



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



# Contenido

Memoria.....5

Presupuesto.....79



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



# Memoria

## Índice:

1.	Introducción al TFG .....	9
1.1.	Resumen y objeto del proyecto .....	9
1.2.	Planteamiento profesional.....	9
1.3.	Competencias adquiridas .....	10
2.	Introducción a Lego© .....	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.	Componentes Lego© Technic.....	12
2.5.	Máquinas reales y modelos Lego© Technic equivalentes.....	13
2.6.	Modelos Isogawa Yoshihito.....	14
3.	Ensamblaje .....	15
3.1.	Presentación y objetivos .....	15
3.2.	Procedimiento del montaje.....	15
3.2.1	Elección del modelo .....	15
3.2.2	Selección de los componentes .....	16
3.2.3	Ensamblado .....	16
3.3.	Ensamblaje en SolidWorks 2007 .....	17
3.3.1	Metodología .....	17
3.3.2	Nomenclatura.....	17
3.3.3	Relaciones de posición .....	18
3.3.3.1.	Relaciones de posición estándar .....	21
3.3.3.2.	Relaciones de posición avanzadas.....	24
3.3.4	Creación de elementos flexibles .....	27
3.3.5	Comprobación .....	28
3.4.	Modelos virtualizados .....	30



3.4.1	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-002_2007.....	30
3.4.2	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-008_2007.....	30
3.4.3	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-009_2007.....	31
3.4.4	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-013_2007.....	31
3.4.5	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-026_2007.....	32
3.4.6	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-037_2007.....	32
3.4.7	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-040_2007.....	33
3.4.8	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-051_2007.....	33
3.4.9	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-059_2007.....	34
3.4.10	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-062_2007.....	34
3.4.11	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-075_2007.....	35
3.4.12	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-079_2007.....	35
3.4.13	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-093_2007.....	36
3.4.14	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-098_2007.....	36
3.4.15	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-102_2007.....	37
3.4.16	vLTm_ASSEMBLY_ISOGAWA-107_2007.....	37
3.4.17	vLTm_ev3-0024_2016.....	38
3.4.18	vLTm_ev3-0050_2016.....	38
3.4.19	vLTm_ev3-0053_2016.....	39
3.4.20	vLTm_ev3-0069_2016.....	39
3.4.21	vLTm_ev3-0134_2016.....	40
3.4.22	vLTm_ev3-0125_2016.....	40
3.4.23	vLTm_pw-078_2016.....	41
3.4.24	vLTm_8862-1_2016.....	42
3.4.25	vLTm_8048-1_2016.....	43
3.4.26	vLTm_8052-1_2017.....	44
3.4.27	vLTm_42000-2_2017.....	45
3.4.28	vLTm_8070-1_2017.....	46
3.4.29	vLTm_42043-1_2017.....	47
4.	Compactación.....	49



5.	Simulación del modelo cinemático autoalineado .....	51
5.1.	Introducción .....	51
5.2.	Conceptos básicos .....	51
5.2.1	Par cinemático .....	51
5.2.2	Grados de libertad .....	51
5.3.	Movilidad de mecanismos .....	51
5.3.1	Mecanismos planos .....	52
5.3.2	Mecanismos espaciales .....	52
5.4.	Mecanismos autoalineados .....	52
5.5.	Modelo autoalineado en SolidWorks con CosmosMotion .....	53
5.5.1	Introducción a CosmosMotion .....	53
5.5.2	Piezas .....	53
5.5.3	Pares cinemáticos (cojinetes) .....	53
5.5.3.1.	Revolución .....	54
5.5.3.2.	Traslacional .....	55
5.5.3.3.	Cilíndrico .....	56
5.5.3.4.	Esférico .....	56
5.5.3.5.	Universal .....	56
5.5.3.6.	Tornillo .....	57
5.5.3.7.	Planar .....	57
5.5.3.8.	Fijo .....	58
5.5.3.9.	En línea .....	58
5.5.3.10.	En plano .....	58
5.5.3.11.	Orientación .....	59
5.5.3.12.	Paralelo .....	59
5.5.3.13.	Perpendicular .....	60
5.5.4	Acopladores .....	60
5.5.5	Grados de libertad del mecanismo .....	61
5.6.	Suspensiones .....	62
5.7.	Movimientos en los pares cinemáticos .....	62



5.7.1	Constante .....	62
5.7.2	Escalón.....	62
5.7.3	Armónica .....	63
5.7.4	Spline.....	63
5.7.5	Expresión matemática.....	63
5.8.	Simulación.....	63
5.9.	Modelos simulados .....	65
5.9.1	8816-1 .....	65
5.9.2	8459-2 .....	66
5.9.3	EV3-0125 .....	66
5.9.4	8862-1 .....	67
5.9.5	pw-078.....	68
5.9.6	8048-1 .....	69
5.9.7	8052-1 .....	70
5.9.8	42000-2 .....	71
5.9.9	8070-1 .....	72
5.9.10	42043-1 .....	73
6.	Resumen.....	75
7.	Bibliografía .....	77





# 1. Introducción al TFG

## 1.1. Resumen y objeto del proyecto

El propósito de este proyecto es el de emplear las herramientas de diseño en ingeniería para comprender los movimientos relativos que existen entre las diferentes piezas de las máquinas mecánicas.

Para llevarlo a cabo, en lugar de usar maquinaria real, se ha utilizado como referencia un juguete de construcción modular, que presenta diferentes grados de tamaño y complejidad. El producto se llama comercialmente “Lego® Technic”. Sus modelos son utilizados por universidades de varios países para el estudio de los mecanismos en máquinas mecánicas, gracias a su sencillez de montaje y semejanza a máquinas reales.

El método que se ha seguido para la elaboración de este TFG es el siguiente:

1. Para empezar, hay que crear un modelo virtual en un programa de CAD, del modelo seleccionado. Para ello debemos de partir de unos componentes virtuales que son suministrados por el tutor del TFG y tras definir sus relaciones de posición entre ellos conseguiremos una réplica virtual del modelo de Lego® Technic elegido.
2. Tras la creación del modelo virtual, se lleva a cabo un proceso de compactación. Esto significa que cada pieza que forma parte el modelo virtual, se transforma para que tenga las características de un componente, es decir, ser considerado como una única entidad virtual. El motivo de esta operación es el de facilitar el proceso de simulación posterior.
3. El siguiente paso consiste en el montaje del modelo virtual con las piezas ya compactadas. Durante este paso se restringen y limitan los grados de libertad del modelo, creando un modelo cinemático autoalineado, es decir sin restricciones en exceso. Por último, se procede a la simulación dinámica del modelo virtual en un software de análisis de elementos finitos.

Es por ello que podemos concluir que los conceptos aprendidos pueden ser útiles y demandados por el mercado laboral, ya sea bien creando modelos reales de productos de Lego® Technic o mediante la aplicación de las herramientas de diseño CAD y simulaciones cinemáticas en el sector industrial.

## 1.2. Planteamiento profesional

Se supone que llega a nuestro despacho profesional un cliente con un prototipo en miniatura de una máquina que quiere fabricar a tamaño real. El prototipo está creado con piezas Lego® Technic reales. El cliente encarga que se averigüe los tipos de cojinetes que se deberían de colocar entre las piezas de la máquina para que sea autoalineada, es decir, que la vida de la máquina sea lo más larga posible y su coste de mantenimiento sea lo menor posible. Está en contra de la obsolescencia programada.



El encargo es aceptado. Se le comunica el cliente que el resultado del trabajo será:

1. Un modelo virtual operativo de la máquina que ha traído en SolidWorks 2007.
2. Un modelo en CosmosMotion con los cojinetes que habría que colocar en cada par cinemático.
3. Una simulación cinemática y dinámica del prototipo para que así pueda mejorar el prototipo punto de vista desde el funcional y que podría formar parte de la información comercial del producto final.

### 1.3. Competencias adquiridas

La realización de este proyecto contribuye a complementar, la adquisición de las siguientes competencias específicas (E) y generales (G), que figuran en la Memoria de Verificación del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales:

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 y de resistencia de materiales

18E: Aplicar los conocimientos de ingeniería mecánica y de materiales a conceptos o desarrollos 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 sintetizan e integran las competencias adquiridas en las enseñanzas

26E: Transmitir conocimientos, habilidades, destrezas, procedimientos, resultados, opiniones o informes técnicos de forma efectiva en el ámbito de las tecnologías industriales a un público tanto especializado como no especializado

27E: Asesorar y realizar actividades que impliquen la realización de cálculos, estudios, informes, planes de actuación y otros trabajos análogos en el ámbito industrial

32E: Diseñar, calcular y ensayar todo tipo de máquinas y dispositivos industriales, así como de sus sistemas de accionamiento, de seguridad y de 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. Introducción a Lego®

### 2.1. El modelo Lego® Technic

Legó® es una empresa dedicada a la fabricación de juguetes de construcción, con los que se pueden montar diferentes modelos mediante el ensamblaje de piezas de plástico.

Legó® Technic es una de las líneas de productos de la empresa Legó®. El propósito de esta serie es la de crear modelos mucho más avanzados, con mecanismos complejos. Estos sets se caracterizan por la presencia de piezas especiales como engranajes, ejes o ruedas. Además, algunos también incluyen actuadores neumáticos y motores eléctricos. Estos elementos permiten crear modelos que imitan fielmente a máquinas reales, gracias a que es posible incorporar mecanismos de dirección, vehículos con suspensión o brazos extensibles.

### 2.2. El modelo Lego® Technic virtual

El modelo Legó® Technic virtual es una representación en un entorno virtual de un modelo Legó® Technic real. Si uno de los objetivos de los juguetes de construcción es desarrollar la imaginación y las habilidades manuales del usuario, estos modelos comparten los aspectos anteriores y además añade el objetivo adicional de desarrollar el uso de las aplicaciones de CAD en el diseño de máquinas.

Mientras que en la construcción de un modelo Legó® Technic real se parte de un conjunto de componentes reales de plástico con los que obtener una máquina siguiendo los pasos de las instrucciones, en los modelos virtuales se parte de esos mismos componentes ya virtualizados para crear un modelo virtual equiparable al real, pero con la característica de que se han de definir como piezas de la máquina real, aquellos componentes que no tienen movimiento relativo entre ellos. Esto quiere decir que el modelo virtual no es una simple copia del modelo real, ya que se han identificado todas las piezas de la máquina real.



Fig. 1 Piezas Lego® Technic virtuales

### 2.3. Utilidad de los modelos Lego© Technic virtuales

Para conocer la utilidad que pueden tener los modelos Lego© Technic virtuales debemos conocer los siguientes datos.

- En la actualidad el diseño mecánico se realiza con aplicaciones informáticas como SolidWorks, Catia, NX, etc.
- Para aprender a manejar estas herramientas informáticas es necesario un periodo de formación para poder sacar todo su potencial. Para ello es recomendable la posibilidad de practicar con modelos.
- Para poder diseñar sistemas mecánicos nuevos e ingeniosos de las máquinas que nos rodean hay que conocer primero el mayor número posible de los mecanismos que las forman.
- No es posible entender de forma intuitiva el funcionamiento de los mecanismos que se describen en libros, a no ser que ya se tenga una experiencia previa.

Por eso los modelos virtuales podrían solucionar los aspectos anteriores ya que:

- Los modelos han sido creados con uno de los programas informáticos nombrados anteriormente, el SolidWorks 2007.
- Este software permite usar las opciones de modelado desde su comienzo. Entre ellas la opción de ensamblar piezas mecánicas.
- Estos modelos están compuestos por toda clase de mecanismos con los que aprender las técnicas para su aplicación en máquinas reales.
- No es necesaria la intuición para comprender el funcionamiento de los mecanismos ya que la aplicación permite su simulación cinemática.

### 2.4. Componentes Lego© Technic

Los componentes de Lego© Technic están diseñados de modo que sea posible su ensamblaje entre ellos para poder crear todo tipo de mecanismos. Este diseño permite que no sea difícil la creación de los modelos virtuales, ya que todos componentes encajan perfectamente entre sí.

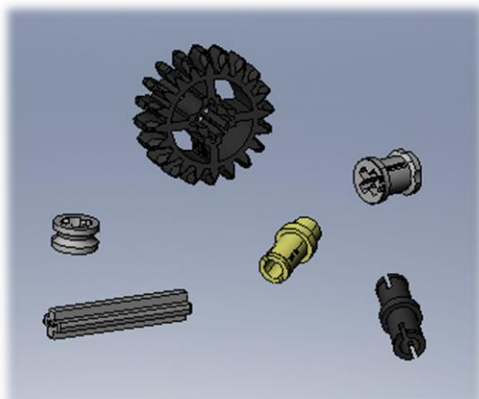


Fig. 2 Componentes Lego© Technic virtuales



Fig. 3 Componentes Lego© Technic reales

## 2.5. Máquinas reales y modelos Lego® Technic equivalentes

A pesar de que los productos de la serie Lego® Technic son un producto lúdico para todas las edades, es posible recrear mecanismos complejos a escala de máquinas reales con gran realismo.

Por ejemplo, es posible construir ejes que transmitan movimiento, cajas de cambio diferenciales, suspensiones, dirección de vehículos, cuadriláteros articulados, etc. Todos estos mecanismos pueden ser empleados para reproducir a escala cualquier máquina real.



Fig. 5 Ejemplo de suspensión



Fig. 4 Suspensión en modelo Lego® Technic virtual



Fig. 7 Remolque real

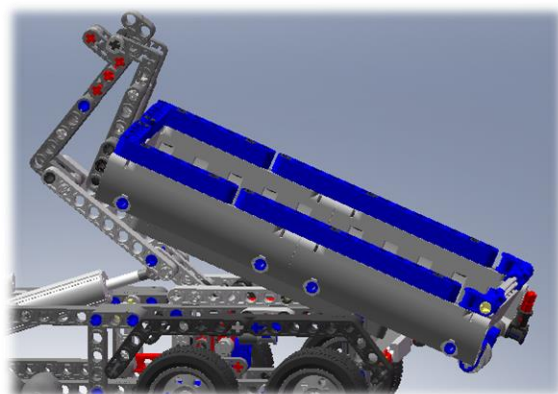


Fig. 6 Remolque virtual



Fig. 9 Camión Mercedes Arocs



Fig. 8 Camión Mercedes Arocs virtual

## 2.6. Modelos Isogawa Yoshihito

Isogawa Yoshihito es el autor de varios libros en los que se explica de forma gráfica como crear un gran número de mecanismos a partir de componentes de Lego® Technic. Los montajes que aparecen en los libros de Yoshihito se caracterizan por ser sencillos y por no ser necesarios un gran número de componentes para construirlos. Estos mecanismos se encuentran clasificados según su tipo de movimiento.

Para la primera parte del TFG se ha utilizado el libro “Tora no Maki” y “The LEGO® MINDSTORMS EV3 Idea Book” con el fin de aprender el funcionamiento de SolidWorks 2007. Para ello se ha construido varios de los montajes que aparecen en sus libros, intentando emplear el mayor número posible de mecanismos distintos.

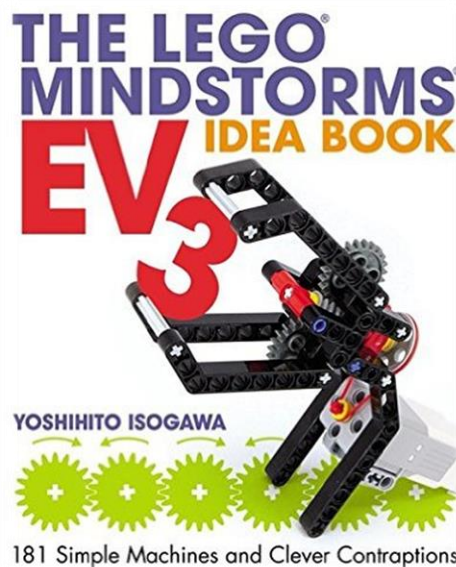


Fig. 10 Libro: The Lego® Mindstorms EV3 Idea Book

## 3. Ensamblaje

### 3.1. Presentación y objetivos

En esta primera fase se aborda el montaje del modelo virtual. Los diferentes componentes son ensamblados usando el manual de instrucciones del modelo Lego® Technic como material de referencia.

Por un lado, para el montaje del modelo Lego® Technic real, se parte de los diferentes componentes de plástico, siguiendo las instrucciones al pie de la letra. Sin embargo, para la creación del modelo Lego® Technic virtual se parte de unos componentes ya virtualizados, con los que se creará la máquina virtual, con la característica fundamental de que los componentes serán ensamblados de modo que todos los componentes que no tengan movimiento relativo entre ellos formarán parte de una pieza. Por este motivo, no es posible seguir las instrucciones al pie de la letra, sino que es necesario identificar previamente cuales son las diferentes piezas que conformarán el modelo. Este proceso, puede resultar complicado cuando el número de componentes del modelo es alto, por eso resulta casi imprescindible contar con un modelo real para facilitar esta tarea.

Esto quiere decir que el modelo final no es una simple reproducción de un modelo real en un entorno virtual, sino que, además, siguiendo este método de trabajo se identifican y crean por separado las diferentes piezas y que una vez que ya se han identificado y creado todas las piezas, se ensambla el modelo final como un conjunto de piezas.

Durante esta parte del trabajo, se persigue la idea de aprender a manejar las herramientas de CAD, en este caso, será en SolidWorks 2007, así como comprobar que el movimiento de los mecanismos es el correcto.

### 3.2. Procedimiento del montaje

Independientemente del modelo Lego® Technic seleccionado y del programa de CAD escogido para su creación, los pasos a la hora de crear el modelo virtual son los siguientes:

#### 3.2.1 Elección del modelo

Empezaremos con los modelos más básicos, para acabar con los más grandes y complejos. Al principio lo recomendable es empezar por los más sencillos para ir aprendiendo poco a poco y familiarizarse con el entorno de trabajo. Una vez se vaya cogiendo más soltura para la creación de los modelos, se pasará progresivamente a modelos más complicados.

Los primeros modelos serán algunos de los que aparecen en el libro Tora no Maki del japonés Isogawa Yoshihito y posteriormente se pasará a los modelos oficiales de Lego® Technic.

### 3.2.2 Selección de los componentes

Cuando ya tenemos elegido el modelo para montar, hay que identificar y seleccionar todos los componentes que serán necesarios para el ensamblaje del modelo. La mejor forma para llevar a cabo esta tarea es obtener el inventario de la web: [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com) en la que solo tendremos que buscar el modelo y aparecerán todos los componentes que lo forman.















Regular Items:						
Parts:						
		1	<a href="#">42043stk01</a>	<b>Sticker for Set 42043 - (23697/6124276)</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Sticker</a>	<a href="#">PG</a>	
		1	<a href="#">87618</a>	<b>Black Bar 5L with Handle (Friction Ram)</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Bar</a> 4623113	<a href="#">PG</a>	
		5	<a href="#">3941</a>	<b>Black Brick, Round 2 x 2 with Axle Hole</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Brick, Round</a> 614326	<a href="#">PG</a>	
		1	<a href="#">21826</a>	<b>Black Hose, Pneumatic 4mm D. V2 Precut 72 mm</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Hose, Pneumatic 4mm D.</a> 6119405	<a href="#">PG</a>	
		4	<a href="#">21830</a>	<b>Black Hose, Pneumatic 4mm D. V2 Precut 216 mm</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Hose, Pneumatic 4mm D.</a> 6119425	<a href="#">PG</a>	
		4	<a href="#">21833</a>	<b>Black Hose, Pneumatic 4mm D. V2 Precut 240 mm</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Hose, Pneumatic 4mm D.</a> 6119444	<a href="#">PG</a>	
		1	<a href="#">21835</a>	<b>Black Hose, Pneumatic 4mm D. V2 Precut 296 mm</b> <a href="#">Catalog</a> ; <a href="#">Parts</a> ; <a href="#">Hose, Pneumatic 4mm D.</a> 6119448	<a href="#">PG</a>	

Fig. 11 Listado de componentes

Como en esta web la nomenclatura de los componentes es la misma que en nuestra librería de componentes virtuales, la búsqueda es muy sencilla.

En el caso de que se trate de un modelo que no sea oficial, como los de Isogawa Yoshihito, hay que identificar las piezas por nuestra cuenta de manera visual ayudándonos del manual de instrucciones.

### 3.2.3 Ensamblado

Tras analizar e identificar las diferentes piezas que formarán parte del modelo, se construirá cada una de las diferentes piezas. Para la creación de las piezas, todos sus componentes tendrán que quedar completamente definidos de modo que la pieza se comporte como un único elemento sin movimientos relativos entre sus componentes. Partiendo de todas las piezas, se ensamblará el modelo final en los que se definirán las restricciones necesarias para dar forma a





la máquina y que sus piezas tengan movimientos relativos entre ellas, de forma que formen los distintos mecanismos que sean necesarios.

### 3.3. Ensamblaje en SolidWorks 2007

#### 3.3.1 Metodología

A la hora de crear los modelos hay una serie de normas que seguir.

Lo primero de todo será ir de componente a componente editando su color por el que haga falta. En el caso de que algún componente pueda tener varios colores en un mismo modelo, se elegirá el color que sea más repetido. Posteriormente, cuando haya que colocar ese componente y su color no sea el que corresponde podrá ser editado para ese caso particular. De esta forma se reduce lo máximo posible el número de veces que hay que colorear los componentes.

En la creación de las piezas, siempre hay que establecer la pieza principal, que también puede ser llamada pieza fija o chasis, como la pieza número 1. La particularidad de esta pieza es que aparte de ser la pieza más grande del modelo, posteriormente en el modelo final estará en una posición fija y no podrá moverse en ninguna dirección. El resto de piezas se numerarán según se vayan creando por orden cronológico y en el modelo final sí que tendrán un movimiento relativo respecto a la pieza fija o chasis.

En el caso de que las piezas estén formadas por más de 10 componentes habrá que trocearlas, en tantos trozos sean necesarios, de modo que ninguno de esos trozos supere los 10 componentes. Esto quiere decir que para una pieza que esté formada por muchos componentes el proceso de montaje consistirá en la creación de varios trozos y posteriormente esos trozos serán ensamblados para crear la pieza final, de modo que la pieza final sea el conjunto de varios trozos. El motivo de poner un límite de 10 componentes es el de mejorar el rendimiento computacional ya que, si no se dividiera en trozos, las piezas grandes aumentarían la carga de trabajo del ordenador y sería muy complicado y lento trabajar con modelos grandes.

Cuando ya están las piezas creadas, se procede a añadirlas al montaje final. Como está explicado anteriormente la primera pieza del ensamblaje final, será la pieza fija o chasis, y el resto de piezas se irán añadiendo por orden cronológico.

#### 3.3.2 Nomenclatura

Para que el ensamblaje final, sus piezas y sus componentes estén bien organizados y sean fácilmente identificables hay que nombrar cada archivo siguiendo una determinada nomenclatura.

- Los componentes que se cogen de la librería virtual ya vienen todos con su nombre correspondiente y no hay que cambiarlo. Su formato es el siguiente:

vLTm\_”aaaaa” (nombre descriptivo).sldprt



Donde “aaaaa” corresponde a la numeración del componente y viene seguido por un nombre descriptivo para facilitar su búsqueda.

- Las piezas que hay que crear llevan la siguiente nomenclatura:

vLTm\_XXXXX-x\_part-yyy000\_2017.sldasm

Donde “XXXXX-x” hace referencia al modelo Lego© Technic que se está creando.

