



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



# Resumen

---

El resultado del presente Trabajo de Fin de Grado es la construcción virtual de los modelos LEGO® Technic y su posterior simulación. Por tanto, este proyecto se divide en dos bloques.

Para llevar a cabo todo el proceso del montaje virtual de los modelos, bloque 1, la herramienta de trabajo fundamental es el SolidWorks, en este caso, el SolidWorks 2007 SP 5.0. Para empezar con este bloque el profesor envía actividades guiadas para realizar los primeros montajes de aprendizaje. Una vez se adquiere el suficiente conocimiento se procede al montaje de los modelos LEGO® Technic enviados por el tutor. Estos modelos se pueden encontrar en cualquier juguetería y son réplicas de vehículos y máquinas reales.

El proceso de montaje comienza con la selección de los componentes que constituyen el modelo. Posteriormente se procede a armar las piezas que formaran el modelo virtual, estableciendo las relaciones de posición entre ellas para que el modelo desempeñe sus funciones.

El segundo bloque consiste en llevar a cabo la simulación de los modelos, montados. Para comenzar el bloque, análogamente, también se dispone de actividades guiadas. Llegado el momento se procede a la simulación virtual de los modelos, a través de la extensión de SolidWorks, CosmosMotion. La tarea consiste en introducir los pares cinemáticos en los puntos de contacto de cada pieza, para simular el comportamiento de los cojinetes en las máquinas reales. Una vez concluida la simulación el modelo debe moverse sobre una base creada, simulando todos los movimientos de sus mecanismos.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

# Contenido

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

<i>Memoria.....</i>	<i>Página 8</i>
<i>Presupuesto.....</i>	<i>Página 79</i>



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



## ÍNDICE MEMORIA

1. OBJETO DEL PROYECTO .....	8
2. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1 Planteamiento profesional .....	9
2.2 Competencias a adquirir.....	9
2.3 El modelo LEGO® Technic. ....	9
2.3.1 Componentes LEGO® Technic .....	11
2.4 El modelo LEGO® Technic virtual.....	11
2.5 Mecanismos LEGO® Technic y mecanismos reales. ....	12
2.6 Modelos Isogawa Yoshihito. ....	13
2.7 Softwares utilizados .....	14
3. ENSAMBLAJE DEL MODELO LEGO® TECHNIC VIRTUAL.....	15
3.1 Introducción al ensamblaje en solidworks.....	15
3.2 Ensamblaje.....	16
3.2.1 Selección de los componentes. ....	16
3.2.2 Personalización de los componentes .....	17
3.2.3 Nomenclatura del ensamblaje y sus piezas. ....	17
3.3 Restricciones. ....	19
3.3.1 Relaciones de posición estándar. ....	20
3.3.2 Relaciones de posición avanzadas. ....	24
3.4 Operaciones auxiliares. ....	26
3.4.1 Geometría de referencia.....	26
3.4.2 Elementos flexibles .....	28
3.5 El proceso de ensamblado.....	30
4. MODELOS LEGO® TECHNIC VIRTUALES.....	31
4.1 Actividad m1-a1a .....	31
4.2 Actividad m1-a2a.....	41



*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

4.3	Actividad m1-a5a .....	43
4.4	Actividades “no guiadas” .....	44
5.	<b>MODELO CINEMÁTICO AUTO-LINEADOR .....</b>	<b>49</b>
5.1	Introducción al modelo cinemático auto-alineador .....	49
5.2	Conceptos básicos.....	50
5.2.1	Par cinemático .....	50
5.2.2	Grados de libertad .....	50
5.2.3	Movilidad de un mecanismo .....	50
5.2.4	Clases de pares cinemáticos.....	51
5.3	Mecanismos auto-alineados en COSMOS MOTION. ....	57
5.3.1	<i>Introducción a COSMOS MOTION</i> .....	57
5.3.2	<i>El entorno de trabajo</i> .....	57
5.3.3	<i>Pares cinemáticos en COSMOS Motion</i> .....	59
5.3.4	<i>Acoplamientos</i> . ....	61
5.3.5	<i>“Motion” definido en el par cinemático</i> . ....	63
6.	<b>Simulación de los modelos LEGO® Technic virtual en COSMOS Motion. ....</b>	<b>66</b>
6.1	Simulación cinemática.....	66
6.2	Simulación dinámica.....	67
7.	<b>MODELOS SIMULADOS .....</b>	<b>68</b>
7.1	vLTm 8816-1_2016 .....	68
7.2	vLTm 8459-2_2016.....	69
7.3	vLTm 8862-1_2016.....	70
7.4	vLTm pw-114_2016.....	71
7.5	vLTm nico-forest-2016.....	72
7.6	vLTm nico-piaggio_2016.....	72
7.7	vLTm nico-jeep_2016.....	73
7.8	vLTm 42008-2_2016.....	74
8.	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>76</b>
8.1	Libros y manuales .....	76
8.2	Páginas web .....	76



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



## 1. OBJETO DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo principal la adquisición del conocimiento necesario para manejar y controlar de forma adecuada y eficaz herramientas de diseño en el ámbito de la ingeniería, debido a su gran utilidad en el ámbito laboral. En este proyecto el programa computacional usado es el SOLIDWORKS.

