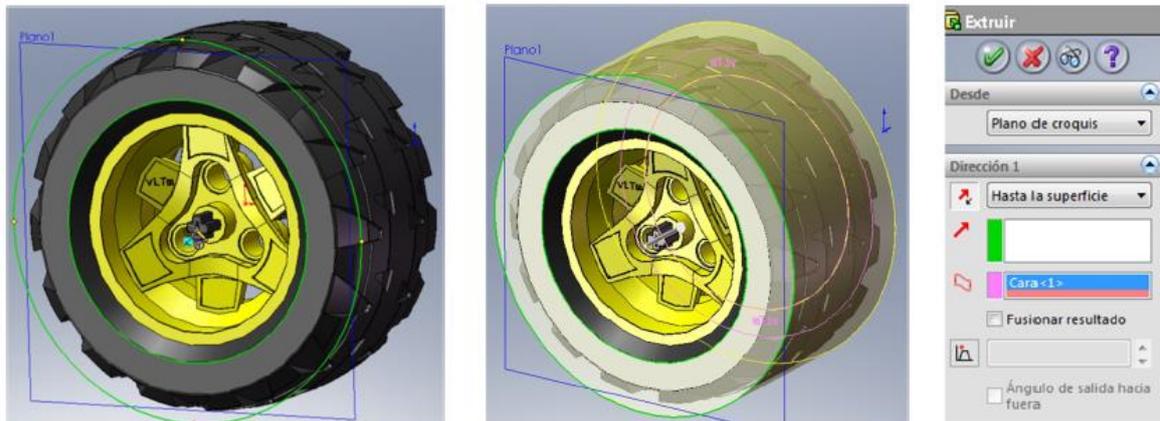


Figura 65. Creaci3n del anillo y extrusi3n

En la simulaci3n en la que se quiera observar el movimiento relativo de las distintas piezas respecto al chasis, ste será la parte fija, como se explic3 en el anterior capítulo. Así, en el caso de crear una simulaci3n en la que el vehículo se desplace por la base, ésta será la parte fija, por lo que el chasis del vehículo será una parte m3vil más.

Ahora queda definir el contacto 3D entre la rueda (seleccionando la superficie lisa de la extrusi3n) y la base. Con esto, se define que ambas superficies seleccionadas no se atravesarán la una a la otra, creando la simulaci3n de rodadura sobre una superficie.

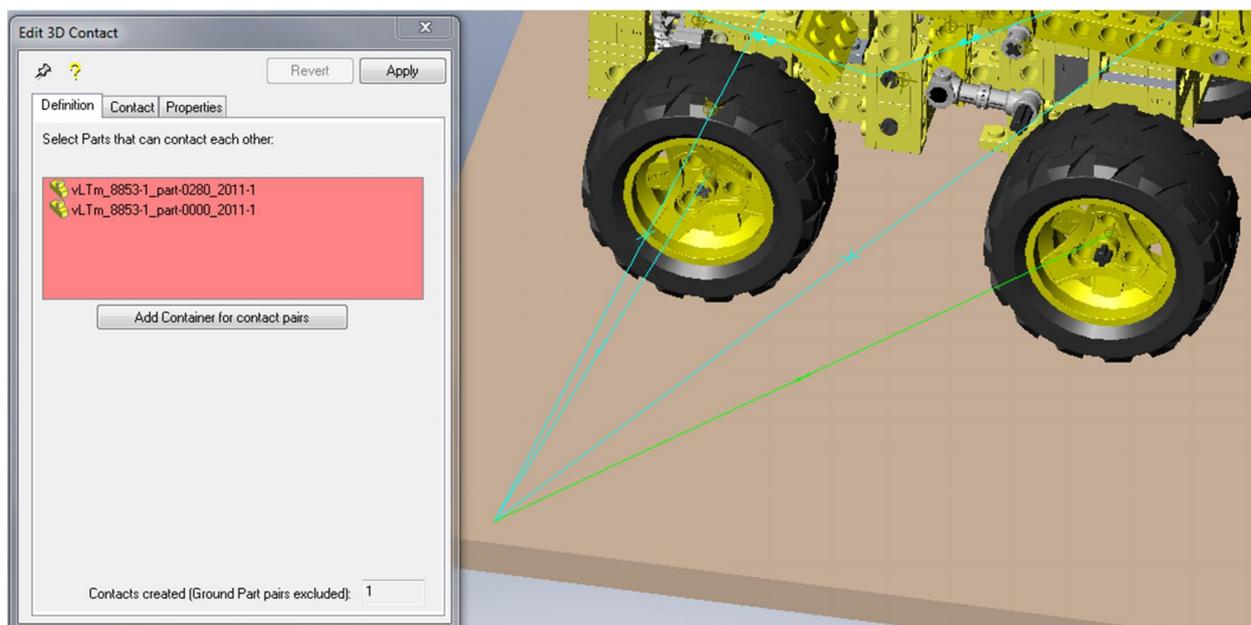


Figura 66. Edici3n de contacto 3D rueda – base

### 6.2.2.3 Parámetros de la simulación

Definidos el movimiento del mecanismo y el contacto con la base, sólo queda fijar la duración de la simulación y el parámetro de la gravedad.

Para definir este último, se accede a los parámetros *World* en el menú *System Defaults* y se comprueba que la gravedad esté definida en -1 en el eje y, eje perpendicular a la base y sentido hacia abajo.

Para definir el tiempo y los *frames* de la simulación, accediendo a la pestaña *Simulation* se pueden introducir estos parámetros.

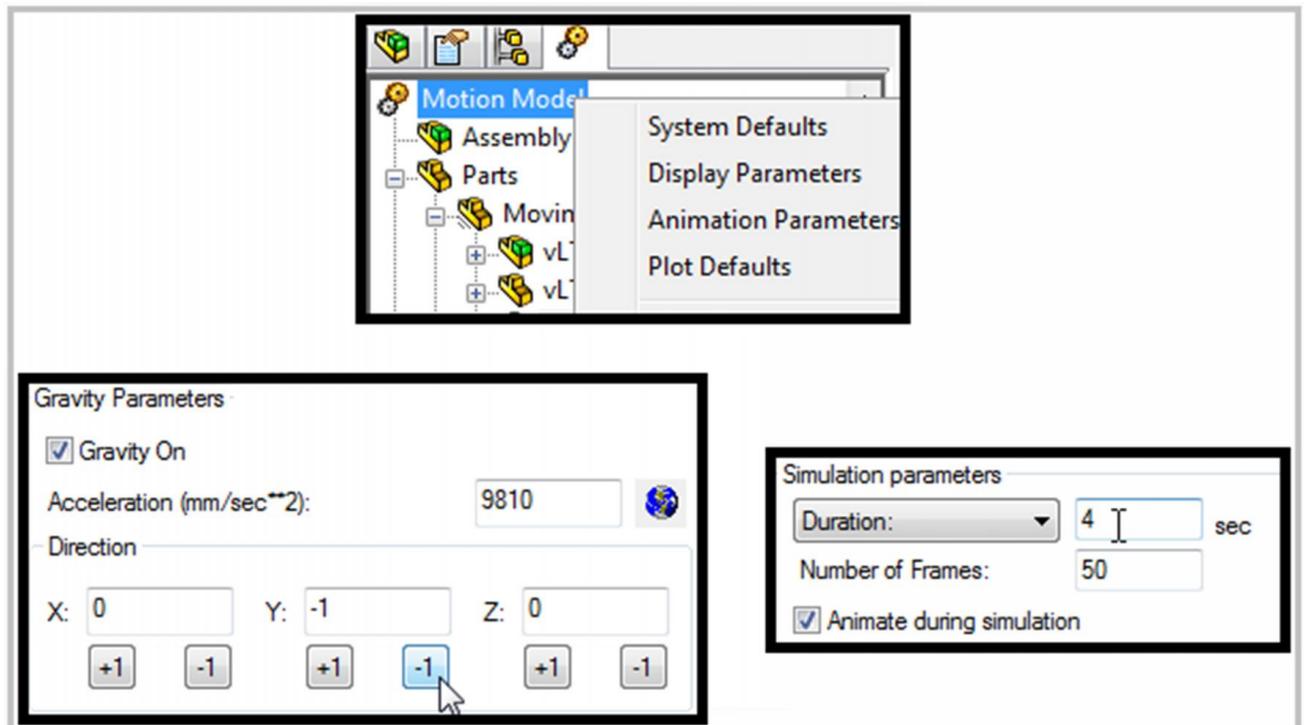


Figura 67. Edici3n de los parámetros de la simulaci3n

Llegado a este punto, se procede a la simulaci3n en la versi3n 2013 de SolidWorks. Para ello, se copian los archivos creados hasta el momento del modelo virtual y autoalineador en otro directorio para poder convertirlos a la nueva versi3n.

Archivos de versiones anteriores son aprovechables por nuevas versiones de SolidWorks, no al contrario, por ello es necesario trabajar sobre una copia de los archivos en SolidWorks 2013, para poder seguir utilizando los originales y modificar el modelo, en versi3n 2007.

Una vez se tiene el modelo listo en SolidWorks 2013, se procede al anàlisis de movimiento, para crear la simulaci3n.

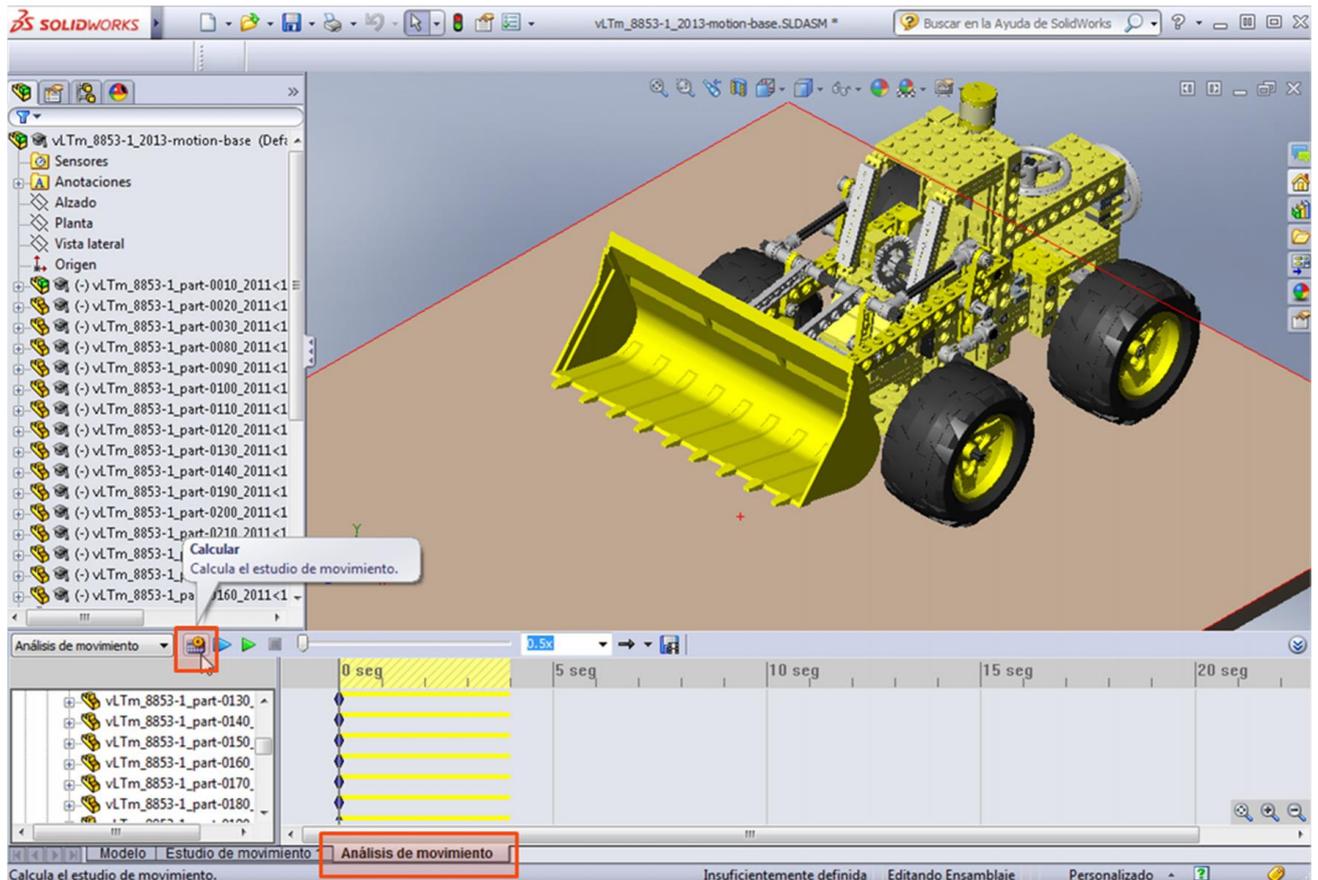


Figura 68. Creación de la simulación en SolidWorks 2013

Como paso final, exportamos el modelo simulado en formato eDrawings.

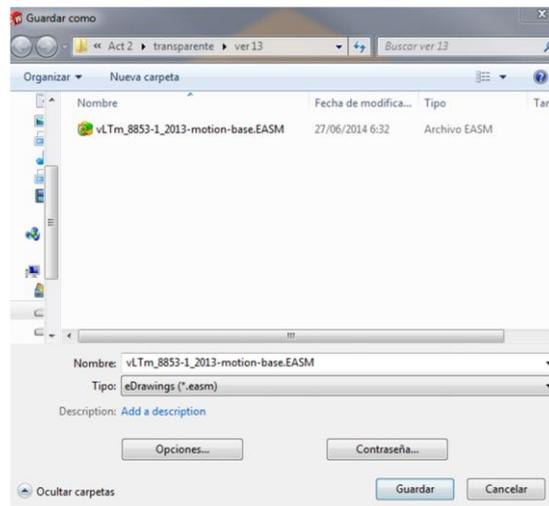


Figura 69. Exportación en formato .easm

## 7. CREACIÓN DE MODELOS VIRTUALES

En este capítulo se expondrán los modelos que se han creado en este TFG componente a componente y posterior ensamblado.

### 7.1 Mecanismos Isogawa Yoshihito

Como módulo inicial para familiarizar al alumno con el modo de trabajar con componentes LEGO Technic en SolidWorks, se abordó la construcción de una serie de mecanismos sencillos, pertenecientes al libro *Tora no Maki*, de Isogawa Yoshihito, característicos cada uno de ellos por contener un tipo de mecanismo común, con lo que el alumno se familiariza con éstos para abordar con mayor facilidad modelos más complejos.

#### 7.1.1 Creación modelo virtual TORA – 002

Mecanismo sencillo con el que se pretende introducir la relación de posición avanzada tipo engranaje.

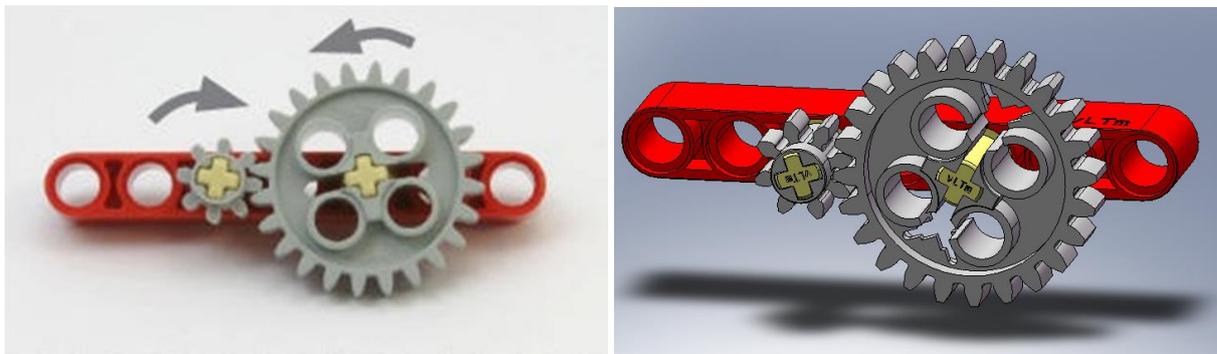


Figura 70. Modelo TORA-002 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 71. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-002



Figura 72. Piezas que componen el modelo virtual TORA-002

### 7.1.2 Creación modelo virtual TORA – 008

Mecanismo consistente en la transmisión de rotación entre dos engranajes, con componentes estructurales del sistema de botones de LEGO.

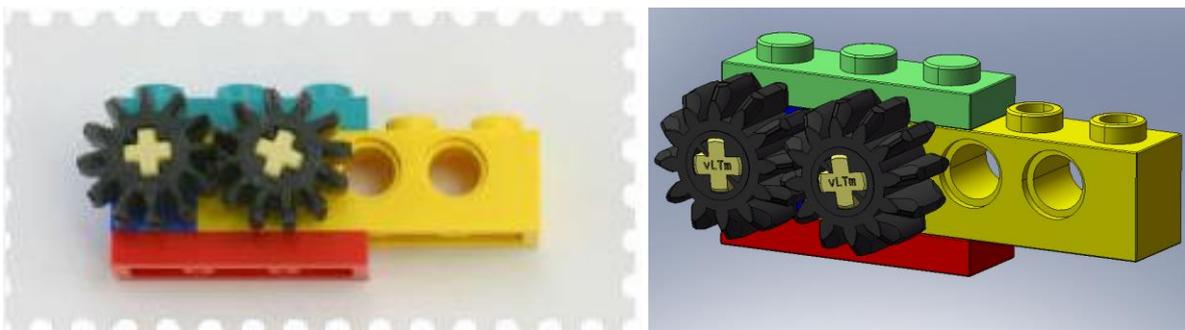


Figura 73. Modelo TORA-008 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 74. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-008



Figura 75. Piezas que componen el modelo virtual TORA-008

### 7.1.3 Creación modelo virtual TORA – 009

Mecanismo consistente en la transmisión de rotación entre dos engranajes, empleando como pieza estructural un componente tipo eje.

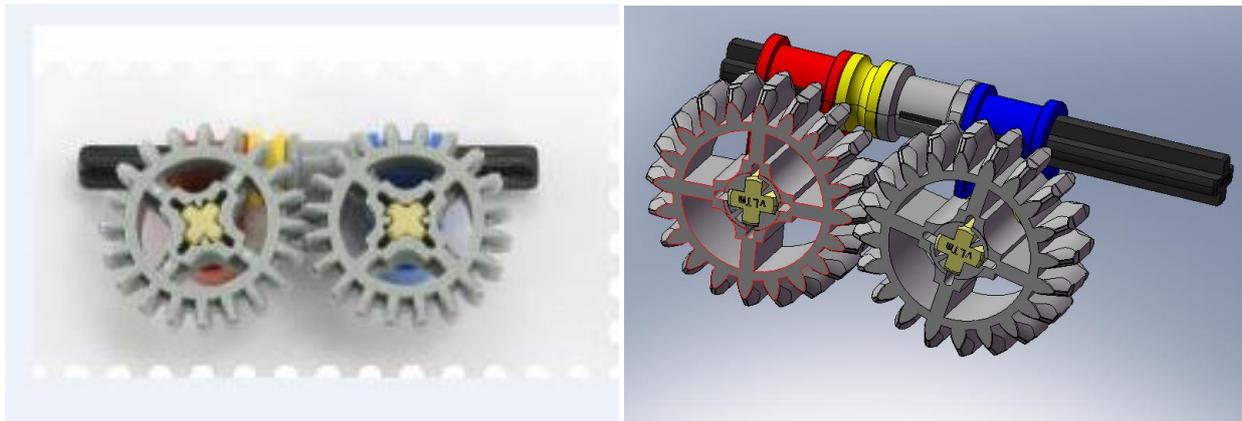


Figura 76. Modelo TORA-009 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 77. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-009



Figura 78. Piezas que componen el modelo virtual TORA-009

### 7.1.4 Creación modelo virtual TORA – 013

Mecanismo consistente en la transmisión de rotación entre dos engranajes, empleando piezas estructurales no visibles.

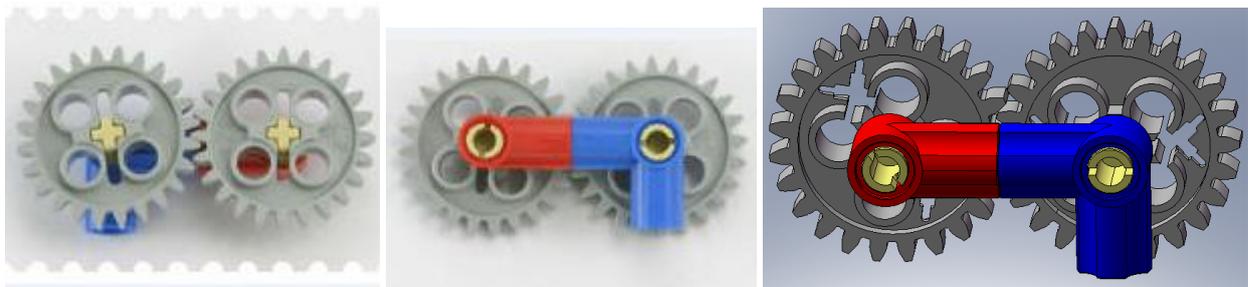


Figura 79. Modelo TORA-013 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)

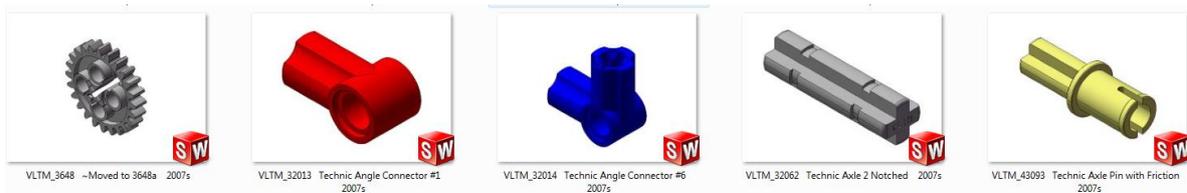


Figura 80. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-013



Figura 81. Piezas que componen el modelo virtual TORA-013

### 7.1.5 Creación modelo virtual TORA – 026

Mecanismo consistente en la transmisión de rotación entre dos engranajes, empleando como pieza estructural un componente tipo eje.



Figura 82. Modelo TORA-026 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)

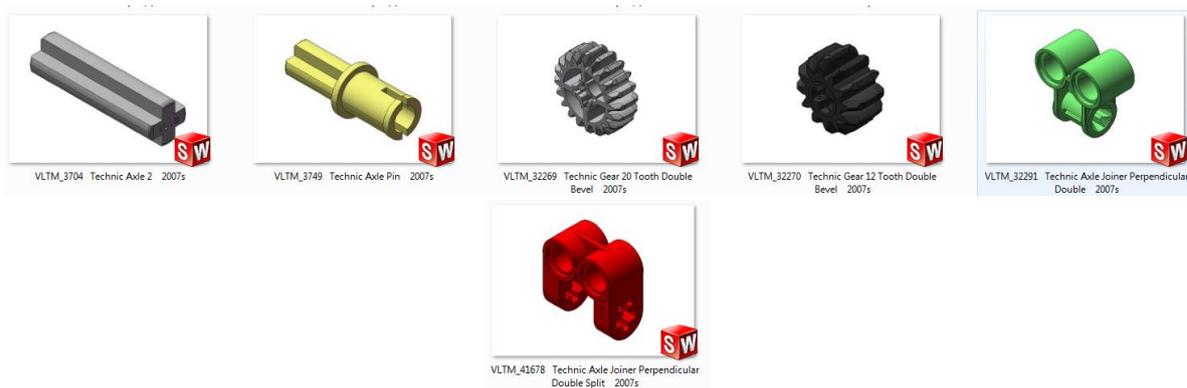


Figura 83. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-026



Figura 84. Piezas que componen el modelo virtual TORA-026

## 7.1.6 Creación modelo virtual TORA – 037

Mecanismo tipo base giratoria, con transmisión de movimiento entre dos engranajes.

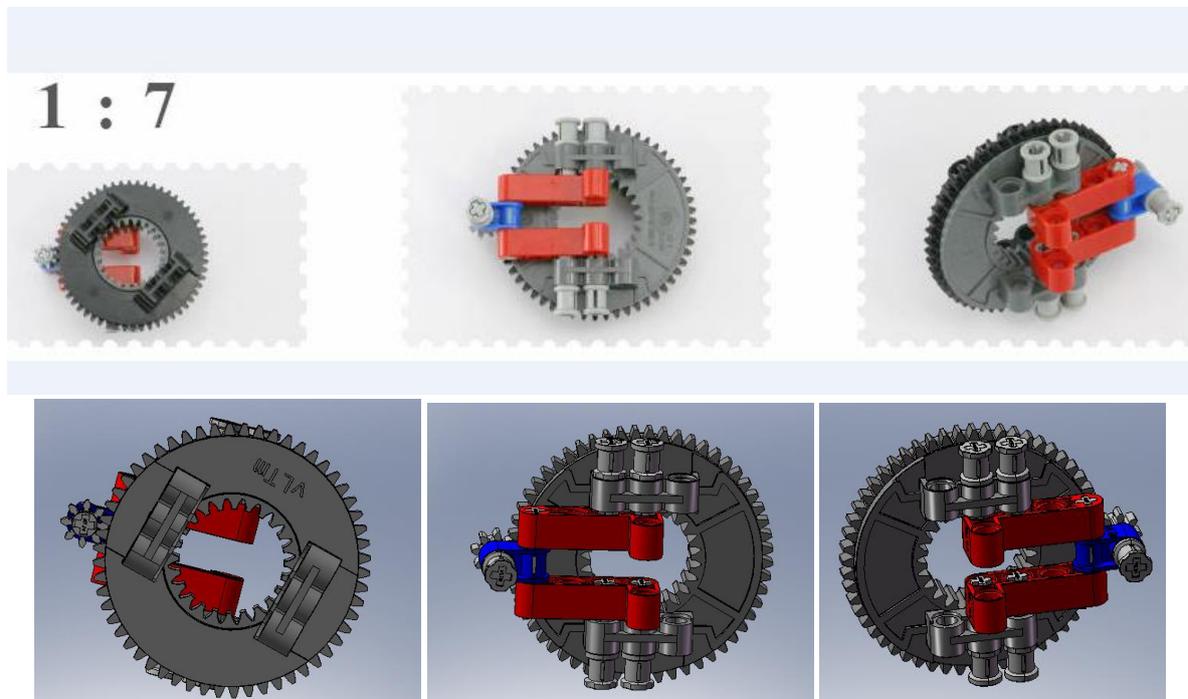


Figura 85. Modelo TORA-037 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)



Figura 86. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-037



Figura 87. Piezas que componen el modelo virtual TORA-037

### 7.1.7 Creaci3n modelo virtual TORA – 040

Mecanismo tipo base giratoria, con transmisi3n de movimiento entre dos engranajes.