“yyy” define el número de la pieza. La primera pieza será la 001 y con cada pieza nueva que se vaya creando se irá subiendo el número de forma ordenada.

- Cuando las piezas estén formadas por más de 10 componentes, habrá que trocearlas de manera que ningún trozo tenga más de 10 componentes. La nomenclatura de los trozos será de la siguiente forma:

vLTm\_XXXXX-x\_part-yyyzzz\_2017.sldasm

Se usará el mismo procedimiento para nombrar los trozos que para nombrar las piezas, con la diferencia de que “zzz” será sustituido por el número del trozo.

- El ensamblaje final tendrá la siguiente nomenclatura.

vLTm\_XXXXX-x\_2017.sldasm

Donde “XXXXX-x” corresponde al modelo Lego© Technic que se está creando.

El número de dígitos necesarios para definir las piezas y el modelo final puede variar dependiendo del tamaño y la complejidad del modelo a crear.

### 3.3.3 Relaciones de posición

Las relaciones de posición son las restricciones que nos permite añadir SolidWorks 2007 para indicar la posición en la que queda cada componente o pieza. SolidWorks nos ofrece 2 tipos de relaciones de posición: las estándar y las avanzadas. El primer tipo es el más habitual ya que nos permite prácticamente definir cualquier orientación y posición. El segundo tipo se emplea en menor medida ya que generalmente sirve para restringir piezas que no tienen un contacto fijo directo entre ellas, como puede ser un engranaje.



Fig. 12 Árbol de restricciones en SolidWorks 2007

Al añadir las relaciones de posición aparecen agrupadas todas juntas en un apartado ordenadas cronológicamente. Además, las restricciones de posición también aparecen debajo de cada componente o pieza, lo que ayuda para localizar los posibles errores y su eliminación o modificación durante el ensamblado.

El método de asignar las relaciones de posición es muy sencillo. Basta con elegir los elementos sobre los que queremos restringir sus movimientos. Lo más habitual es elegir las caras de los componentes que queremos restringir, pero también se pueden restringir, aristas y puntos. Tras seleccionar estos dos elementos el programa automáticamente escogerá un tipo de relación de posición y en el caso de que no sea el que queremos podremos cambiarlo por el que queramos.

Antes de empezar a añadir las restricciones de posición hay que establecer un componente o pieza como fijos. Esto quiere decir que no se podrá mover en ninguna dirección del espacio. Además, la posición del origen de coordenadas de este componente o pieza deberá coincidir con el origen de coordenadas del espacio de trabajo. De esta forma conseguimos que la pieza o ensamblaje final queden perfectamente orientados.

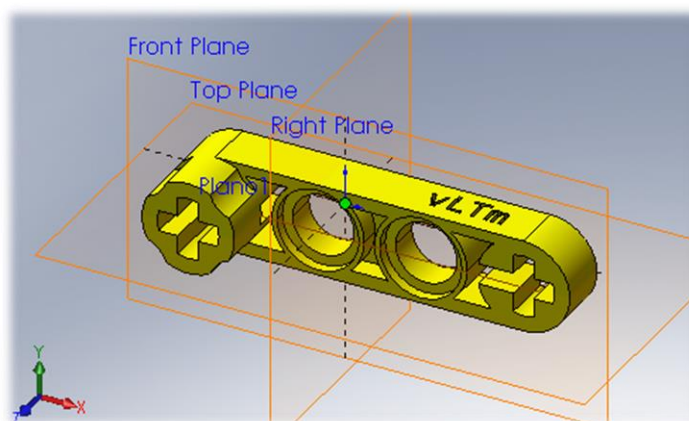


Fig. 13 Componente coincidente con el origen de coordenadas

En algunas ocasiones, cuando hay que añadir relaciones de posición a algunos componentes con geometrías complejas, no es posible hacerlo directamente, si no que tenemos que ayudarnos de geometría auxiliar para poder llevarlo a cabo. Esto significa que, en lugar de seleccionar las superficies o aristas de los componentes, tenemos que establecer puntos o ejes en las piezas para poder añadir posteriormente ayudándonos de estos elementos que hemos creado para poder crear las relaciones de posición.

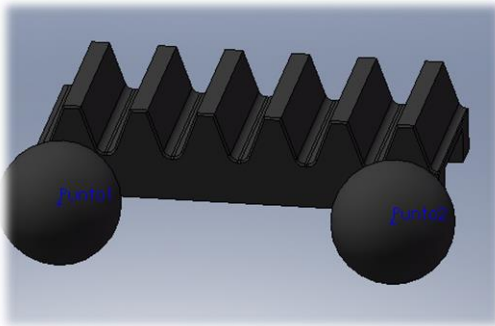


Fig. 14 Componente1 con puntos auxiliares

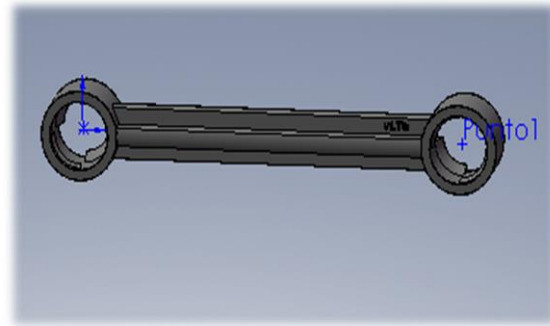


Fig. 15 Componente2 con puntos auxiliares

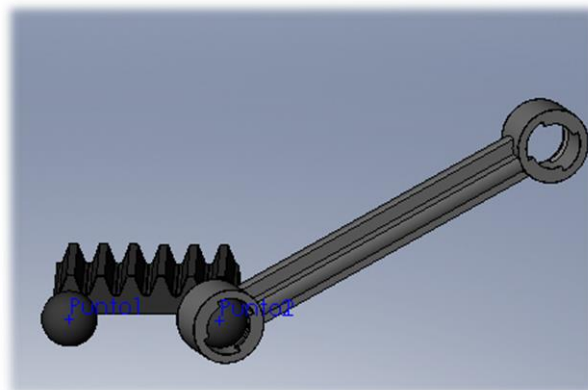


Fig. 16 Relación de posición entre componentes con geometría auxiliar

Finalmente, solo falta decir que no existe una única forma de determinar las posiciones de un componente en el espacio, sino que el número de maneras de hacerlo es enorme y siempre que se haya hecho correctamente se llega al mismo resultado.

### 3.3.3.1. Relaciones de posición estándar

- Coincidente: Permite que las entidades seleccionadas tengan en común un mismo plano, recta o punto.

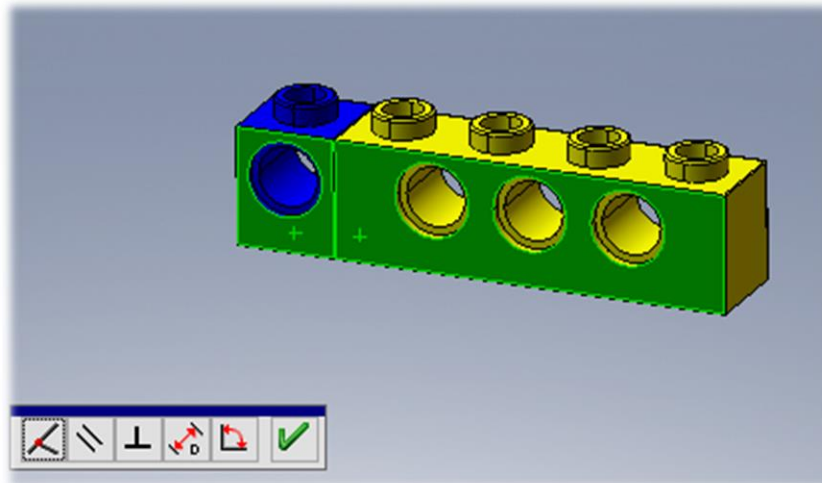


Fig. 17 Ejemplo de relación de coincidencia

- Paralelo/perpendicular: Con esta relación dos caras o rectas de distintos componentes permanecerán paralelas o perpendiculares.

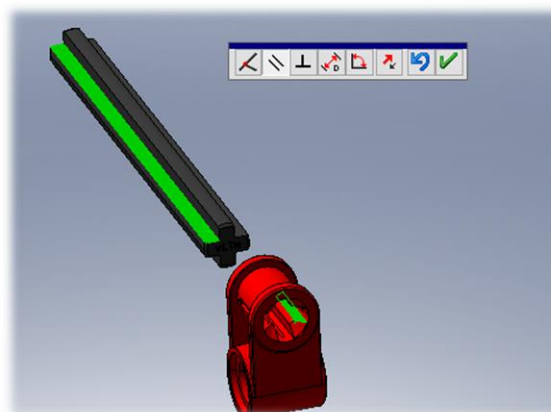


Fig. 18 Ejemplo de relación de paralelismo

- Tangente: Sirve para que dos superficies, siendo al menos una de ellas curva estén en contacto.

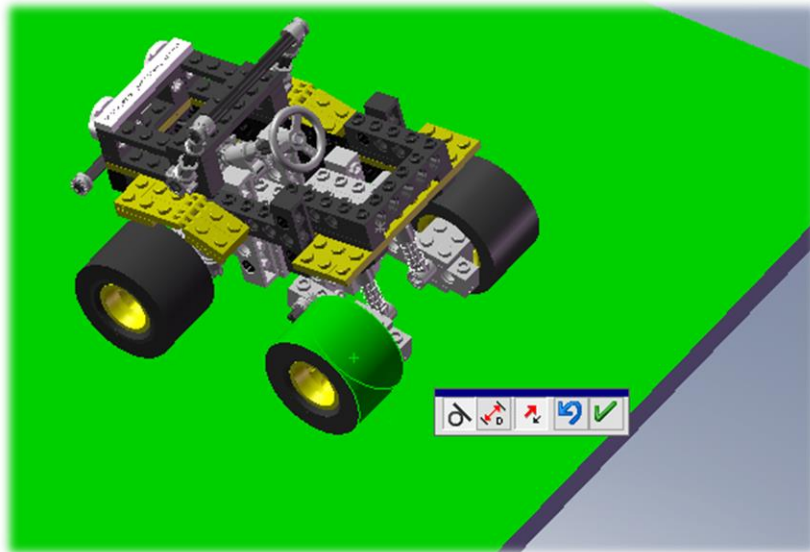


Fig. 19 Ejemplo de relación de tangencia

- Concéntrica: Con esta relación se consigue que dos superficies circulares compartan un mismo centro en común. Es muy utilizada ya que es la forma natural por la que los componentes se insertan unos en otros.

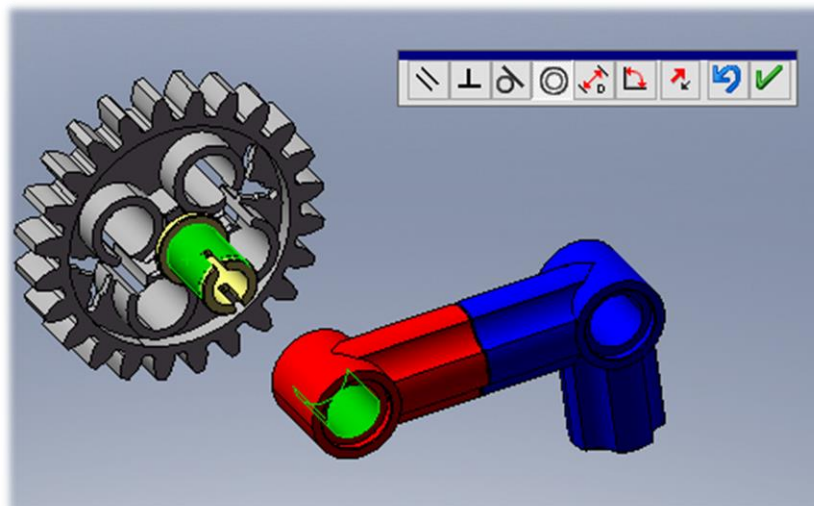


Fig. 20 Ejemplo de relación de concetricidad

- Distancia: Permite asignar a nuestra voluntad una distancia entre los elementos seleccionados.

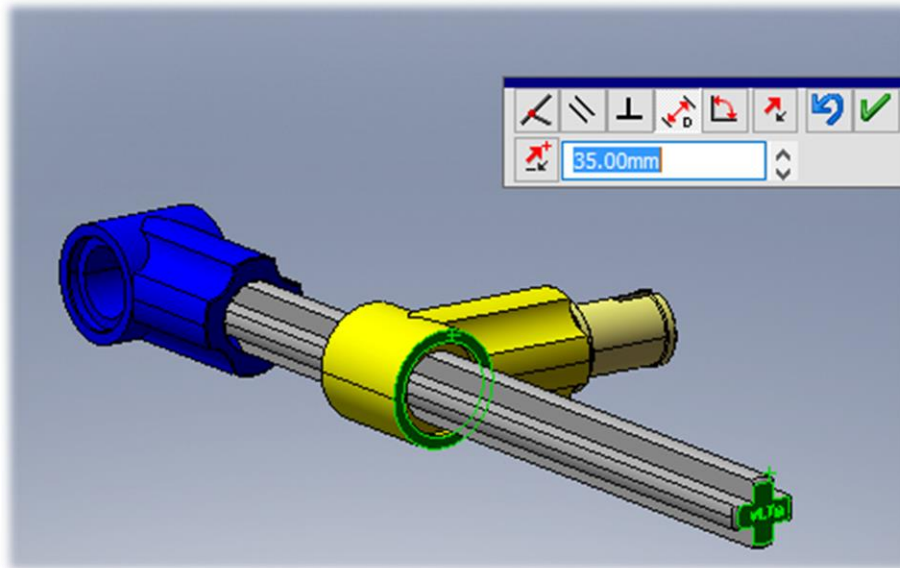


Fig. 21 Ejemplo de relación de distancia

- Ángulo: Permite asignar a nuestra voluntad un ángulo entre dos elementos seleccionados

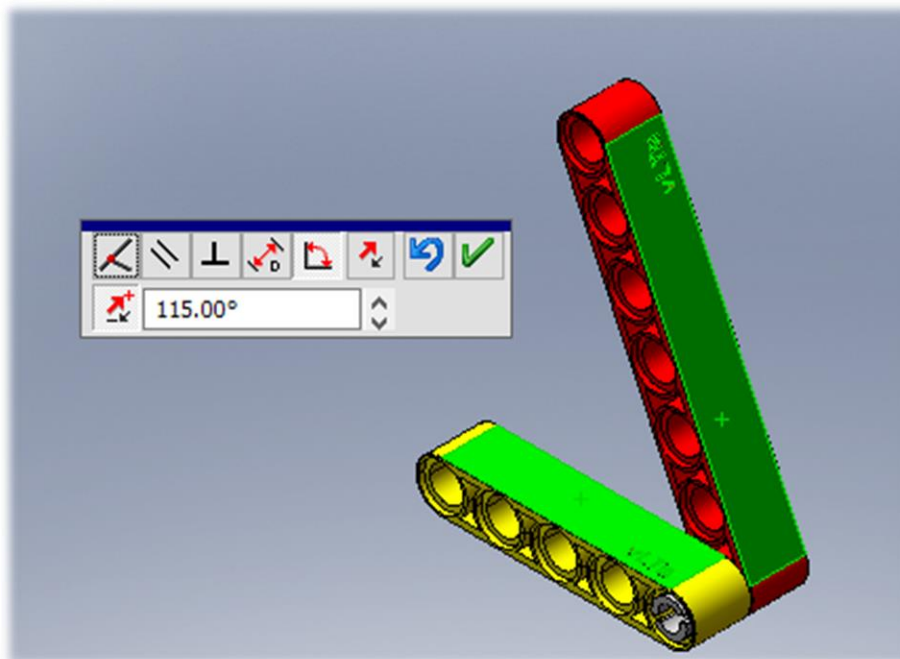


Fig. 22 Ejemplo de relación de ángulo

### 3.3.3.2. Relaciones de posición avanzadas

- Simétrica: Se usa para colocar dos componentes a la misma distancia respecto a un plano en común.
- Ancho: De forma parecida a la relación de simetría, permite colocar dos piezas de forma que una que una de ellas esté centrada respecto a la otra.

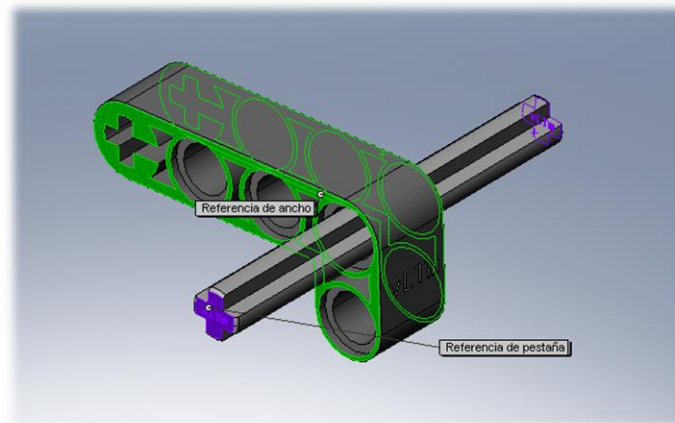


Fig. 23 Ejemplo de relación de ancho

- Engranaje: Sirve para definir la relación de giro entre dos ejes que están en contacto a través de engranajes o poleas. Para definir la relación de giro hay que indicar el número de dientes de cada engranaje o bien el diámetro de cada uno. Tras definir la relación de giro entre los engranajes hay que comprobar que los dos ejes giran en el sentido que les corresponde. En caso de no ser así habrá que invertir su giro.

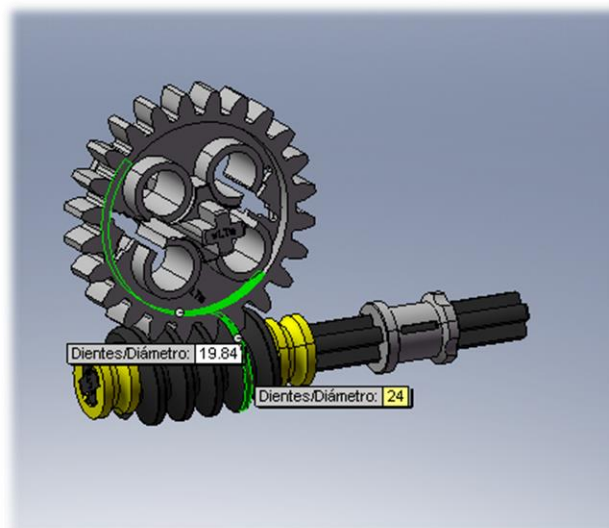


Fig. 24 Ejemplo de relación de engranaje



- Piñón-cremallera: Este tipo de relación nos permite transformar un giro en un movimiento traslacional. Para ello habrá que elegir primero una arista de la cremallera que tenga la misma dirección que el movimiento de translación que debe tener. Posteriormente se elige la superficie circular del engranaje. Una vez hecho esto solo falta definir la relación de giro indicando el desplazamiento longitudinal de la cremallera por cada diente del piñón. Al igual que en la relación de engranaje habrá que comprobar que la cremallera gira en la dirección que debe. De no ser así habrá que invertir la dirección.

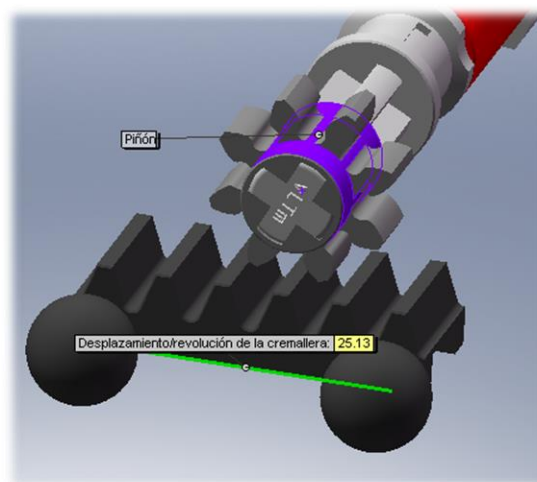


Fig. 25 Ejemplo de relación de piñón-cremallera

- Distancia: De igual manera que la relación de distancia estándar, podemos definir la distancia entre dos elementos seleccionados con la diferencia de que esta vez en lugar de elegir una distancia fija podemos elegir una distancia máxima y mínima de forma que los componentes pueden desplazarse dentro de los límites establecidos.



Fig. 27 Ejemplo de relación de distancia (máxima)



Fig. 26 Ejemplo de relación de distancia (mínima)



Fig. 28 Ejemplo de relación de distancia  
(intermedia)

- Ángulo: De igual manera que la relación de ángulo estándar, podemos definir el ángulo entre dos elementos seleccionados con la diferencia de que esta vez en lugar de elegir un ángulo fijo podemos elegir un ángulo máximo y mínimo de forma que los componentes puedan girar dentro de los límites establecidos.

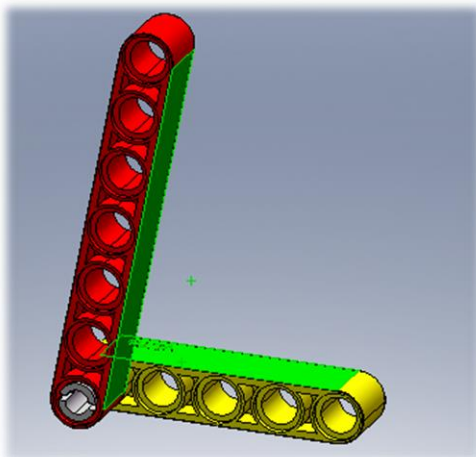


Fig. 30 Ejemplo relación de ángulo (máximo)

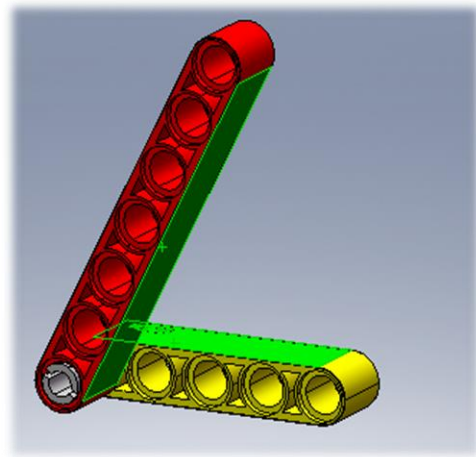


Fig. 31 Ejemplo relación de ángulo (intermedio)

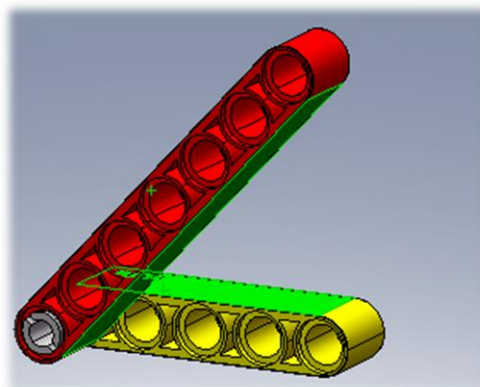
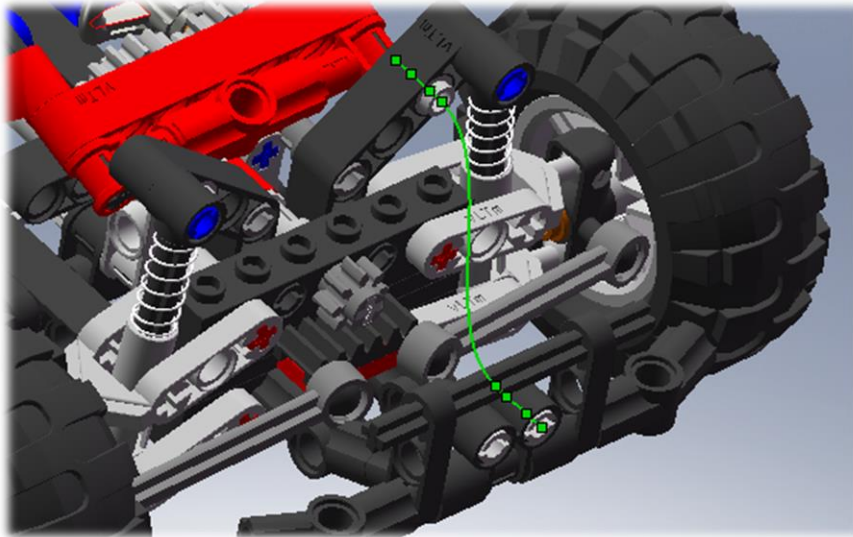


Fig. 29 Ejemplo relación ángulo (mínimo)

### 3.3.4 Creación de elementos flexibles

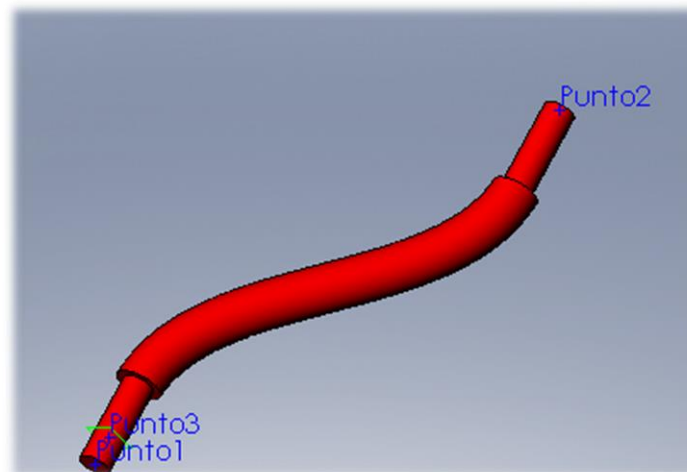
En algunos modelos Lego® Technic reales no todos sus componentes son sólidos-rígidos. También existen elementos flexibles que según como se coloquen adquieren una forma distinta. Como estos elementos pueden adoptar diferentes curvaturas, no se pueden coger de la librería de componentes, sino que es necesario crear cada elemento a medida con la forma que le corresponda.