Para llevar a cabo el desarrollo del aprendizaje se han utilizado los denominados modelos Lego® Technic como modelos del proyecto. Se trata de un sistema de construcción modular desarrollado por ingenieros cualificados que pretenden emular la apariencia y funcionamiento de las máquinas reales. Estos modelos son fáciles de montar y simplifican el funcionamiento de todos los mecanismos que se utilizan en la realidad pero a su vez muestran un grado de complejidad técnica. Todos los modelos que posteriormente se exponen en el contenido del proyecto se pueden encontrar fácilmente en cualquier juguetería.

El proceso utilizado para la elaboración del presente TFG ha sido desarrollado durante los últimos años por el profesor responsable del mismo, y que sigue desarrollando hoy en día. El proceso consiste en lo siguiente:

- I. En primer lugar el profesor suministra los componentes virtuales necesarios para llevar a cabo los montajes. Una vez se ha dispuesto de ellos se procede a la búsqueda y selección de los componentes adecuados para montar de forma virtual el modelo. En este caso el programa de CAD utilizado es el "SOLIDWORKS 2007". Conjuntamente con los componentes el profesor también proporciona las instrucciones de montaje.
- II. Para la tarea del montaje se constituyen las piezas, que se definen como un conjunto de componentes ensamblados entre sí y los cuales no tienen movimiento relativo entre ellos o si lo poseen es irrelevante para la estabilidad del modelo en sí.
- III. Una vez constituidas las piezas se procede a compactarlas. La compactación es un proceso a través del cual, los conjuntos de componentes virtuales que constituyen una pieza pasan a ser una única entidad virtual. Este proceso se aplica sistemáticamente a lo largo del proyecto.
- IV. Con las piezas ya compactadas se procede al montaje de las mismas con la herramienta de CAD, SOLIDWORKS 2007. Se trata de establecer unas relaciones de posición entre todas las piezas que constituyen el modelo para que se consiga como resultado final el modelo lego® technic correspondiente.



- V. A partir de este modelo cinemático, el siguiente paso consiste en realizar una simulación virtual. Esta simulación permite mostrar el movimiento de la “máquina” y observar así el correcto funcionamiento de todos sus mecanismos. De la misma forma se seleccionan y aplican los pares cinemáticos para que el modelo quede autoalineado y por tanto queden libres de restricciones en exceso. Este proceso es necesario para un posterior cálculo de resistencia de los componentes mediante programas CAE de elemento finitos.

Los conocimientos adquiridos pueden ser aplicados a la realidad mediante las herramientas de CAD y de simulación utilizadas en este proyecto.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1 *Planteamiento profesional*

Un cliente quiere construir una máquina a escala real. Este cliente ha construido un prototipo a escala con piezas LEGO® Technic reales fácilmente accesibles a través del “ebay de Lego”, [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com). Encarga que se solucione el tipo de cojinetes que hay que instalar en la máquina real, en los puntos de contacto entre piezas de la máquina, para que esta quede “auto-alineada”, pues el objetivo es conseguir una vida útil lo más grande posible, y con el mínimo coste de mantenimiento. Está en contra de la “obsolescencia programada”.

El encargo es aceptado y se indica el resultado al cliente: En primer lugar se facilita un modelo virtual de la máquina a escala ensamblado en solidworks. Otro modelo en la extensión CosmosMotion con la identificación de cada tipo de cojinete. Por último, una simulación cinemática y dinámica para facilitar la máxima información al cliente.

### 2.2 *Competencias a adquirir*

1. Conocimientos básicos y avanzados sobre el manejo de softwares de aplicación en la ingeniería.
2. Conocimientos sobre la teoría de máquinas y mecanismos.
3. Conceptos tecnológicos de uso industrial.
4. Conocimientos para el diseño y cálculo de máquinas y mecanismos industriales
5. Desarrollo de la creatividad y aplicación del conocimiento adquirido durante el grado.
6. Saber gestionar la información y su obtención.
7. Capacidad para desarrollar trabajos de forma autónoma y exponerlos ante el tribunal o cualquier otro organismo o entidad.