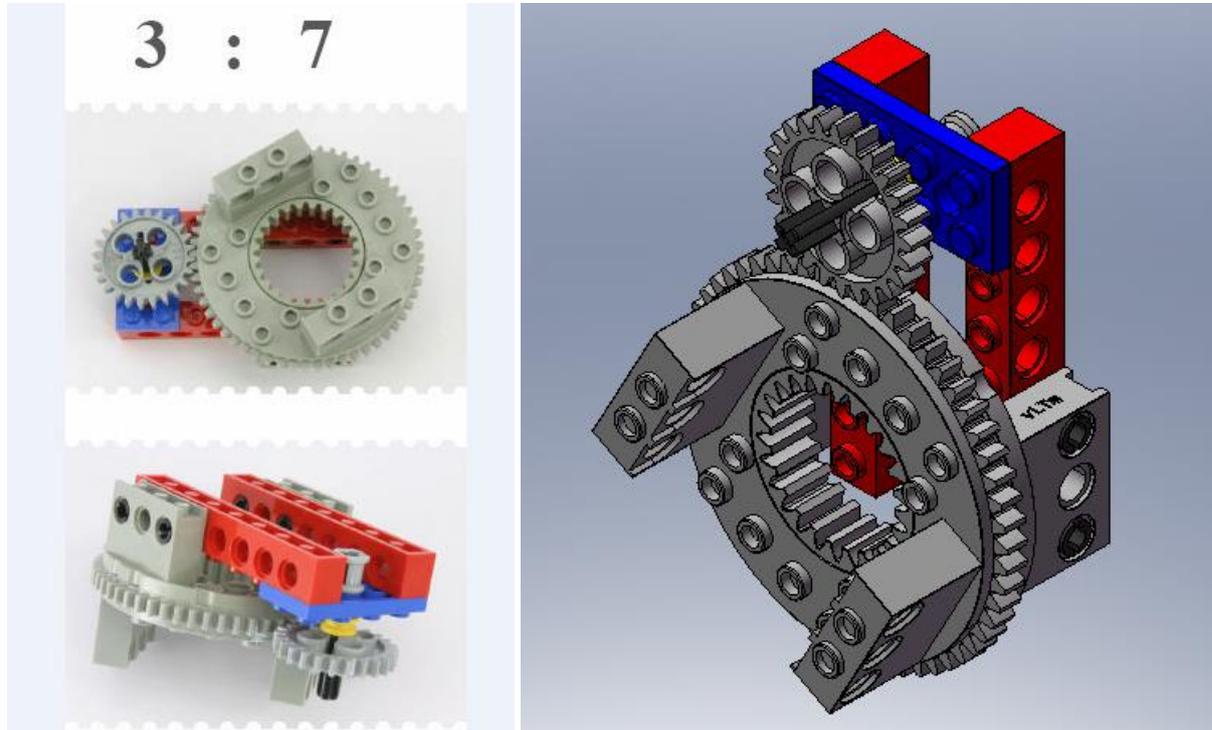


Figura 88. Modelo TORA-040 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 89. Componentes utilizados en la creaci3n del modelo virtual TORA-040



Figura 90. Piezas que componen el modelo virtual TORA-040

### 7.1.8 Creaci3n modelo virtual TORA – 051

Mecanismo consistente en transmisi3n mediante engranajes con ejes perpendiculares.

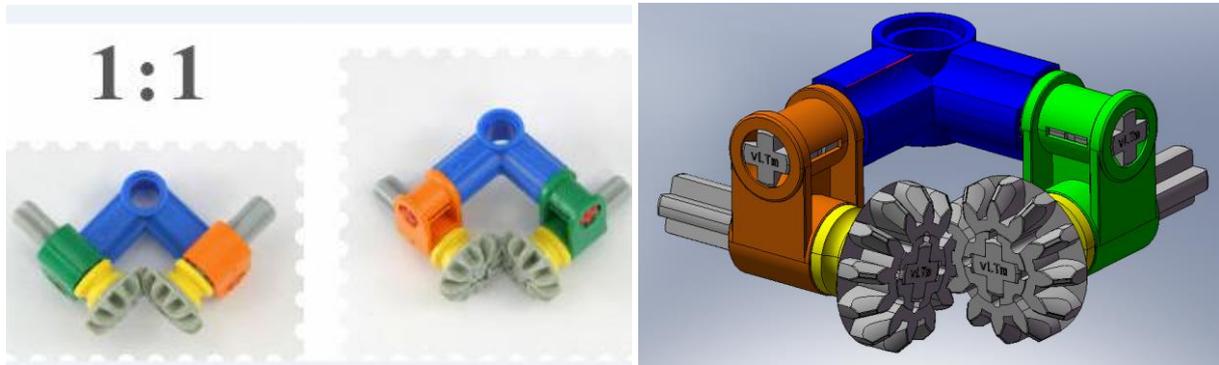


Figura 91. Modelo TORA-051 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)

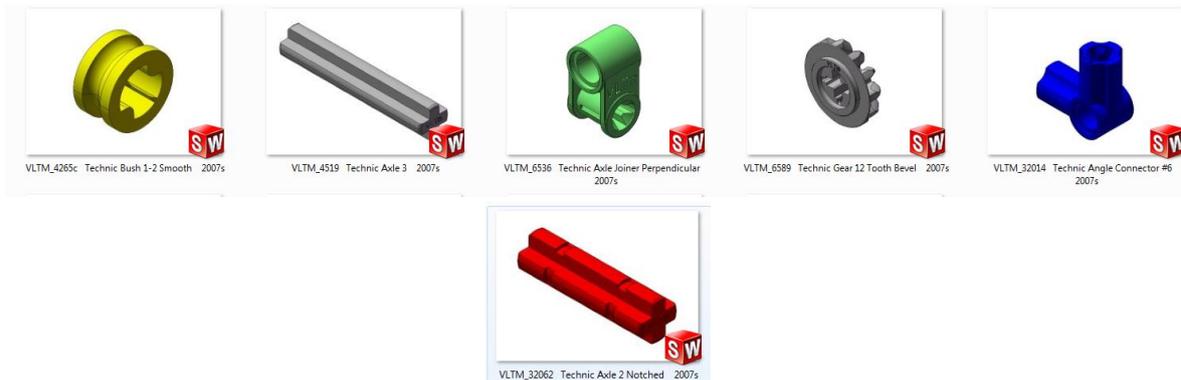


Figura 92. Componentes utilizados en la creaci3n del modelo virtual TORA-051



Figura 93. Piezas que componen el modelo virtual TORA-051

### 7.1.9 Creaci3n modelo virtual TORA – 059

Mecanismo consistente en transmisi3n mediante engranajes con ejes perpendiculares.

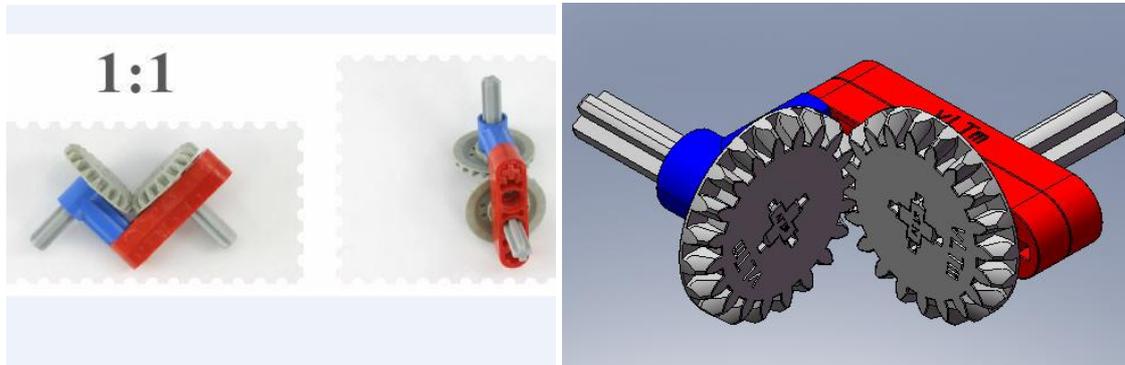


Figura 94. Modelo TORA-059 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 95. Componentes utilizados en la creaci3n del modelo virtual TORA-059



Figura 96. Piezas que componen el modelo virtual TORA-059

### 7.1.10 Creación modelo virtual TORA – 062

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes de tipo bola.

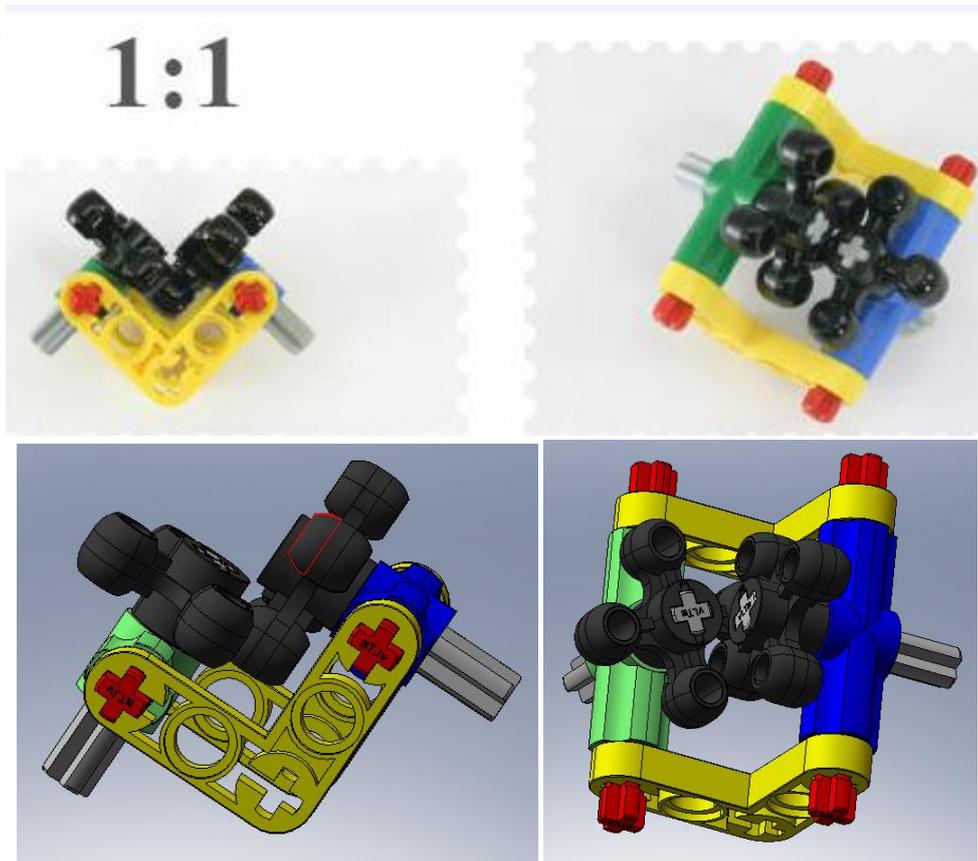


Figura 97. Modelo TORA-062 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)



Figura 98. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-062



Figura 99. Piezas que componen el modelo virtual TORA-062

### 7.1.11 Creación modelo virtual TORA – 075

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes con ejes perpendiculares.



Figura 100. Modelo TORA-075 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)

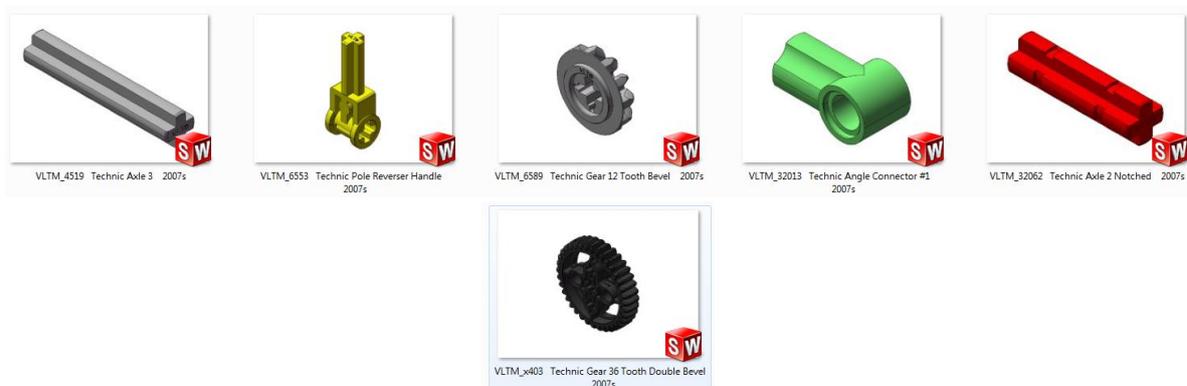


Figura 101. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-075



Figura 102. Piezas que componen el modelo virtual TORA-075

### 7.1.12 Creación modelo virtual TORA – 079

Mecanismo de transmisión tornillo sin fin.



Figura 103. Modelo TORA-079 Isogawa Yoshihito real (izquierda) y virtual (derecha)



Figura 104. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-079



Figura 105. Piezas que componen el modelo virtual TORA-079

### 7.1.13 Creaci3n modelo virtual TORA – 093

Mecanismo de conversi3n de movimiento rotacional a oscilatorio.

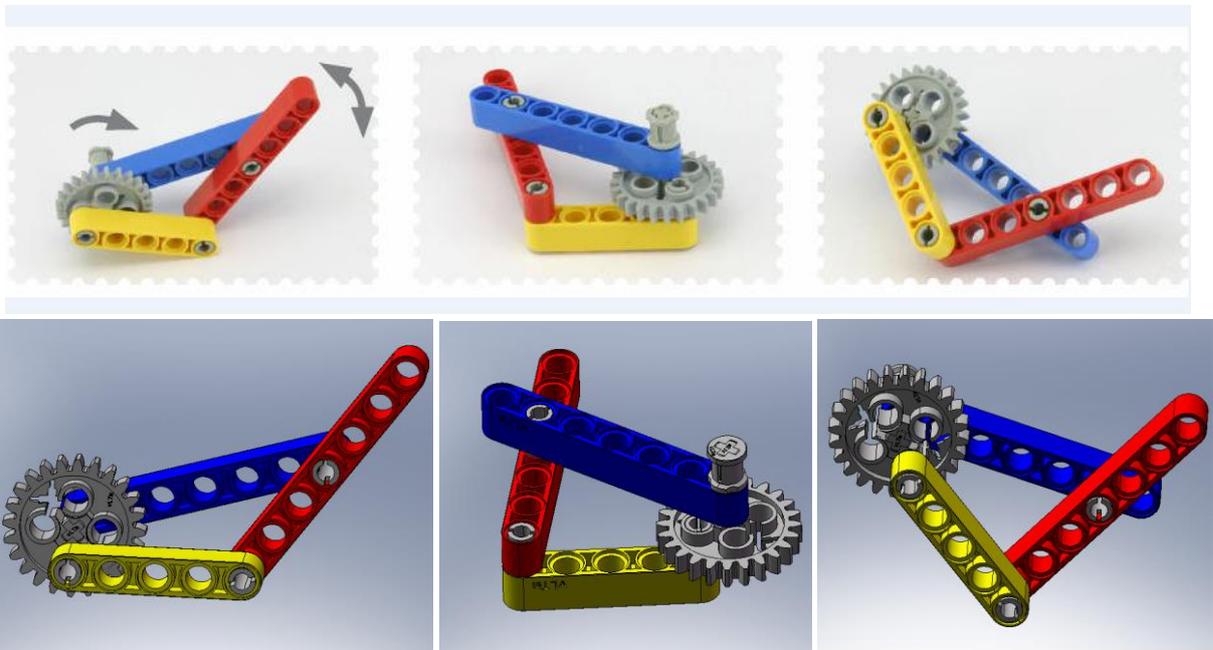


Figura 106. Modelo TORA-093 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)



Figura 107. Componentes utilizados en la creaci3n del modelo virtual TORA-093



Figura 108. Piezas que componen el modelo virtual TORA-093

### 7.1.14 Creación modelo virtual TORA – 098

Mecanismo de conversión de movimiento rotacional a combinación de oscilatorio y lineal alternativo.

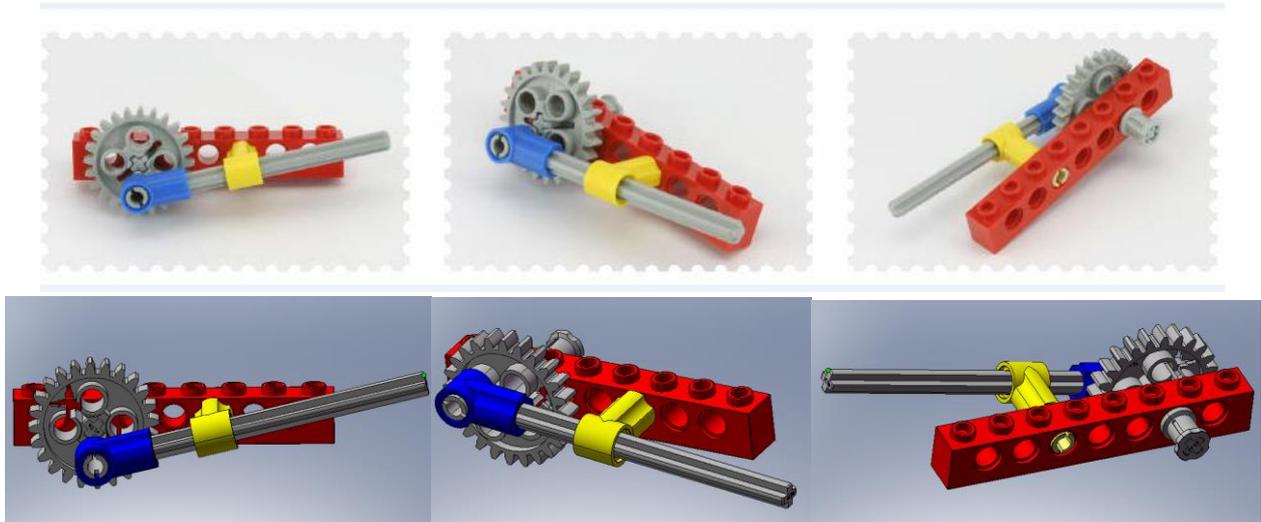


Figura 109. Modelo TORA-098 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)

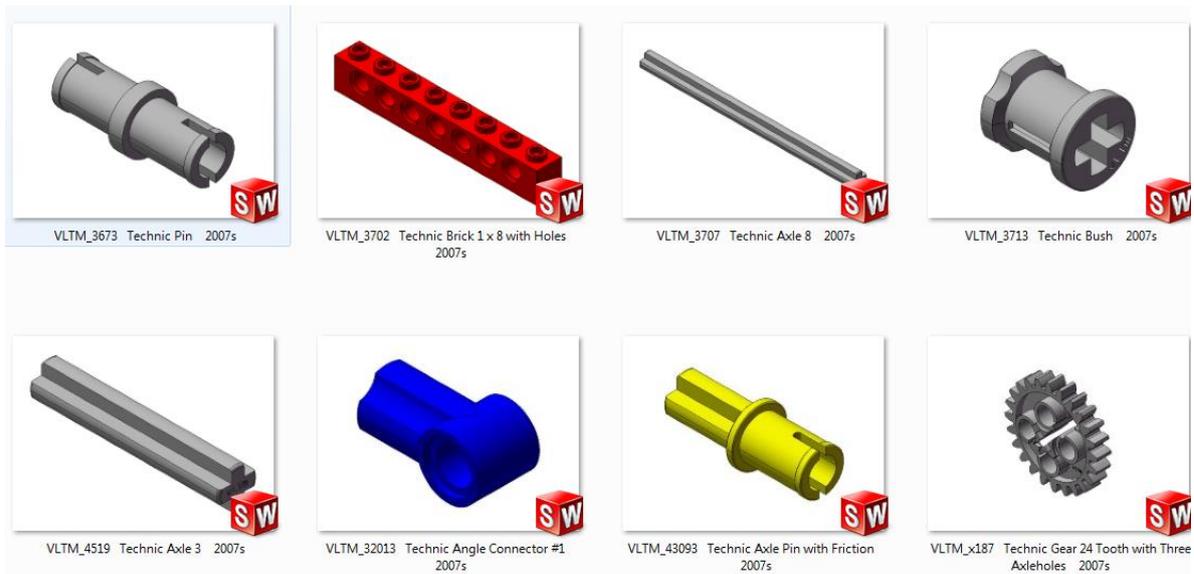


Figura 110. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-098



Figura 111. Piezas que componen el modelo virtual TORA-098

### 7.1.15 Creación modelo virtual TORA – 102

Mecanismo de conversión de movimiento rotacional a lineal alternativo, empleando una transmisión piñón-cremallera.

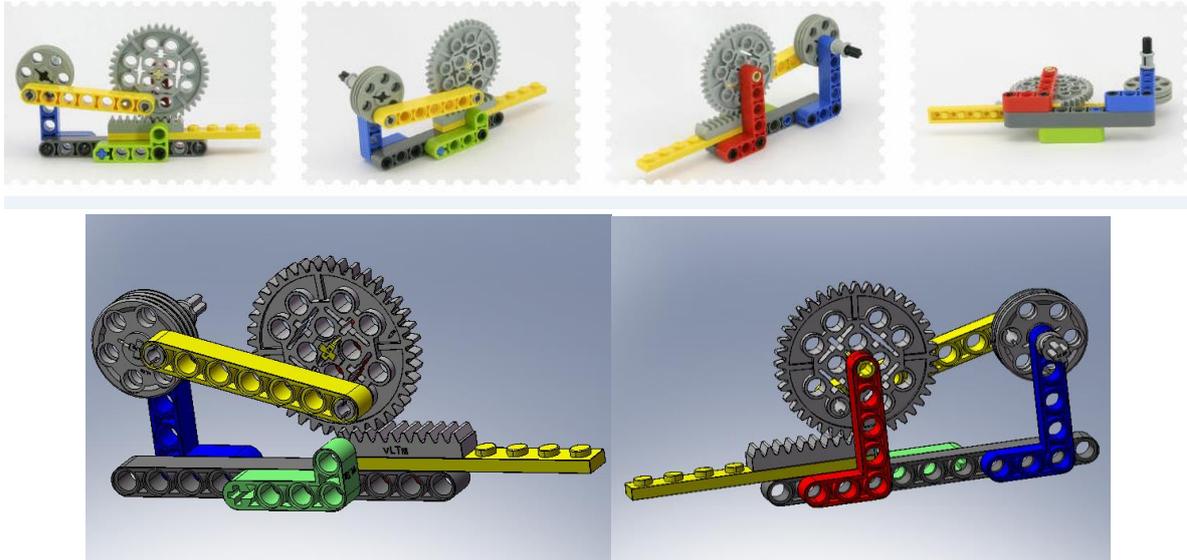


Figura 112. Modelo TORA-102 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)



Figura 113. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-102



Figura 114. Piezas que componen el modelo virtual TORA-102

### 7.1.16 Creación modelo virtual TORA – 107

Mecanismo de transmisión de rotación entre dos ejes en direcciones no paralelas mediante una junta Hooke.

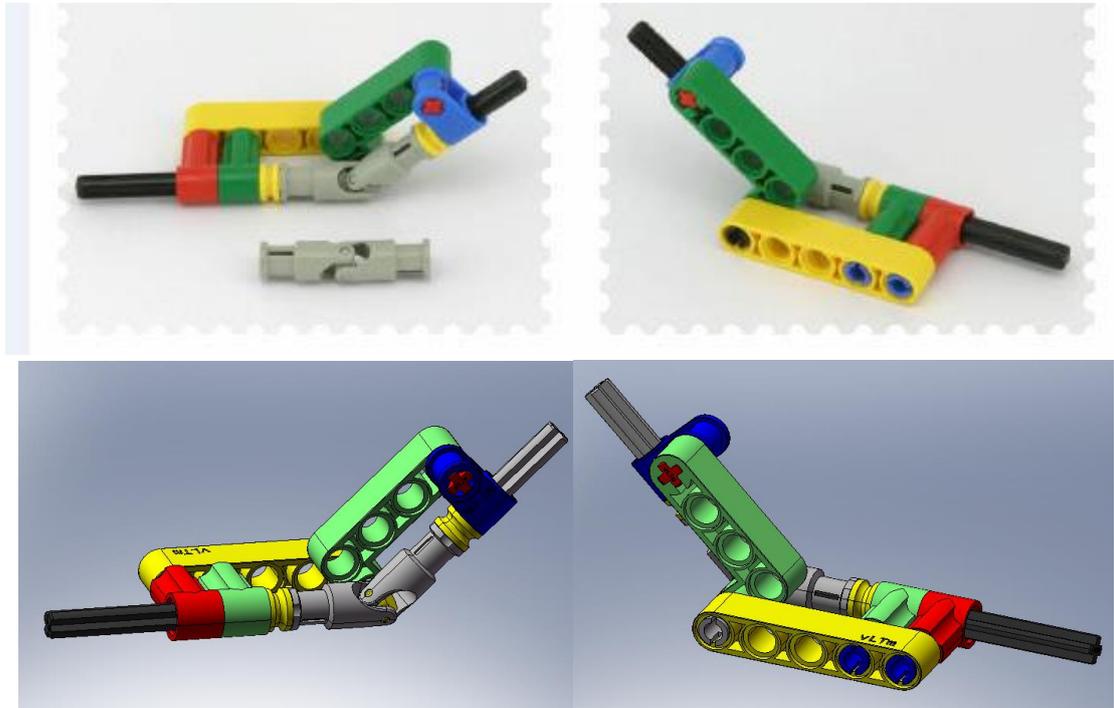


Figura 115. Modelo TORA-107 Isogawa Yoshihito real (arriba) y virtual (abajo)

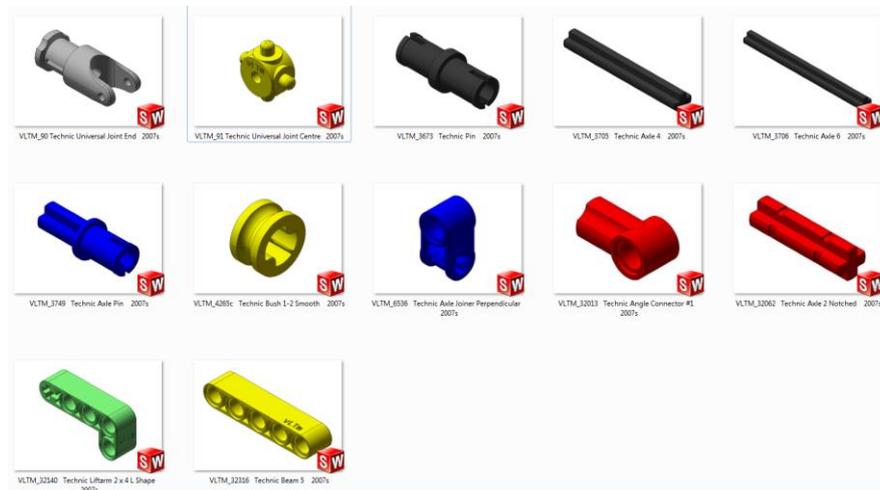


Figura 116. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-107



Figura 117. Piezas que componen el modelo virtual TORA-107

### 7.1.17 Creación modelo virtual T – 1861

Modelo de un vehículo motorizado de Isogawa Yoshihito.