Para crear estos componentes tenemos que esperar a tener el modelo completo, para que así cada pieza este en la posición que le corresponda y de esta manera podemos establecer las dimensiones y trayectoria del elemento flexible. A partir de aquí debemos de dibujar en un croquis 3D una línea que siga la trayectoria deseada, con la herramienta "spline". Para ello es necesario apoyarse de geometría auxiliar para acotar las posiciones iniciales y finales de la línea.



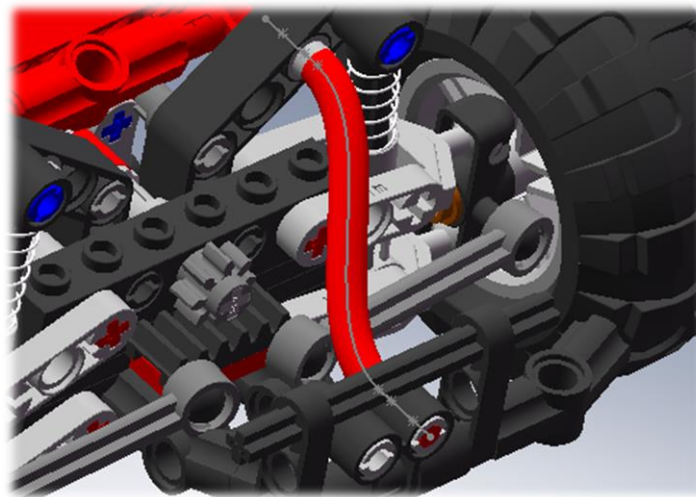
*Fig. 32 Trayectoria del elemento flexible*

Con la línea definida, la copiaremos en la sección de creación de sólidos que tiene SolidWorks 2007. Tras medir la sección que deberá tener el elemento flexible, se dibuja una circunferencia con centro en el origen de nuestra spline y se procede a crear el componente mediante la herramienta de barrido. Posteriormente añadiremos geometría auxiliar para poder colocar en la posición correspondiente el componente.



*Fig. 33 Elemento flexible*

Por último, solo falta colocar el elemento flexible en el lugar en el que habíamos definido previamente la spline.



*Fig. 34 Ensamblado del elemento flexible*

### 3.3.5 Comprobación

Con el modelo final ya terminado, solo falta comprobar que no hay ningún error. En modelos con un alto número de piezas es posible haber cometido algún error a la hora de asignar las relaciones de posición. Para saber que todo funciona como toca, basta con identificar los impulsores y accionarlos para ver que todas las piezas se mueven como es debido. En caso de que haya algún fallo, bastará con identificar el motivo por que sucede el error y añadir, eliminar o editar las relaciones de posición correspondientes para subsanarlo.

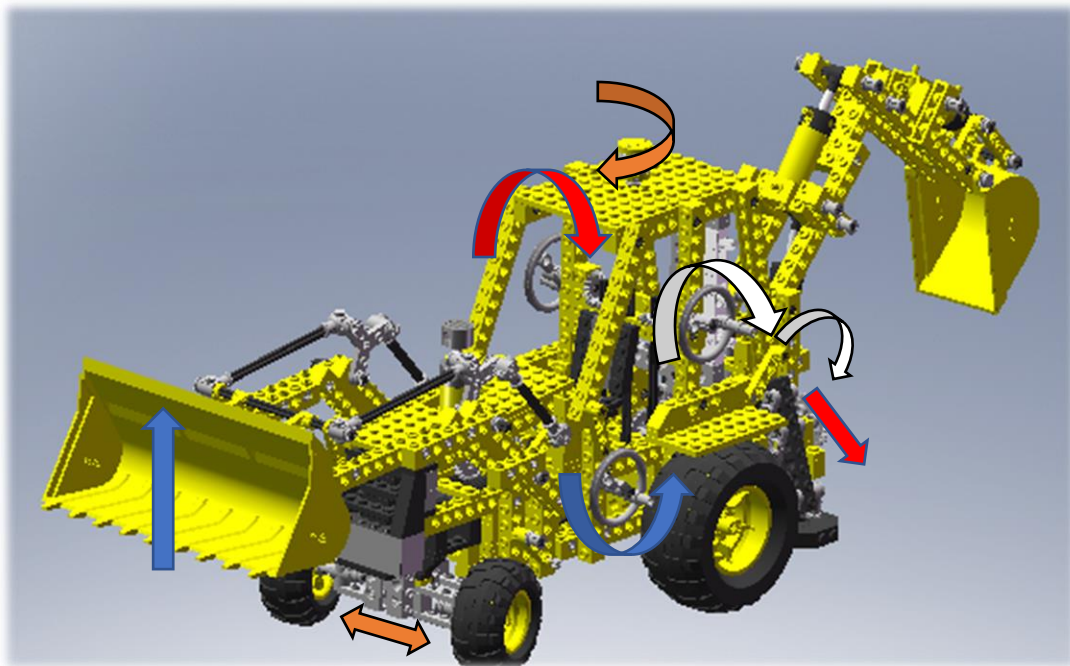


Fig. 35 Accionadores y reacciones del ensamblaje

### 3.4. Modelos virtualizados

Se han virtualizado en total 22 ensamblajes pertenecientes a los libros de Yoshihito Isogawa y 6 modelos Lego® Technic. Los 20 primeros mecanismos de Isogawa han sido creados con la ayuda de los videos de aprendizaje, así como el primer modelo Lego® Technic creado que además con un documento eDrawings de soporte. El resto de modelos han sido creados desde cero sin ningún tipo de ayuda más allá de los manuales de montaje y la observación de los modelos Lego® Technic reales. Además, el modelo Lego® Technic 42043-1 también ha sido construido físicamente.