### 2.3 *El modelo LEGO® Technic.*

La compañía LEGO posee una línea de juguetes llamada “Technic” orientada a todos los públicos. Se caracteriza por tener una amplia gama de componentes de plástico fácilmente



### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

interconectables entre ellos. La finalidad principal de esta serie es conseguir unos modelos de mayor complejidad, incorporando piezas técnicas y específicas para cada modelo tales como suspensiones, baterías, pistones, motores eléctricos, cigüeñales, cilindros neumáticos...etc. Estas piezas permiten introducir movimientos más complejos, necesarios para la creación de modelos de grúas, coches, camiones...etc, de todo tipo y con mecanismos muy similares a los utilizados en la realidad.

Estos juguetes lego® technic consiguen asemejarse mucho a modelos de la realidad debido a la gran variedad de componentes específicos de los que disponen.

A lo largo de la historia la compañía ha ido evolucionando la complejidad de los modelos, pasando de la dinámica de construcción de bloques o “ladrillos” a la introducción de vigas y pasadores que permiten reducir el número de piezas y conseguir nuevas formas y funciones en el modelo, dotándola de mayor complejidad.



*Ilustración 0.- Lego Technic*

Para ver muchos de los modelos disponibles y los componentes necesarios para construirlos se puede recurrir a la página web [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com).



### 2.3.1 **Componentes LEGO® Technic**

Los componentes LEGO® Technic mostrados en la siguiente imagen son algunos de los muchos que hay comercializados y que cumplen con unas medidas cuidadosamente calculadas de tal forma que encajen a la perfección entre ellos en los modelos en los que se van a integrar. A la hora de virtualizar los componentes es de gran utilidad conocer las medidas estándar de cada una de ellas, ya que simplifica mucho el trabajo y agiliza los procesos de compactación y ensamblaje.



*Ilustración 1.- Componentes LEGO Technic*

### 2.4 **El modelo LEGO® Technic virtual**

El objetivo principal de los modelos LEGO® Technic virtual es aprender a manejar las aplicaciones de CAD para el diseño. De esta forma, los modelos virtuales se construyen a partir de las instrucciones del modelo real, en este caso con el programa SOLIDWORKS 2007. El proceso de montaje del modelo consiste en la unión de las piezas (conjunto de componentes agrupados que actúan como si fueran un solo componente virtual) a través de las relaciones de posición, que más adelante se explicarán en extensión, para que se conformen y se definan

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

los movimientos de los mecanismos del modelo en sí. De esta forma dispondremos de una máquina LEGO® Technic virtual semejante a la real y preparada para la posterior simulación virtual.

Otro objetivo es el de la selección e identificación de los componentes a utilizar en el montaje. Este proceso ayuda también a identificar las piezas de la máquina real, ya que se pretende que los mecanismos virtuales muestren de manera fidedigna el funcionamiento de los mecanismos instalados en las máquinas reales.

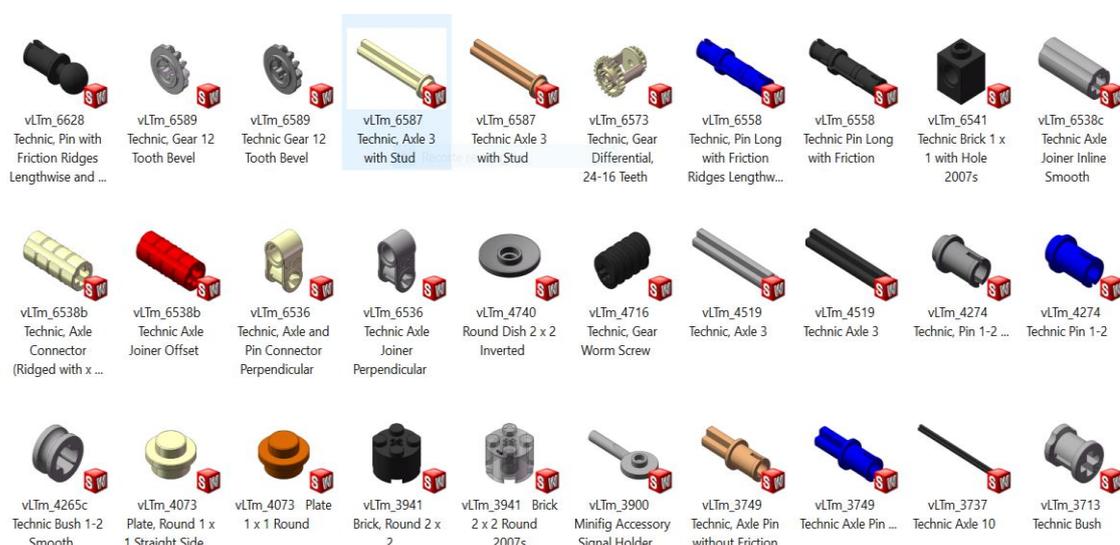


Ilustración 2.- Componentes virtuales LEGO® TECHNIC

Los programas informáticos donde se desarrollan los modelos permiten simular con detalle los movimientos de los mecanismos. De esta forma se consiguen modelos virtuales que se acercan mucho a los modelos reales.