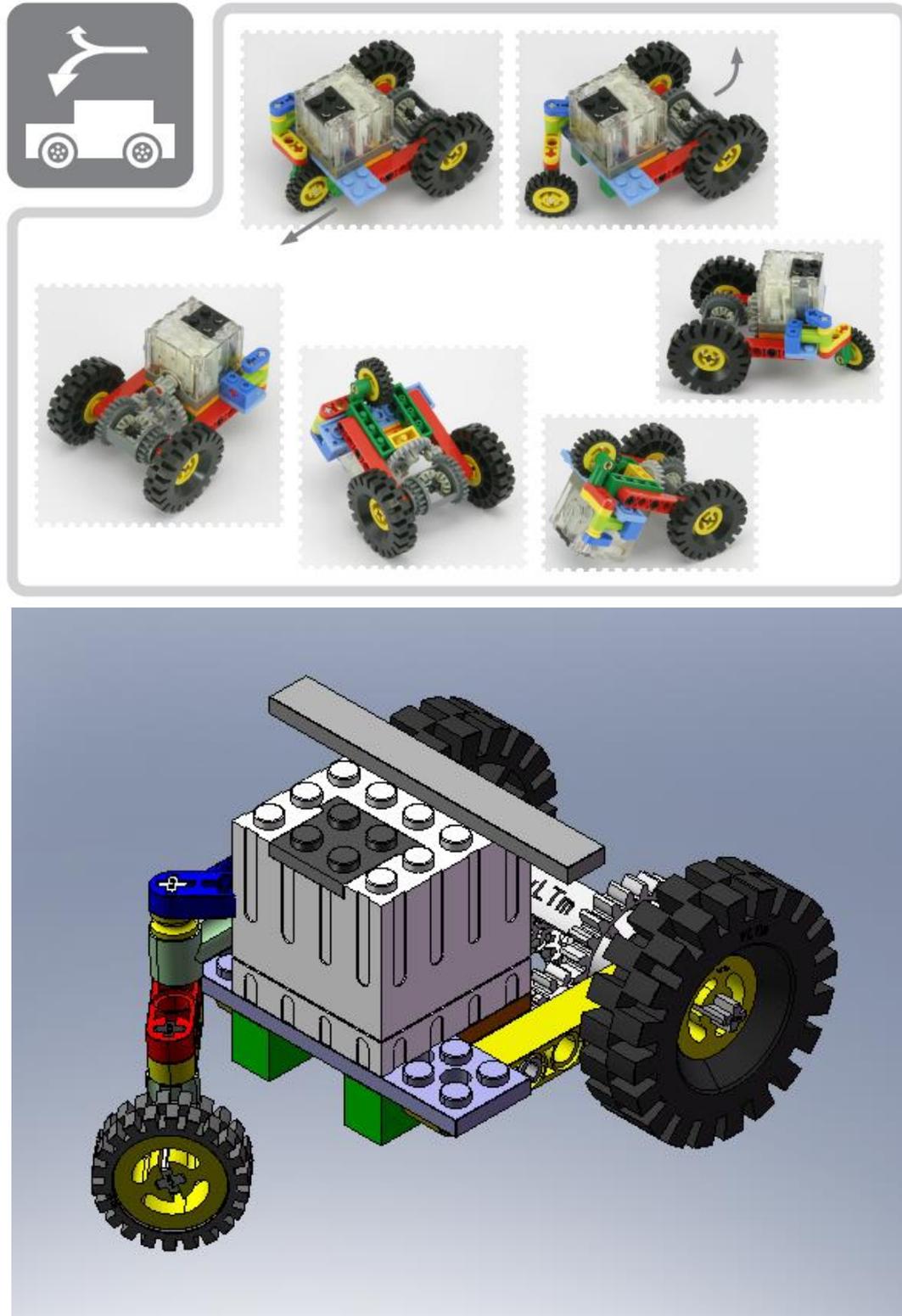


Figura 118. Modelo real (arriba) y virtual (abajo) T-1861 Isogawa Yoshihito

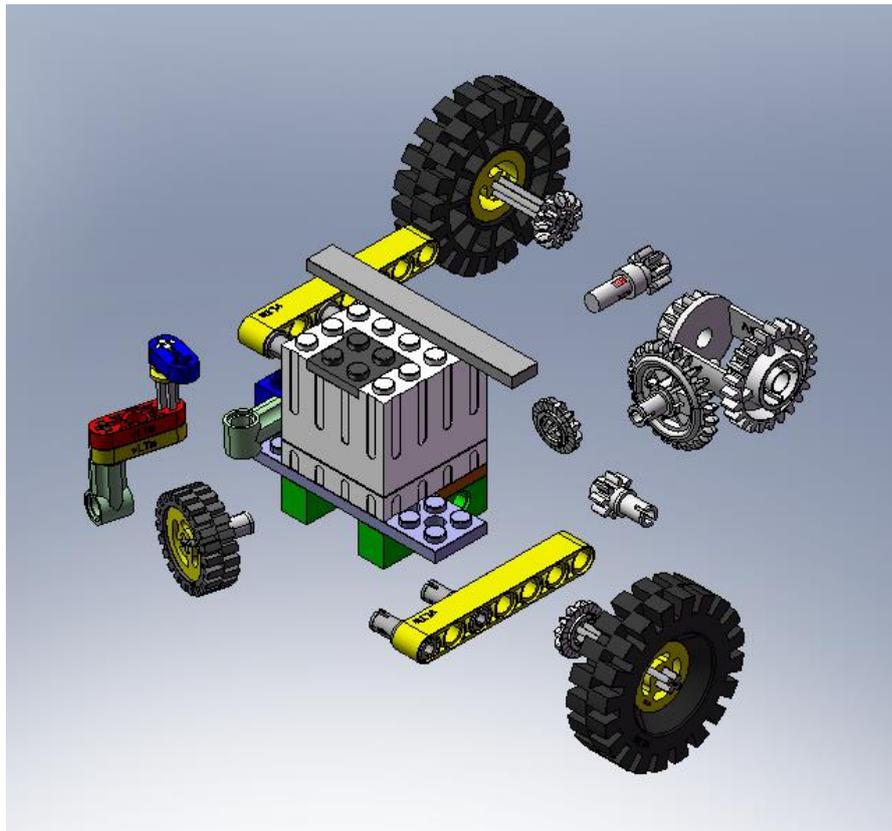
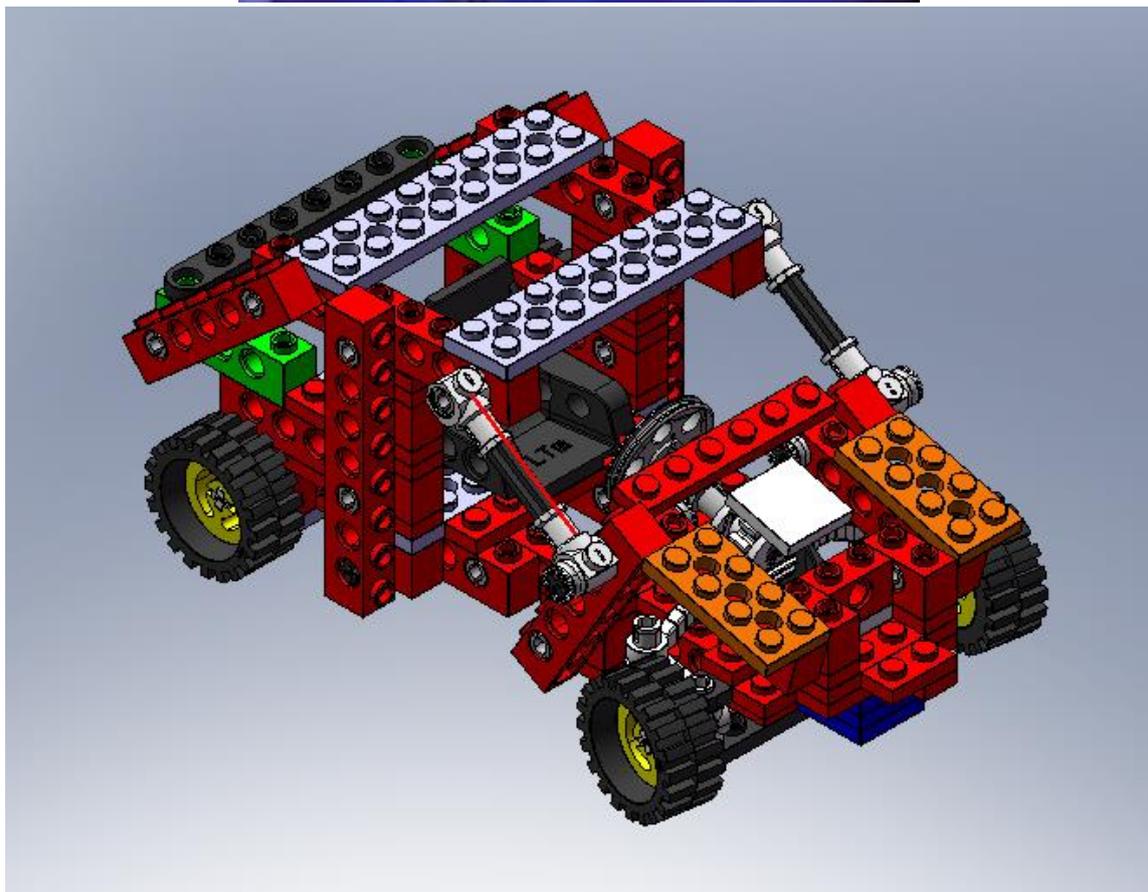


Figura 119. Piezas que componen el modelo virtual T-1861


Figura 120. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual T-1861

## 7.2 Creación modelo virtual vLTm – 8891-1

Primer modelo virtual de un modelo LEGO Technic: vehículo de tracción trasera accionada manualmente con dirección mediante engranaje-tornillo sin fin.



*Figura 121. Modelo real (arriba) y virtual (abajo) vLTm – 8891-1*

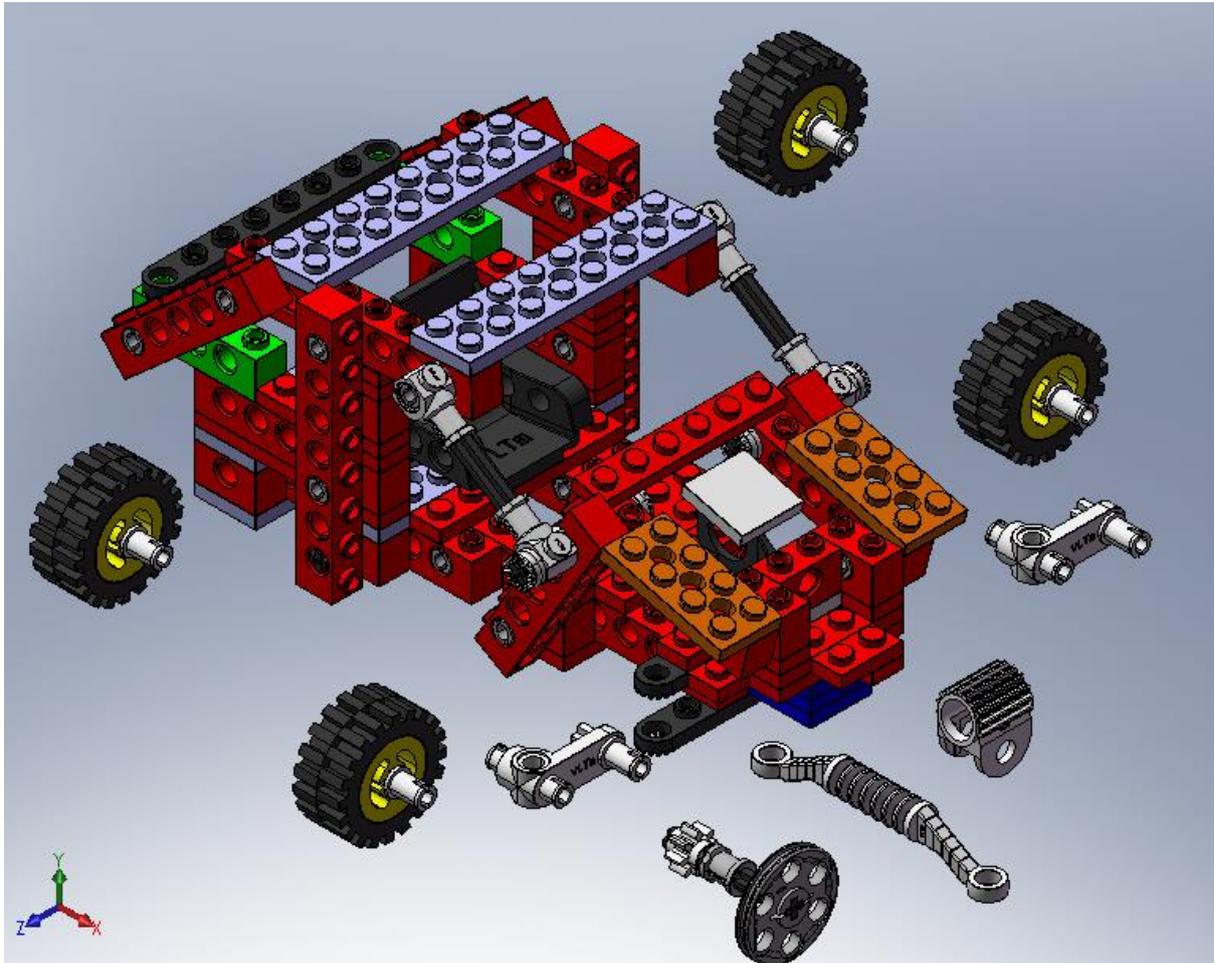


Figura 122. Piezas que componen el modelo virtual vLTm – 8891-1


Figura 123. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual vLTm – 8891-1

### 7.3 Creaci3n modelo virtual TnMm – 0250

Modelo con suspensi3n y serie de engranajes interconectados, de Isogawa Yoshihito.

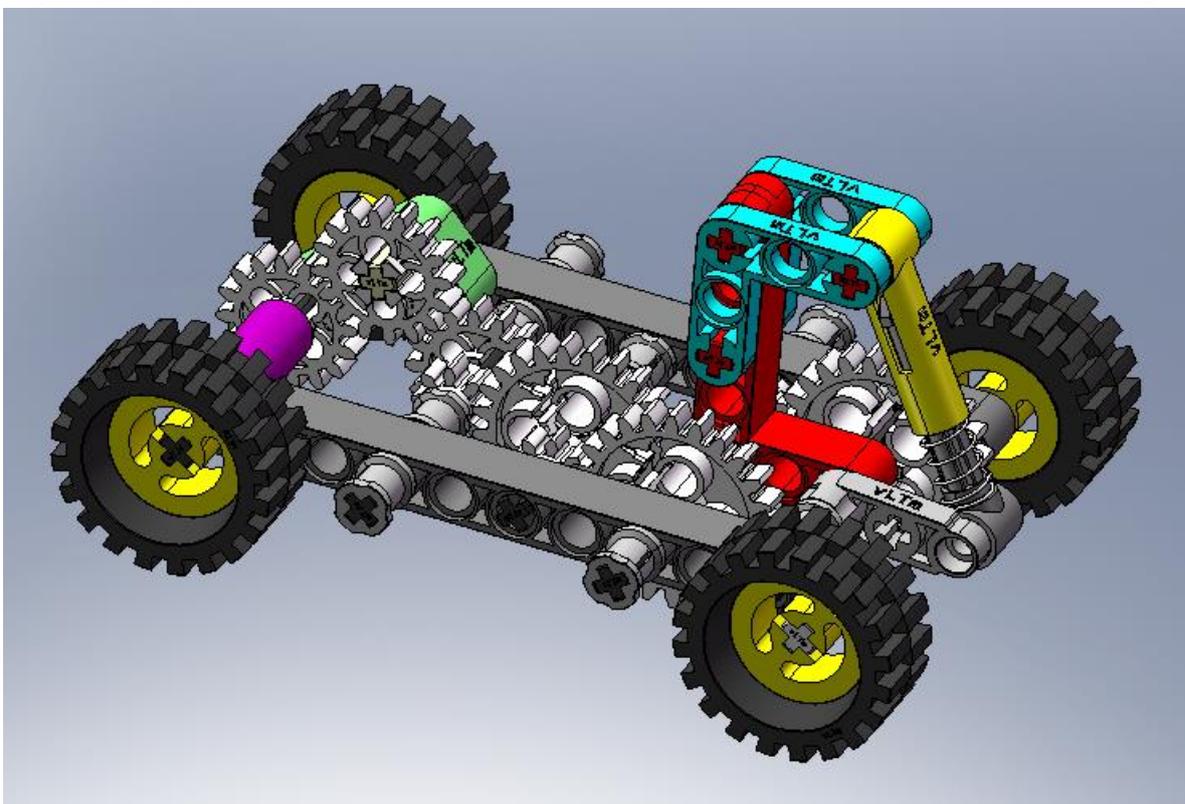


Figura 124. Modelo real (arriba) y virtual (abajo) TnMm – 0250, Isogawa Yoshihito

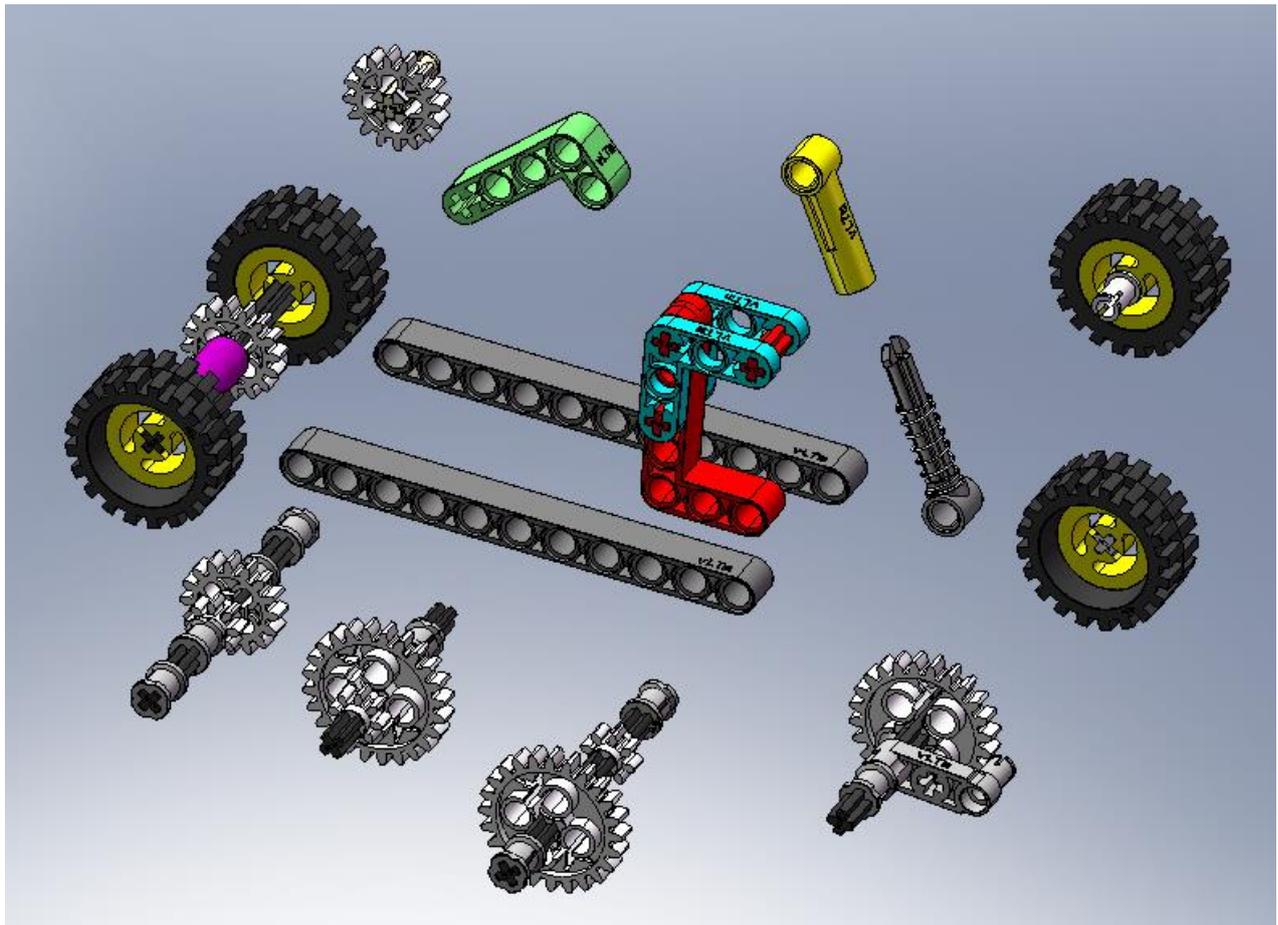


Figura 125. Piezas que componen el modelo virtual TnMm – 0250

VLTM_3329	VLTM_3252	VLTM_3252	VLTM_3214	VLTM_3205	VLTM_5292	VLTM_4019	VLTM_3749	VLTM_3713
9 Technic	6 Technic	5 Technic	0 Technic	6 Technic	rotor	Technic	Technic	Technic
Beam 3 x	Beam 3 x 5	Beam 11	Liftarm 2 x	Beam 3 x 3	moteur	Gear 16	Axle Pin	Bush
0.5 Liftar...	Bent 90 ...	2007s	4 L Shape ...	x 0.5 Liftar...		Tooth 2...	2007s	2007s
VLTM_3707	VLTM_3706	VLTM_3704	VLTM_3648	VLTM_3647	VLTM_3482	VLTM_2346	vLTm_731c	vLTm_731c
Technic	Technic	Technic	~Moved	Technic	Wheel	Tyre	01 Technic	01 Technic
Axle 8	Axle 6	Axle 2	to 3648a	Gear 8	Centre	Medium	Shock	Shock
2007s	2007s	2007s	2007s	Tooth 2...	Large 20...		Absorber ...	Absorber ...

Figura 126. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TnMm – 0250

## 7.4 Creación modelo virtual vLTm – 8872 – 2

Este modelo consiste en un camión de transporte con elevador de dirección basada en el mecanismo piñón-cremallera.