#### 3.4.1 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-002\_2007

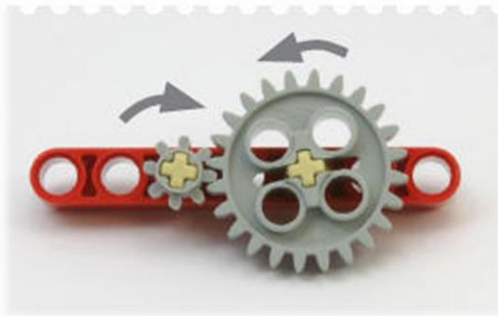


Fig. 37 Vista del modelo 002 de Isogawa

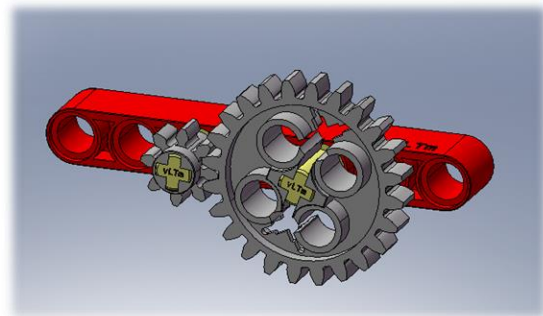


Fig. 36 Modelo 002 virtual de Isogawa

#### 3.4.2 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-008\_2007



Fig. 40 Vista 1 del modelo 008 de Isogawa



Fig. 39 Vista 2 del modelo 008 de Isogawa

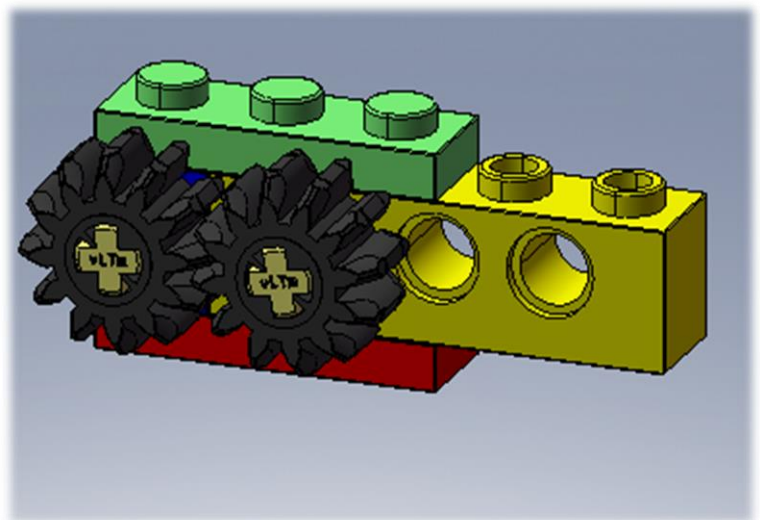


Fig. 38 Modelo 008 virtual de Isogawa

### 3.4.3 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-009\_2007



Fig. 41 Vista 1 del modelo 009 de Isogawa



Fig. 43 Vista 2 del modelo 009 de Isogawa

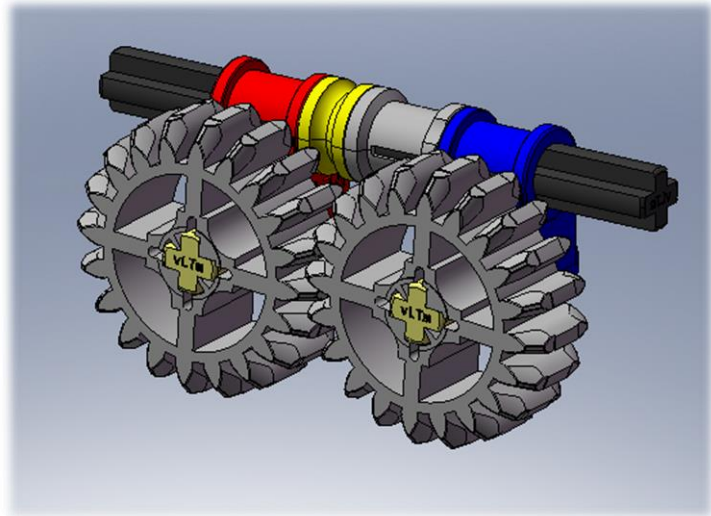


Fig. 42 Modelo 009 virtual de Isogawa

### 3.4.4 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-013\_2007



Fig. 44 Vista 1 del modelo 013 de Isogawa

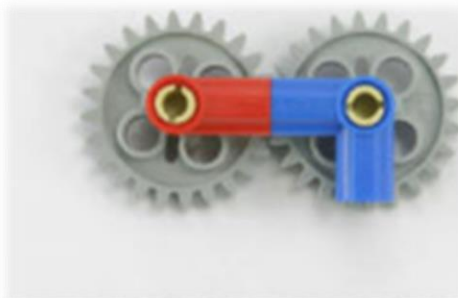


Fig. 46 Vista 2 del modelo 013 de Isogawa

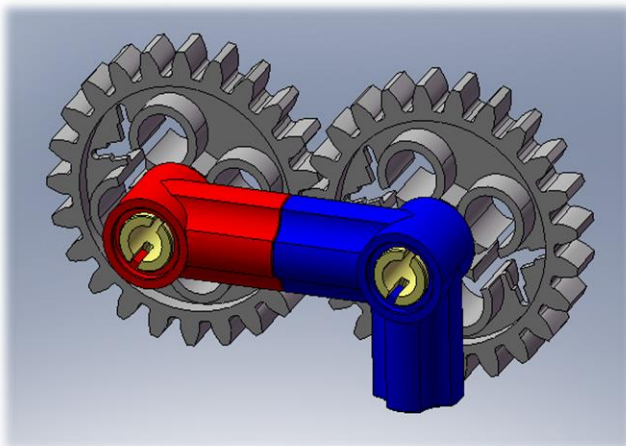


Fig. 45 Modelo 013 virtual de Isogawa

### 3.4.5 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-026\_2007



Fig. 49 Vista 1 del modelo 026 de Isogawa



Fig. 48 Vista 2 del modelo 026 de Isogawa

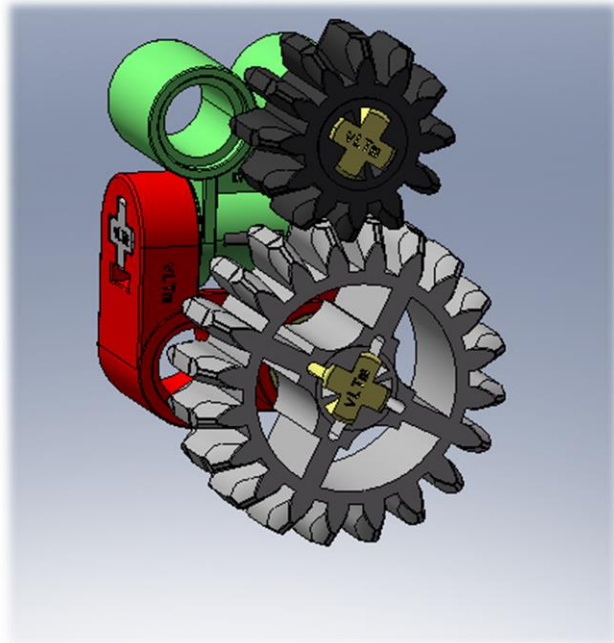


Fig. 47 Modelo 026 virtual de Isogawa

### 3.4.6 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-037\_2007



Fig. 52 Vista 1 del modelo 037 de Isogawa



Fig. 50 Vista 2 del modelo 037 de Isogawa

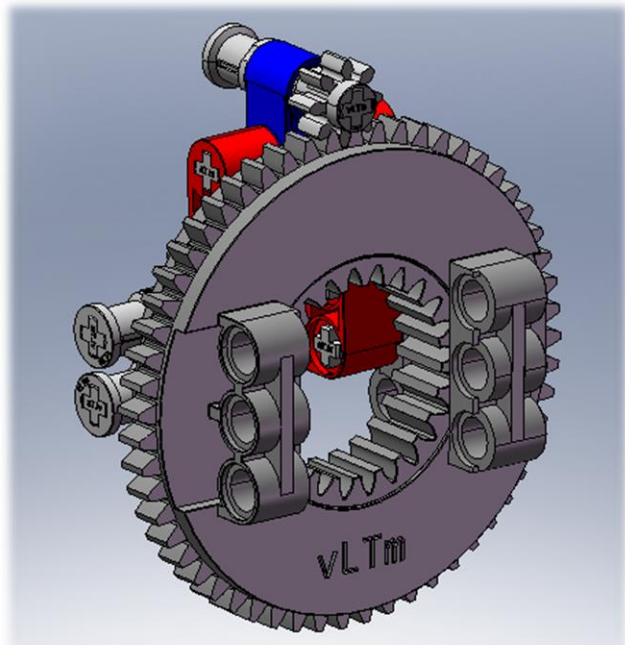


Fig. 51 Modelo 037 virtual de Isogawa



### 3.4.7 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-040\_2007

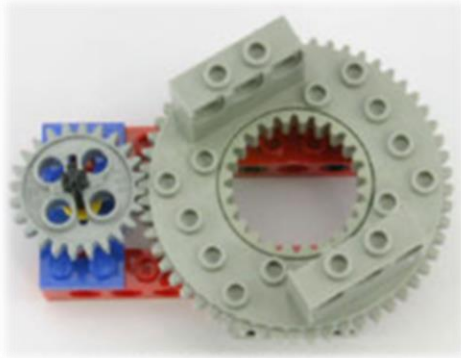


Fig. 54 Vista 1 del modelo 040 de Isogawa

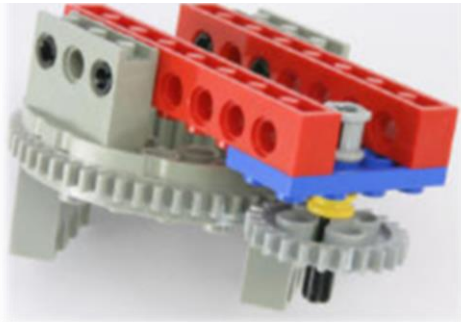


Fig. 55 Vista 2 del modelo 040 de Isogawa

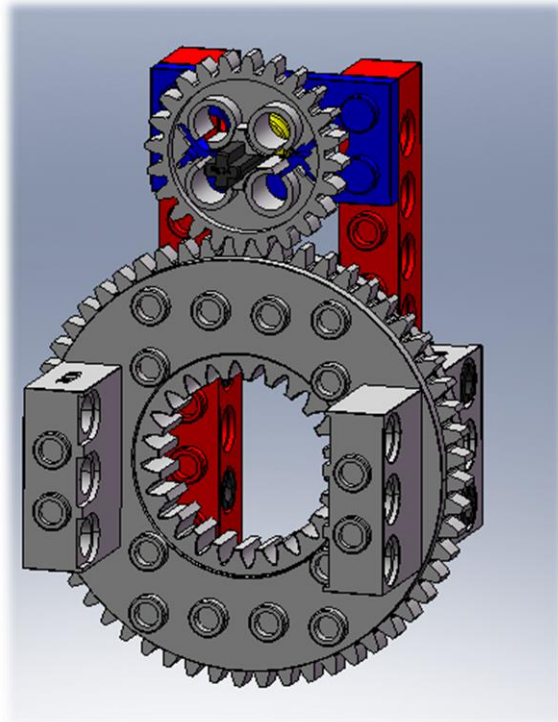


Fig. 53 Modelo 040 virtual de Isogawa

### 3.4.8 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-051\_2007



Fig. 56 Vista 1 del modelo 051 de  
Isogawa



Fig. 58 Vista 2 del modelo 051 de  
Isogawa

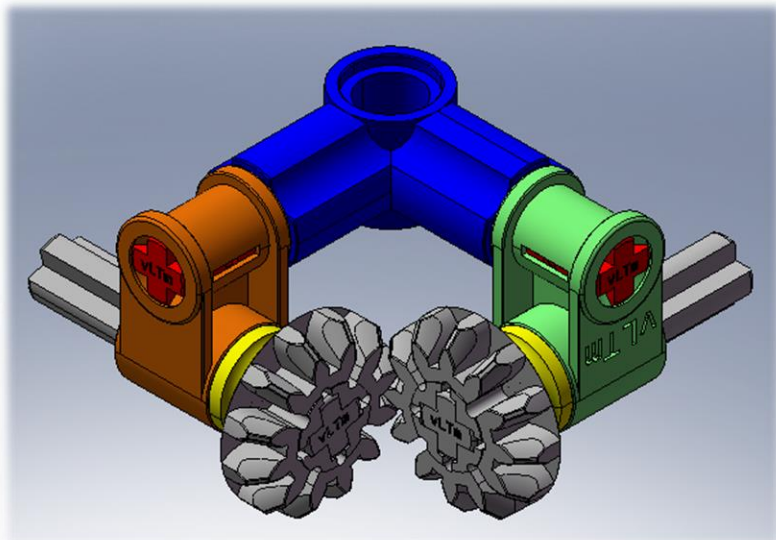


Fig. 57 Modelo 051 virtual de Isogawa

### 3.4.9 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-059\_2007



Fig. 60 Vista 1 del modelo 059 de Isogawa



Fig. 59 Vista 2 del modelo 059 de Isogawa

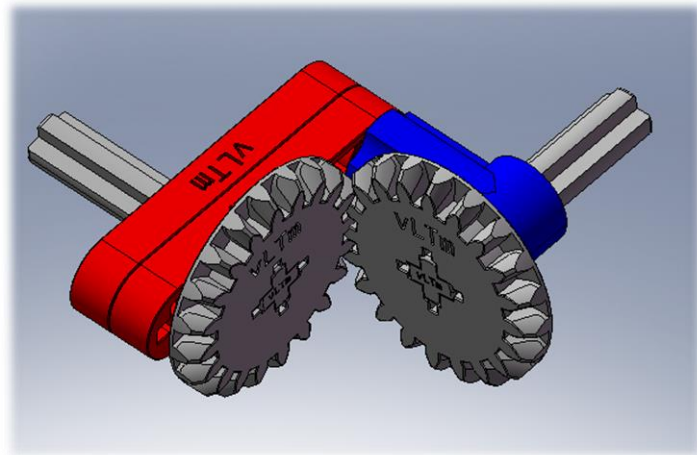


Fig. 61 Modelo 059 virtual de Isogawa

### 3.4.10 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-062\_2007

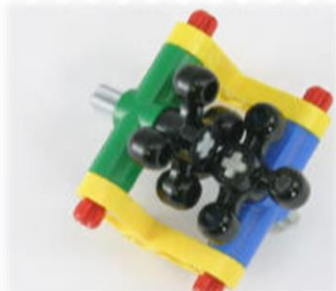


Fig. 63 Vista 1 del modelo 062 de Isogawa



Fig. 64 Vista 2 del modelo 062 de Isogawa

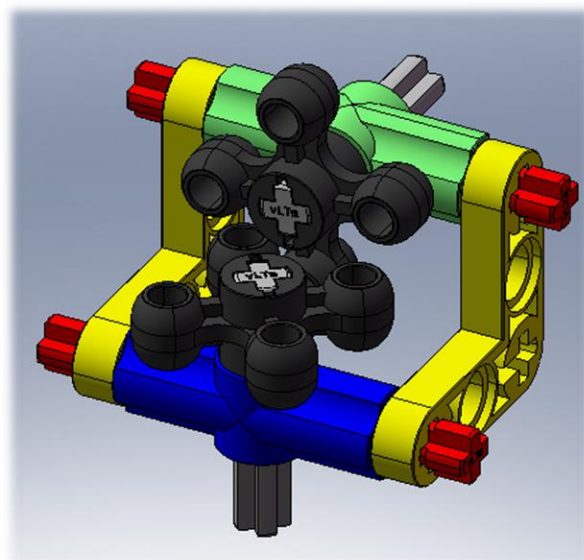


Fig. 62 Modelo 062 virtual de Isogawa

### 3.4.11 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-075\_2007



Fig. 65 Vista 1 del modelo 075 de Isogawa



Fig. 67 Vista 2 del modelo 075 de Isogawa

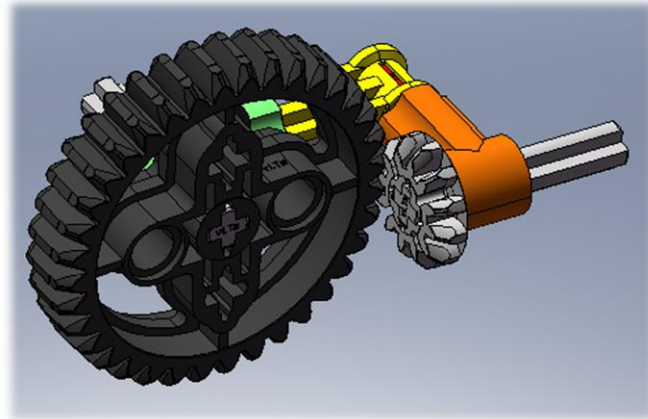


Fig. 66 Modelo 075 virtual de Isogawa

### 3.4.12 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-079\_2007



Fig. 70 Vista 1 del modelo  
079 de Isogawa



Fig. 69 Vista 2 del modelo 079 de  
Isogawa

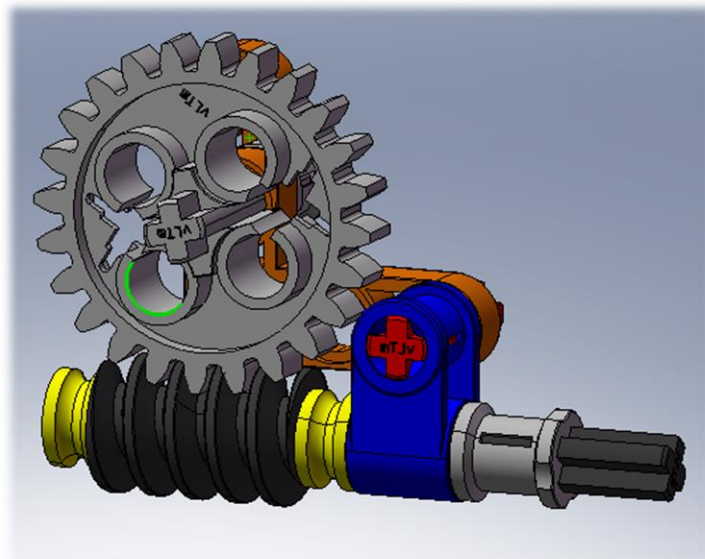


Fig. 68 Modelo 079 virtual de Isogawa

### 3.4.13 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-093\_2007



Fig. 71 Vista 1 del modelo 073 de Isogawa



Fig. 72 Vista 2 del modelo 073 de Isogawa

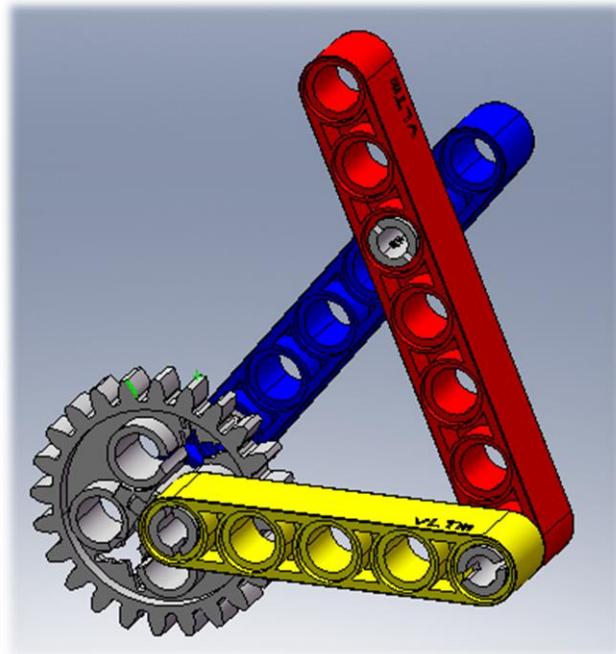


Fig. 73 Modelo 073 virtual de Isogawa

### 3.4.14 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-098\_2007

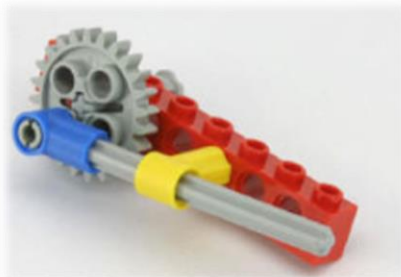


Fig. 75 Vista 1 del modelo 098 de Isogawa

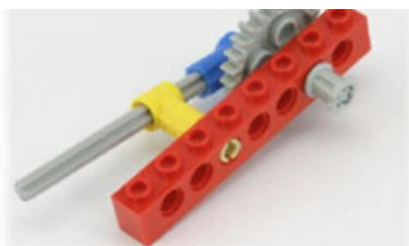


Fig. 74 Vista 2 del modelo 098 de Isogawa

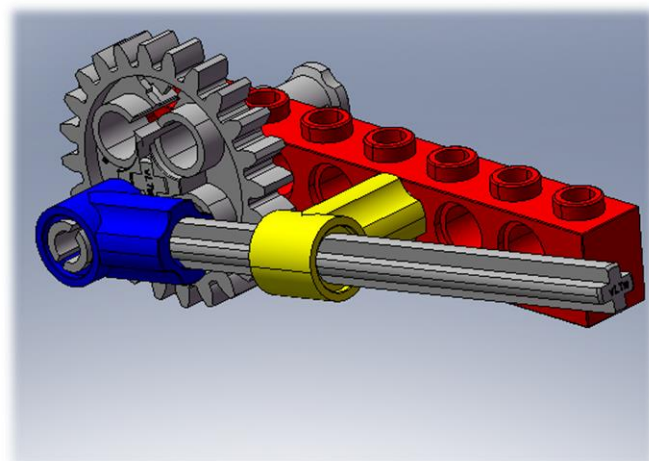


Fig. 76 Modelo 098 virtual de Isogawa

### 3.4.15 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-102\_2007



Fig. 77 Vista del modelo 102 de Isogawa

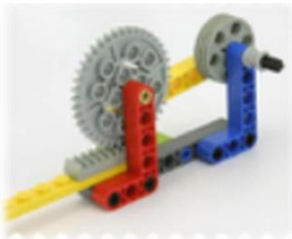


Fig. 78 Vista 2 del modelo 102 de Isogawa

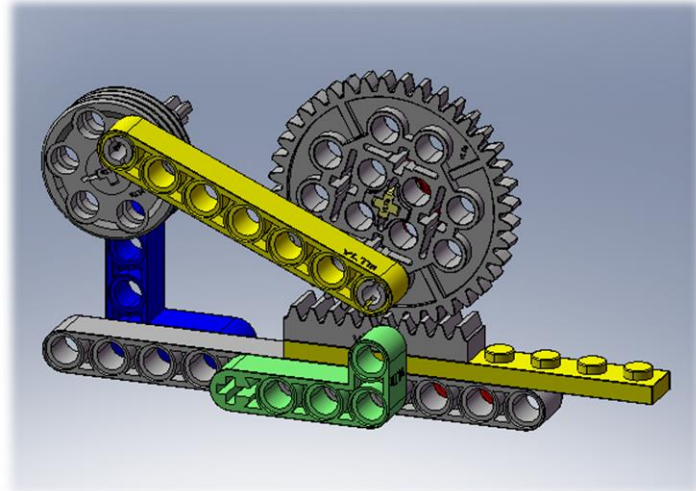


Fig. 79 Modelo 102 virtual de Isogawa

### 3.4.16 vLTm\_ASSEMBLY\_ISOGAWA-107\_2007



Fig. 80 Vista 1 del modelo 107 de Isogawa



Fig. 82 Vista 2 del modelo 107 de Isogawa

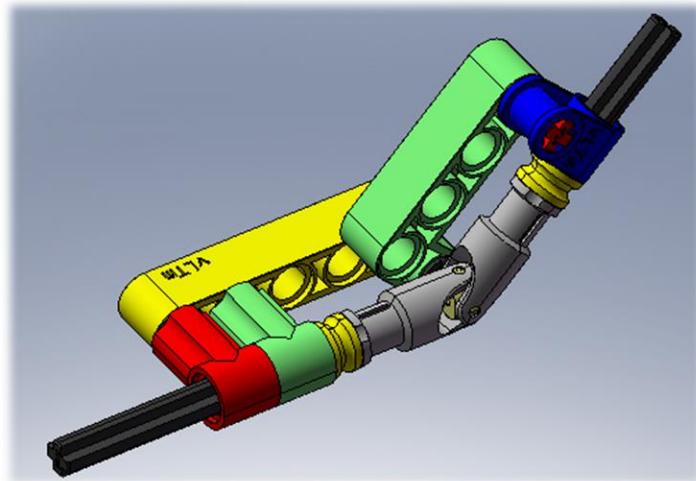


Fig. 81 Modelo 107 virtual de Isogawa

### 3.4.17 vLTm\_ev3-0024\_2016



Fig. 84 Vista del modelo ev3-0024 de Isogawa

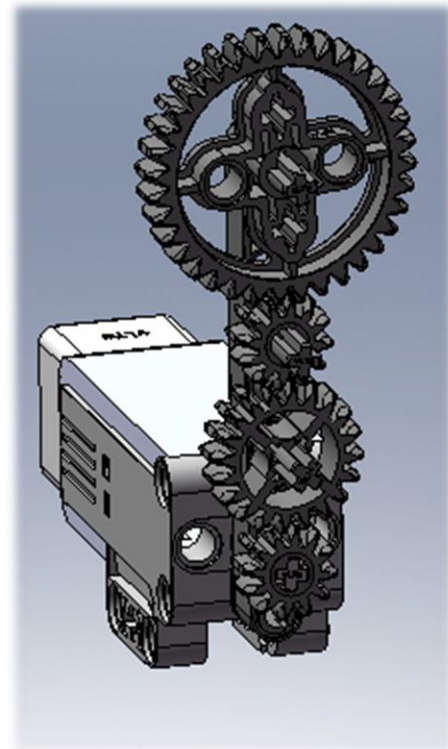


Fig. 83 Modelo virtual ev3-0024 de Isogawa

### 3.4.18 vLTm\_ev3-0050\_2016

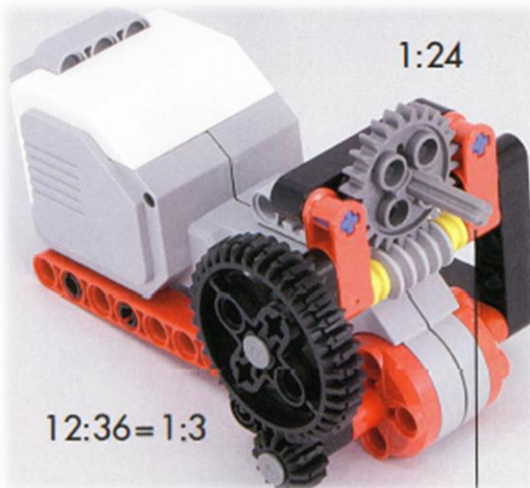


Fig. 86 Vista del modelo ev3-0050 de Isogawa

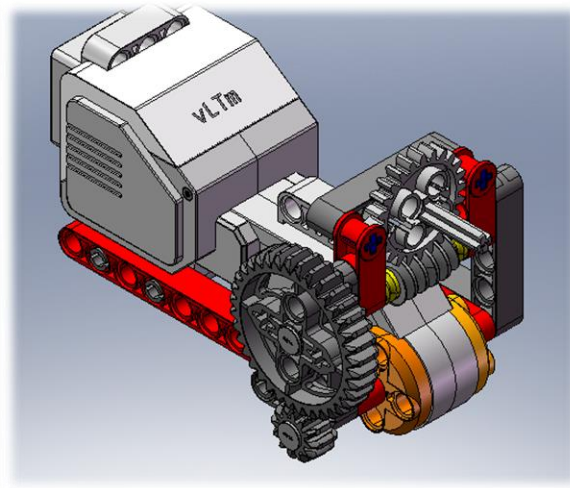


Fig. 85 Modelo virtual 3v3-0050 de Isogawa

### 3.4.19 vLTm\_ev3-0053\_2016

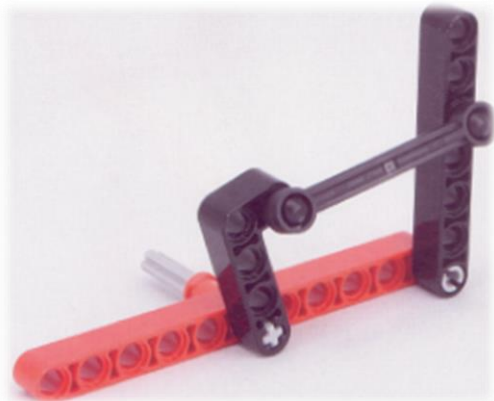


Fig. 88 Vista del modelo ev3-0053 de Isogawa

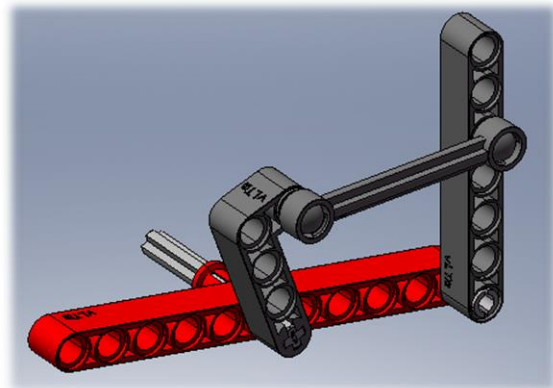


Fig. 87 Modelo ev3-0053 virtual de Isogawa

### 3.4.20 vLTm\_ev3-0069\_2016

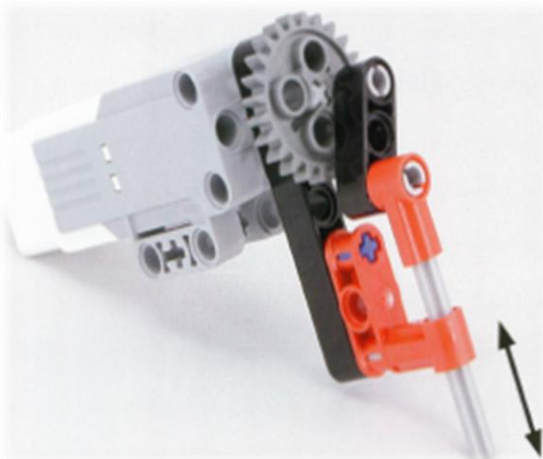


Fig. 90 Vista del modelo ev3-0069 de Isogawa

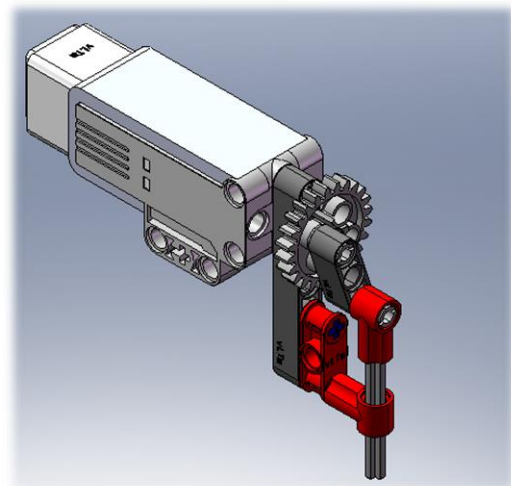


Fig. 89 Modelo ev3-0069 virtual de Isogawa

### 3.4.21 vLTm\_ev3-0134\_2016

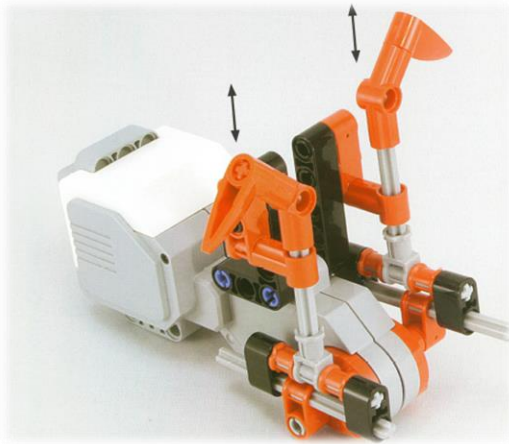


Fig. 92 Vista del modelo ev3-0134 de Isogawa

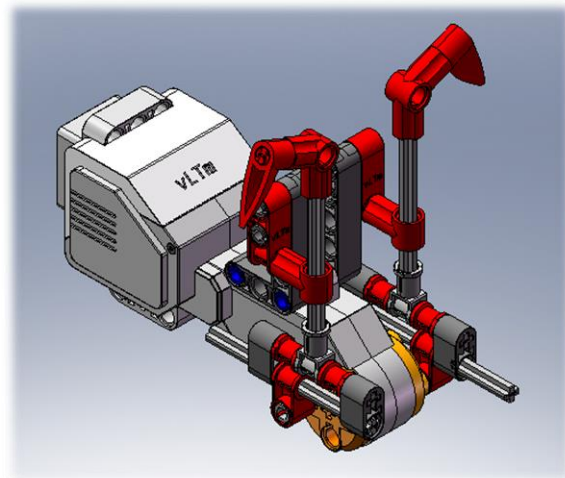


Fig. 91 Modelo 3v3-0134 virtual de Isogawa

### 3.4.22 vLTm\_ev3-0125\_2016



Fig. 93 Vista 1 del modelo ev3-0125 de Isogawa

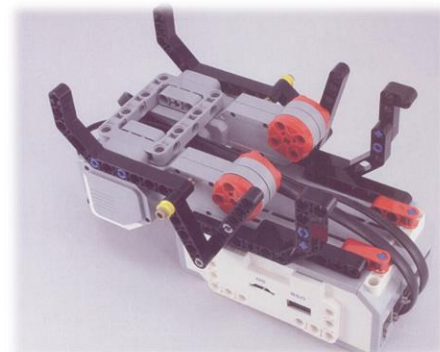


Fig. 94 Vista 2 del modelo ev-3 de Isogawa

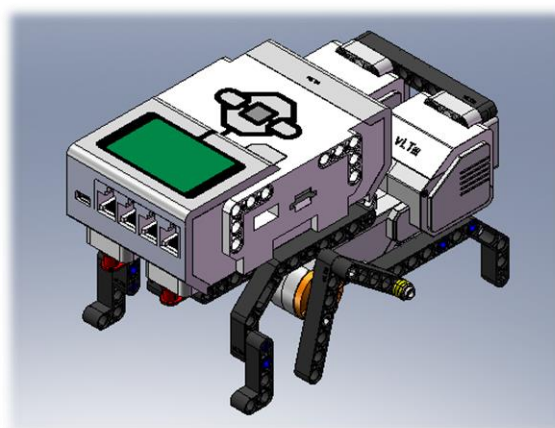


Fig. 95 Modelo ev3-0125 virtual de Isogawa



### 3.4.23 vLTm\_pw-078\_2016



Fig. 97 Vista 1 del modelo pw-078 de Isogawa



Fig. 96 Vista 2 del modelo pw-078 de Isogawa

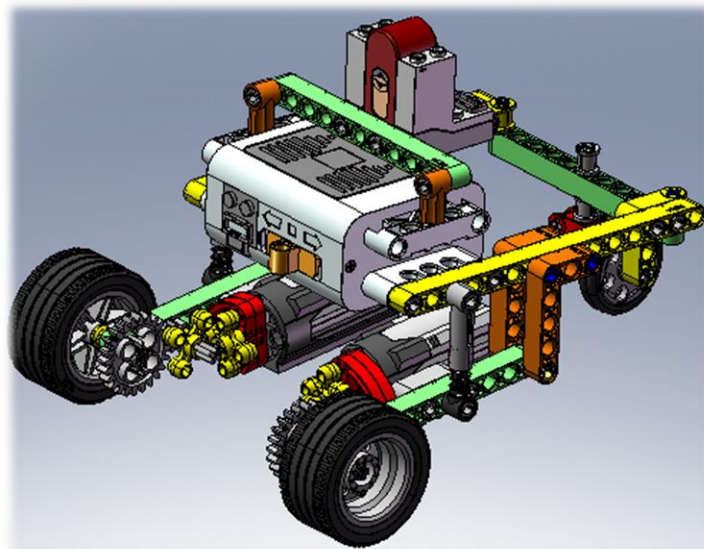


Fig. 98 Modelo pw-078 virtual de Isogawa

3.4.24 vLTm\_8862-1\_2016



Fig. 99 Vista del modelo Lego© Technic 8862-1

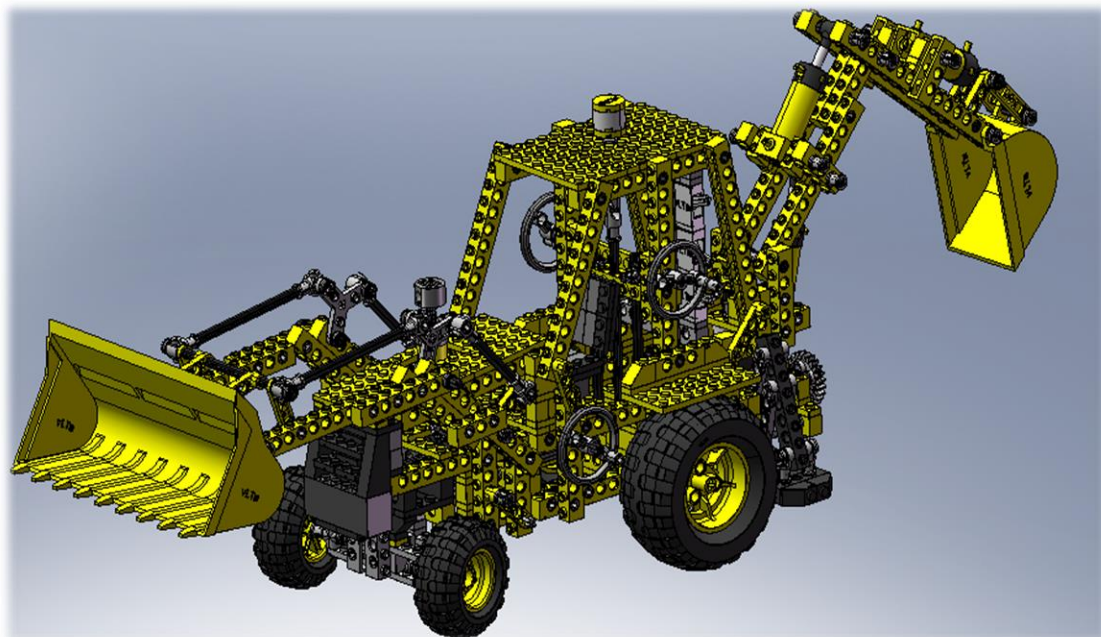


Fig. 100 Modelo Lego© Technic 8862-1 virtual

3.4.25 vLTm\_8048-1\_2016



Fig. 102 Vista del modelo Lego© Technic 8048-1

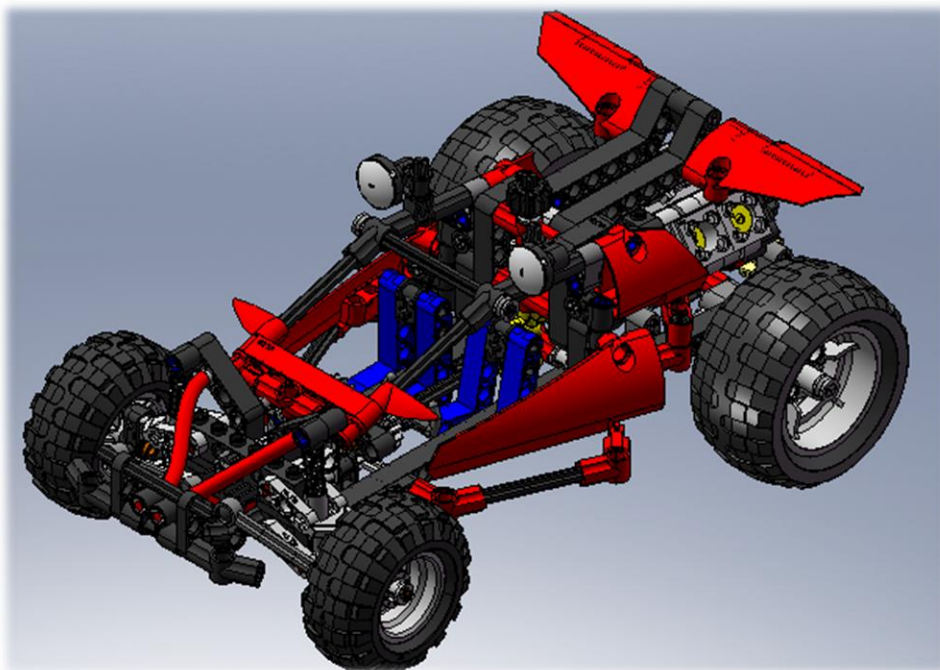


Fig. 101 Modelo Lego© Technic 8048-1 virtual

3.4.26 vLTm\_8052-1\_2017



Fig. 103 Vista del modelo Lego© Technic 8052-1

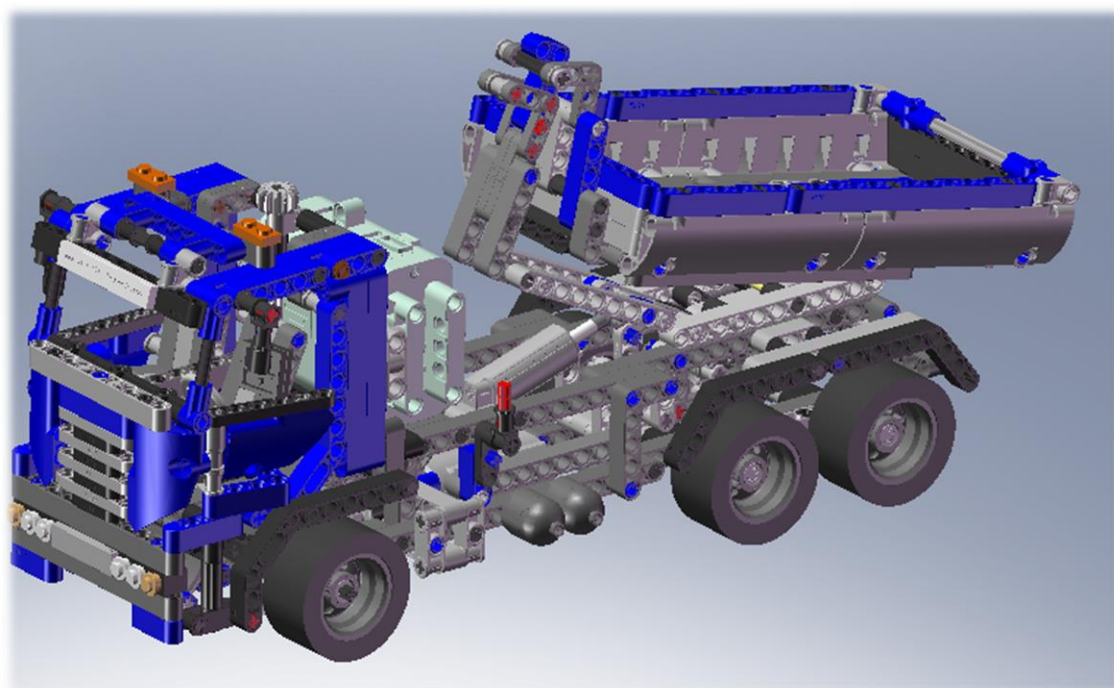


Fig. 104 Modelo Lego© Technic 8052-1 virtual

3.4.27 vLTm\_42000-2\_2017



Fig. 106 Vista del modelo Lego© Technic 42000-2

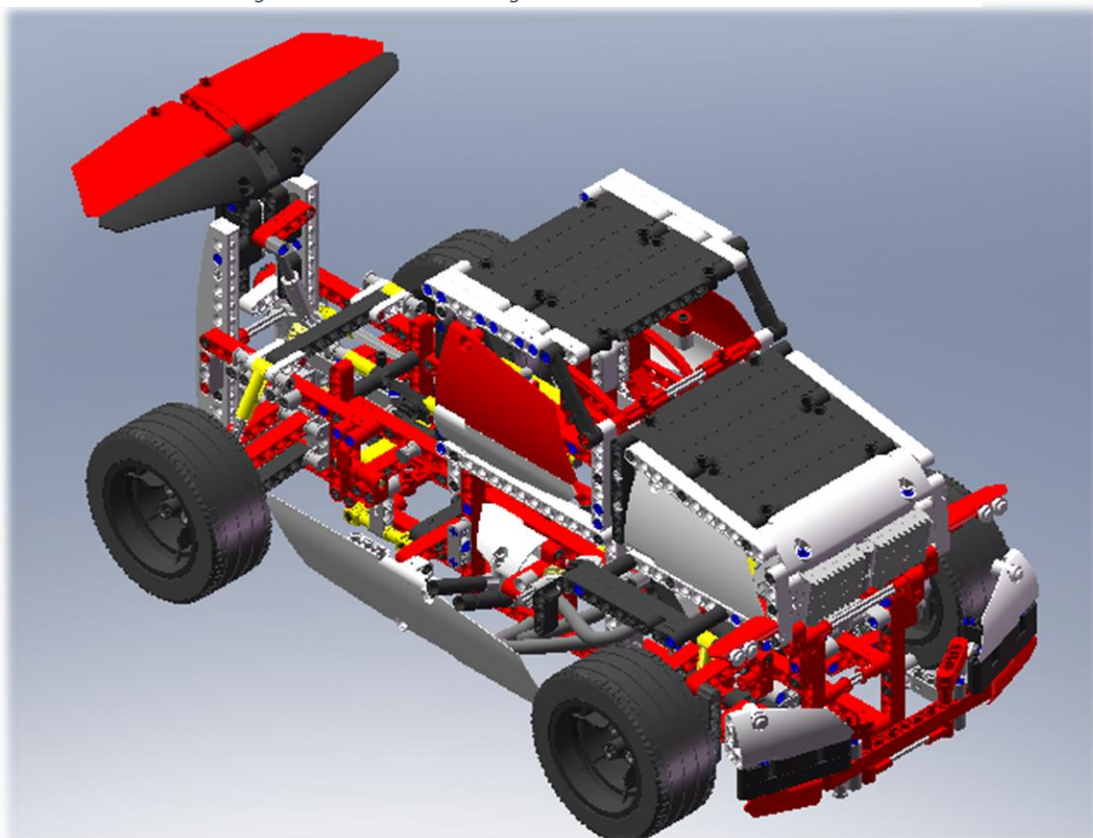


Fig. 105 Modelo Lego© Technic 42000-2 virtual

### 3.4.28 vLTm\_8070-1\_2017



Fig. 107 Vista del modelo Lego© Technic 8070-1

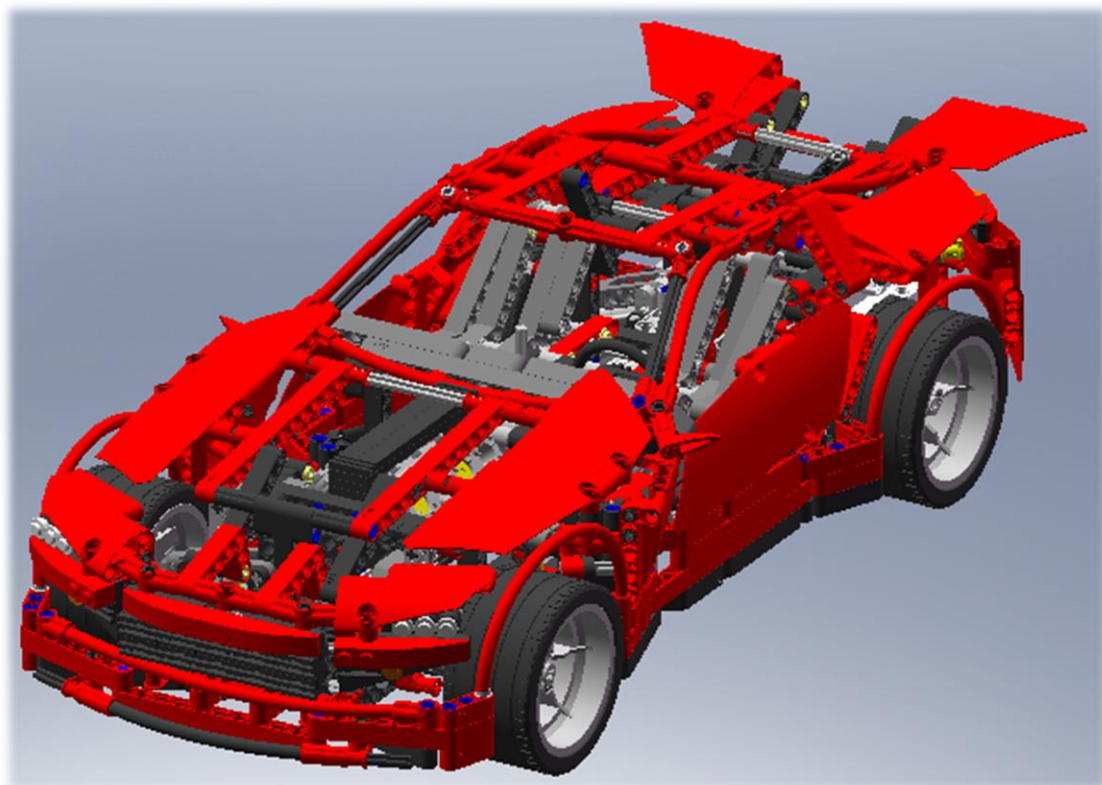


Fig. 108 Modelo Lego© Technic 8070-1 virtual

3.4.29 vLTm\_42043-1\_2017



Fig. 109 Vista del modelo Lego© Technic 42043-1

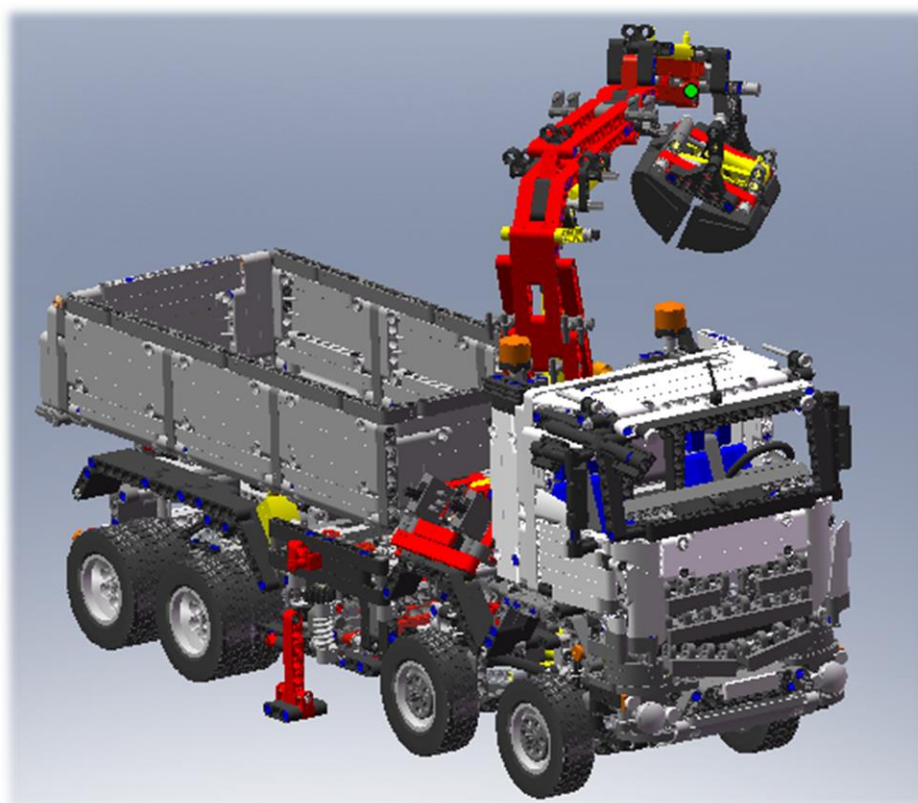


Fig. 110 Modelo Lego© Technic 42043-1 virtual



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA





## 4. Compactación

Al acabar el proceso de ensamblaje se obtiene el modelo Lego® Technic virtual que está formado por numerosas piezas, a su vez formadas por numerosos componentes. Mediante el proceso de compactación se consigue que cada pieza sea una única entidad virtual, en lugar de ser un conjunto de componentes. Esto quiere decir que tras el proceso de compactación una pieza tendrá el mismo comportamiento que un componente.

Este proceso se realiza porque aporta varias ventajas. La primera es que, tras el compactado de las piezas, los archivos son más ligeros, por lo tanto, esto reduce las operaciones de cálculo que tiene que realizar el procesador, permitiendo que se puedan manejar en ordenadores con menos potencia. La otra ventaja es que es una forma de protección de las piezas ya que posteriormente no se pueden modificar mediante restricciones de posición, por lo que las piezas no se pueden alterar o dañar por error.

Tras la compactación habrá que volver a ensamblar las piezas compactadas, pero en esta ocasión el proceso será mucho más rápido y fácil que las piezas ya están listas y solo hay que añadirlas al modelo final.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

## 5. Simulación del modelo cinemático autoalineado

### 5.1. Introducción

En esta última fase se procederá a la creación de modelos autoalineados de algunos de los modelos creados en la fase de montaje y que han sido compactados y posteriormente, a una simulación dinámica.

En este apartado además de usar SolidWorks 2007, es necesario el complemento CosmosMotion que es el que nos permitirá crear las simulaciones, mediante la introducción de pares cinemáticos en las piezas que representan a los cojinetes que llevaría una máquina real.

### 5.2. Conceptos básicos

#### 5.2.1 Par cinemático

Se llama par cinemático a la unión entre dos cuerpos de un mecanismo que limita unos movimientos relativos.

Al número de movimientos restringidos por un par cinemático se le denomina clase de par. La clase de par indica el número de fuerzas o momentos que debe ser capaz de transmitir. Por otro lado, al número de movimientos que quedan libres se le llama movilidad del par. La suma de la clase y de la movilidad del par siempre suma seis.

#### 5.2.2 Grados de libertad

El número de grados de libertad de un sólido en ingeniería se refiere al número de coordenadas independientes que son necesarias para poder definir de forma única la posición de un sólido respecto a un sistema de referencia.

El termino puede usarse de 3 formas distintas, pero todas ellas relacionadas entre sí. La primera será para referirse a los grados de libertad de un cuerpo respecto a un sistema de referencia. La segunda para referirse al número de grados de libertad de un par cinemático. Por último, para referirnos a los grados de libertad de un mecanismo.

### 5.3. Movilidad de mecanismos

La movilidad o grados de libertad del mecanismo sirven para saber cuántas variables hay que asignar para poder definir todos los componentes del mecanismo en el tiempo y en el espacio. Los mecanismos tienen que tener al menos un grado de libertad, ya que si no se trataría de una estructura que estaría completamente definida. Para calcular la movilidad de los mecanismos hay que diferenciar entre mecanismos planos y mecanismos espaciales o tridimensionales.

### 5.3.1 Mecanismos planos

Los mecanismos planos son aquellos en los que sus componentes se mueven en un mismo plano o planos paralelos. La movilidad del mecanismo plano se calcula como:

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

*Ecuación 1 Criterio de movilidad*

Donde M es la movilidad del mecanismo. La N indica el número de cuerpos que forman el mecanismo. La P corresponde con los pares cinemáticos y por último GDL son los grados de libertad de los pares cinemáticos.

### 5.3.2 Mecanismos espaciales

En este caso cada cuerpo tiene posibilidad de moverse en los seis grados de libertad del espacio en lugar de tres como en los mecanismos planos. La movilidad del mecanismo espacial se calcula como:

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

*Ecuación 2 Criterio de Gruebler*

Donde los diferentes parámetros son los mismos que los que se han explicado en el apartado anterior.

Este criterio es que el utiliza el complemento CosmosMotion en SolidWorks 2007 para calcular la movilidad del mecanismo.

## 5.4. Mecanismos autoalineados

El concepto mecánico que explica la finalidad docente de lo que se desarrolla en este apartado es el de mecanismos autoalineados. Este concepto fue enunciado por L. Reshetov en su libro "Mecanismos autoalineadores". La conclusión de su libro fue que, para mejorar los mecanismos, estos debían de estar determinados estáticamente, o dicho de otra forma, estar "autoalineados". En su libro explica su teoría y la aplica con ejemplos para demostrarla.

Según tu teoría, lo correcto es emplear mecanismos estáticamente determinados, es decir sin restricciones en exceso o pasivas. Se llama restricciones en exceso o pasivas a todas aquellas que su eliminación no afecta a los grados de libertad del mecanismo, por lo tanto, tampoco afecta a su movilidad.

Las dimensiones de las piezas de un mecanismo pueden ser ligeramente alteradas durante la vida útil de las máquinas. Esto puede ser debido a un hundimiento de la cimentación, el desgaste de los pares cinemáticos, dilataciones térmicas, deformaciones elásticas, o errores humanos durante su montaje o mantenimiento. Los mecanismos determinados estáticamente no



dependen de las variaciones dimensionales de sus piezas. Gracias a ello, los mecanismos autoalineados no solo reducen el gasto del montaje, sino que aumentan significativamente la fiabilidad mecánica de la máquina.

Dicho de otra forma, las restricciones en exceso en los mecanismos son perjudiciales. Por eso, en esta parte del trabajo lo que se pretende conseguir es simular modelos cinemáticos autoalineados con la ayuda de CosmosMotion.

## 5.5. Modelo autoalineado en SolidWorks con CosmosMotion

### 5.5.1 Introducción a CosmosMotion

CosmosMotion es un complemento de SolidWorks que permite simular, analizar sistemas mecánicos y obtener información sobre desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, etc. Al formar parte de SolidWorks permite su uso, en el mismo entorno en el que se ha creado el modelo, de modo que se evita la tarea de tener que transformar los archivos entre diferentes aplicaciones informáticas. De esta manera es mucho más sencillo y rápido realizar ajustes y correcciones a la hora de rediseñar posibles defectos.

### 5.5.2 Piezas

Las piezas que formen parte del modelo autoalineado solo pueden ser de dos tipos diferentes, fijas o móviles. El procedimiento será el de añadir pieza a pieza al modelo indicando si son fijas o móviles. Todas las piezas serán móviles, salvo una, sobre la cual se moverán el resto de piezas. La diferencia entre las piezas fijas y móviles es que mientras las fijas no se podrán mover y por lo tanto sus grados de libertad serán cero, las piezas móviles tendrán seis grados de libertad, que tendremos que reducir hasta cero para que el modelo sea autoalineado, definiendo los pares cinemáticos correspondientes.

### 5.5.3 Pares cinemáticos (cojinetes)

Por defecto CosmosMotion coloca los pares cinemáticos automáticamente cuando cada vez que se añade una pieza al modelo autoalineado. Como no siempre las asignaciones están bien hechas, lo mejor es eliminar todos los pares por defecto para posteriormente crearlos manualmente.

Uno de los motivos por los que las asignaciones por defecto no son las correctas es porque los pares cinemáticos no aparecen colocados en el lugar de unión correcto entre las dos piezas. Esto puede dar lugar a que el movimiento relativo de las piezas sea erróneo. También ocurre que aun estando mal colocado el par cinemático el movimiento relativo sea correcto y no afecte al funcionamiento correcto del modelo, pero en este caso como los pares cinemáticos lo que están representando son los cojinetes que una máquina real debería de llevar, lo más correcto es colocarlos en el lugar que ocuparían en la máquina real, para ser lo más preciso posible.

Otro de los motivos por lo que hay que eliminar los pares cinemáticos por defecto es que el tipo que ha escogido CosmosMotion no es el correcto para crear el mecanismo autoalineado. Como

cuando son creados por defectos no se puede editar el tipo de par cinemático y como en muchos de los casos no es posible saber cuál es el par cinemático adecuado hasta que todo el mecanismo está completo para que el modelo no tenga grados de libertad en exceso, es mejor siempre eliminarlos de antemano.

Los pares cinemáticos representan los rodamientos o cojinetes que una máquina real debería llevar. Hay 13 tipos diferentes de pares cinemáticos y cada uno restringe un número distinto de grados de libertad, según se recoge en la siguiente tabla:

Par cinemático	Grados de libertad traslacionales	Grados de libertad rotacionales	Grados de libertad en total
Revolución	3	2	5
Traslacional	2	3	5
Cilíndrico	2	2	4
Esférico	3	0	3
Universal	3	1	4
Tornillo	0,5	0,5	1
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 Grados de libertad restringidos

Los pares cinemáticos marcados con asterisco indican que se tratan de pares cinemáticos primitivos. Los pares primitivos se caracterizan porque restringen uno, dos, o tres grados de libertad. Normalmente no tienen un análogo físico y son útiles para imponer restricciones geométricas. Pueden ser combinados para definir restricciones complejas. De hecho, pueden ser usados para crear cualquiera del resto de pares cinemáticos, a excepción del de tornillo.

#### 5.5.3.1. Revolución

Con los pares de revolución se permite que las dos piezas que estén en contacto puedan girar una sobre la otra sobre un eje común. El origen se puede colocar en cualquier parte a lo largo del eje sobre el que rota una pieza respecto a la otra. La orientación define la dirección del eje.

El eje de rotación sobre el que giran las piezas es paralelo a la orientación del vector y pasa por el origen.

Es recomendable revisar que el eje de giro coincide con el eje de las piezas, pues si no se ha hecho bien el eje de giro se sitúa en un lugar erróneo.