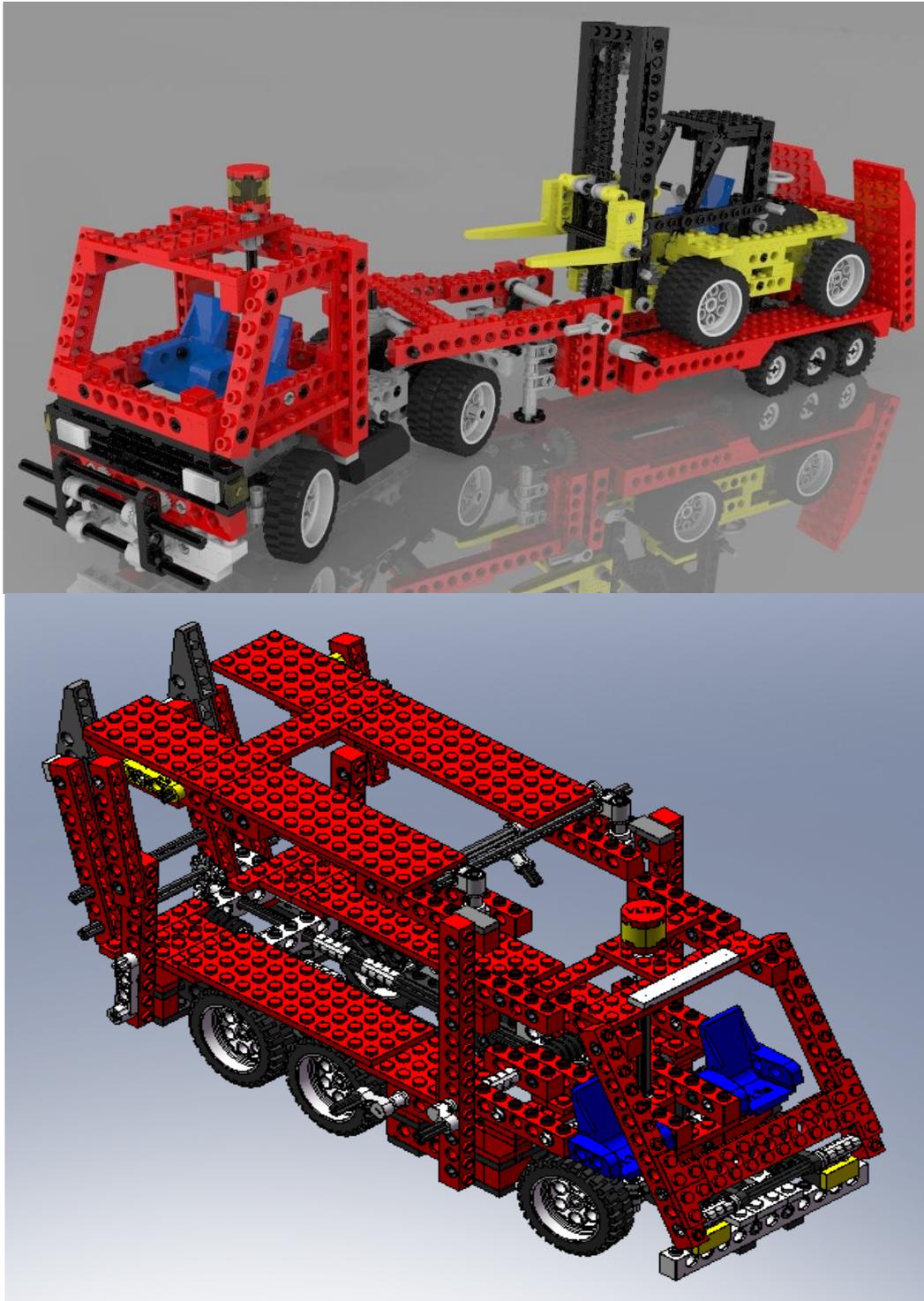


Figura 127. Modelo real (arriba) y virtual (abajo) LEGO Technic 8872 – 2

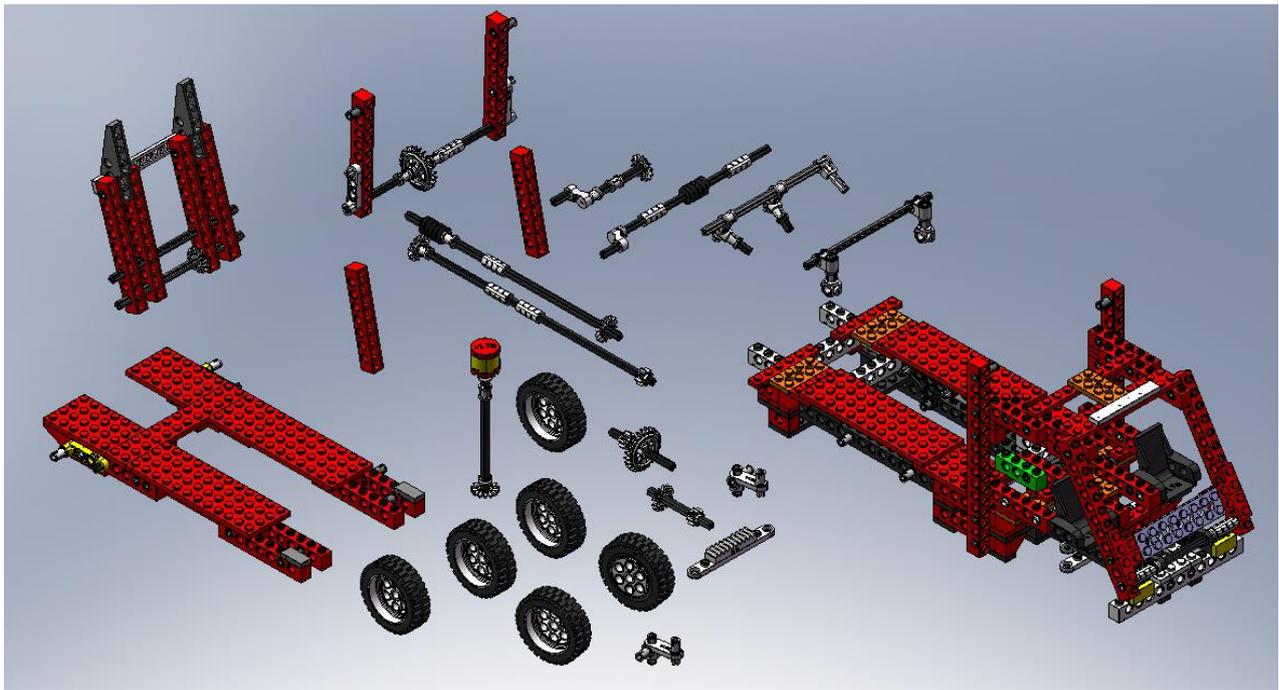


Figura 128. Piezas que componen el modelo virtual vLTm – 8872 – 2

VLTm_2420 Plate 2 x 2 Corner 2007s	VLTm_2445 Plate 2 x 12	VLTm_2695 Wheel 13 x 24 Model Team	VLTm_2696 Tyre 13 x 24 Model Team	VLTm_2711 Technic Rotor 2 Blade wit...	VLTm_2717 Technic Seat 3 x 2 Base	VLTm_2730 Technic Brick 1 x 10 with Hole...	VLTm_2744 Technic Wing Back	VLTm_2780 Technic Pin with Friction a...	VLTm_2817 Plate 2 x 2 with Holes	VLTm_2825 Technic Beam 4 x 0.5 Liftar...	VLTm_2854 Technic Engine Crankshaf...	VLTm_2905 Technic Triangle 2007s
VLTm_2989 Technic Brick 1 x 4 with Hole...	VLTm_3020 Plate 2 x 4	VLTm_3021 Plate 2 x 3	VLTm_3022 Plate 2 x 2	VLTm_3023 Plate 1 x 2 2007s	VLTm_3029 Plate 4 x 12	VLTm_3032 Plate 4 x 6	VLTm_3069 b Tile 1 x 2 with Groove	VLTm_3623 Plate 1 x 3 2007s	VLTm_3647 Technic Gear 8 Tooth	VLTm_3650 a Technic Gear 24 Tooth Cr...	VLTm_3651 Technic Connector	VLTm_3665 Slope Brick 45 2 x 1 Inverted...
VLTm_3666 Plate 1 x 6 2007s	VLTm_3673 Technic Pin 2007s	VLTm_3700 Technic Brick 1 x 2 with Hole...	VLTm_3701 Technic Brick 1 x 4 with Hole...	VLTm_3702 Technic Brick 1 x 8 with Hole...	VLTm_3703 Technic Brick 1 x 16 with Hole...	VLTm_3704 Technic Axle 2	VLTm_3705 Technic Axle 4	VLTm_3706 Technic Axle 6 2007s	VLTm_3707 Technic Axle 8 2007s	VLTm_3708 Technic Axle 12	VLTm_3709 b Technic Plate 2 x 4 with Hole...	VLTm_3710 Plate 1 x 4 2007s
VLTm_3713 Technic Bush	VLTm_3737 Technic Axle 10	VLTm_3738 Technic Plate 2 x 8 with Hole...	VLTm_3743 Technic Gear Rack 1 x 4	VLTm_3749 Technic Axle Pin 2007s	VLTm_3795 Plate 2 x 6	VLTm_3832 Plate 2 x 10	VLTm_3894 Technic Brick 1 x 6 with Hole...	VLTm_3895 Technic Brick 1 x 12 with Hole...	VLTm_3941 Brick 2 x 2 Round	VLTm_4032 Plate 2 x 2 Round	VLTm_4070 Brick 1 x 1 with Headlight...	VLTm_4143 Technic Gear 14 Tooth Be...
VLTm_4150 Tile 2 x 2 Round	VLTm_4261 Technic Steering Arm	VLTm_4265 a Technic Bush 1-2	VLTm_4273 Technic Connector Toggle Jo...	VLTm_4274 Technic Pin 1-2	VLTm_4287 Slope Brick 33 3 x 1 Inverted...	VLTm_4442 Technic Plate 1 x 8 with Hole...	VLTm_4477 Plate 1 x 10 2007s	VLTm_4716 Technic Screw	VLTm_6536 Technic Axle Joiner Perpendic...	VLTm_6538 a Technic Axle Joiner Inline 20...	VLTm_6553 Technic Pole Reverser ...	VLTm_6558 Technic Pin Long with Fricti...

Figura 129. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual vLTm – 8872 – 2

## 7.5 Creación modelo virtual vLTm – 8455 – 2

Excavadora con pala que cuenta con dirección a través de HOG en línea del motor de 3 cilindros impulsado por diferencial trasero, 7 pistones neumáticos y cucharón delantero.

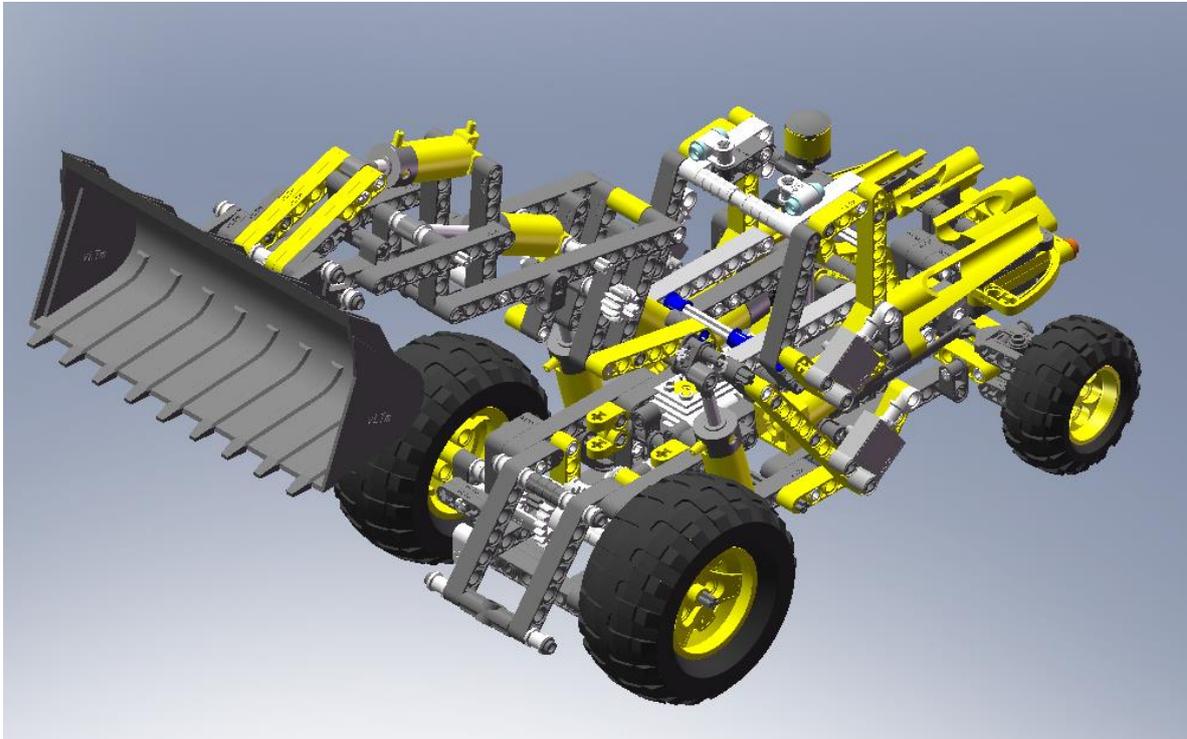


Figura 130. Modelo virtual vLTm – 8455 – 2

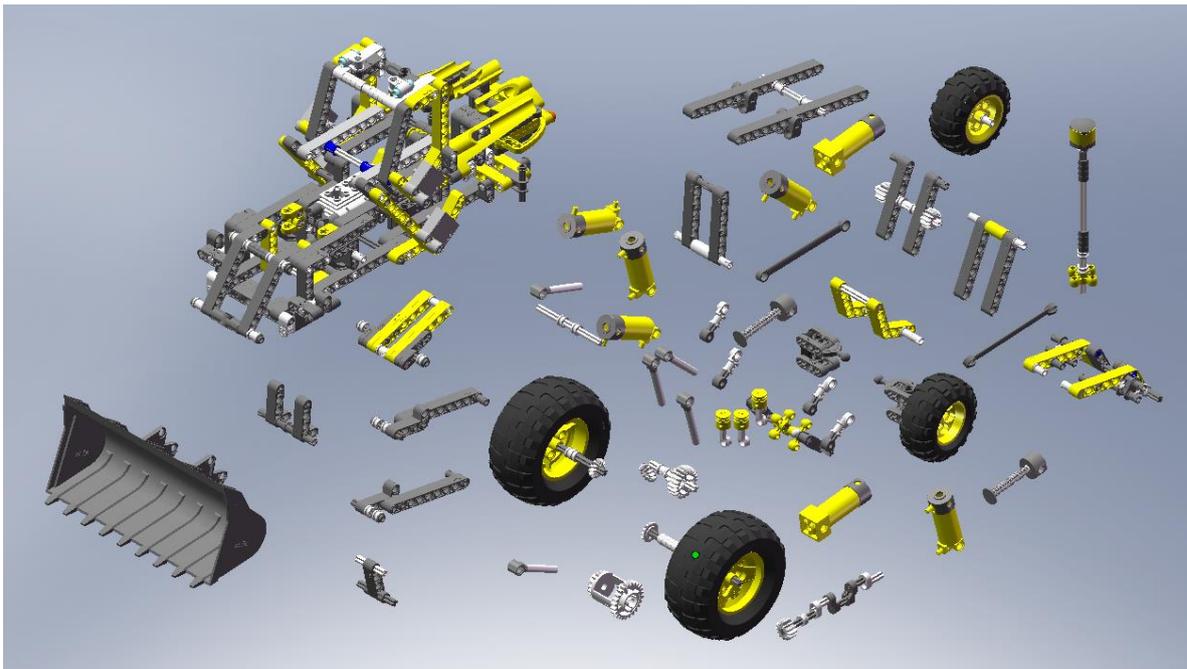


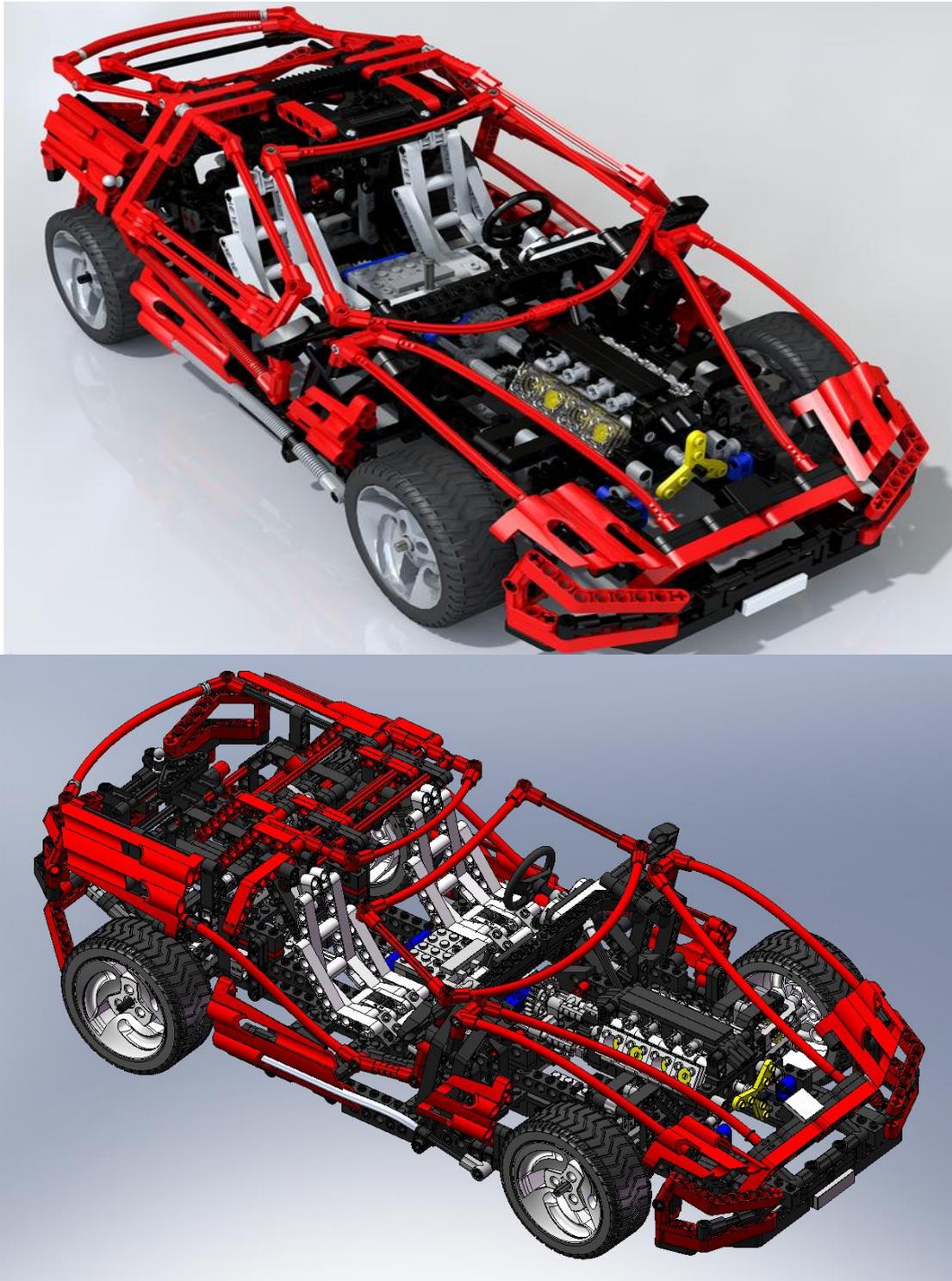
Figura 131. Piezas que componen el modelo virtual vLTm – 8455 – 2



Figura 132. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual vLTm – 8455 – 2

## 7.6 Creación modelo virtual vLTm – 8448 – 1

El modelo 8448-1 consiste en un coche deportivo con motor de 8 cilindros, suspensión, caja de cambios de 5 velocidades, dirección con mecanismo pistón-cremallera y diferencial.



*Figura 133. Modelo real (arriba) y virtual (abajo) LEGO Technic 8448 – 1*

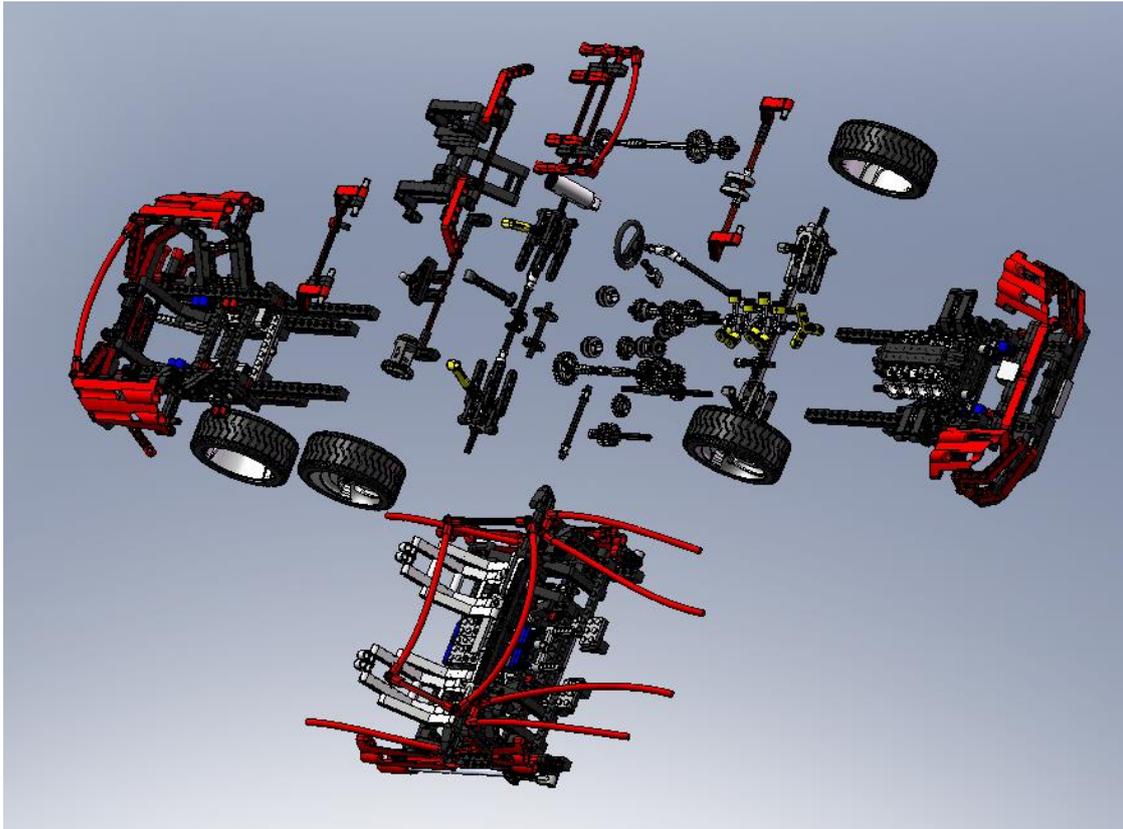


Figura 134. Piezas que componen el modelo virtual vLTm – 8448 – 1

vltm_xxxx-x_part-0x0_2014	flex_capot_dnxa	flex_capot_dnxa_e xt	flex_capot_izdo	flex_capot_izdo_e xt	flex_marco	flex_parabrisas_d own	flex_parabrisas_d own_1	flex_parabrisas_su perior
flex_parabrisas_u p	flex_paragolpes	flex_puerta_izda	flex_techo	VLTm_44 Technic Connector Toggle Joint S...	VLTm_78 Technic Ribbed Hose	VLTm_90 Technic Universal Joint End 2007s	VLTm_91 Technic Universal Joint Centre 2007s	VLTm_111 Technic Connector Block 3 x 3 Triangular
VLTm_731.c01 Technic Shock Absorber 6.5L (Complete Asse...	vLTm_731.c01 Technic Shock Absorber 6.5L - BASE 2007s	VLTm_924 Technic Angle Connector #4	VLTm_2431 Tile 1 x 4	VLTm_2431 Tile 1 x 4_grey	VLTm_2450 Plate 3 x 3 without Corner	VLTm_2639 Plate 4x4 Corner	VLTm_2730 Technic Brick 1 x 10 with Holes	VLTm_2736 Technic Axle Towball
VLTm_2739 -Moved to 2739b	VLTm_2741 Technic Large Steering Wheel	VLTm_2744 Technic Wing Back	VLTm_2780 Technic Pin with Friction and Slots	VLTm_2825 Technic Beam 4 x 0.5 Liftarm with Boss	VLTm_2850 Technic Engine Cylinder Head	VLTm_2851 Technic Engine Piston Round	VLTm_2852 Technic Engine Connecting Rod	VLTm_2853 Technic Engine Crankshaft
VLTm_2854 Technic Engine Crankshaft Centre	VLTm_2905 Technic Triangle	VLTm_3002 Brick 2 x 3	VLTm_3005 Brick 1 x 1	VLTm_3021 Plate 2 x 3	VLTm_3021 Plate 2 x 3_grey	VLTm_3021 Plate 2 x 3_grey	VLTm_3022 Plate 2 x 2	VLTm_3023 Plate 1 x 2

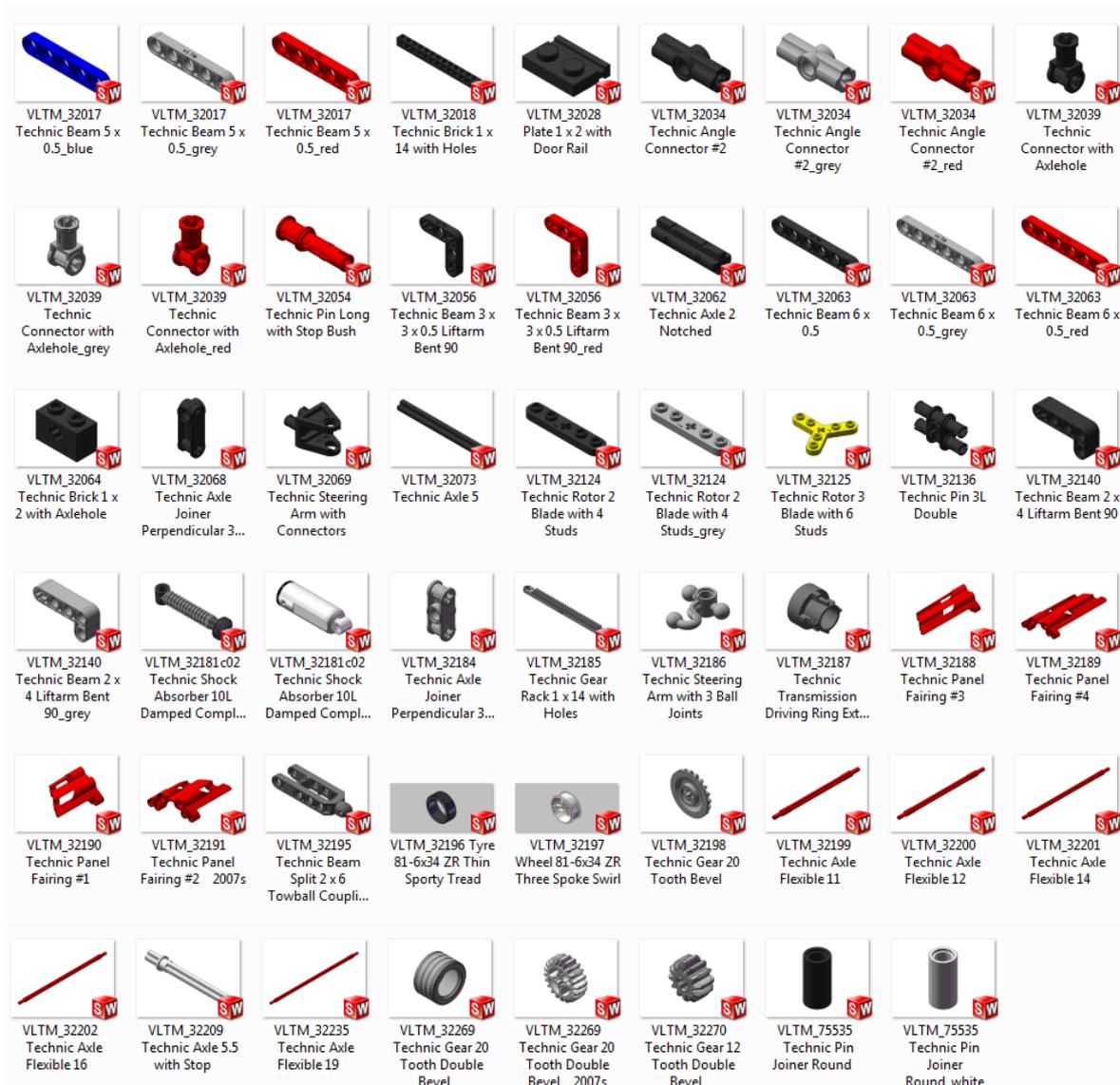



Figura 135. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual *vLTm – 8448 – 1*

## 7.7 Creación modelo virtual vLTm – 42008 – 1

A diferencia de los anteriores, este modelo se ha dispuesto físicamente ya montado, para su creación virtual. Se trata de un camión de asistencia con funciones eléctricas, actuadores lineales y neumática.



*Figura 136. Modelo real 42008 – 1, camión de asistencia*

Al no disponer de archivo eDrawings, el montaje virtual ha sido realizado siguiendo los libros de instrucciones de creación del modelo. Cabe destacar que se ha utilizado el modelo real para diferenciar las piezas, ya que al ser un modelo grande y con tantas funciones, es difícil distinguir a simple vista las relaciones de movimiento de los distintos componentes.