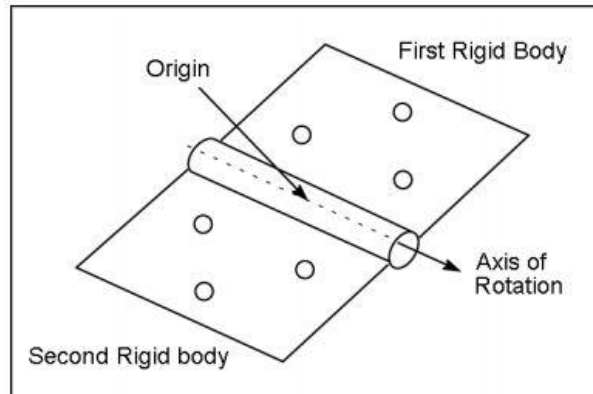


Fig. 111 Par cinemático de revolución

#### 5.5.3.2. Traslacional

Este par permite que un cuerpo rígido se traslade a lo largo de un vector respecto a un segundo cuerpo rígido. Los cuerpos rígidos solo pueden desplazarse sin girar uno respecto al otro. La localización del origen de un par traslacional no afecta al movimiento de la articulación, sino que afecta a las cargas de reacción en el par. La orientación del par traslacional determina la dirección del eje a lo largo del cual las piezas pueden deslizarse entre ellas. La dirección del movimiento es paralela a la orientación del vector y pasa por el origen.

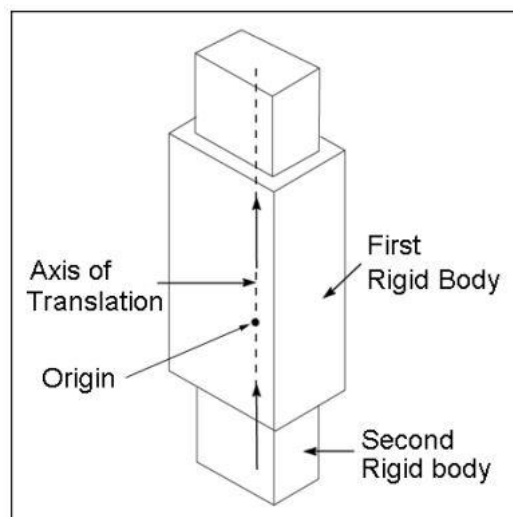


Fig. 112 Par cinemático de traslación

### 5.5.3.3. Cilíndrico

El par cilíndrico permite tanto la rotación relativa como la traslación relativa de un cuerpo rígido respecto a otro. El origen de la articulación puede estar situado en cualquier lugar a lo largo del eje sobre el cual el cuerpo rígido puede rotar o desliza respecto al otro. La orientación define la dirección del eje sobre el cual el cuerpo rígido puede rotar o deslizar respecto al otro. El eje de rotación y traslación del par cilíndrico es paralelo al vector de orientación a través del origen. Un ejemplo real sería un cilindro hidráulico.

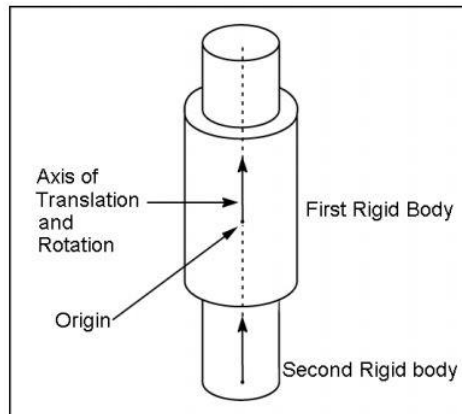


Fig. 113 Par cinemático cilíndrico

### 5.5.3.4. Esférico

El par esférico permite la libre rotación sobre un punto en común de un cuerpo rígido respecto a otro. El origen de la articulación determina el punto sobre el cual cuerpo rígido puede pivotar libremente respecto al otro.

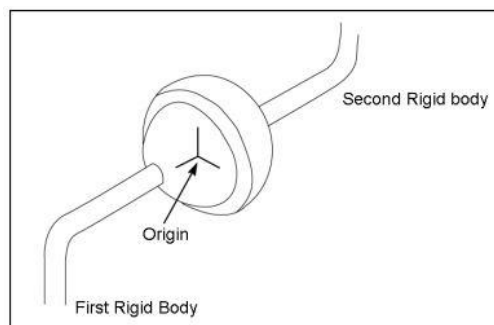


Fig. 114 Par cinemático esférico

### 5.5.3.5. Universal

El par universal permite transferir la rotación de un cuerpo rígido a otro cuerpo rígido. Esta articulación es útil para transferir movimiento de rotación alrededor de esquinas o entre dos ejes de transmisión conectados en ángulo a través de un punto. El origen representa el punto de conexión entre los dos cuerpos. Representa a una junta Hooke.



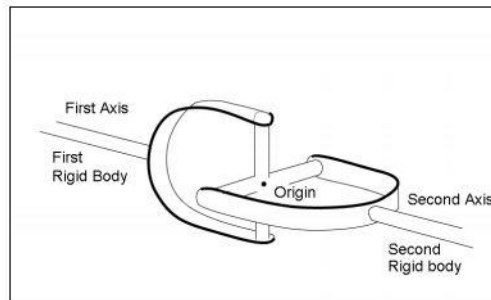


Fig. 115 Par cinemático universal

### 5.5.3.6. Tornillo

El par tornillo limita a un cuerpo a rotar mientras se traslada con respecto a otro cuerpo rígido. Al definirlo hay que indicar el desplazamiento relativo de un cuerpo respecto al otro por cada vuelta que gira.

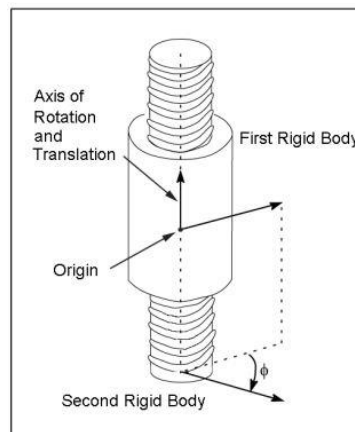


Fig. 116 Par cinemático de tornillo

### 5.5.3.7. Planar

El par Planar permite que el plano de un cuerpo rígido deslice y rote en el plano de otro cuerpo rígido. El origen determina un punto en el espacio a través del cual el plano de movimiento pasa. La orientación del vector es perpendicular al plano del movimiento. El eje de rotación es paralelo al vector de orientación.

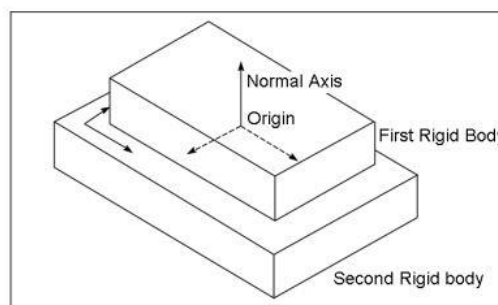


Fig. 117 Par cinemático planar

#### 5.5.3.8. Fijo

El par fijo bloquea dos cuerpos rígidos juntos, por lo que no puede moverse uno respecto al otro. Para un par fijo el origen y la orientación no afecta a los resultados de la simulación. Se recomienda colocarlo en un lugar que sea fácilmente visible. Un ejemplo real sería una soldadura que une a dos partes.

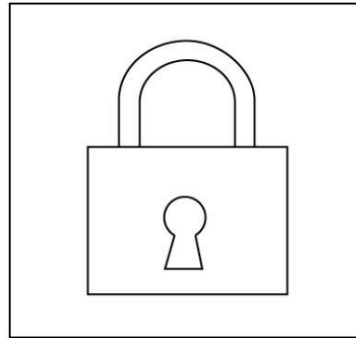


Fig. 118 Par cinemático fijo

#### 5.5.3.9. En línea

El par en línea es un par primitivo con cuatro grados de movilidad que permite un movimiento traslacional y tres de rotación de una parte respecto a la otra. CosmosMotion impone dos restricciones de traslación que confinan el movimiento traslacional entre las partes del eje de orientación. El origen define la localización del eje.

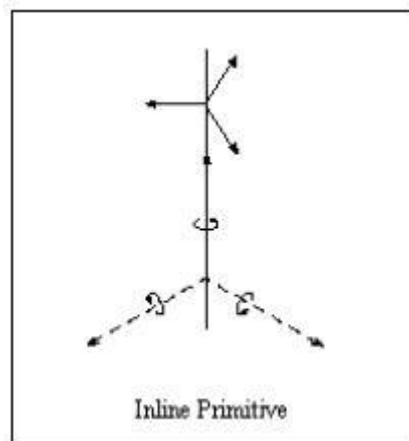


Fig. 119 Par cinemático en línea

#### 5.5.3.10. En plano

El par en plano es un par primitivo con cinco grados de movimiento que permite tanto movimientos de traslación como de rotación de una parte respecto otra. CosmosMotion impone una restricción traslacional que limita el movimiento traslacional entre las partes en el plano de orientación.

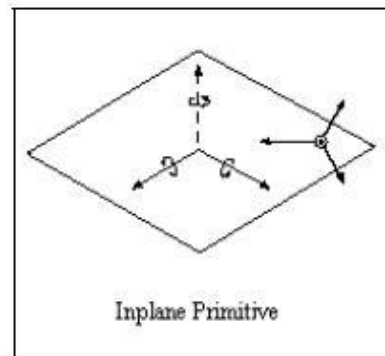


Fig. 120 Par cinemático en plano

### 5.5.3.11.Orientación

La par orientación es un par primitivo con tres grados de libertad que permite solo movimientos traslacionales de una parte respecto a la otra. CosmosMotion impone tres restricciones de rotación para evitar que las dos partes roten entre ellas.

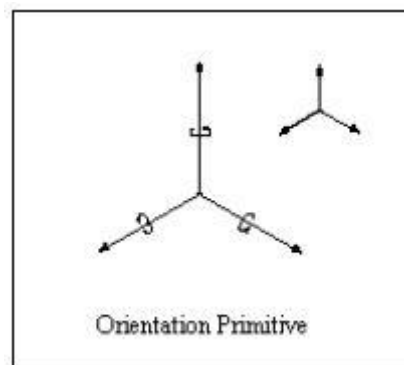


Fig. 121 Par cinemático de orientación

### 5.5.3.12.Paralelo

El par paralelo es un par primitivo con cuatro grados de movilidad que permite tanto movimientos de rotación como de traslación de una parte respecto la otra. El vector de orientación indica los ejes de las dos piezas que se mantienen en paralelo. El vector de orientación pasa por el origen. Se permiten desplazamientos relativos.

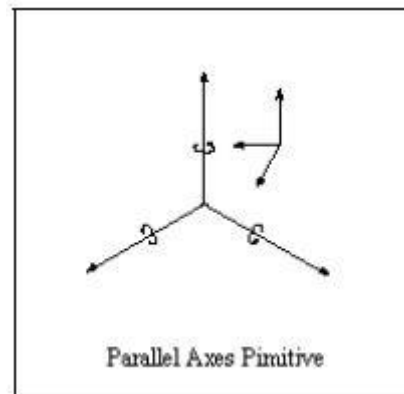


Fig. 122 Par cinemático paralelo

### 5.5.3.13. Perpendicular

El par perpendicular es un par primitivo con cinco grados de movilidad que permite tanto movimientos de rotación como traslacionales de una parte respecto la otra. CosmosMotion impone una restricción de rotación de forma que las piezas permanezcan perpendiculares. Esto permite rotaciones relativas sobre el eje-z, pero no permite rotaciones relativas en la dirección perpendicular al eje-z.

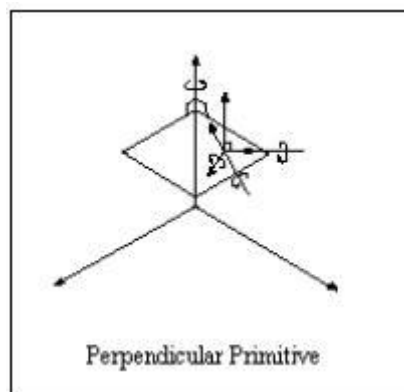


Fig. 123 Par cinemático perpendicular

### 5.5.4 Acopladores

Los acopladores son unas restricciones que se establecen sobre algunos tipos de pares cinemáticos que permiten relacionar el movimiento de rotación o traslación mediante una constante proporcional. Los acopladores permiten el movimiento de un par de revolución, cilíndrico o traslacional sea transmitido a otro par de revolución cilíndrico o traslacional. Los dos pares relacionados mediante el acoplador no tienen por qué ser del mismo tipo. El movimiento acoplado también puede ser del mismo tipo o diferente. Por ejemplo, el movimiento de rotación de un par de revolución puede estar acoplado a la rotación de un par cilíndrico, pero también puede estar acoplado a la traslación de un par traslacional.

Un acoplador no diferencia entre parte impulsora y parte conducida. Cada par cinemático en el acoplamiento puede conducir al otro. Existe una posibilidad de bloqueo si ambos pares son

impulsores. Un mismo par cinemático puede acoplarse a varios pares distintos. Esto podría dar lugar a bloqueos si existe si los acoplamientos entran en conflicto entre ellos. Por último, cada acoplamiento elimina un grado de libertad del modelo.

Se utilizan para simular transmisiones de movimientos en mecanismos con engranajes, poleas, piñón-cremallera, tornillo sin fin, etc.

### 5.5.5 Grados de libertad del mecanismo

Como se ha explicado anteriormente el objetivo es conseguir un modelo autoalineado, es decir sin grados de restricción en exceso. Para ello, lo mejor es comprobar periódicamente que se cumple la condición de que no haya restricciones en exceso. Además, también habrá que comprobar que no hay grados de libertad en exceso. En el caso de que el número de grados de libertad no fuera el que corresponde habría que editar los pares cinemáticos hasta conseguir que el número de grados de libertad sea correcto. Si una vez que todas las piezas ya están introducidas en el modelo, ya se puede pasar al paso de la simulación.

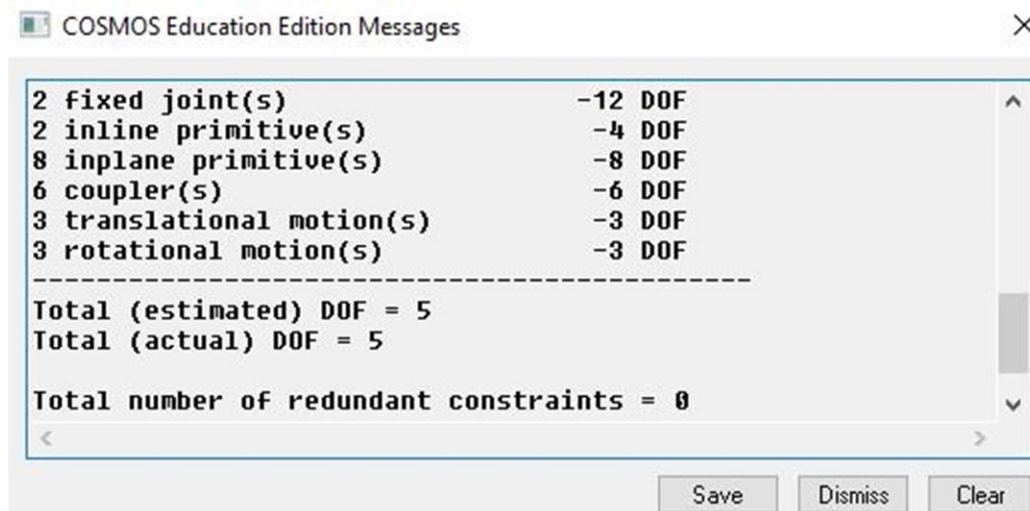


Fig. 124 Ventana de información sobre pares cinemáticos y grados de libertad del modelo

En ciertas ocasiones no es posible, por la forma que los diseñadores de Lego® Technic han diseñado sus modelos no es posible conseguir un modelo sin grados de restricción en exceso. Esto puede ocurrir por ejemplo cuando hay dos piezas independientes que en realidad se comportan como si se tratase de una única pieza, ya que entre ellas no hay movimiento relativo, pero no forman parte de la misma pieza ya que son dos sólidos diferentes.

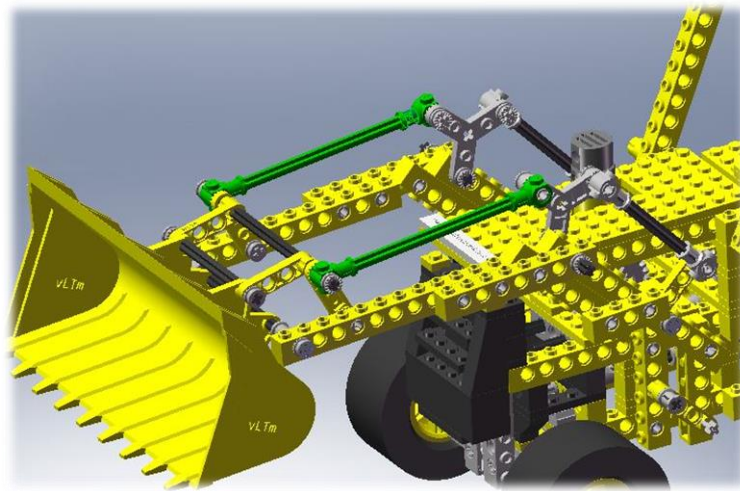


Fig. 125 Piezas independientes sin movimiento relativo entre ellas

## 5.6. Suspensiones

En el caso de los vehículos que tengan suspensiones, para definir las habrá que crearlas en dos pasos. El primer paso consiste en definir el muelle. Para ello hay que seleccionar los puntos que indican la posición de inicio y fin del muelle y elegir el valor de la constante de elasticidad del muelle. El segundo paso consiste en definir el amortiguador. El procedimiento es el mismo que con el muelle, pero en lugar de indicar la constante del muelle se elige la dureza del amortiguador.

## 5.7. Movimientos en los pares cinemáticos

Por defecto, los pares cinemáticos no tienen ningún movimiento asociado. Sin embargo, es posible añadirles movimientos a los grados de libertad del par para que de esta forma estén conducidos. Se puede añadir un movimiento por cada grado de libertad que tiene cada par cinemático. Tras añadirse un movimiento, el número de grados de libertad del mecanismo disminuye, ya que el grado de libertad pasa a estar conducido. El movimiento se puede definir a través de condiciones de desplazamiento, velocidad o aceleración, en función del tiempo. Además, los movimientos pueden seguir distintos tipos de funciones.

### 5.7.1 Constante

Es el tipo más sencillo de función. Bastará con elegir un valor que se mantendrá constante a lo largo del tiempo.

### 5.7.2 Escalón

Con esta función se puede crear un movimiento en el que se define un valor inicial y otro final. Esta función tiene que estar definida en el tiempo. La función evolucionará desde el valor inicial

hasta el final de una forma suave dentro del periodo de tiempo indicado. Antes y después del periodo de transición la función permanecerá constante.

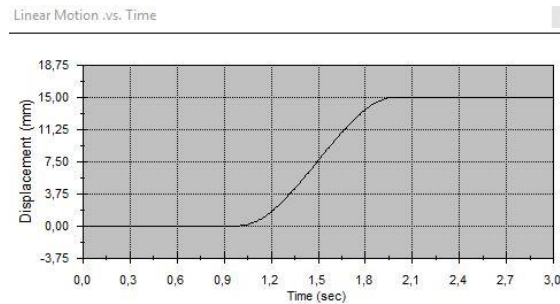


Fig. 126 Ejemplo de función escalón

### 5.7.3 Armónica

La función armónica crea un movimiento sinusoidal. Para definir esta función hay que indicar su amplitud, frecuencia, tiempo de desfase y valor medio.

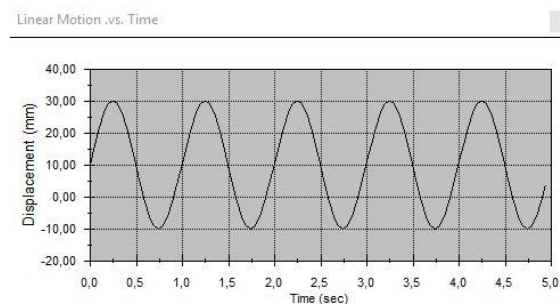


Fig. 127 Ejemplo de función armónica

### 5.7.4 Spline

Esta función permite definir el movimiento a través de los valores en una tabla. La tabla tiene dos columnas. En la primera se introduce el valor del tiempo y en la segunda se indica el valor del desplazamiento, velocidad o aceleración para ese tiempo definido en la primera columna.

### 5.7.5 Expresión matemática

Con esta función se puede representar cualquier tipo de movimiento, pero es necesario conocer los comandos necesarios para definirla. Por ejemplo, se puede utilizar para definir una función escalón, pero que, en lugar de tener solo un escalón, pueda tener tantos como se quiera.

## 5.8. Simulación

Llegados a este punto ya está todo preparado para poder realizar una simulación cinemática. La simulación cinemática es una simulación que hay que hacer previamente a la simulación dinámica, que es la que realmente nos interesa. En este tipo de simulaciones el chasis del vehículo está fijo en el espacio y son el resto de piezas las que se moverán respecto de él. Esta

simulación sirve para comprobar que todas las piezas se mueven de forma correcta, antes de realizar la simulación dinámica.

La simulación dinámica se diferencia de la cinemática en que esta vez todas las piezas del vehículo Lego® Technic virtual, incluido el chasis, son piezas libres y por lo tanto se pueden desplazar por el espacio. Para crear la simulación dinámica es necesario realizar dos pasos. El primero es crear una base sobre la que se desplace el vehículo. La segunda es añadir las condiciones de contacto del modelo con la base sobre la que se moverá.

Para crear la base, al igual que se hizo en la fase de ensamblaje con los elementos flexibles, hay que usar el módulo de creación sólidos de SolidWorks 2007. Esta vez será mucho más sencillo que en la fase de ensamblaje ya que para crear una base bastará con crear un rectángulo en un boceto y extruirlo. El tamaño de la base debe ser lo suficientemente grande para que el modelo puede moverse sin problemas sobre ella. Cuando se simulan vehículos con suspensiones es recomendable añadir a la base pequeños obstáculos en forma de badén para que pueda apreciar el funcionamiento de las suspensiones. Una vez que la base ya está terminada, solo falta añadirlo al modelo como una pieza fija, porque como es lógico la base tiene que permanecer quieta en nuestra simulación y cambiar el chasis de nuestro modelo de pieza fija a pieza móvil para que en la simulación pueda desplazarse. Durante este paso, CosmosMotion creará nuevos pares cinemáticos que habrá que eliminarlos. Una vez hecho todo esto nuestro modelo deberá de tener seis grados extra de libertad que son los que corresponden al chasis que antes era fijo y ahora ya no lo es.

Por último, hay que establecer el contacto entre el modelo y la base que están en contacto. Normalmente, las únicas piezas en contacto con la base son las ruedas, pero no tiene por qué ser así. Como los neumáticos de las ruedas suelen tener geometrías muy complicadas, es necesario simplificar su geometría para facilitar la simulación ya que, si no el proceso de simulación sería mucho más complicado, lento y podría dar fallos en ordenadores con poca potencia de cálculo. El proceso de simplificación de las ruedas consiste en abrir estas piezas con el módulo de creación de sólidos y crear unos cilindros de un tamaño un poco más grande que los neumáticos de forma que la superficie de los neumáticos quede envuelta por un cilindro liso.