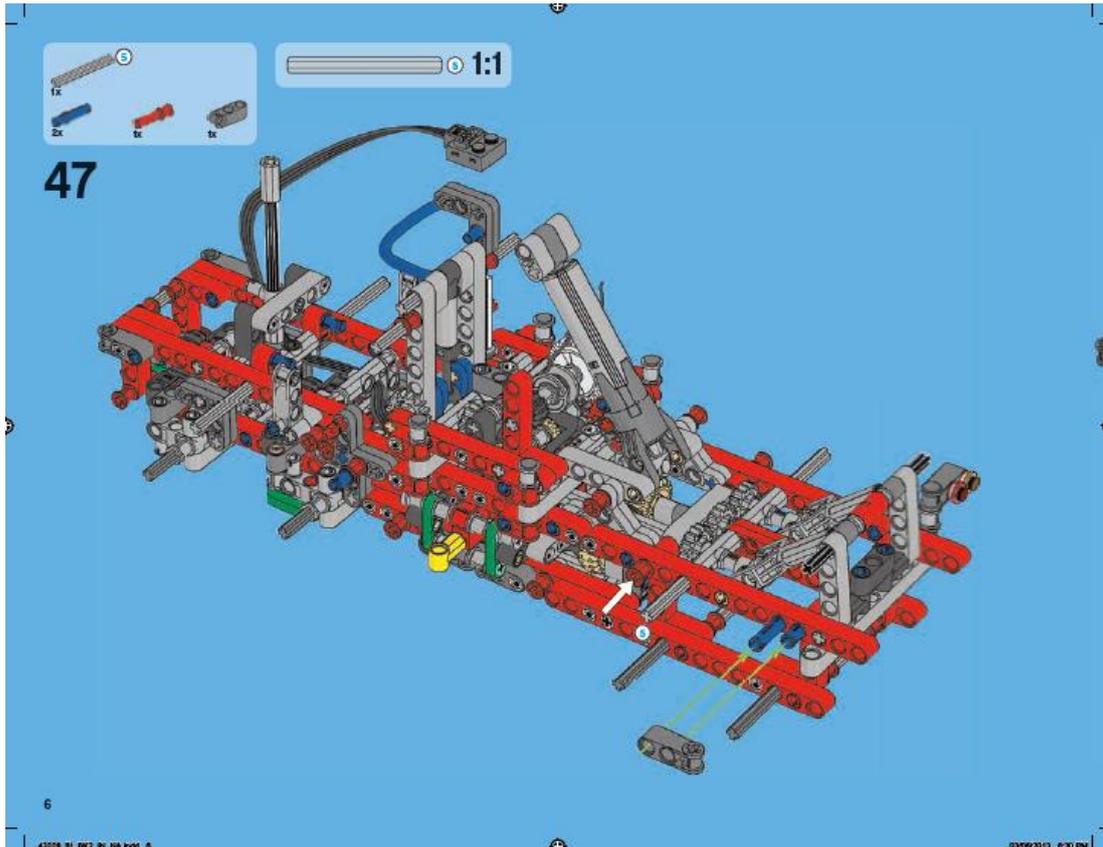
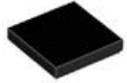


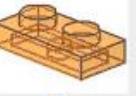
Figura 137. Ejemplo de página de libro de instrucciones del modelo 42008 – 1



Figura 138. Modelo virtual vLTm – 42008 – 1

 1 <a href="#">5102c37</a> *	 6 <a href="#">3706</a> *	 4 <a href="#">32524</a> *	 169 <a href="#">2780</a> *
 2 <a href="#">75c07</a> *	 3 <a href="#">3707</a> *	 6 <a href="#">6629</a> *	 2 <a href="#">3068b</a> *
 1 <a href="#">3623</a> *	 2 <a href="#">3737</a> *	 2 <a href="#">40490</a> *	 8 <a href="#">44309</a> *
 2 <a href="#">3710</a> *	 15 <a href="#">32013</a> *	 2 <a href="#">32525</a> *	 1 <a href="#">5102c05</a> *
 2 <a href="#">3020</a> *	 2 <a href="#">6538c</a> *	 4 <a href="#">32009</a> *	 1 <a href="#">5102c07</a> *
 1 <a href="#">3032</a> *	 7 <a href="#">32270</a> *	 4 <a href="#">32140</a> *	 1 <a href="#">5102c14</a> *
 4 <a href="#">2444</a> *	 1 <a href="#">32269</a> *	 3 <a href="#">62531</a> *	 63 <a href="#">43093</a> *
 1 <a href="#">54200</a> *	 2 <a href="#">87761</a> *	 1 <a href="#">48496</a> *	 4 <a href="#">41677</a> *
 2 <a href="#">85984</a> *	 14 <a href="#">32523</a> *	 1 <a href="#">87408</a> *	 61 <a href="#">6558</a> *
 1 <a href="#">x77ac100</a> *	 9 <a href="#">32316</a> *	 2 <a href="#">32138</a> *	 1 <a href="#">30395</a> *
 16 <a href="#">3705</a> *	 4 <a href="#">11478</a> *	 4 <a href="#">6628</a> *	 2 <a href="#">4694b (Inv)</a> *

16 <a href="#">87083</a> *	30 <a href="#">6632</a> *	1 <a href="#">58120c01</a> *	19 <a href="#">32073</a> *
8 <a href="#">32209</a> *	4 <a href="#">32524</a> *	1 <a href="#">5102c17</a> *	12 <a href="#">44294</a> *
1 <a href="#">61904</a> *	7 <a href="#">40490</a> *	1 <a href="#">5102c39</a> *	4 <a href="#">60485</a> *
7 <a href="#">6536</a> *	9 <a href="#">41239</a> *	1 <a href="#">99798c01</a> *	21 <a href="#">32034</a> *
30 <a href="#">42003</a> *	18 <a href="#">32526</a> *	1 <a href="#">4697b</a> *	2 <a href="#">32015</a> *
12 <a href="#">32291</a> *	2 <a href="#">87080</a> *	1 <a href="#">61510</a> *	12 <a href="#">32184</a> *
1 <a href="#">10928</a> *	2 <a href="#">87086</a> *	53 <a href="#">3713</a> *	2 <a href="#">98989</a> *
4 <a href="#">6542b</a> *	3 <a href="#">11946</a> *	21 <a href="#">4265c</a> *	5 <a href="#">41678</a> *
1 <a href="#">41239</a> *	3 <a href="#">11947</a> *	2 <a href="#">92693c01</a> *	25 <a href="#">6538c</a> *
16 <a href="#">32056</a> *	5 <a href="#">64782</a> *	1 <a href="#">61927c01</a> *	4 <a href="#">32039</a> *
4 <a href="#">6587</a> *	1 <a href="#">59510c01</a> *	47 <a href="#">4519</a> *	10 <a href="#">94925</a> *

 19 <a href="#">60483</a> *	 8 <a href="#">3673</a> *	 1 <a href="#">32316</a> *	 3 <a href="#">6589</a> *
 9 <a href="#">32316</a> *	 1 <a href="#">2819</a> *	 2 <a href="#">40490</a> *	 1 <a href="#">32198</a> *
 2 <a href="#">32063</a> *	 4 <a href="#">61903</a> *	 20 <a href="#">32278</a> *	 3 <a href="#">32269</a> *
 6 <a href="#">40490</a> *	 15 <a href="#">2412b</a> *	 14 <a href="#">32526</a> *	 9 <a href="#">32002</a> *
 7 <a href="#">32525</a> *	 8 <a href="#">56145</a> *	 2 <a href="#">11946</a> *	 3 <a href="#">32556</a> *
 2 <a href="#">41239</a> *	 8 <a href="#">3713</a> *	 2 <a href="#">11947</a> *	 4 <a href="#">4073</a> *
 4 <a href="#">32526</a> *	 2 <a href="#">6641</a> *	 8 <a href="#">62462</a> *	 2 <a href="#">3023</a> *
 6 <a href="#">99773</a> *	 2 <a href="#">6539</a> *	 52 <a href="#">32054</a> *	 14 <a href="#">4073</a> *
 40 <a href="#">4274</a> *	 35 <a href="#">32062</a> *	 4 <a href="#">99008</a> *	 4 <a href="#">54200</a> *
 4 <a href="#">48989</a> *	 28 <a href="#">6536</a> *	 2 <a href="#">6538b</a> *	 2 <a href="#">3069b</a> *
 8 <a href="#">87082</a> *	 10 <a href="#">32449</a> *	 5 <a href="#">3749</a> *	 2 <a href="#">4073</a> *



*Figura 139. Lista de componentes utilizados en la creación del modelo virtual vLTm – 42008 – 1 de [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com)*

## 7.8 Creación modelo virtual vLTm – 42000 – 1

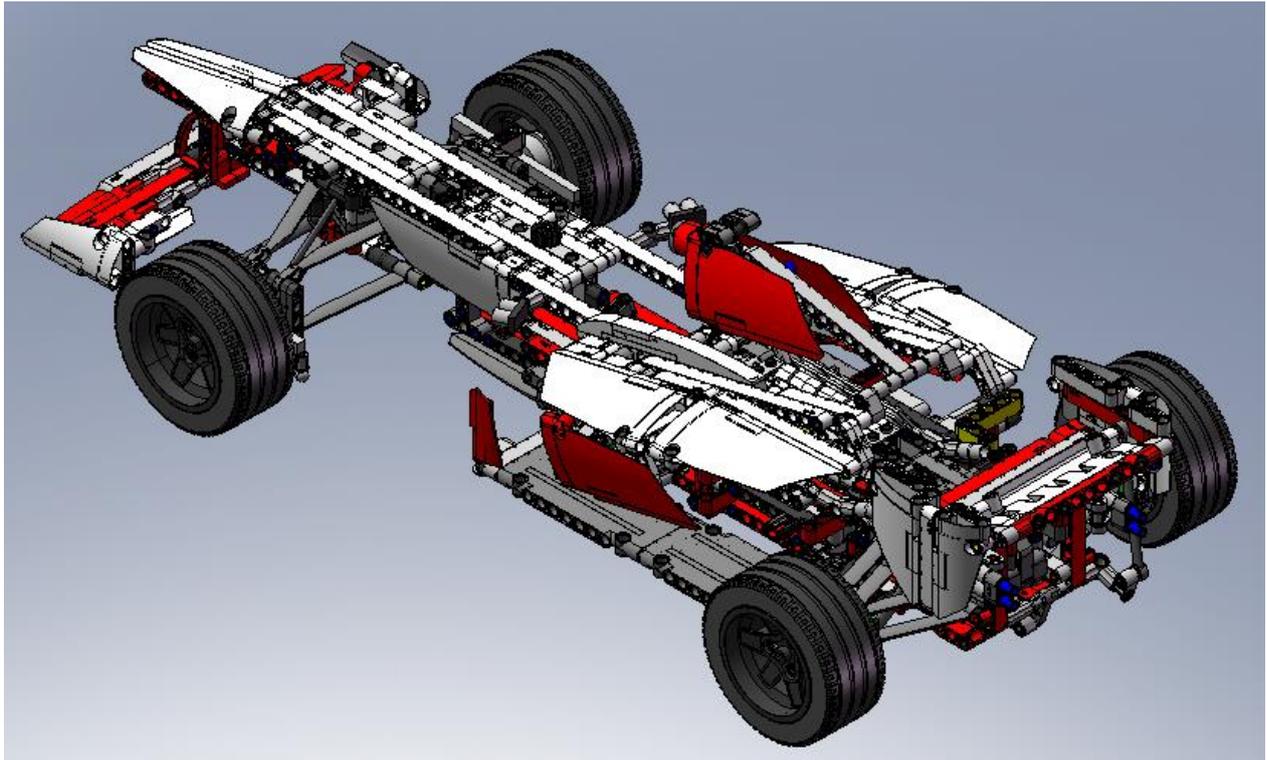
Este modelo Lego Technic se ha podido disponer físicamente “en caja” (desmontado), por lo que, se ha ensamblado virtual y físicamente en paralelo.

El proceso de montaje virtual ha sido mucho más visual y práctico. El único inconveniente ha sido tener que diferenciar las distintas piezas, ya que sin tener todo el modelo montado no se sabe si tienen movimiento entre sí.

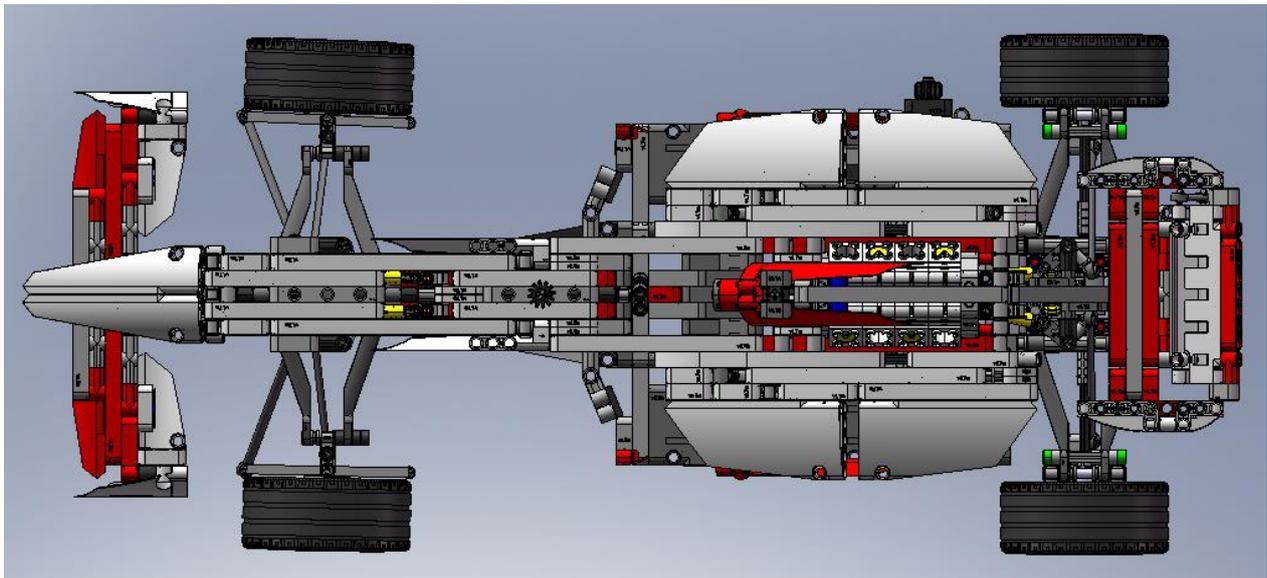
El modelo 42000-1 consiste en un coche de carreras tipo fórmula 1, con detalles realistas y funciones como: suspensión independiente en las cuatro ruedas, alerón trasero ajustable o motor V8 con pistones en movimiento.



*Figura 140. Modelo real 42000 – 1, Bólide Campeón*



*Figura 141. Modelo virtual vLTm – 42000 – 1*

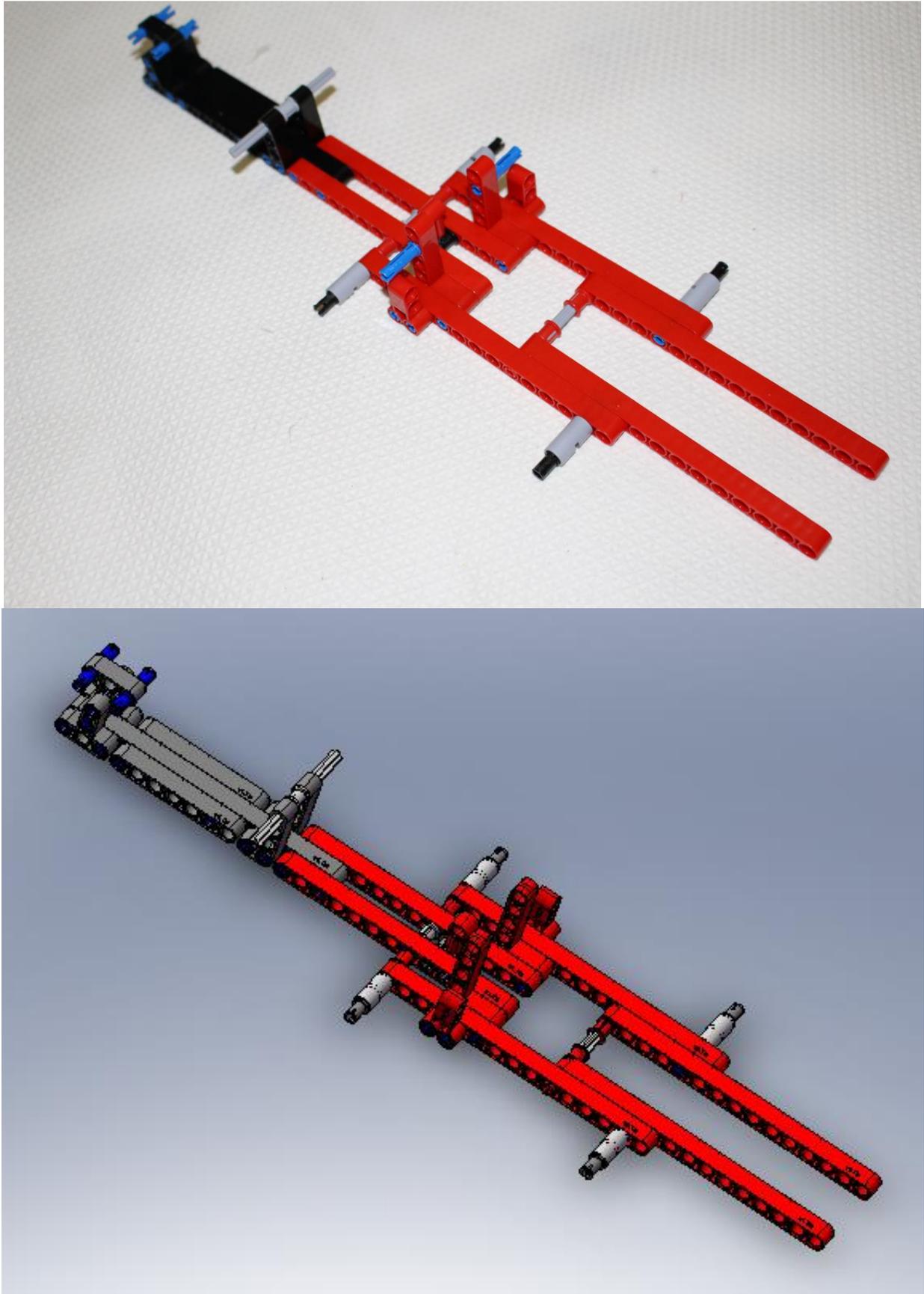


*Figura 142. Visualización superior del modelo virtual vLTm – 42000 – 1*

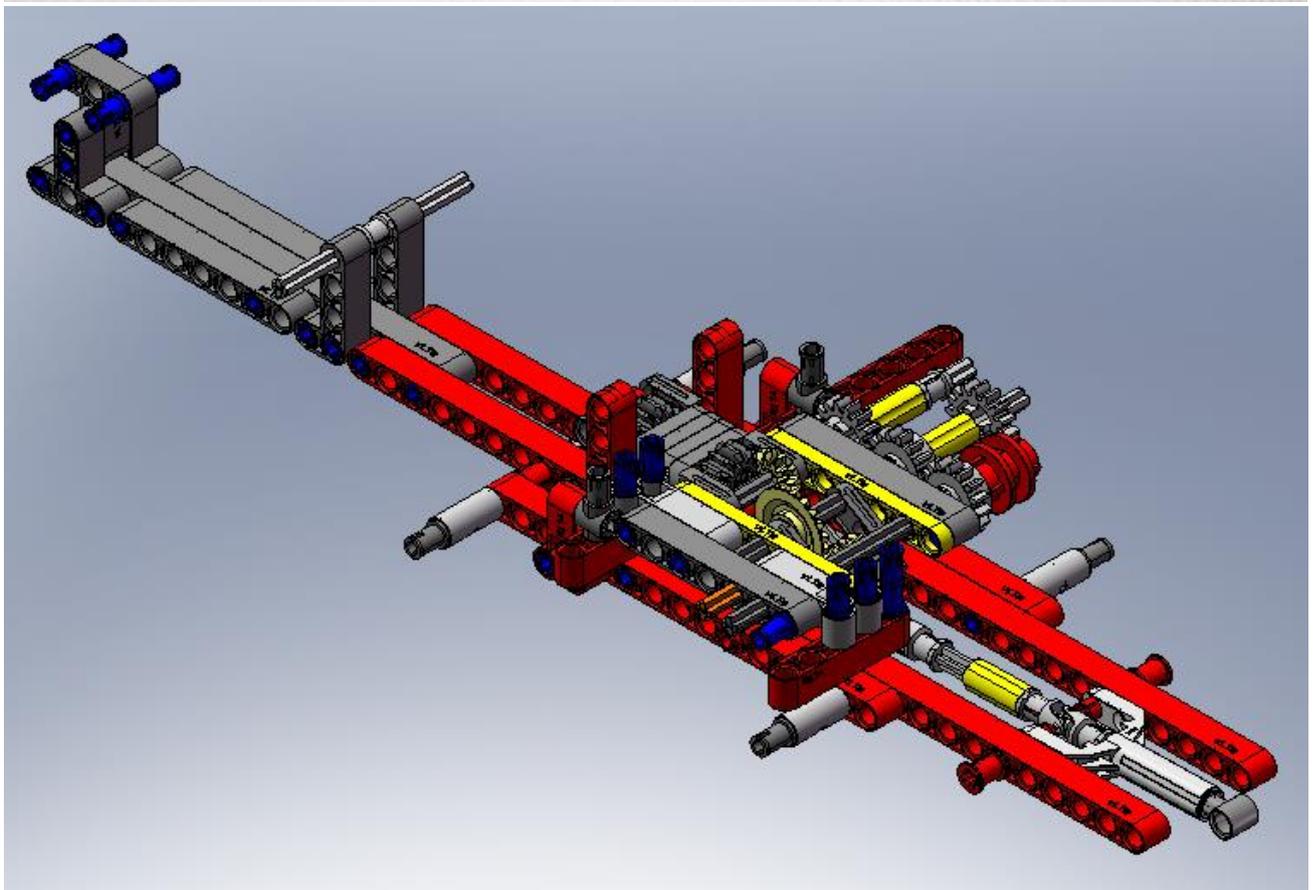
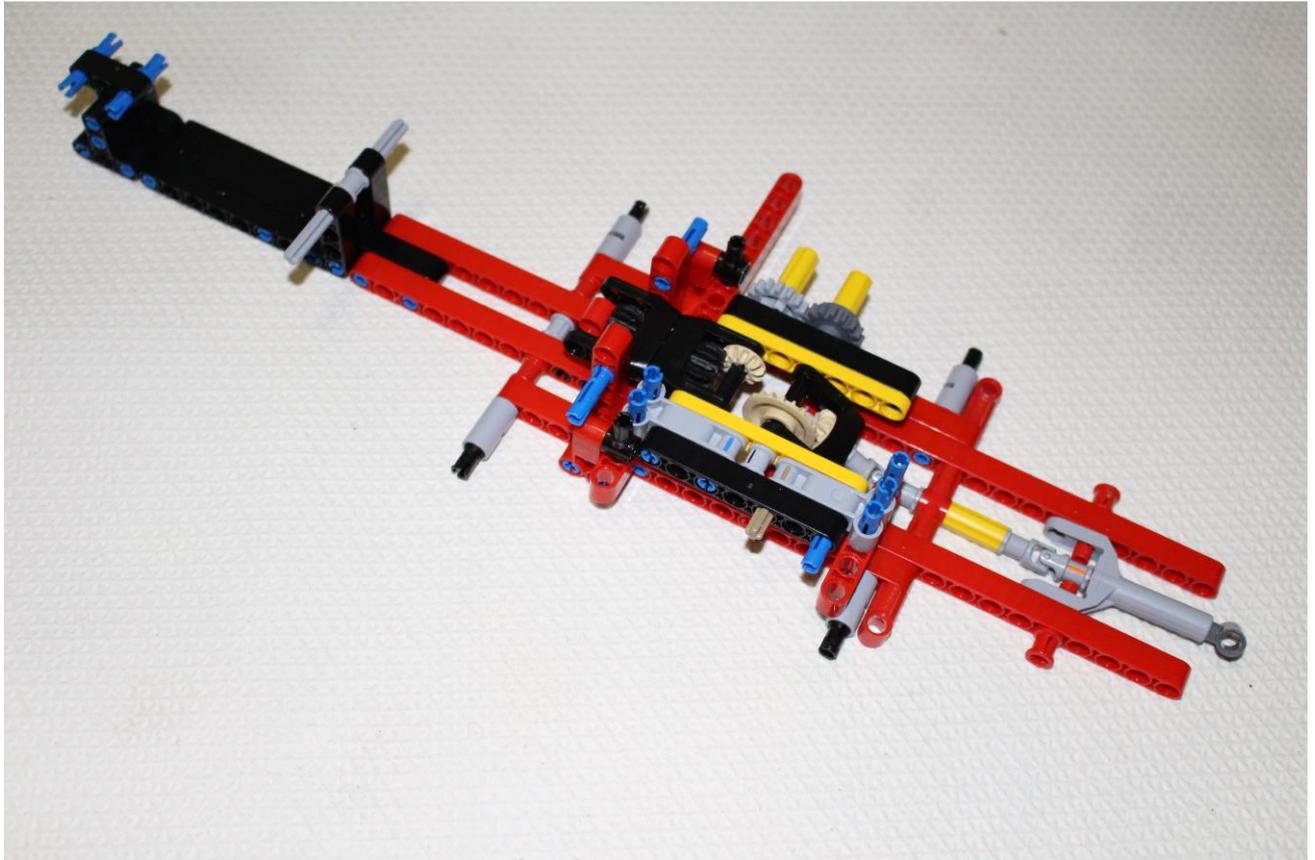
A continuación se expondrán una serie de fotografías tomadas durante el montaje y se compararán con su equivalente en el modelo virtual, para así poder apreciar la alta fidelidad con la que los modelos virtuales se asimilan a los reales.



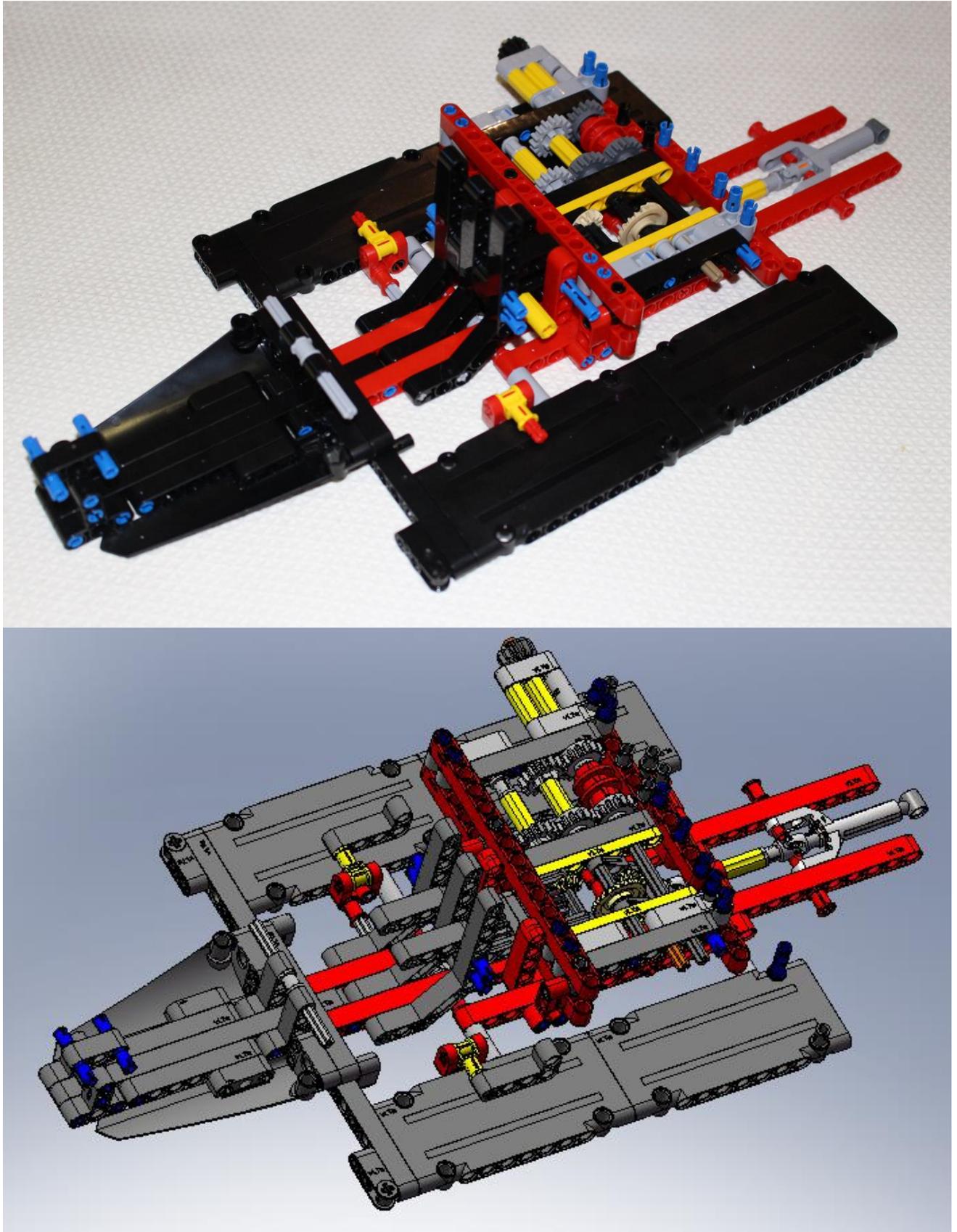
*Figura 143. Caja, libros de instrucciones y componentes del modelo vLTm – 42000 – 1*



*Figura 144. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1*



*Figura 145. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1*



*Figura 146. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1*

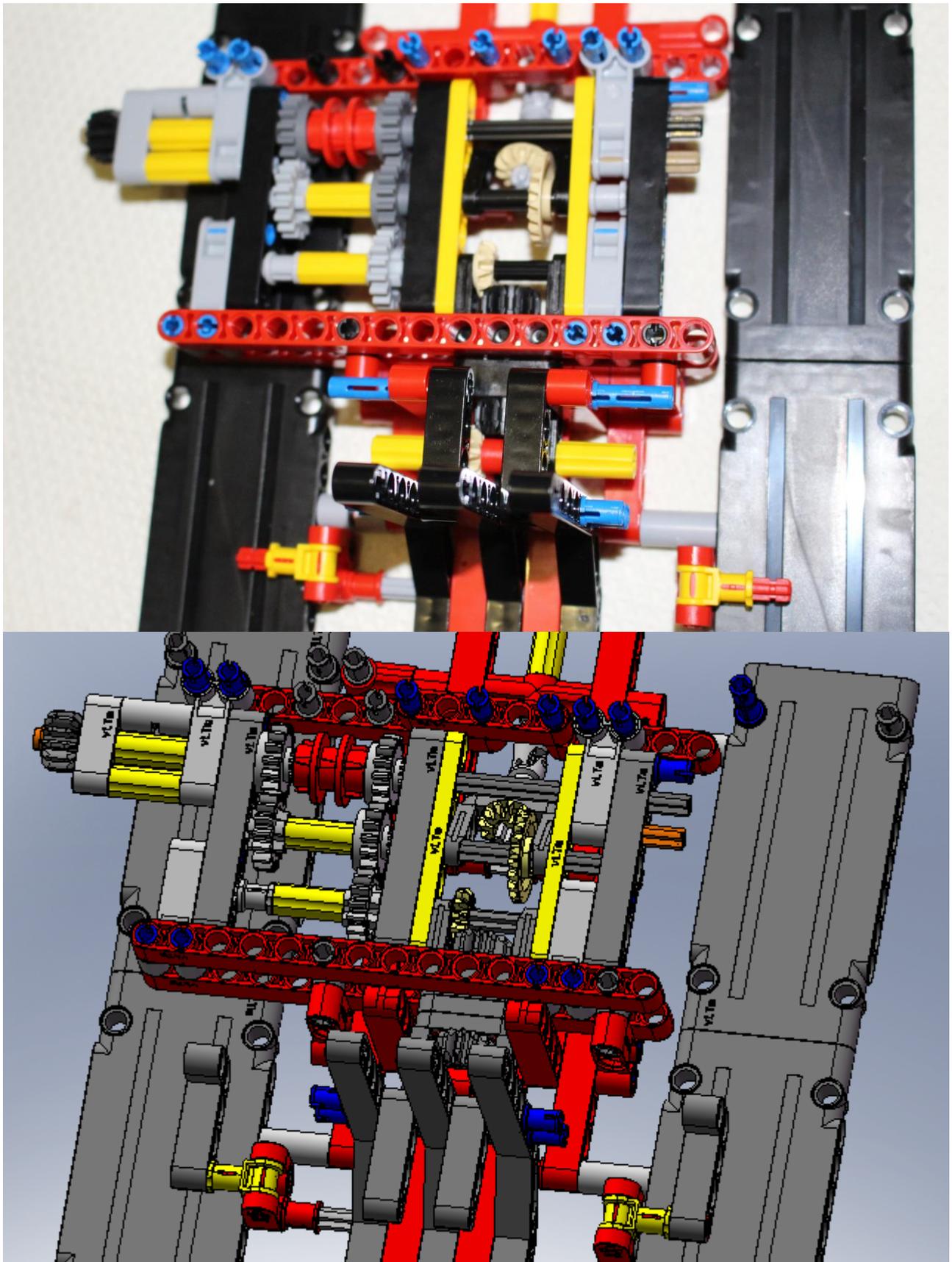


Figura 147. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1

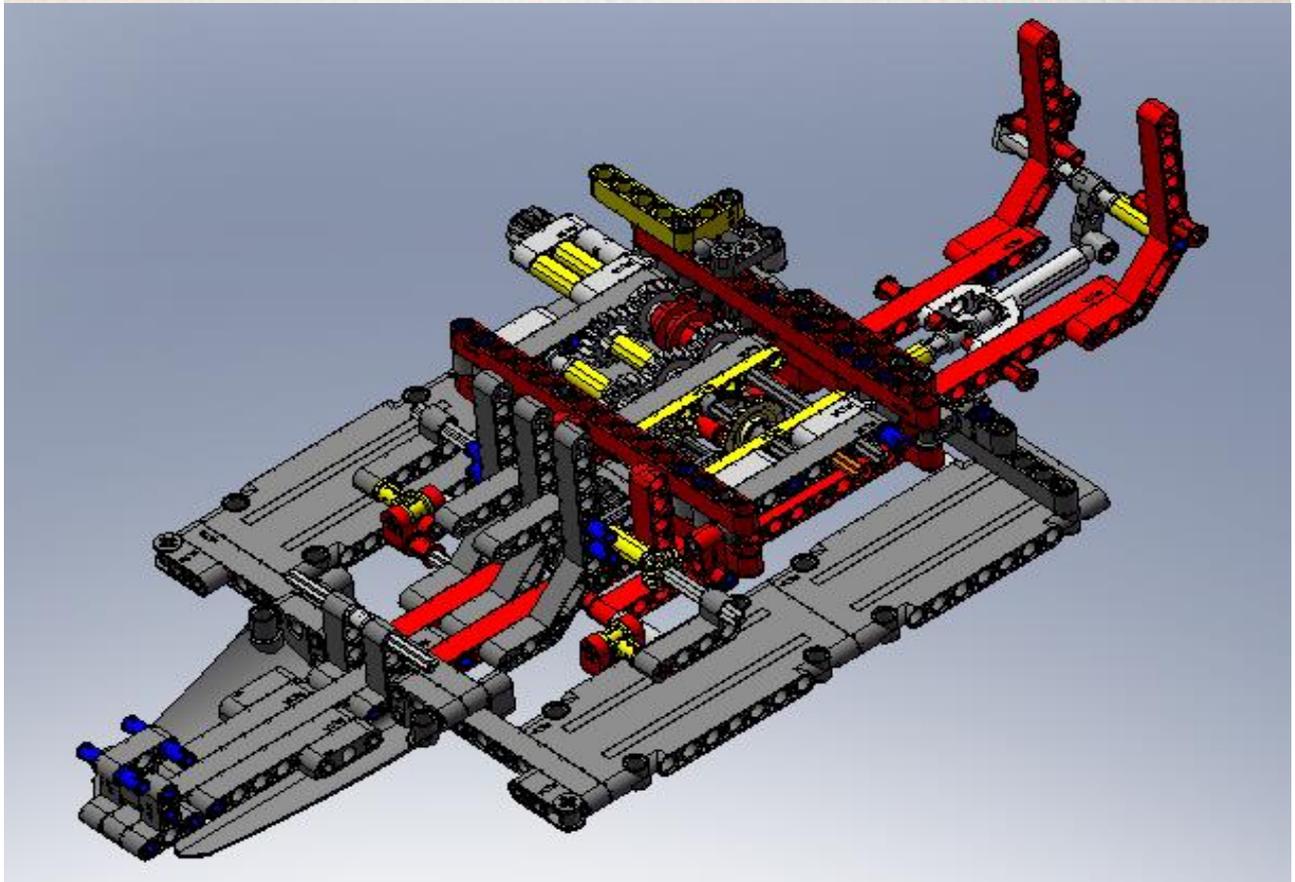
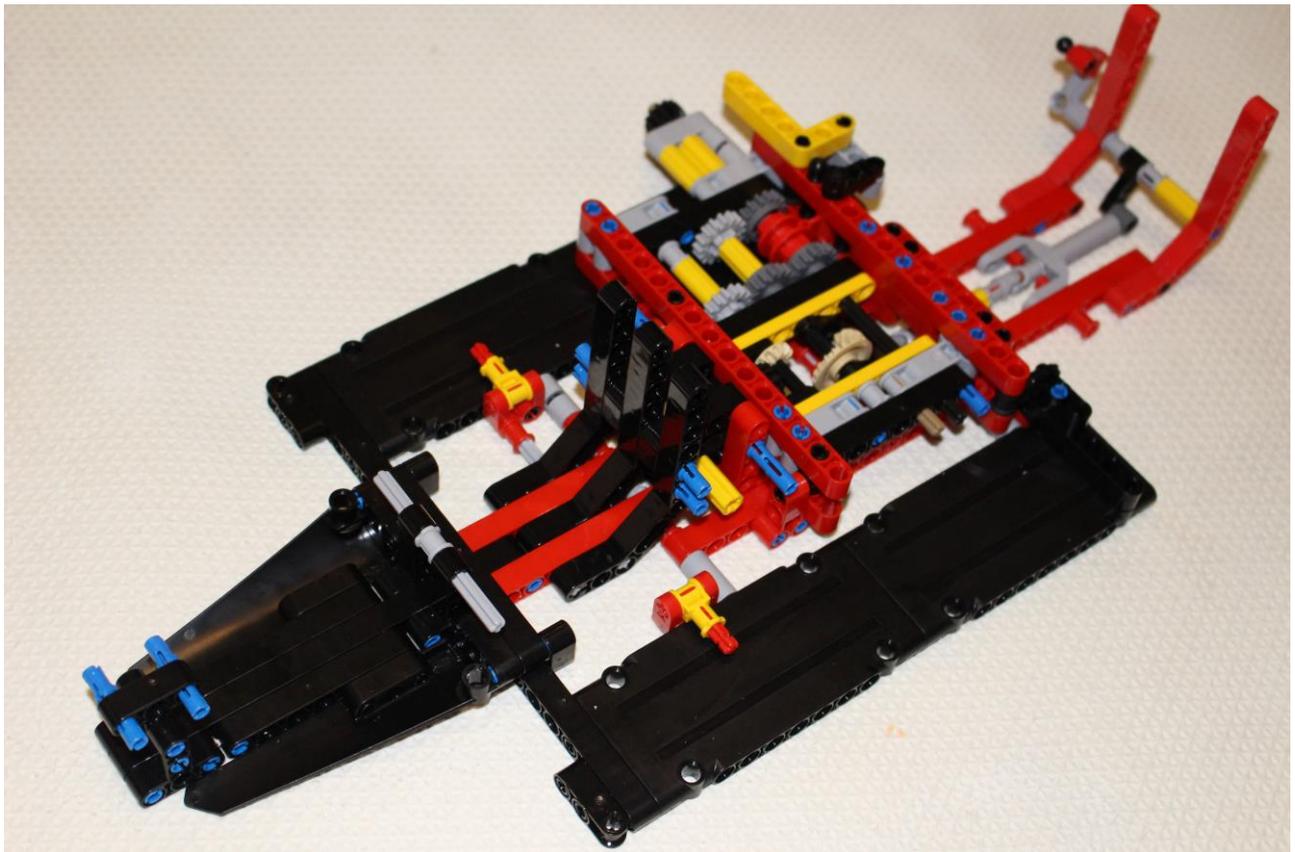


Figura 148. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1

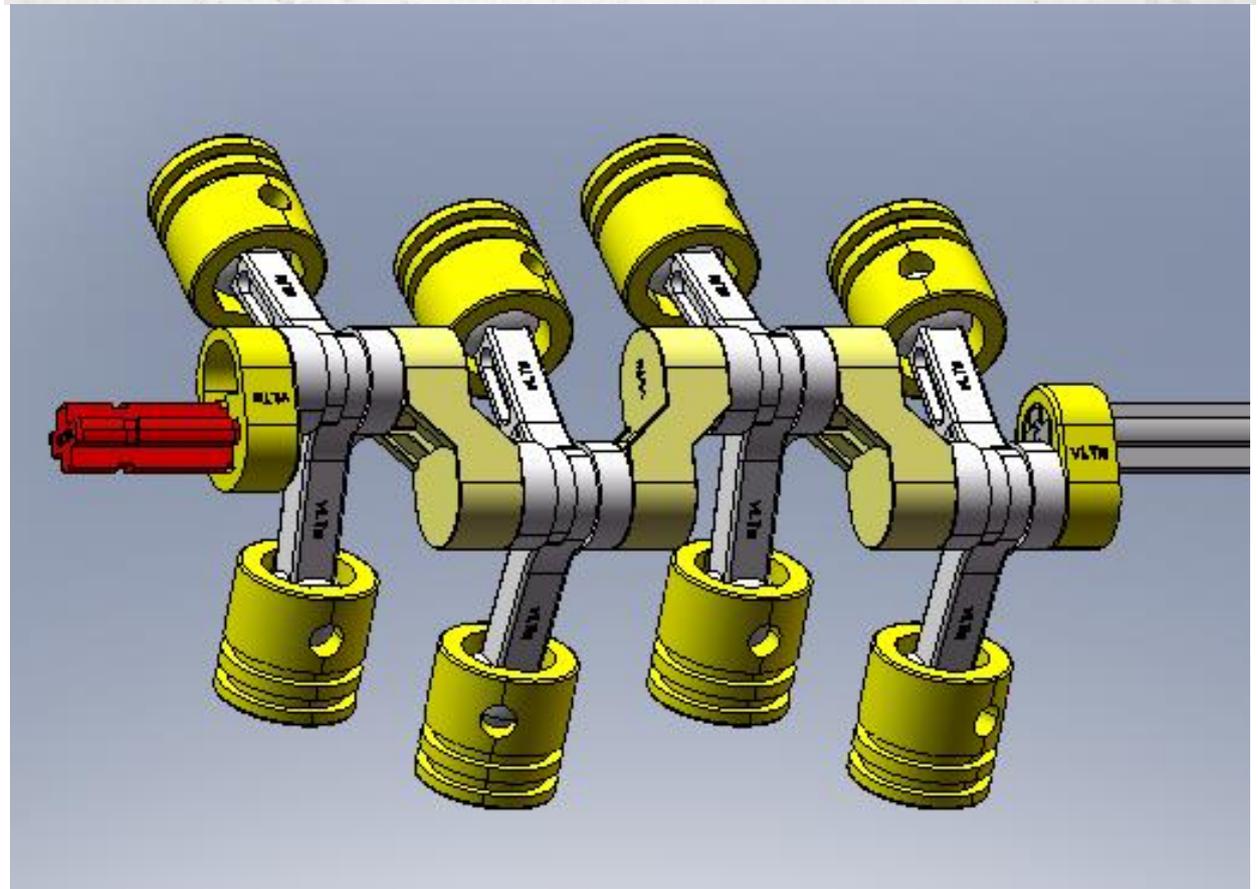
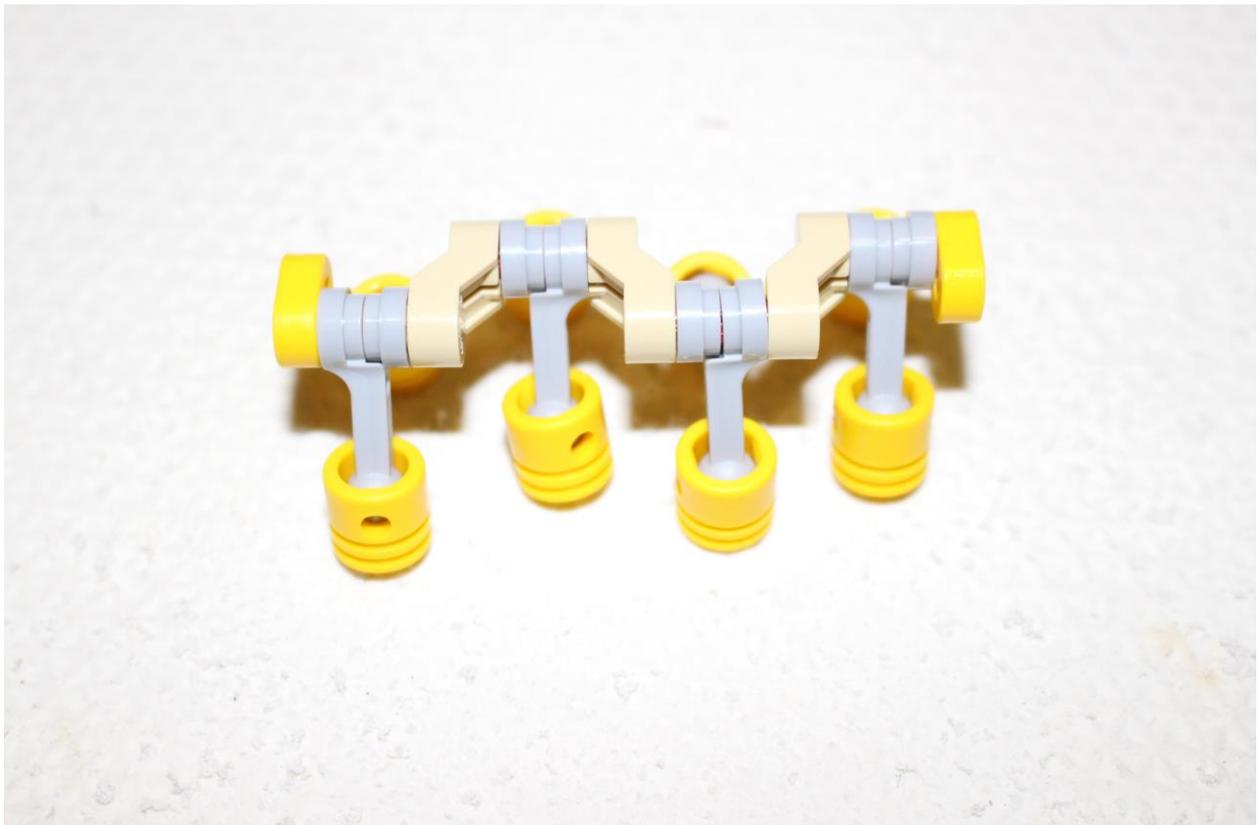


Figura 149. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1

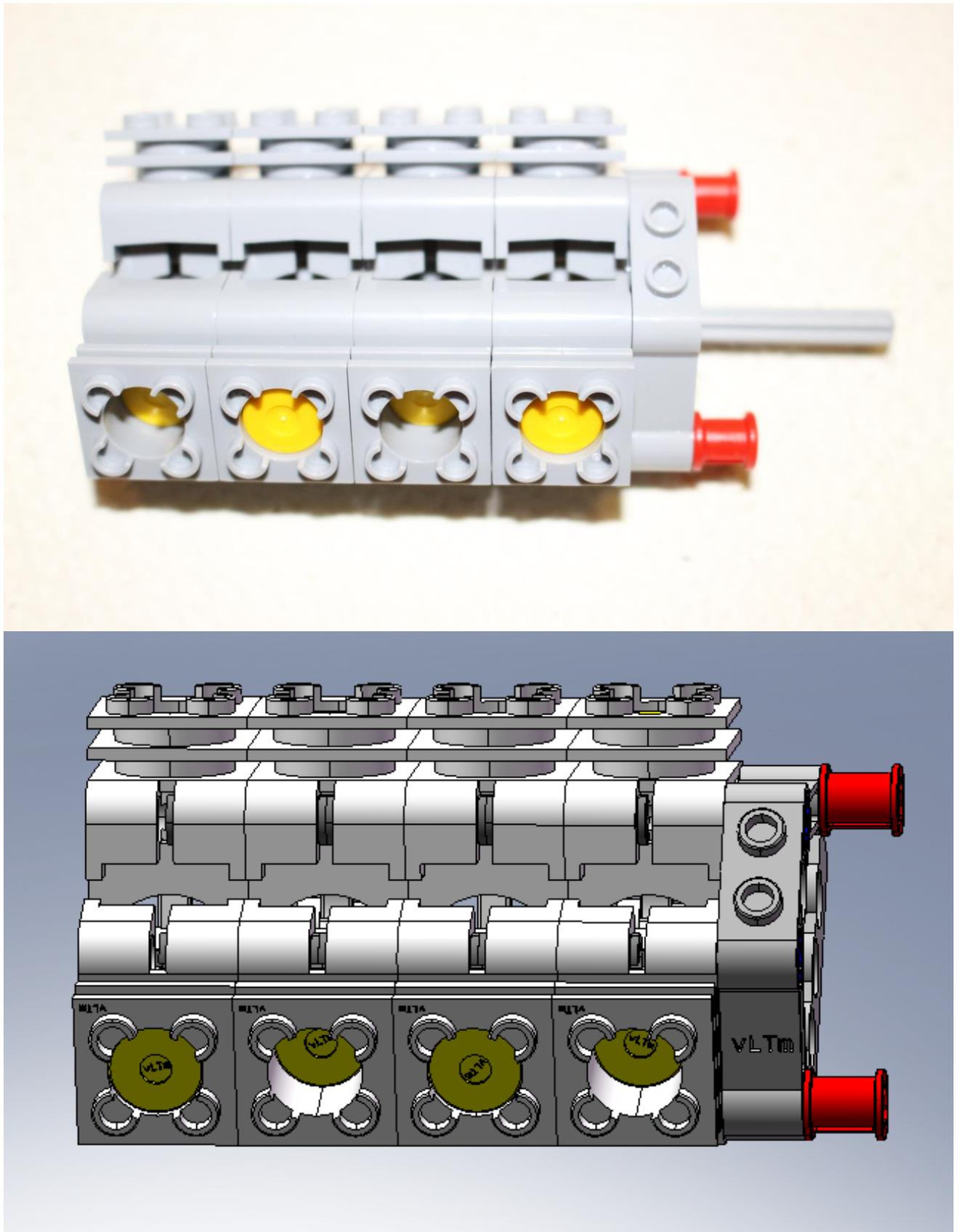
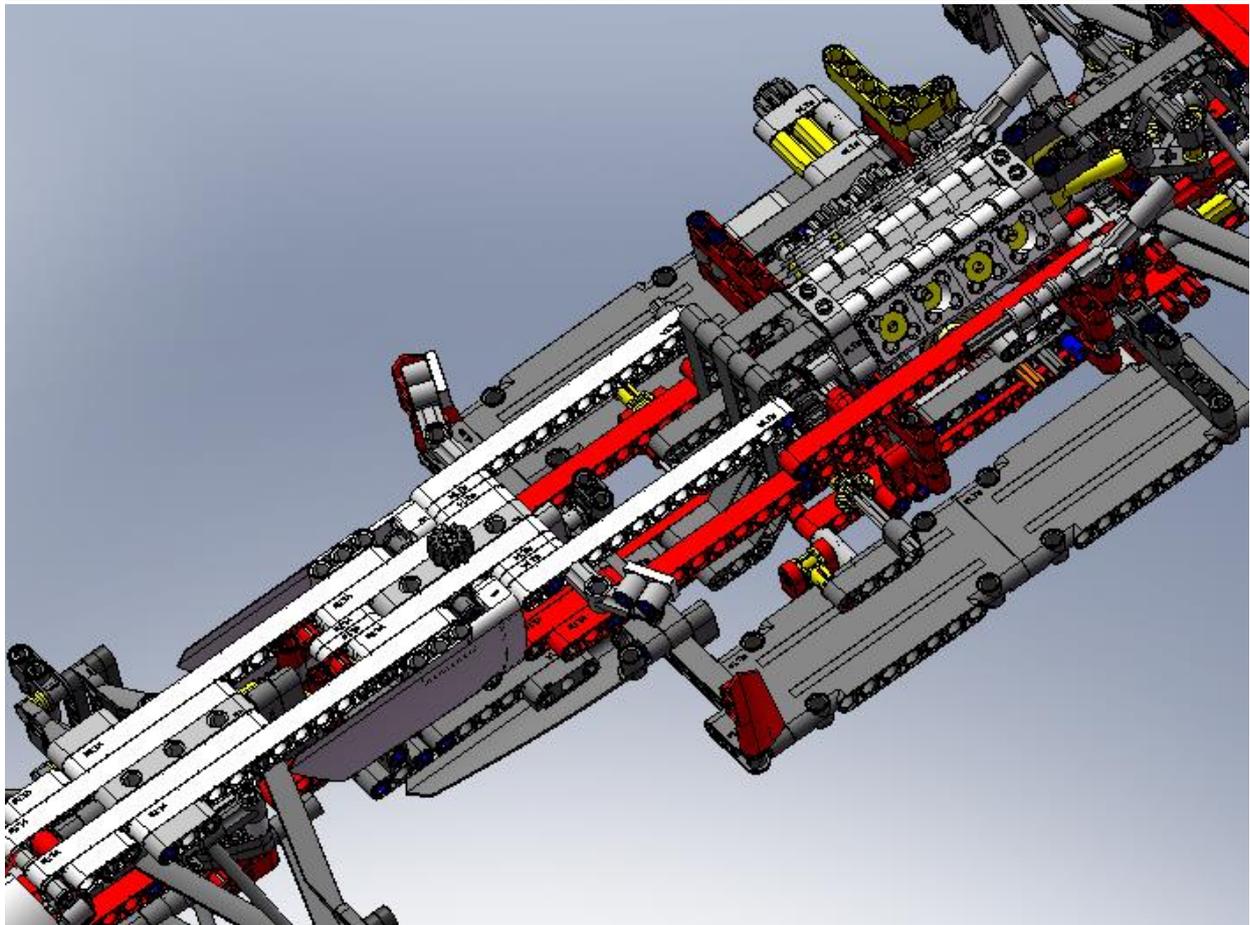
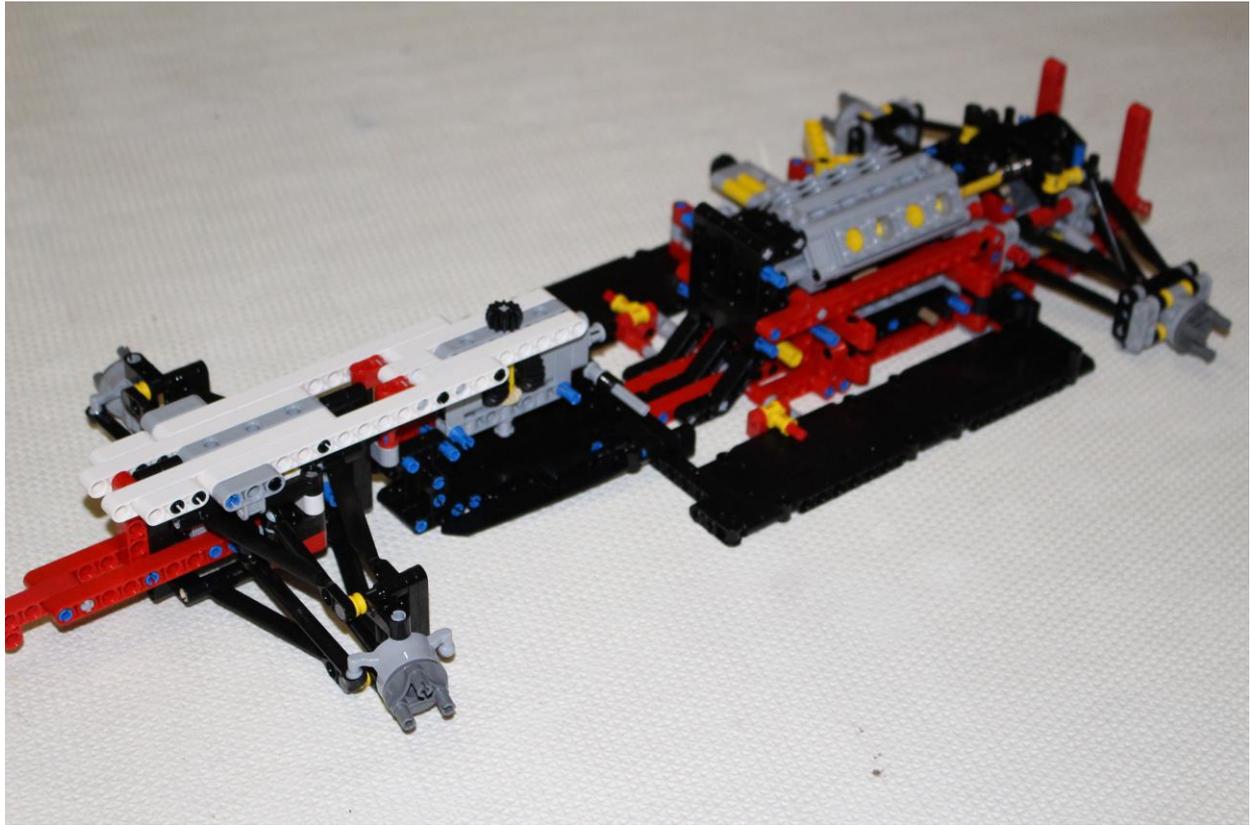