Fig. 128 Rueda original



Fig. 129 Rueda cilindrada



Una vez la rueda se ha transformado a una forma cilíndrica, solo hay que marcar las piezas que se quiere que tengan contacto entre ellas. Lo recomendable es que la posición inicial de la simulación, sea con las ruedas ligeramente situadas por encima de la base, para que de esta forma no haya posibilidad de interferencia entre las ruedas y la base, lo que causaría el fallo de la simulación dinámica.

Con todo ya preparado para comenzar la simulación solo queda establecer los parámetros de la simulación, como puede ser el tiempo a simular, el número de frames, o la dirección y aceleración de la gravedad.

## 5.9. Modelos simulados

En total han sido simulados han sido simulados diez modelos, de los cuales dos de ellos corresponden a montajes de Yoshihito Isogawa y los ocho restantes a modelos Lego® Technic. De los modelos simulados, dos han sido simulados usando videos como material de apoyo y un tercero se ha creado parcialmente con videos de apoyo. El resto de simulaciones han sido creadas sin material de apoyo, salvo la observación de los modelos reales. Además, el modelo Lego® Technic 42043-1 ha sido construido físicamente.

### 5.9.1 8816-1

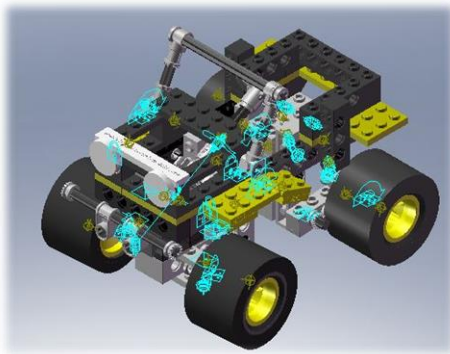


Fig. 131 Modelo Lego® Technic 8816-1 autoalineado

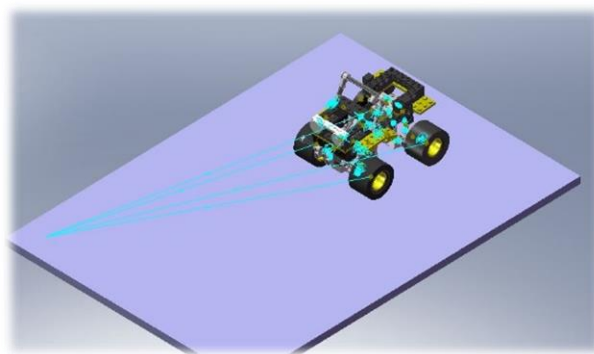


Fig. 130 Simulación dinámica del modelo Lego® Technic 8816-1

### 5.9.2 8459-2

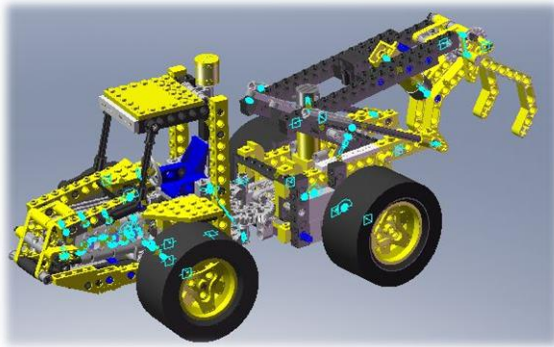


Fig. 133 Modelo Lego© Technic 8559-2 autoalineado

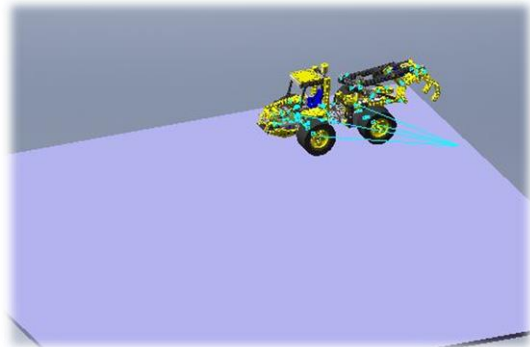


Fig. 132 Simulación dinámica del modelo Lego© Technic 8459-2

### 5.9.3 EV3-0125

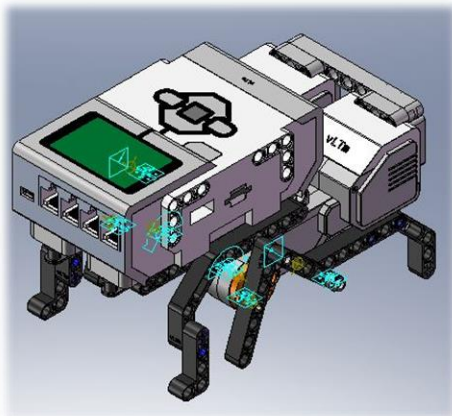


Fig. 134 Modelo ev3-0125 autoalineado de Isogawa

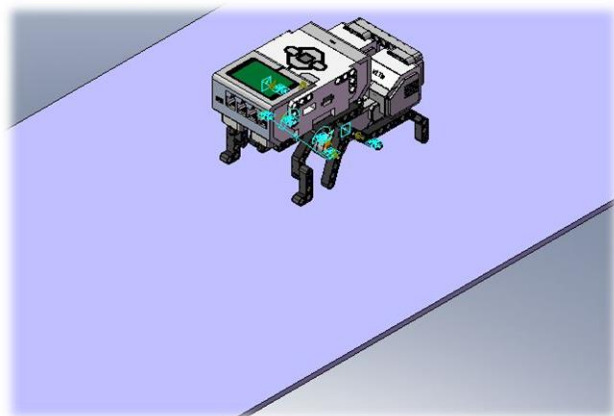
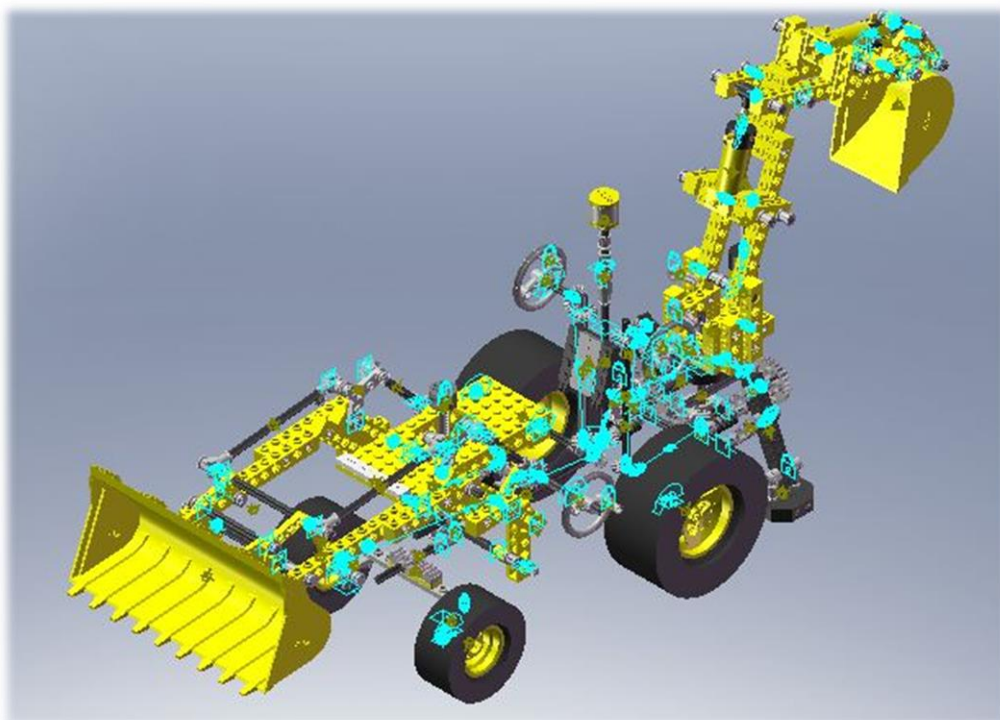
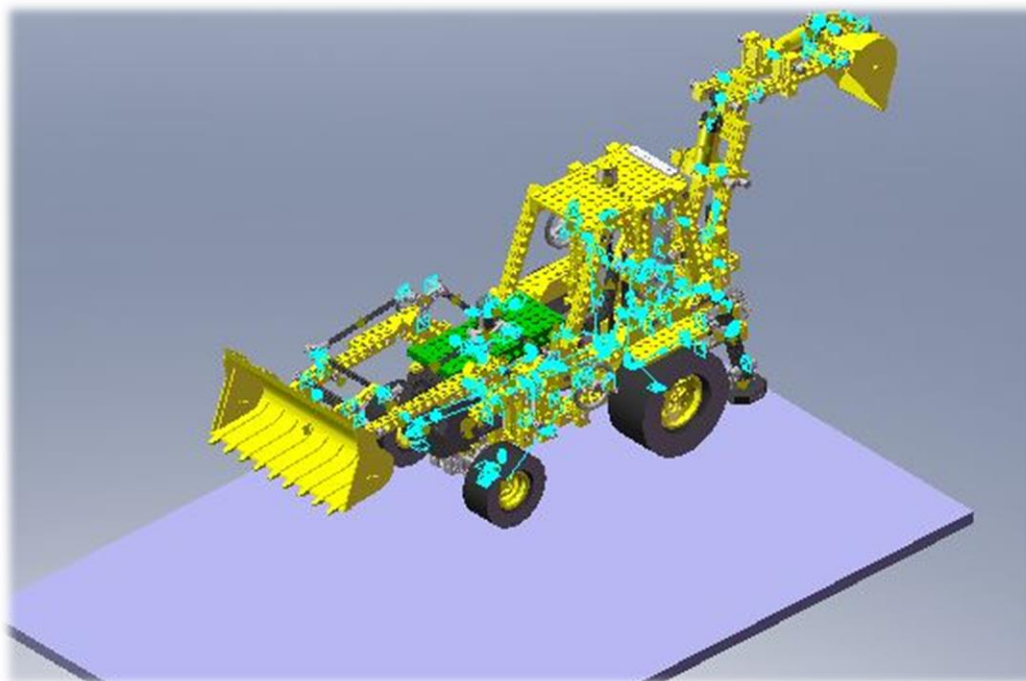