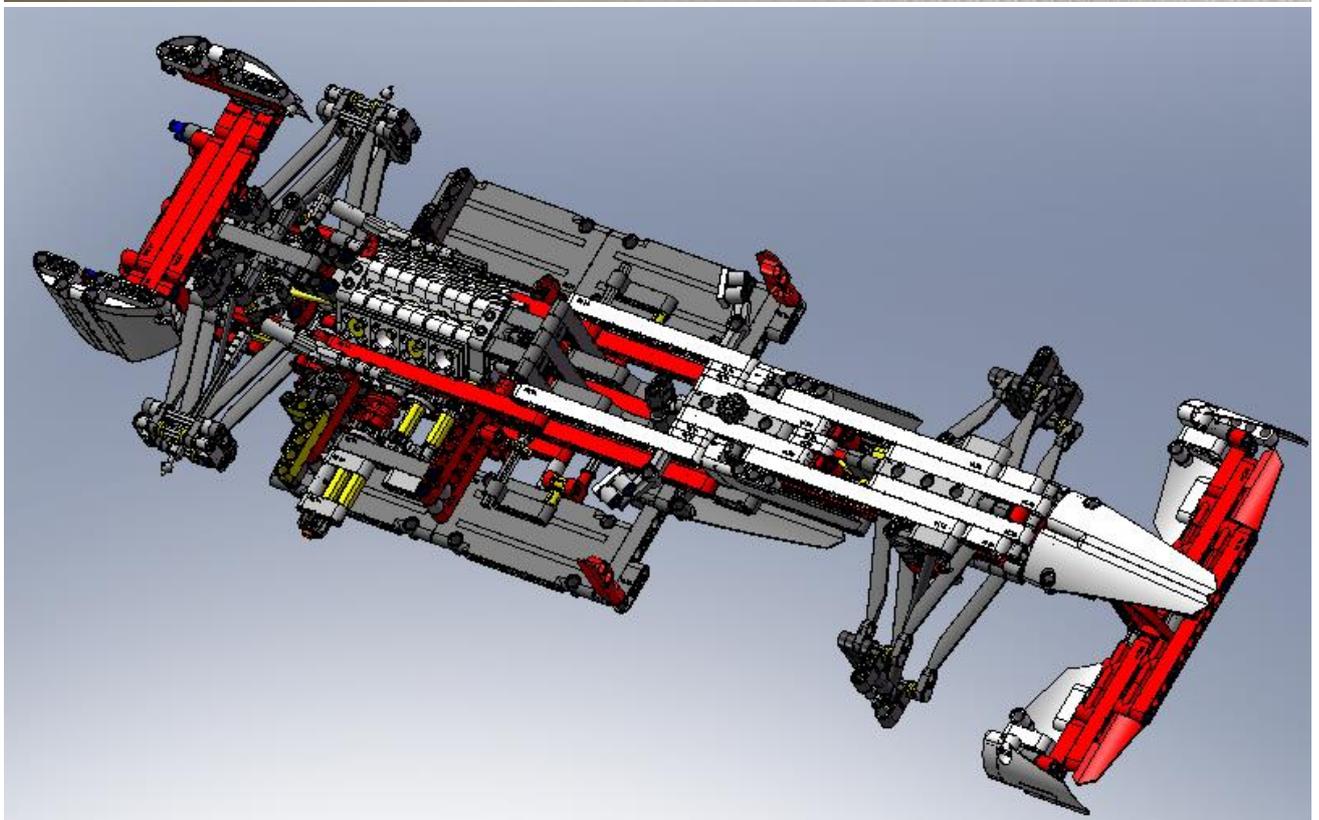
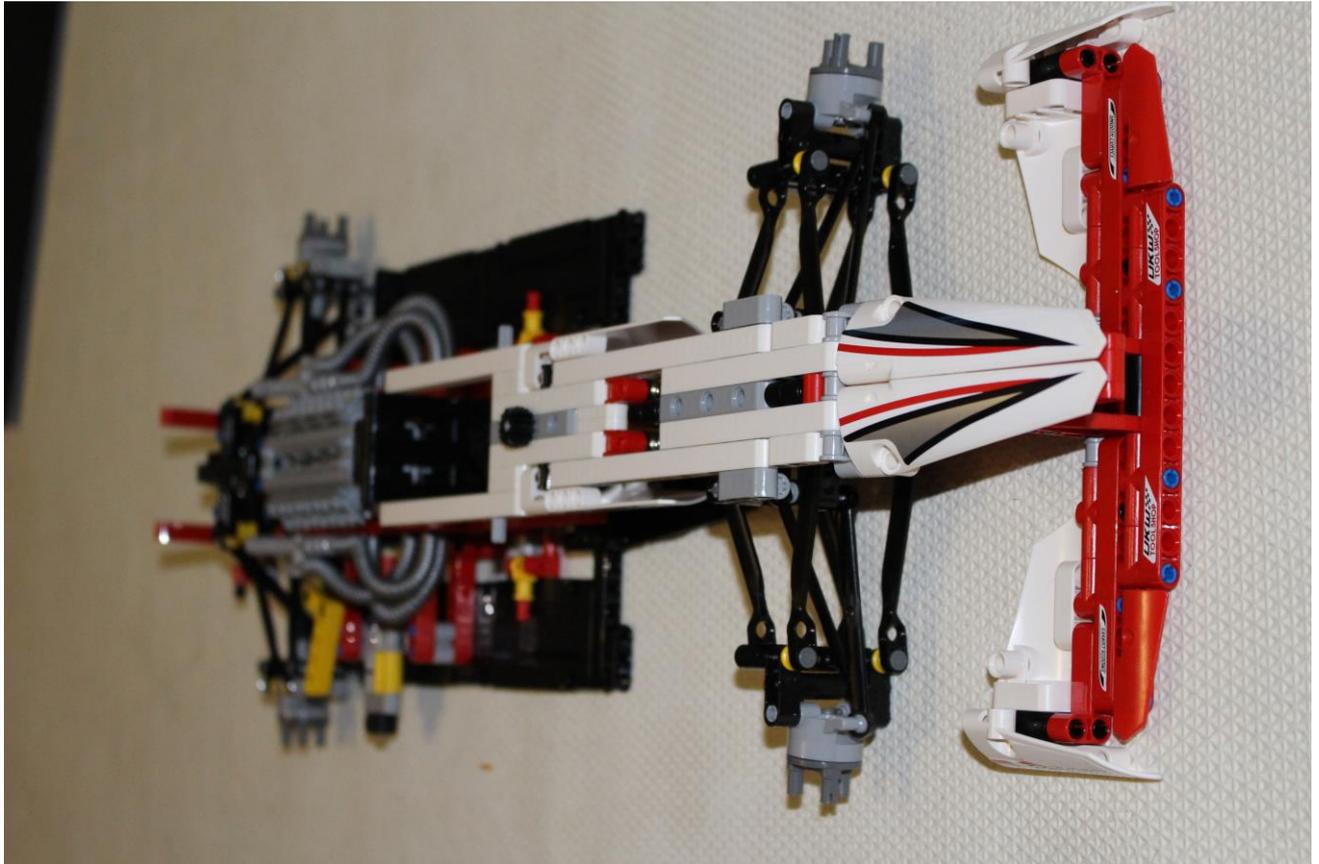
Figura 150. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1



*Figura 151. Proceso de creación de modelo real Lego Technic 42000 – 1*



*Figura 152. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1*



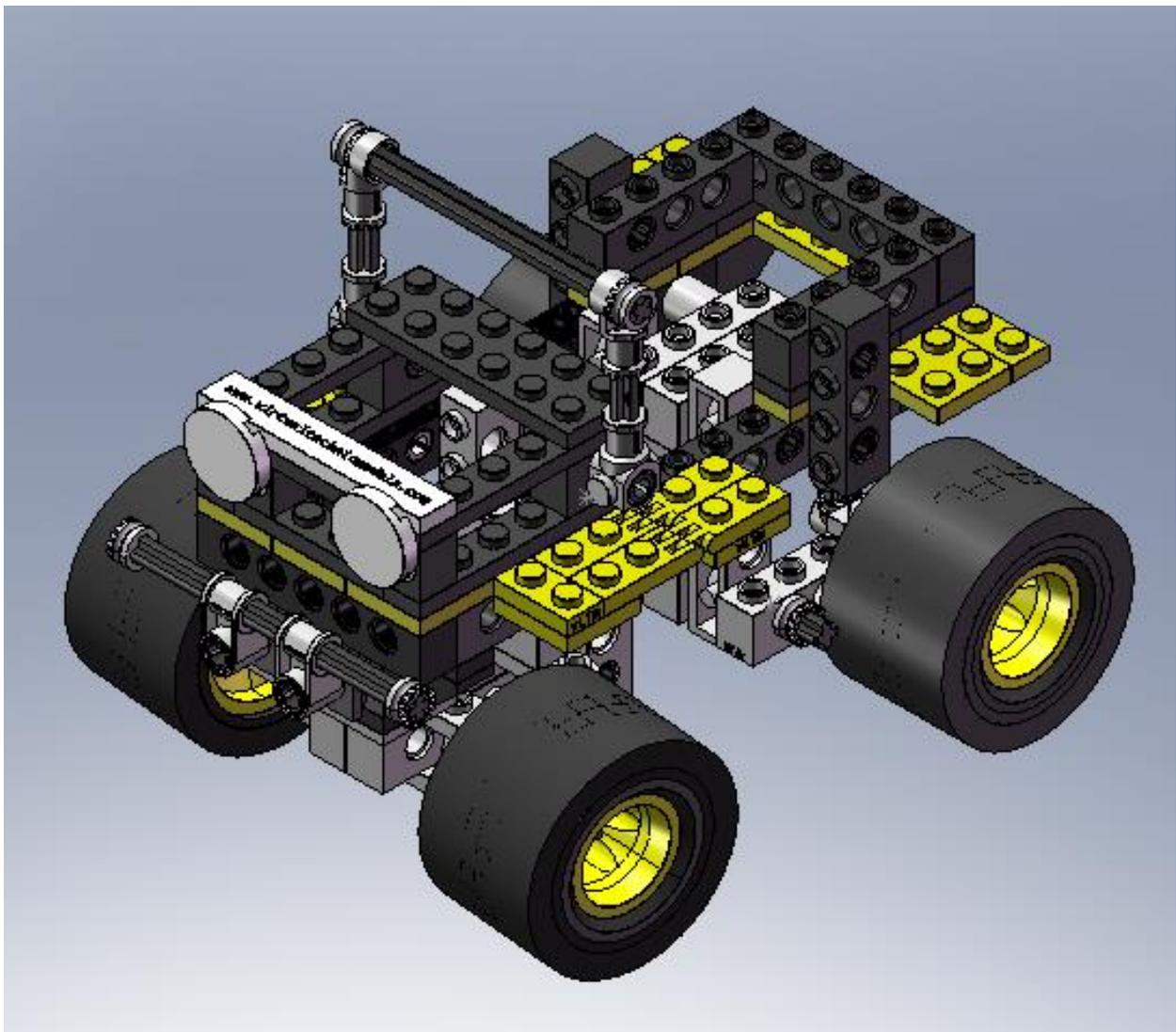
*Figura 153. Proceso de creación de modelo real y virtual Lego Technic 42000 – 1*

## 8. SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES

En este capítulo se van a exponer los modelos que se han construido a partir del montaje de sus piezas compactadas y su posterior simulación.

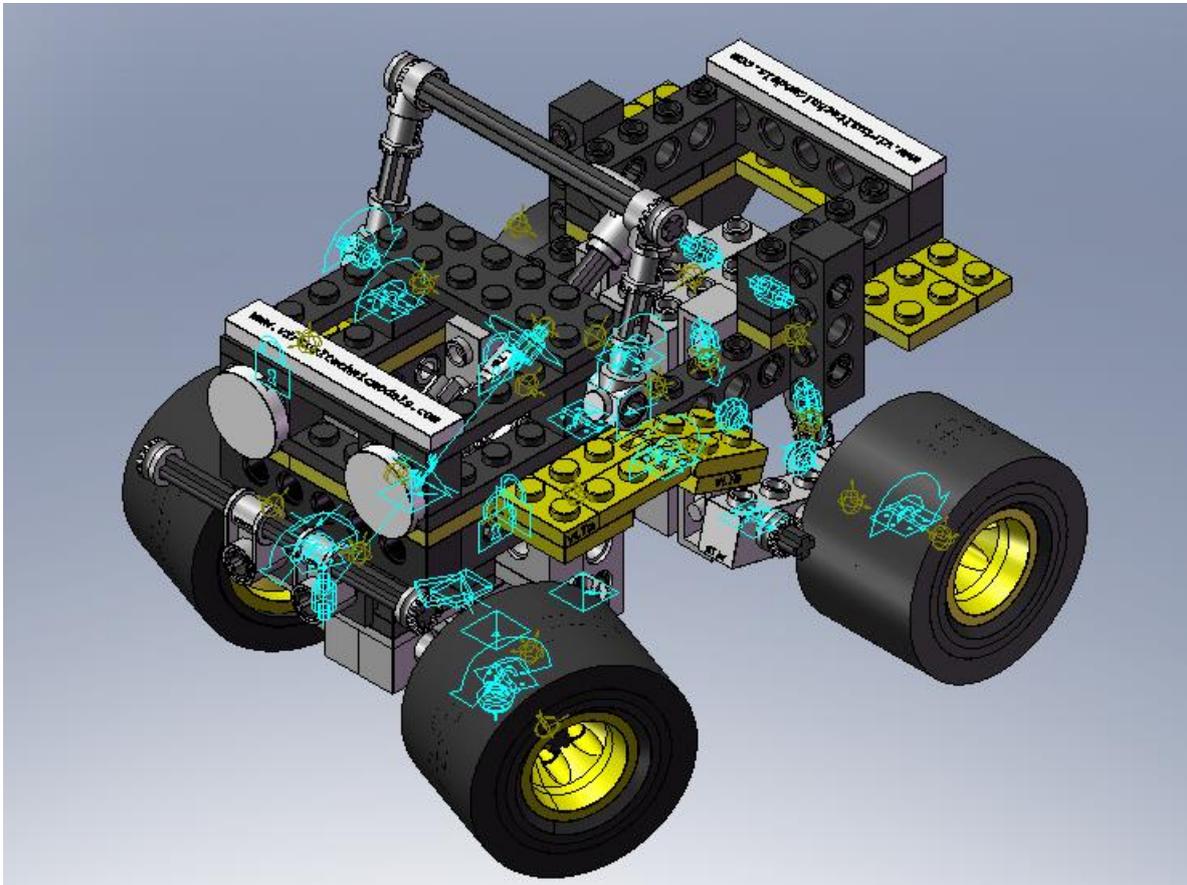
### 8.1 Simulación del modelo virtual vLTm – 8816 – 1

Este ha sido un modelo creado y simulado paso a paso siguiendo vídeos del profesor, en los que nos inician en CosmosMotion.

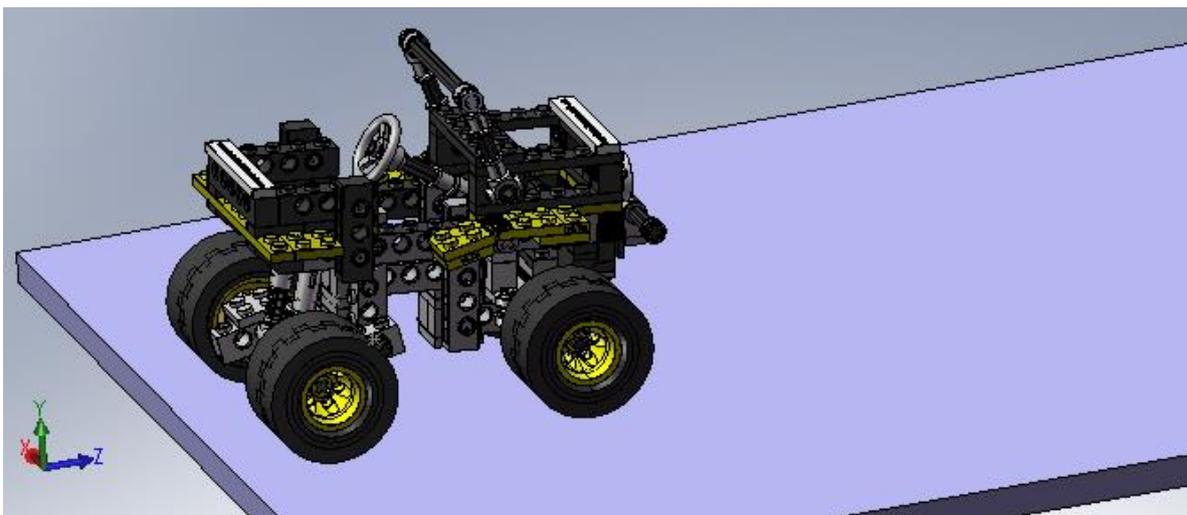


*Figura 154. Modelo Virtual Lego Technic 8816-1*

En la siguiente imagen se pueden observar en color azul todos los pares cinemáticos necesarios para autoalinearse el modelo.



*Figura 155. Modelo Virtual Lego Technic 8816-1 autoalineado en CosmosMotion*



*Figura 156. Modelo Virtual Lego Technic 8816-1, simulación en base en CosmosMotion*

## 8.2 Simulación del modelo virtual TnMm – 0367 – 1

Se trata de un modelo sencillo con mecanismo de piñón-cremallera y en el que también intervienen varios engranajes.

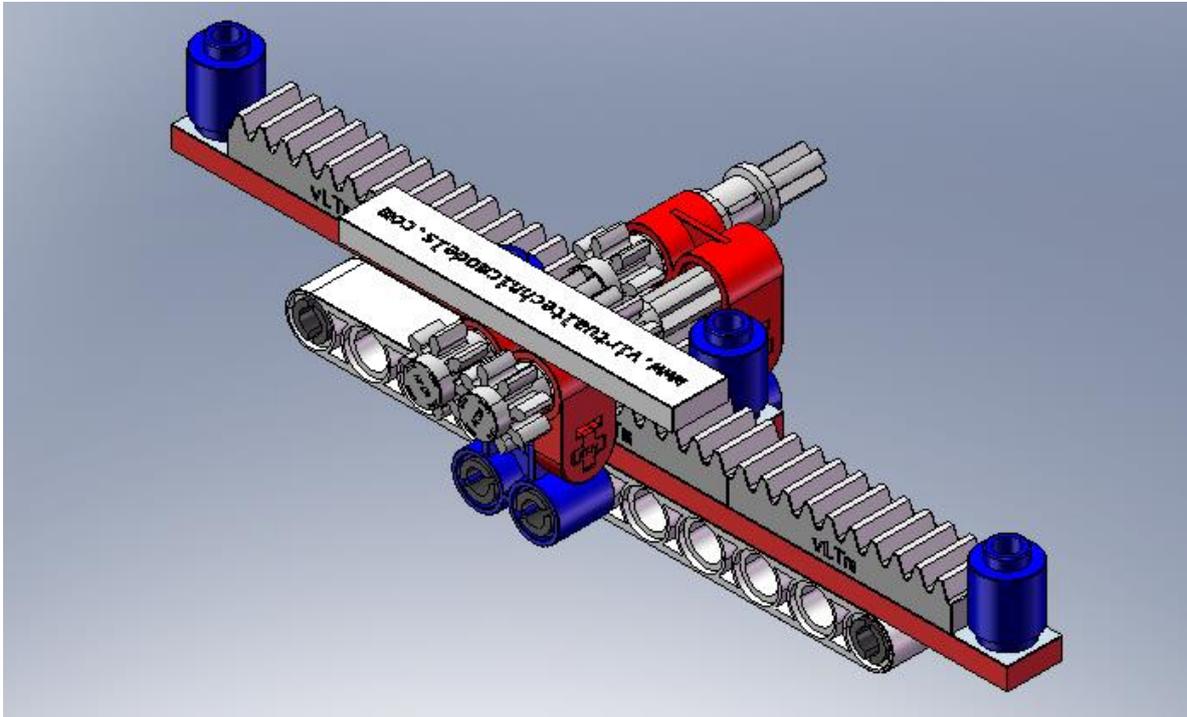


Figura 157. Modelo Virtual TnMm – 0367 – 1

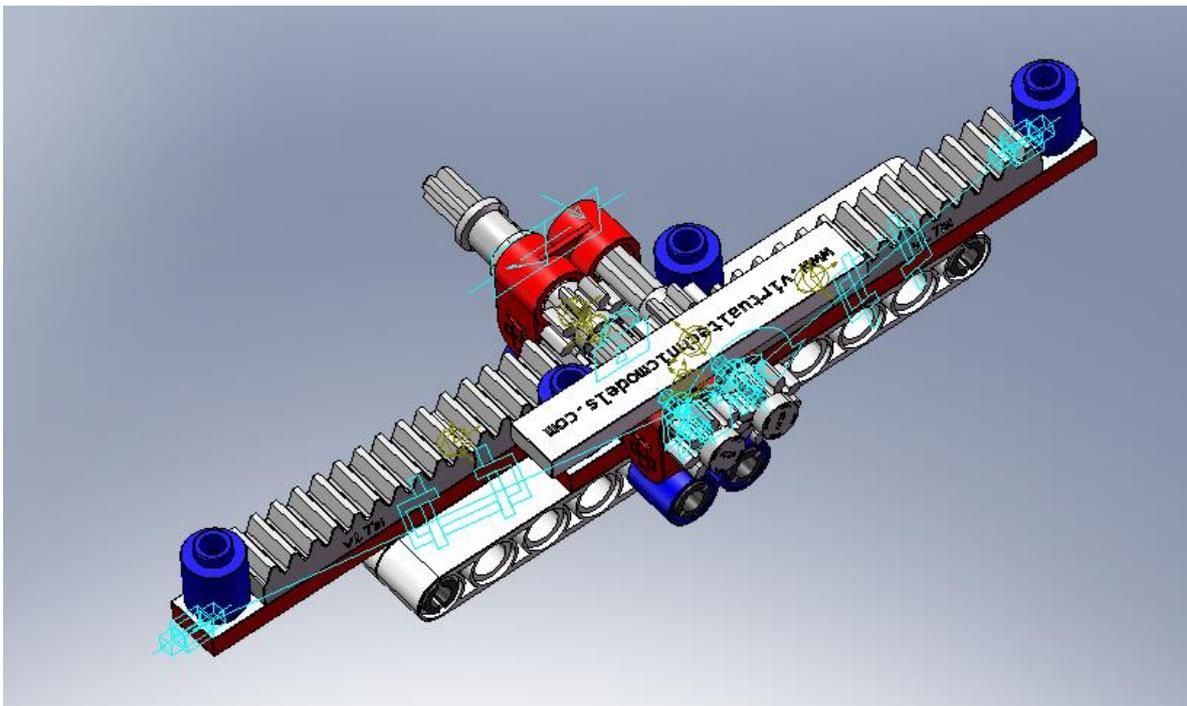


Figura 158. Modelo Virtual TnMm – 0367 – 1 autoalineado en CosmosMotion

### 8.3 Simulación del modelo virtual vLTm – 8854 – 1

El modelo 8854 – 1 se trata ya de un modelo más complejo en el que existe mayor cantidad de engranajes. También se observan varios cilindros pistones que llevan una configuración específica de pares cinemáticos, y la dirección se lleva a cabo por un mecanismo piñón- cremallera.



*Figura 159. Modelo real Lego Technic 8854 – 1*

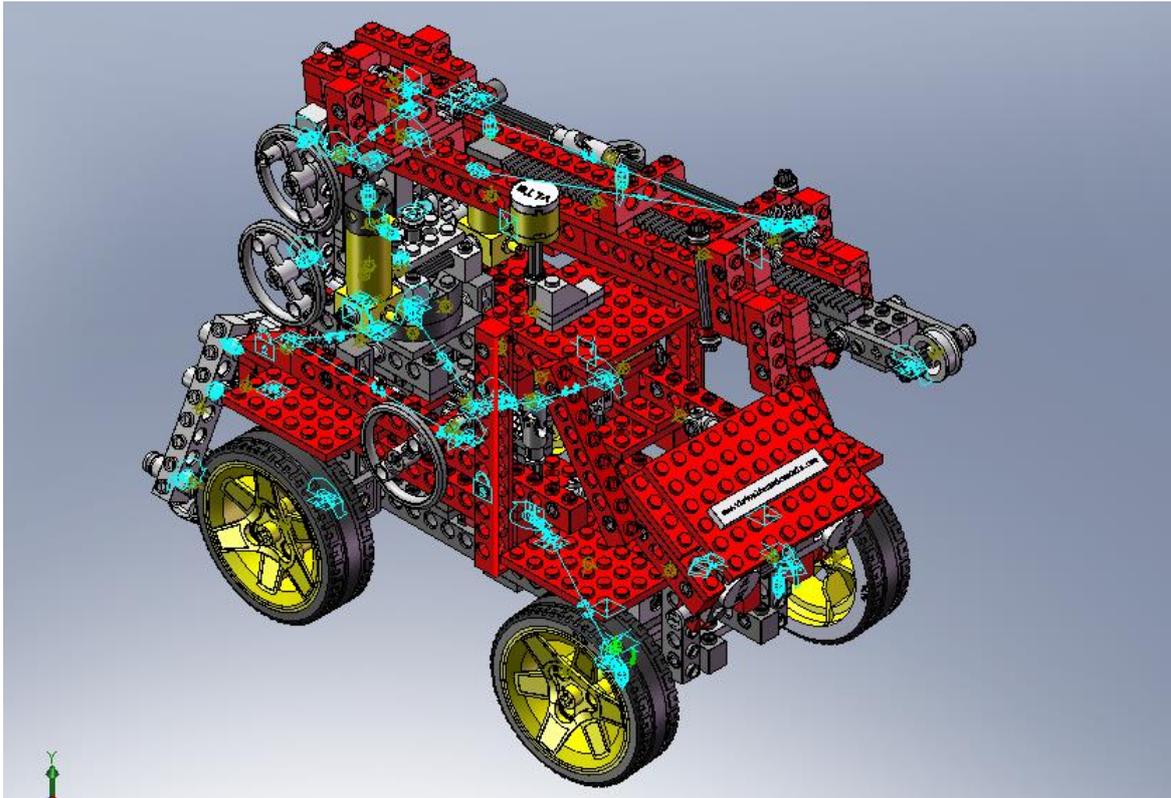


Figura 160. Modelo Virtual vLTm – 8854 – 1 autoalineado en CosmosMotion

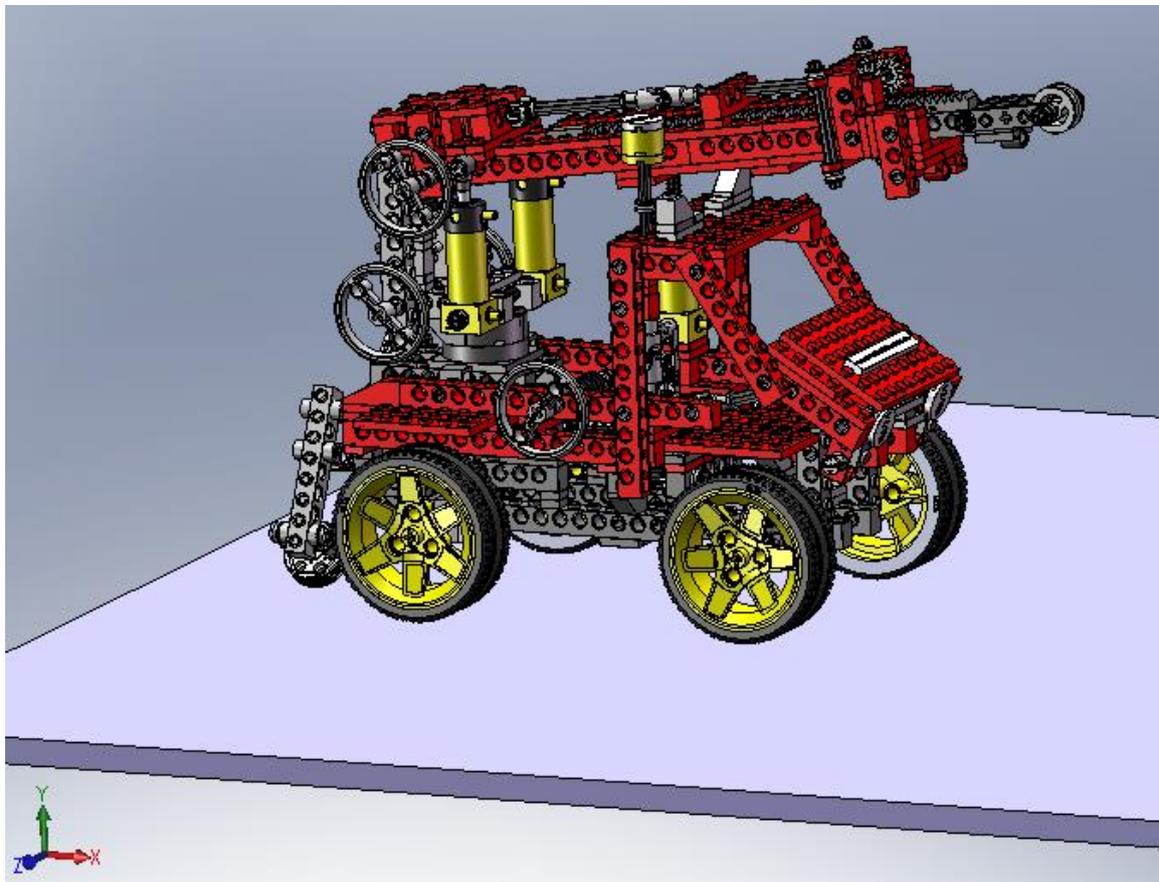


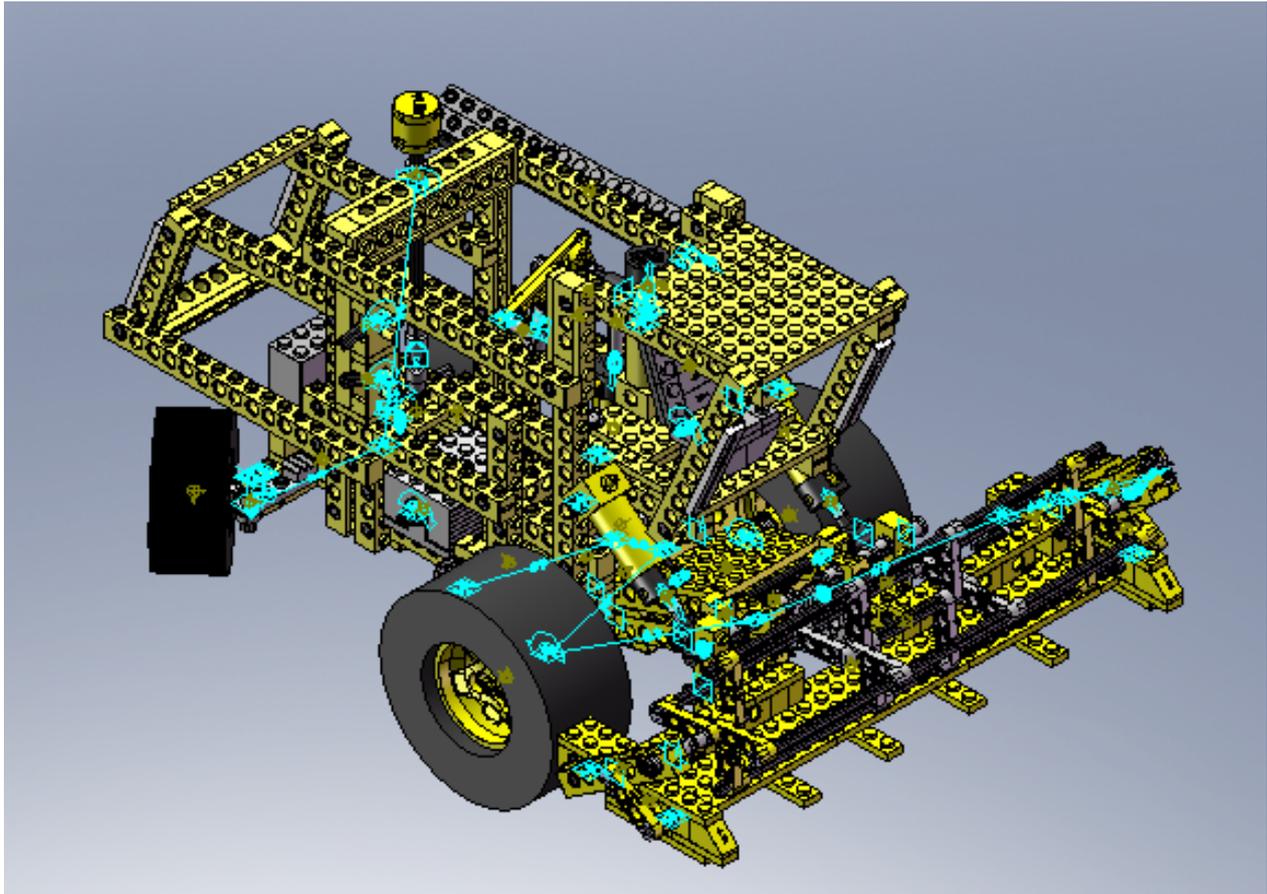
Figura 161. Modelo Virtual vLTm – 8854 – 1 simulado en base con CosmosMotion

## 8.4 Simulación del modelo virtual vLTm – 8862 – 2

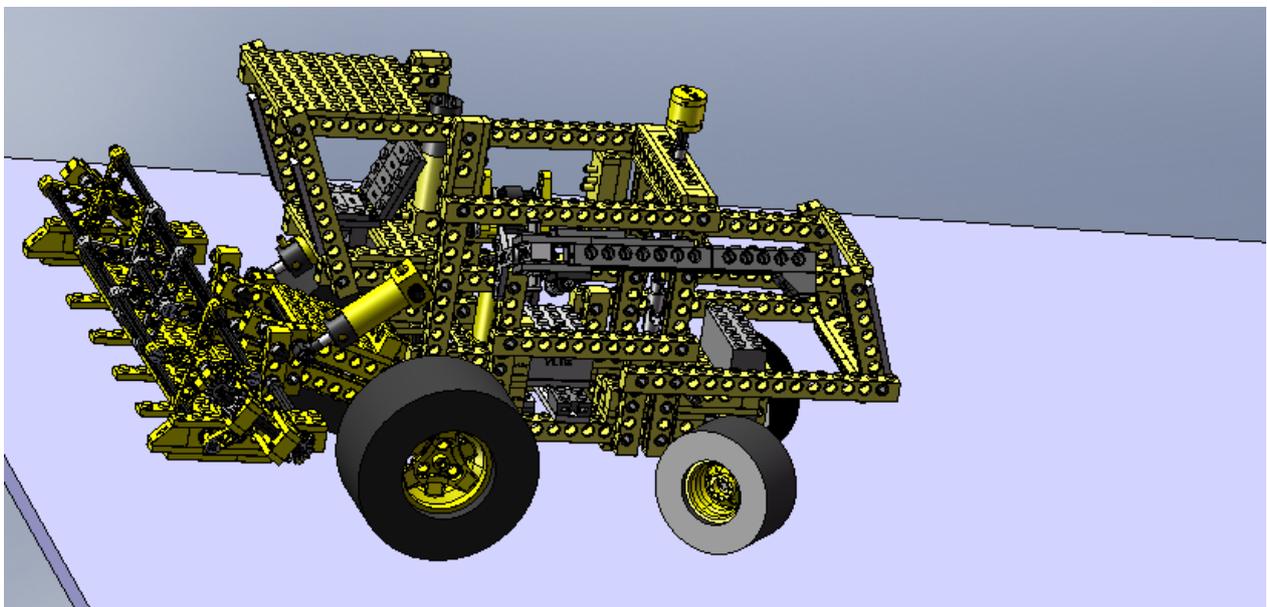
El modelo 8862-2 consiste en una cosechadora con parte eléctrica y neumática en la que se introducen en CosmosMotion actuadores, junta Hooke, tornillos sin fin entre otros.



*Figura 162. Modelo real Lego Technic 8862 – 2*



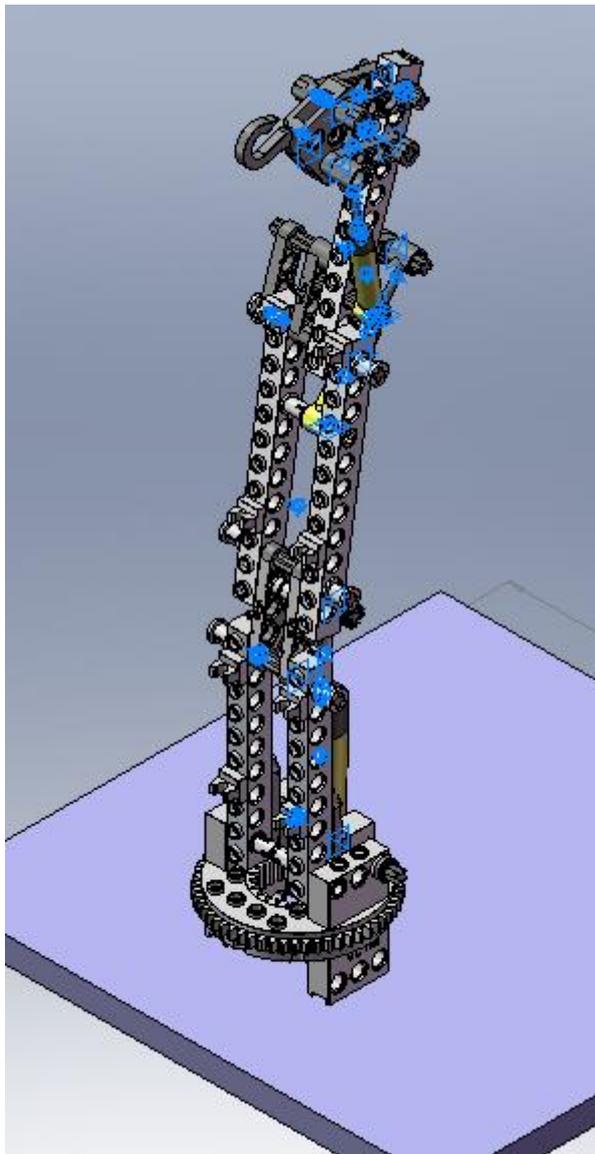
*Figura 163. Modelo Virtual vLTm – 8862 – 2 autoalineado en CosmosMotion*



*Figura 164. Modelo Virtual vLTm – 8862 – 2 simulado en base con CosmosMotion*

## 8.5 Simulación del modelo virtual vLTm – 8837 – 1

Este apartado tiene como objetivo realizar la simulación del modelo en diferentes pasos o “steps”, esto es, hacer que cada actuador neumático existente actúe en un determinado tiempo. Para ello, se utiliza este modelo que tiene gran semejanza a la grúa de una máquina de obras públicas.



PRIMER ACTUADOR

```
STEP(TIME, 3, STEP(TIME, 0, 0, 1, 27.1), 4, 0)
```

SEGUNDO ACTUADOR

```
STEP(TIME, 4, STEP(TIME, 1, 0, 2, 17.6), 5, 0)
```

TERCER ACTUADOR

```
STEP(TIME, 5, STEP(TIME, 2, 0, 3, 17.3), 6, 0)
```

Figura 165. Modelo Virtual vLTm – 8837 – 1 simulado en base con CosmosMotion

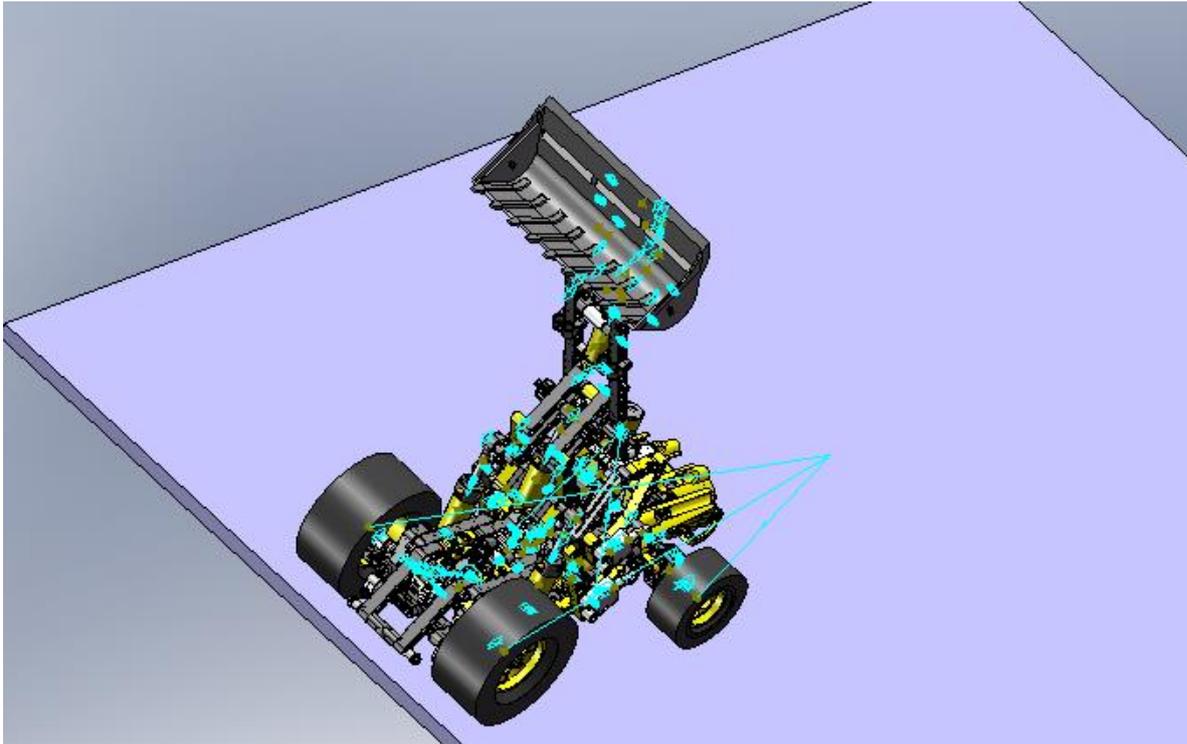
## 8.6 Simulación del modelo virtual vLTm – 8455 – 2

El modelo Lego Technic 8455-2 consiste en una excavadora accionada manualmente. Este modelo contiene en su parte trasera un diferencial, motor de tres cilindros, dirección a través de HOG y gran cantidad de neumáticos y cilindros. En cuanto a su simulación en CosmosMotion:

- Ha de levantarse/inclinarse el cucharón delantero mediante el funcionamiento por “steps” de sus actuadores.
- La dirección ha de cambiar constantemente y sus ruedas moverse a una velocidad tal que se aprecie su movimiento.
- El diferencial tiene una configuración específica de pares cinemáticos.
- Deben moverse todas las piezas respecto al chasis, teniendo en cuenta que no se monten unas encima de otras durante la simulación.



*Figura 166. Modelo real Lego Technic 8455 – 2*



*Figura 167. Modelo Virtual vLTm – 8455 – 2 autoalineado y simulado en base en CosmosMotion*

## 9. BIBLIOGRAFÍA

### Libros

- *LEGO Technic Tora no Maki* – Isogawa Yoshihito

### Páginas web

- [www.virtualtechnicmodels.com](http://www.virtualtechnicmodels.com)
- [www.lego.com](http://www.lego.com)
- [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com)



# PRESUPUESTO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	127
I.    CAPÍTULO 1º: SOFTWARE .....	1288
II.   CAPÍTULO 2: EQUIPO INFORMÁTICO .....	1289
IV.  CAPÍTULO 4: MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC.....	129
<b>2. RESUMEN</b> .....	130



# 1. INTRODUCCIÓN.

A continuación se presenta el presupuesto detallado de este proyecto. Pero es conveniente tener en cuenta algunas consideraciones que se han tenido en cuenta para su ejecución.

El presupuesto desglosado consta de 4 capítulos que son los siguientes:

- Capítulo 1: Software.
- Capítulo 2: Equipo informático.
- Capítulo 3: Modelos LEGO TECHNIC.
- Capítulo 4: Modelos Virtuales LEGO TECHNIC.

Es conveniente destacar que el presupuesto ha sido realizado desde dos puntos de vista diferentes.

Primero se ha dado un enfoque de proyecto a medida. Esto significa que todo el trabajo realizado durante el proyecto se lleva a cabo a petición de un único cliente que es quien lo solicita. Por tanto, todos los gastos (equipo informático, software, modelos virtuales, etc) corren de su cuenta. Todo esto conllevará consigo un coste elevado, ya que el tiempo invertido es mucho.

El otro enfoque que se ha decidido dar, es el de un proyecto destinado a uso comercial, es decir, que los modelos no son simulados para un único cliente. Aquí debe tenerse una visión más global y realizar una serie de estimaciones, precisiones, estudios de mercado evaluación de la utilización de los diferentes modelos virtuales para así poder realizar un presupuesto en el que se refleje el precio de venta e cada uno de los modelos virtuales.

## I. CAPÍTULO 1º: SOFTWARE

Para llevar al cabo el proyecto se ha utilizado una Aplicación CAD. El programa SolidWorks 2007. En este tipo de programas es necesario realizar el primer año una inversión más elevada para así poder obtener las licencias y posteriormente ir pagando una cuota anual de mantenimiento que permite tener el software actualizado.

Por tanto el programa SolidWorks 2007 SP3.1 junto con la herramienta CosmosMotion que este incorpora, ha sido el empleado para ensamblar y autoalinearse los modelos Lego Technic 8862-2 Jeep, 8862-2 Cosechadora y los distintos modelos de Isogawa Yoshihito. Y para realizar el ensamblaje del modelo 9395-2 Camión con montacargas.

PROGRAMA	UNIDADES	HORAS/AÑO	HORAS PROYECTO	PRECIO UNITARIO (€/ud.)	COSTE (€)
SOLIDWORKS 2007 + COSMOSMOTION	1	2080	300	5300	764.42

<b>TOTAL</b>	<b>764.42</b>
--------------	---------------

## II. CAPÍTULO 2: EQUIPO INFORMÁTICO

Para la realización adecuada de este proyecto, es necesario un ordenador que cumpla con las siguientes condiciones:

- Procesador: Intel® Core™ i7-4770.
- Frecuencia/Velocidad: 3.4 GHz.
- Memoria RAM: 8GB.
- Tarjeta Gráfica: Nvidia GeForce GT640 (4GB dedicados).

Se considera un período de amortización de 4 años.

OBJETO	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	HORAS LABORABLES / AÑO	AMORTIZACIÓN	HORAS TFG	COSTE
PC	1	1000	2080	25%	300	36.06

<b>TOTAL</b>	<b>36.06</b>
--------------	--------------

### III. CAPÍTULO 3: MODELOS LEGO TECHNIC

Para la realización del proyecto es de gran utilidad disponer de los modelos Lego Technic reales. El director de este proyecto tiene a disposición de los alumnos una extensa colección de modelos recopilada a lo largo de los años.

MODELO LEGO TECHNIC	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	COSTE
42008-1	1	119.99	119.99
42000-1	1	89.99	89.99
8455-2	1	399.90	399.90
<b>TOTAL</b>			<b>609.88</b>

### IV. CAPÍTULO 4: MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC

En este capítulo se explica detalladamente el coste de ensamblar, autoalinearse y simular de cada uno de los modelos Lego Technic Virtuales.

MODELO VIRTUAL LEGO TECHNIC	TAREA	HORAS	PRECIO (€/h)	PRECIO TAREA (€)	COSTE DEL MODELO (€)
42008-1	Montaje del modelo virtual	75	30	2250	2250
42000-1	Montaje del modelo virtual	70	30	2100	2100
8455-2	Montaje del modelo virtual	8	30	240	1800
	Autoalineación	40	30	1200	
	Simulación	12	30	360	
<b>TOTAL</b>					<b>6150</b>

## 2. RESUMEN

Por último se va a resumir en una tabla el coste total de cada uno de los capítulos y la suma total. Además se incluirá un 6% de Beneficio Industrial y un 21% en concepto de IVA.

Como se ha explicado al principio de este documento, el precio indicado como total, corresponde con el de un trabajo realizado a medida, es decir, demandado por un “cliente” y no un posible precio de venta de los modelos virtualizados. Para obtener el precio de esto último sería necesario realizar un estudio de mercado y una previsión de la demanda.

CAPÍTULO	COSTE (€)
1. SOFTWARE	764.42
2. EQUIPO INFORMÁTICO	36.06
3. MODELOS LEGO TECHNIC	609.88
4. MODELOS LEGO TECHNIC VIRTUALES	6150
<b>SUBTOTAL</b>	<b>7560.36</b>

Para poder obtener el total, se debe incluir un 6% de beneficio industrial y sumar el 21% del IVA.

SUBTOTAL	7560.36
BENEFICIO INDUSTRIAL (6%)	453.62
IVA (21%)	1587.68
<b>TOTAL</b>	<b>9601.66</b>

El presupuesto total del TFG asciende a un total, en Euros, de: Nueve mil seiscientos uno con sesenta y seis.