Fig. 135 Simulación dinámica del modelo ev3-0125 de Isogawa

5.9.4 8862-1

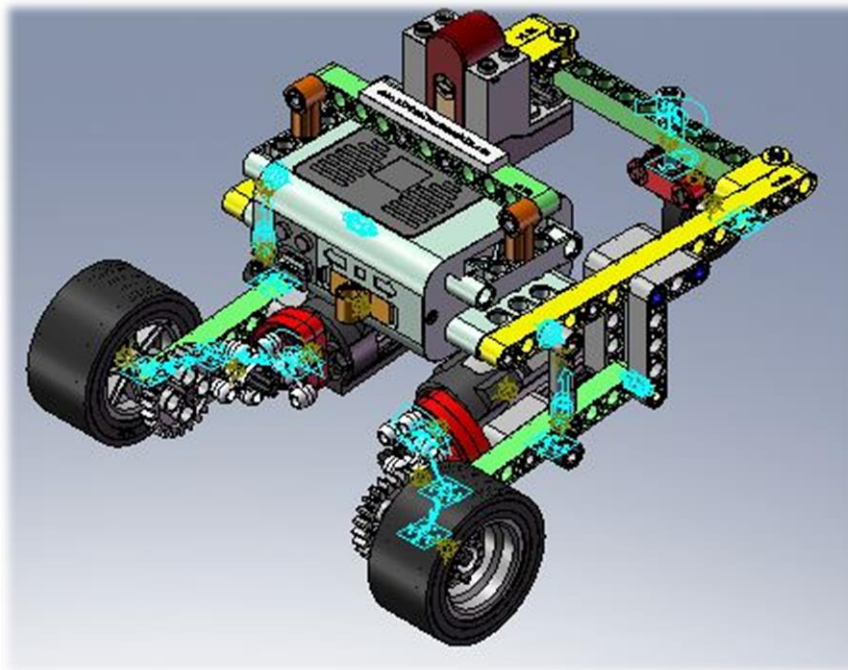


*Fig. 136 Modelo Lego© Technic 8862-1 autoalineado*

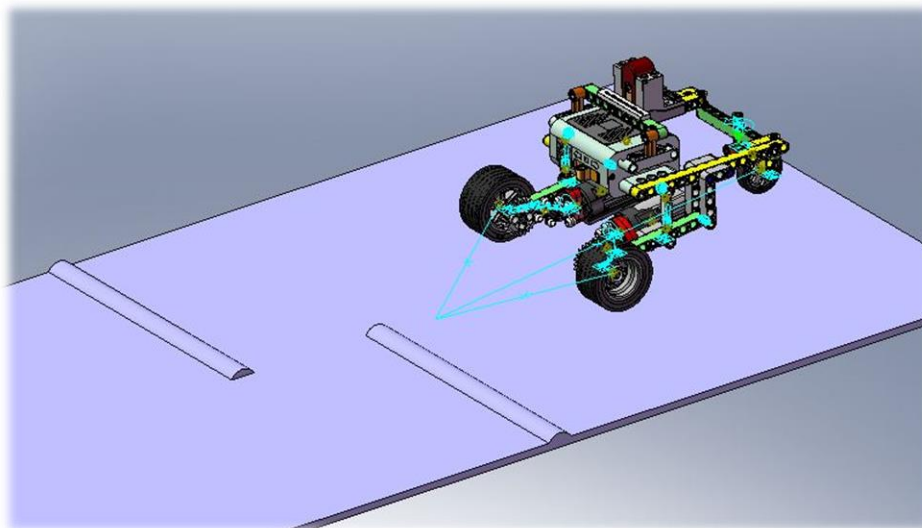


*Fig. 137 Simulación dinámica del modelo Lego© Technic 8862-1*

### 5.9.5 pw-078



*Fig. 138 Modelo pw-078 autoalineado de Isogawa*



*Fig. 139 Simulación dinámica del modelo pw-078 de Isogawa*

5.9.6 8048-1

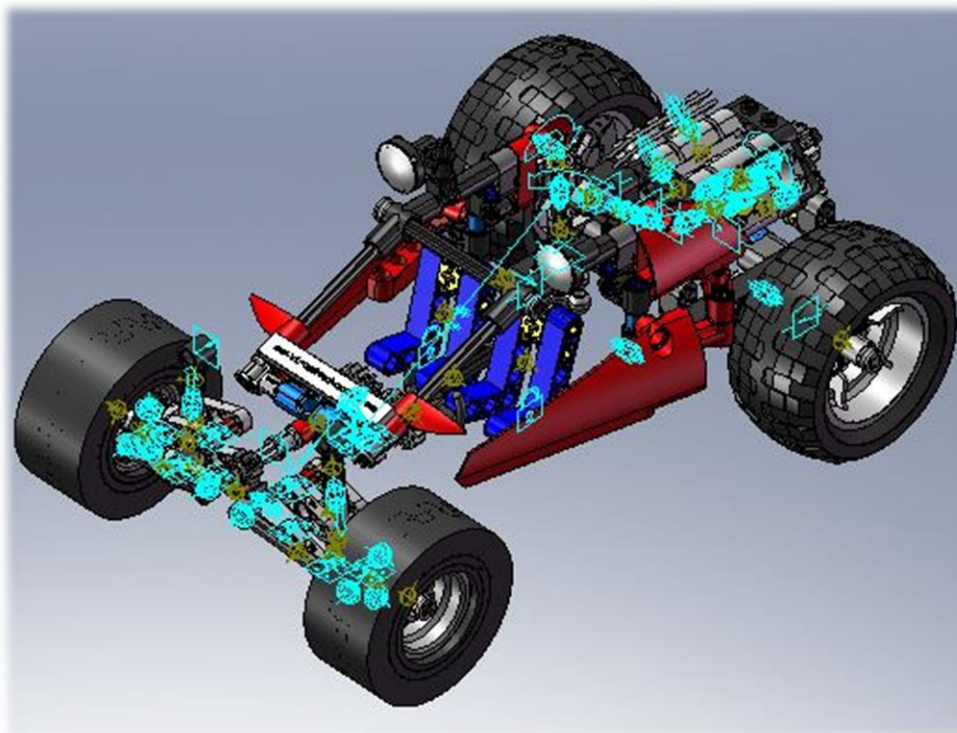


Fig. 140 Modelo Lego© Technic 8048-1 autoalineado

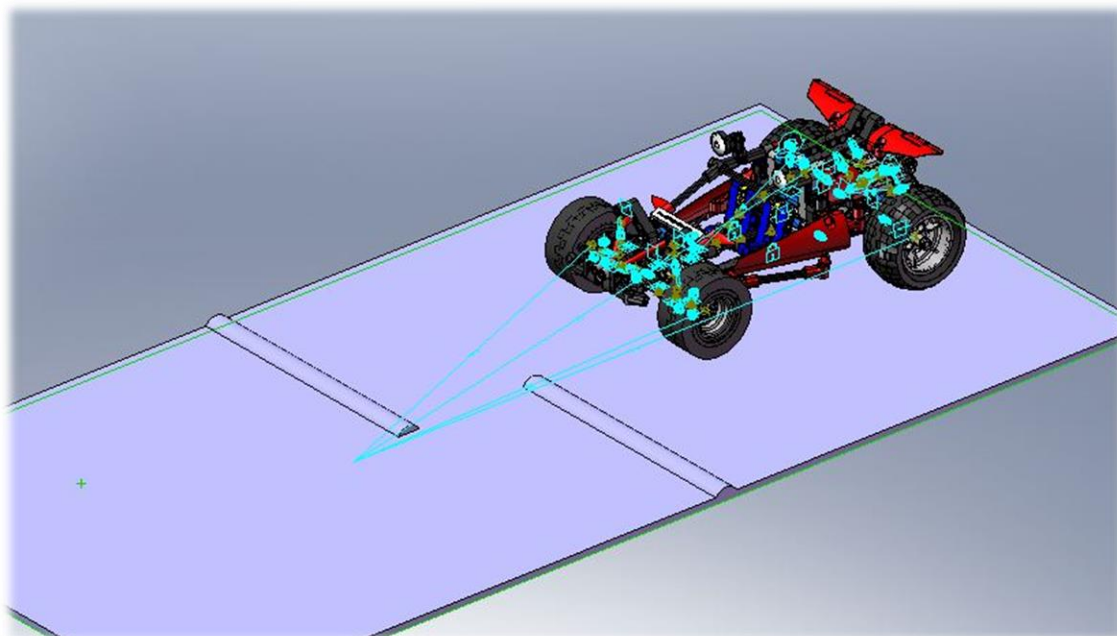


Fig. 141 Simulación dinámica del modelo Lego© Technic 8048-1

### 5.9.7 8052-1

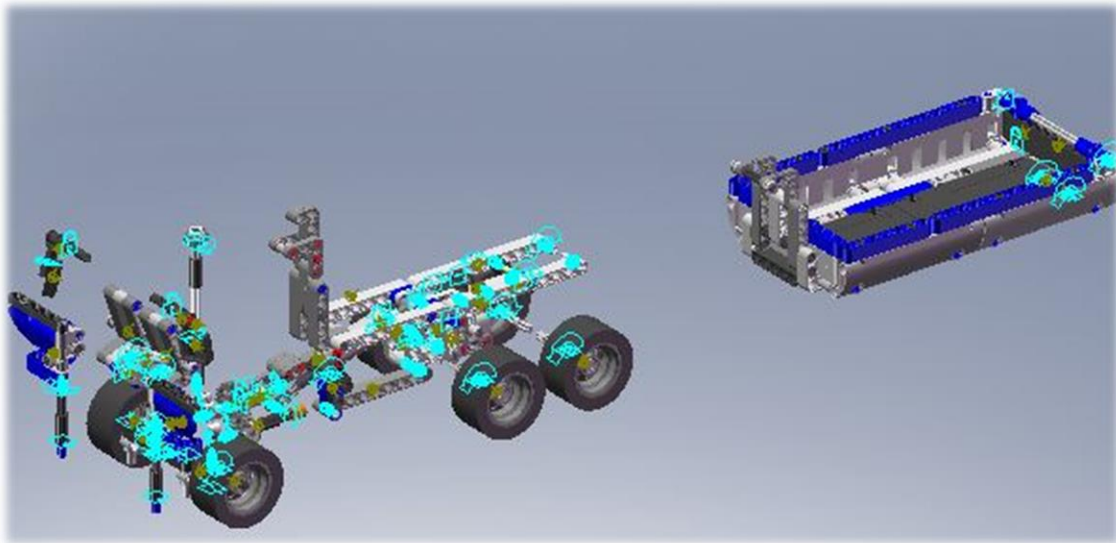


Fig. 142 Modelo Lego® Technic 8052-1 autoalineado

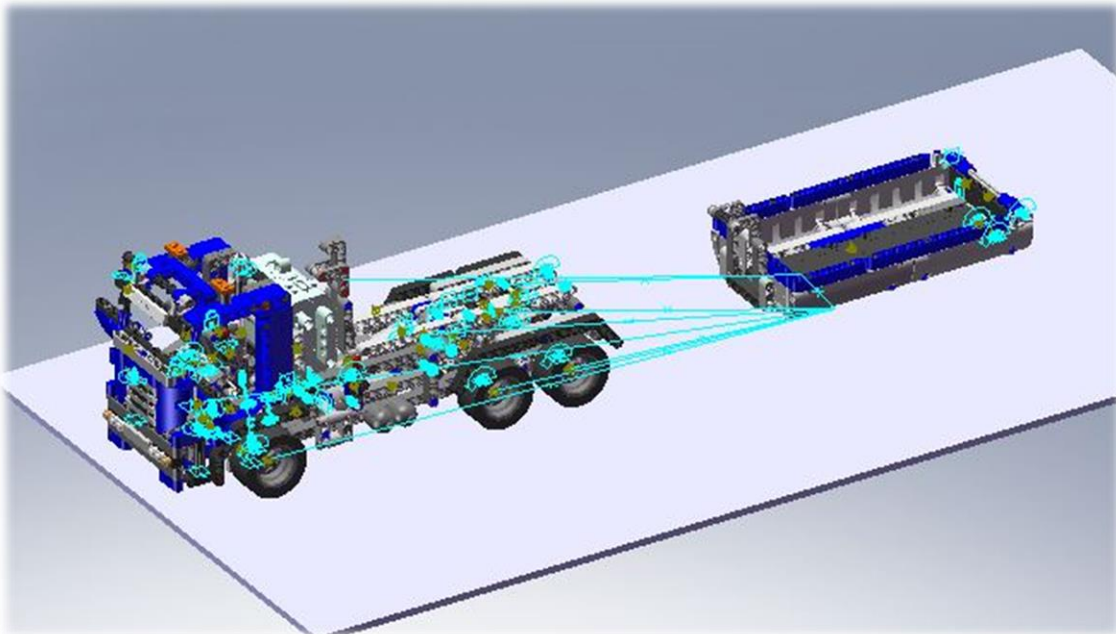


Fig. 143 Simulación dinámica del modelo Lego® Technic 8052-1

### 5.9.8 42000-2

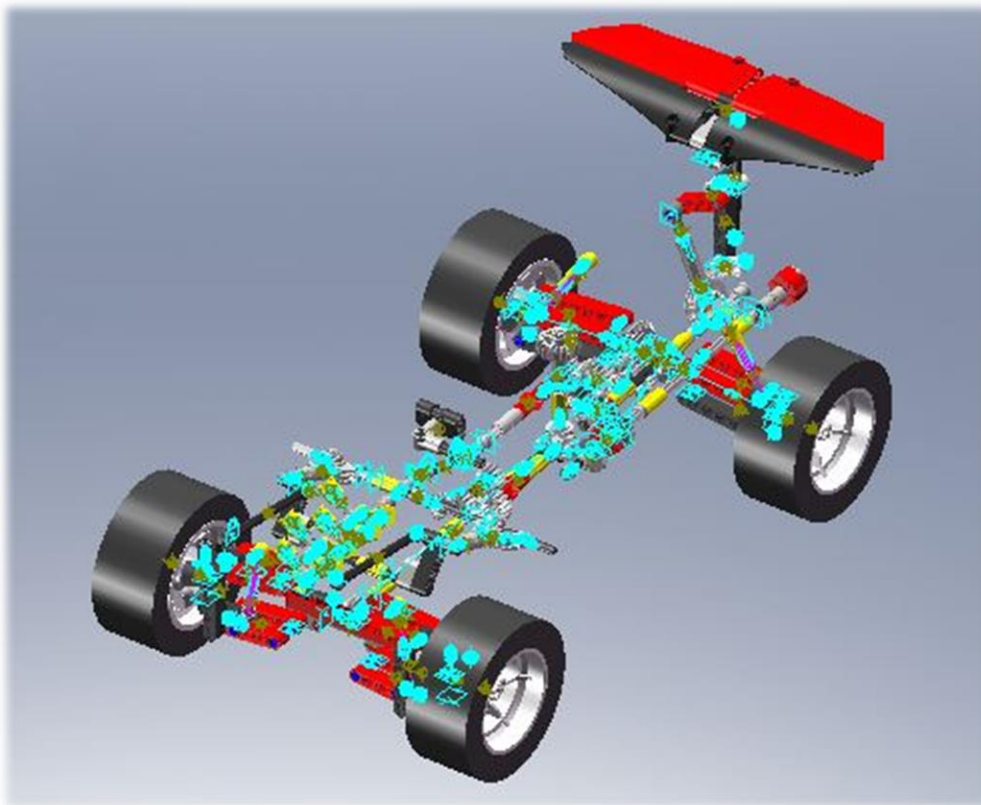


Fig. 144 Modelo Lego© Technic 42000-2 autoalineado

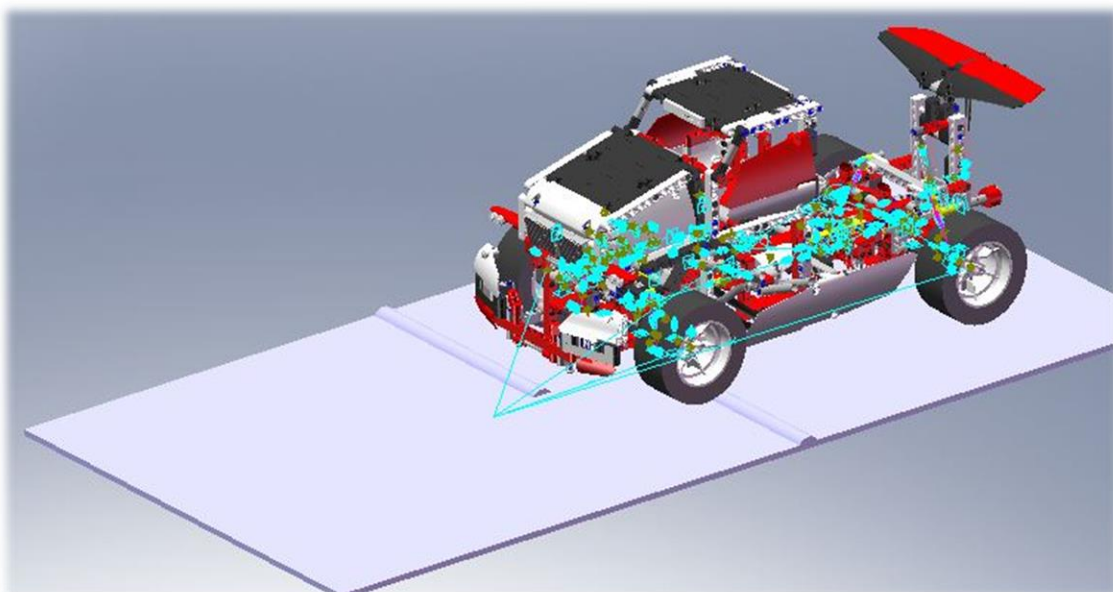
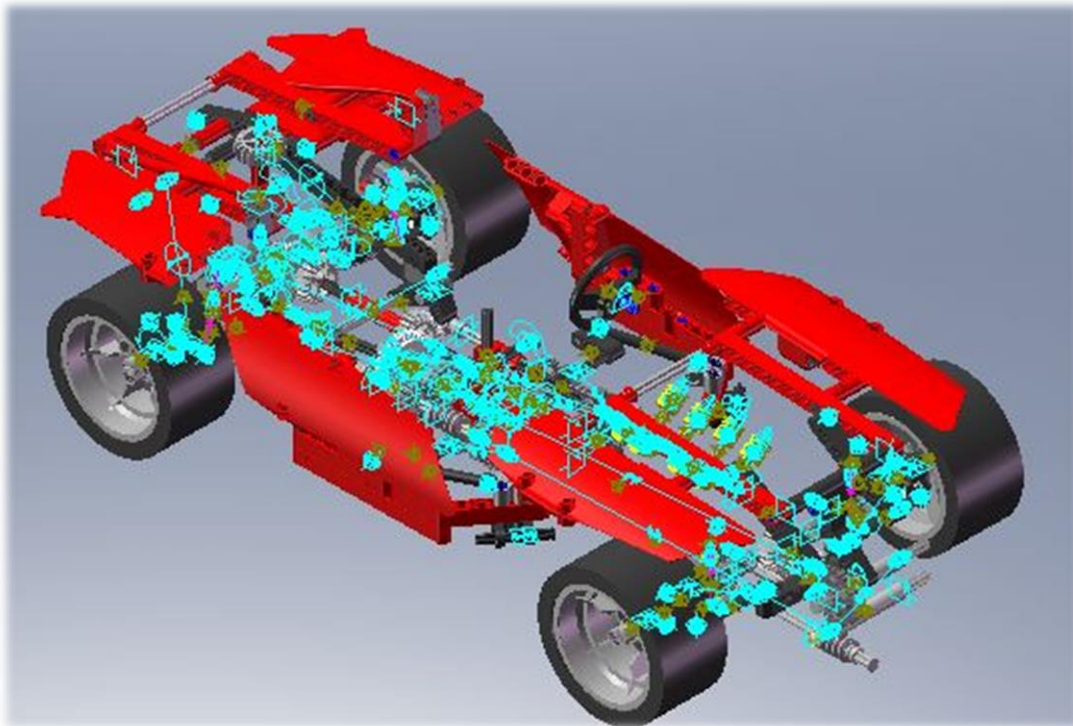
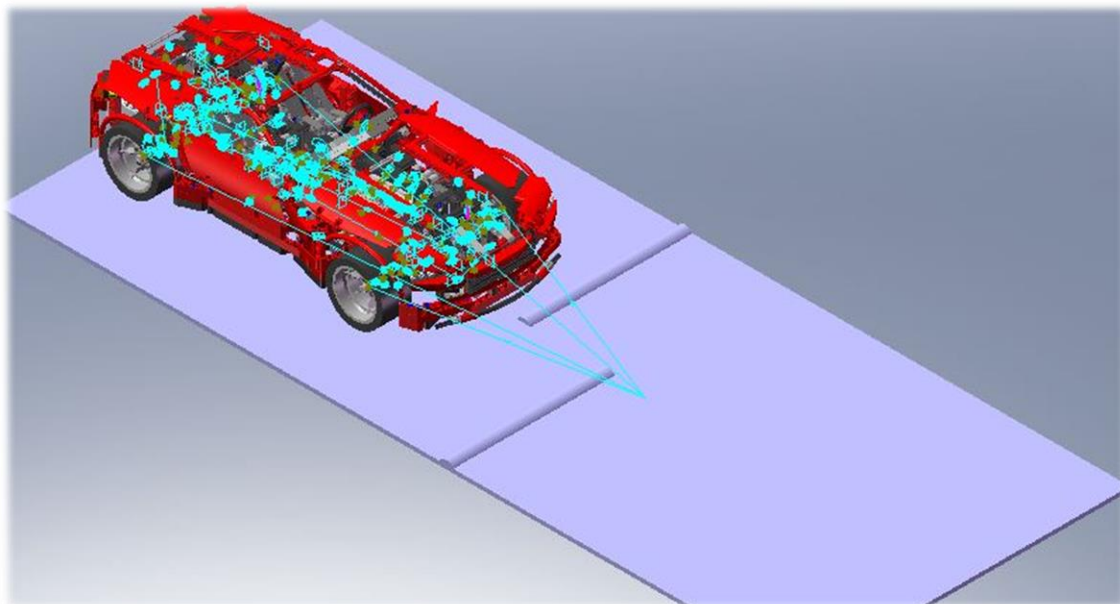


Fig. 145 Simulación del modelo Lego© Technic 42000-2

### 5.9.9 8070-1



*Fig. 146 Modelo Lego© Technic 8070-1 autoalineado*



*Fig. 147 Simulación dinámica del modelo Lego© Technic 8001-1*



5.9.10 42043-1

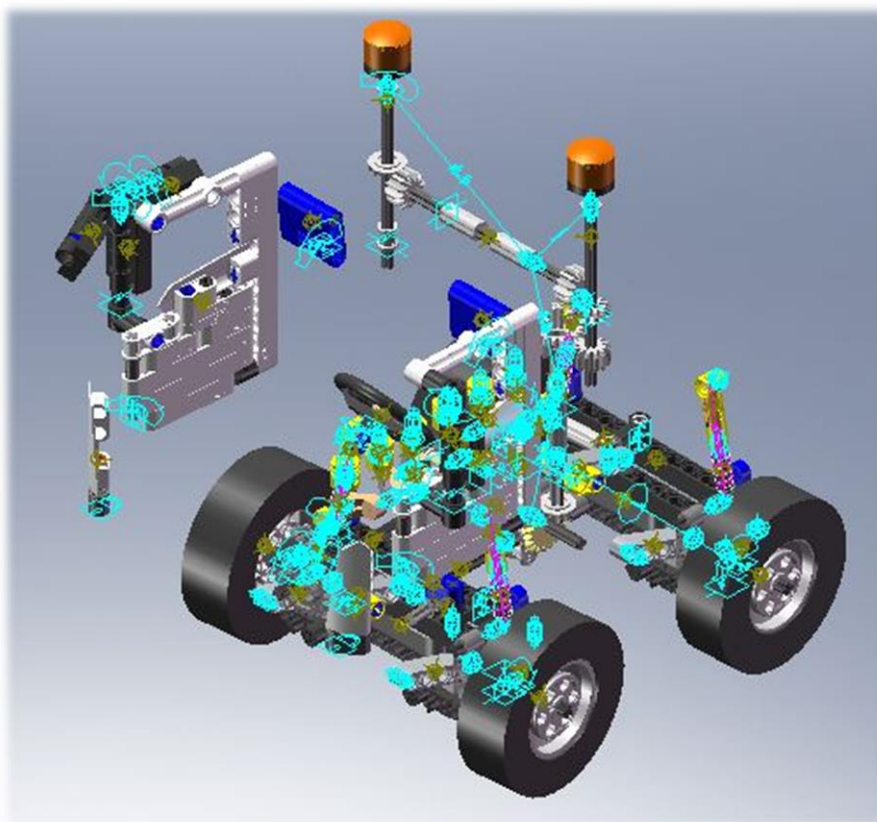


Fig. 148 Modelo Lego© Technic 42043-1 autoalineado

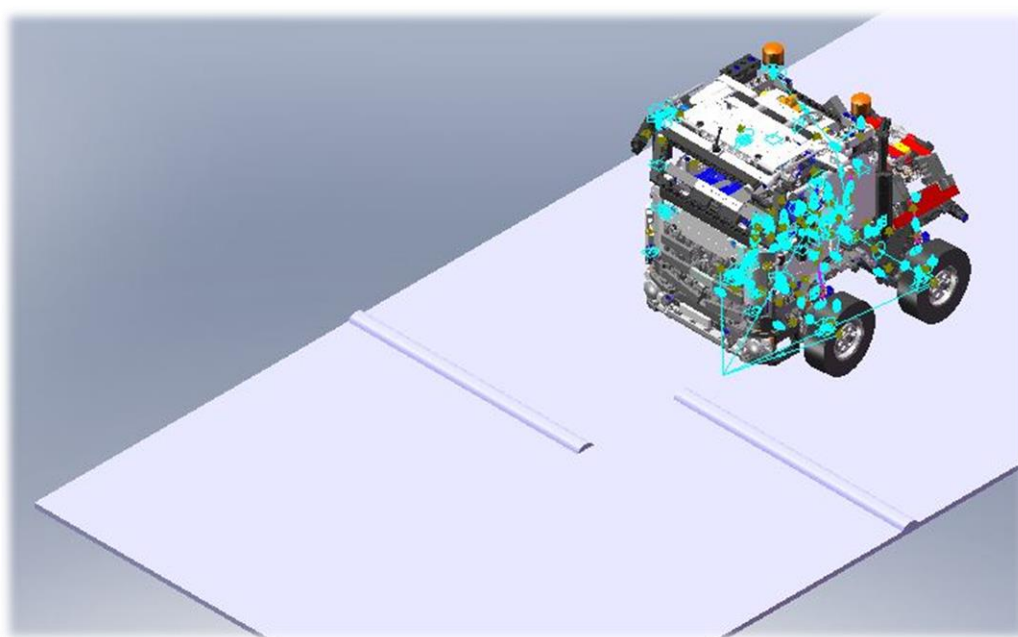


Fig. 149 Simulación dinámica del modelo Lego© Technic 42043-1



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



## 6. Resumen

La primera parte del trabajo hace referencia al proceso de ensamblado. En ella se realizan tres actividades guiadas mediante videos. La primera, en la que se utilizan modelos simples de Isogawa, grabadas sin audio, excepto una. La segunda en la que se usan modelos sencillos de la serie EV3 de Isogawa, grabadas con audio. La tercera en la que se monta un modelo Lego® Technic comercial que representa a escala un tractor excavador. Esta ha sido grabada con audio y a lo largo de los videos aparecen las dificultades típicas que suelen aparecer en este tipo de actividades. Tras resolver las dificultades se adquiere poco a poco la experiencia que hace falta en el manejo del programa SolidWorks 2007 y se aprende la diferencia entre componente y pieza que es fundamental. Una vez finalizadas las actividades guiadas se prosigue ensamblando siete modelos más. Dos de ellos pertenecientes a los modelos de Isogawa y los otros cinco modelos comerciales de Lego® Technic, de los cuales uno ha sido construido físicamente.

La segunda parte del trabajo está centrada en la simulación cinemática y dinámica de los mecanismos y las máquinas. En esta parte ya se cuenta con las piezas que componen cada modelo, que fueron compactadas después de la primera fase del trabajo, de tal forma que los componentes que forman las piezas ya no se pueden modificar. El primer paso es montar de nuevo los ensamblajes en SolidWorks definiendo las relaciones de posición para que el modelo sea operativo. En segundo lugar, hay que crear el modelo cinemático autoalineado en el complemento CosmosMotion. Esto quiere decir que se han seleccionado los pares cinemáticos de manera que no haya restricciones en exceso para que la vida útil de la máquina sea mayor. Los pares cinemáticos que han sido elegidos, indican el tipo de cojinetes que habría que colocar en una máquina a escala real en las uniones entre las piezas. Los modelos se simulan dos veces cada uno. La primera es una simulación cinemática en la que el chasis permanece fijo en el espacio. La segunda simulación es dinámica ya que se hace progresar cada modelo sobre una base. En total se han realizado tres actividades guiadas mediante videos. Posteriormente se han realizado las simulaciones de los mismos siete modelos que se montaron durante la fase del ensamblado, de los cuales dos eran modelos de Isogawa y cinco modelos Lego® Technic comerciales y uno de ellos fue construido físicamente.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



## 7. Bibliografía

Libros y manuales:

“Yoshihito, I, LEGO© Technic Tora no Maki”

“Yoshihito, I, *The LEGO© MINDSTORMS EV3 Idea Book*”

” L. Reshetov, *Self-aligning mechanisms*, Mir, 1982”

“J.L. Oliver, *Creación Modelos Virtuales Maquinas*”

“J.L. Oliver, *Simulación Cinemática y Dinámica Computacional de Maquinas*”

Ayuda de programas:

Documento de ayuda SolidWorks 2007 SP3.1

COSMOSMotion User’s Guide

Webs:

<https://www.lego.com>

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

<https://brickset.com/>

<https://www.bricklink.com/v2/main.page>

<http://www.virtualtechmodels.com/>

Imágenes:

<http://www.renovarcarnet.com/dgt/suspension/suspension-amortiguacion>

<http://jmora7.com/Mecan/Mecan/index4.htm>

<http://www.technicbricks.com/2015/01/2h15-lego-technic-releases.html>

<https://es.pinterest.com/pin/263882859393081636/>

<http://ec.traetelo.com/lego-technic-42000-grand-prix-racer-p-1452953.html>



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



# Presupuesto

## Índice:

1. Introducción .....	81
2. Capítulo 1: Software.....	81
3. Capítulo 2: Equipo informático .....	82
4. Capítulo 3: Modelos Lego® Technic .....	83
5. Capítulo 4: Modelos virtuales Lego® Technic .....	84
6. Coste final.....	85



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



# 1. Introducción

A continuación, aparece el presupuesto en detalle de este proyecto. Hay que señalar que el presupuesto ha sido elaborado bajo el punto de vista en el que un único cliente encarga el trabajo, por lo tanto, se trata de un presupuesto a medida. Esto quiere decir que todos los gastos de los modelos Lego® Technic corren a cuenta suya, por lo cual el precio final del presupuesto será elevado, ya que se han empleado muchos recursos.

El presupuesto se desglosa en los siguientes apartados.

1. Software
2. Equipo informático
3. Modelos Lego® Technic
4. Modelos virtuales Lego® Technic

En el caso de que se hubiera elaborado bajo un punto de vista comercial en el que los modelos Lego® Technic virtuales no se realizan para un único cliente, sino que se dirigen al público en general, habría que haber realizado estimaciones y estudios de mercado para hacer un presupuesto mucho más ajustado.

## 2. Capítulo 1: Software

Para realizar el proyecto ha sido necesario conseguir la licencia del programa CAD, SolidWorks 2007 y del complemento CosmosMotion. Para esta clase de programas informáticos, el primer año hay que adquirir la licencia y posteriormente pagar la cuota anual para ir actualizando el programa y la licencia. Como es un programa muy habitual en el sector y se puede usar para otros proyectos asumimos que el periodo de la amortización será de un año. Se asume que la jornada laboral es de 8 horas diarias, 5 días a la semana y 48 semanas al año.

Objeto	Unidades	Precio unitario (€)	Horas al año	Horas del proyecto	Amortización	Coste (€)
SolidWorks 2007 + CosmosMotion	1	5300	1920	300	15,63%	828,13
					<b>Total</b>	<b>828,13</b>

Tabla 2 Capítulo 1: software

### 3. Capítulo 2: Equipo informático

Para la construcción de los modelos Lego® Technic virtuales es necesario un ordenador que cumpla con los requisitos mínimos del software. Se ha considerado que el periodo de amortización del equipo será de 4 años.

Objeto	Unidades	Precio unitario (€)	Coste (€)
Kingston SSDNow V300 120GB	1	67,50	67,50
MEMORIA DDRIII 8GB KINGSTON 1600MHz	1	74,80	74,80
Raijintek Themis CPU Cooler	1	20,90	20,90
ASROCK H77 PRO4/MVP	1	65,70	65,70
CPU Intel Core i5-3570	1	166,80	166,80
Cooler Master N300 N1. USB 3.0	1	39,20	39,20
Fuente de Alimentación Corsair VS550 550Watt	1	42,80	42,80
Seagate 3.5" 2TB SATA3 BARRACUDA	1	70,10	70,10
Gigabyte GeForce GTX 760 OC 2GB GDDR5	1	225,50	225,50
Samsung LS24F350FHUXEN 24" LED	1	139,00	139,00
Logitech Wireless Combo MK330	1	36,95	36,95
Windows 8.1 PRO 64 bits	1	125,00	125,00
		Subtotal	1074,25
		Amortización	3,90%
		<b>Total</b>	<b>41,90</b>

Tabla 3 Capítulo 2: hardware

## 4. Capítulo 3: Modelos Lego© Technic

Para poder crear los modelos virtuales son imprescindibles los modelos reales Lego© Technic para hacer el trabajo de una forma rápida y efectiva. Como varios de los modelos que han sido necesarios son antiguos y ya solo se pueden adquirir a través de vendedores particulares, se ha establecido su precio como el promedio al que son posibles de conseguir a través de la web: [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com), ya que cuenta con las estadísticas de los precios máximos, mínimos y promedios al que han sido vendido cada modelo.

Modelo	Unidades	Precio unitario (€)	Coste (€)
8048	1	53,33	53,33
8052	1	152,15	152,15
42000	1	134,60	134,60
8070	1	188,27	188,27
42043	1	199,99	199,99
		Total	728,34

Tabla 4 Capítulo 3: modelos Lego© Technic

## 5. Capítulo 4: Modelos virtuales Lego® Technic

En este capítulo se explica el coste de la mano de obra de construir, auto-alinear y simular los modelos Lego® Technic virtuales. Se supone que el coste de la mano de obra es de 30€/h, incluyendo todos los gastos.

Modelo Lego® Technic Virtual	Tarea	Precio (€/h)	Horas	Coste (€)
EV3-0125	Ensamblaje	30	2,35	70,50
	Simulación	30	1,46	43,80
PW-078	Ensamblaje	30	4,54	136,20
	Simulación	30	3,76	112,80
8048-1	Ensamblaje	30	15,88	476,40
	Simulación	30	6,58	197,40
8052-1	Ensamblaje	30	33,74	1012,20
	Simulación	30	13,16	394,80
42000-2	Ensamblaje	30	36,67	1100,10
	Simulación	30	18,80	564,00
8070-1	Ensamblaje	30	55,17	1655,10
	Simulación	30	23,51	705,30
42043-1	Ensamblaje	30	67,14	2014,20
	Simulación	30	17,24	517,20
			<b>Total</b>	<b>9000,00</b>

Tabla 5 Capítulo 4: mano de obra

## 6. Coste final

Para acabar con el presupuesto total del proyecto solo falta sumar todas las partidas y aplicar el IVA y el beneficio industrial. Empezaremos sumando todos los capítulos para calcular el coste de realización.

Capítulo	Coste (€)
Software	828,13
Equipo informático	41,90
Modelos Lego© Technic	728,34
Modelos virtuales	9000,00
<b>Subtotal</b>	<b>10598,37</b>

*Tabla 6 Resumen del presupuesto*

Para llegar al presupuesto final una vez sumadas todas las partidas, se añade el beneficio industrial que se supone de un 6% sobre el coste de realización y el IVA del 21% sobre el coste de realización más el beneficio industrial.

Subtotal	10598,37€
Beneficio Industrial	6%
IVA	21%
<b>TOTAL</b>	<b>13593,47€</b>

*Tabla 7 Presupuesto final*

Por lo tanto, el presupuesto final del proyecto es de:

*Trece mil quinientos noventa y tres con cuarenta y siete euros*