## 2.5 Mecanismos LEGO® Technic y mecanismos reales.

Los mecanismos que se consiguen en los modelos LEGO® Technic realizan las mismas funciones que los mecanismos reales, en este caso se observa el brazo de una grúa accionado por cilindros neumáticos en el caso de la maqueta, e hidráulicos en el caso real. Esto se debe al avance en los componentes técnicos que se han desarrollado durante los últimos años.



*Ilustración 3.- Brazo de grúa de un LEGO Technic y uno real*



*Ilustración 4.- Cilindro actuador LEGO Technic y cilindro actuador real*

## 2.6 Modelos Isogawa Yoshihito.

Isogawa Yoshihito recopila en el libro “LEGO Technic idea book” cientos de mecanismos sencillos contruidos a partir de componentes LEGO® Technic con un estilo claro, conciso e intuitivo. En su libro nos muestra todo tipo de mecanismos, clasificados en fotografías, por lo que es fácil la localización de cada mecanismo.

En esta obra se clasifican todo tipo de mecanismos, y con todo tipo de dificultades. Desde mecanismos con ruedas hasta mecanismos con patas, engranajes, poleas, pares

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

prismáticos, pasadores y mucho más. Estos son algunos de los ejemplos de los mecanismos que se encuentran en el libro de Isogawa Yoshihito.



Ilustración 5.- Mecanismo ISOGAWA YOSHIHITO

## 2.7 Softwares utilizados

Solidworks es un software de CAD que permite el modelado mecánico en 3D. Este software es desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp, filial de Dassault Systèmes, S.A. La primera versión salió al mercado en 1995 con la finalidad de hacer más accesible la tecnología CAD. El programa es capaz de modelar piezas en 3D y extraer todo tipo de información, tales como planos, cálculos de resistencia...etc.

Para llevar a cabo el proyecto presente se han utilizado principalmente dos aplicaciones, el SOLIDWORKS 2007, y el SOLIDWORKS 2016. Con el primero se ha realizado prácticamente la totalidad del TFG ya que presenta ventajas con respecto a la versión más reciente. La ventaja principal es el manejo de la extensión COSMOS MOTION que permite hacer un cálculo de los grados de libertad y restricciones en exceso del modelo antes de realizar la simulación. Esto es de gran ayuda ya que se consigue agilizar el proceso. Por otra parte, una desventaja es la inutilización de la tarjeta gráfica del ordenador que se esté usando, ya que carece de los “drivers” necesarios para que esta actúe sobre el programa. El solidworks 2016 se ha utilizado para visualizar las simulaciones, ya que se consigue mejor calidad de imagen y rapidez en el proceso.

Otro software utilizado durante la realización del proyecto es el eDrawings, este software permite exportar archivos de solidworks y otros programas CAD, y visualizar tanto el modelo como la simulación, con una gran calidad de imagen. El uso de este programa es muy útil ya que permite visualizar y entender la estructura del modelo más rápidamente, seleccionando y ocultando las piezas que se quieran ver agilizando así el proceso de montaje en solidworks.



### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

El último programa utilizado es el Flash FXP 5, es un servidor donde el profesor sube todos los documentos necesarios para llevar a cabo la actividad y donde el alumno también carga los ficheros con la solución de las diferentes actividades. Se disponen de varias cuentas de entregas y de material personalizado. De esta forma cada alumno dispone de su cuenta y las entregas son muy eficientes y rápidas.

## 3. ENSAMBLAJE DEL MODELO LEGO® TECHNIC VIRTUAL

### 3.1 *Introducción al ensamblaje en solidworks.*

El proceso de ensamblaje de los modelos LEGO® Technic, constituye la primera fase del proyecto, donde el objetivo principal, es el de ensamblar los modelos virtuales con la ayuda de las instrucciones de montaje de los modelos reales.

Para llevar a cabo con éxito el proceso de ensamblaje, se dispone de todos los componentes virtuales que requiere cada modelo del TFG. Previamente el profesor se encarga de subir todo el material personalizado y requerido por el alumno al servidor FlashFXP 5, como se ha explicado anteriormente, y el alumno se encarga de elegir y seleccionar los diferentes componentes virtuales para cada modelo LEGO® Technic virtual.

La primera fase del proyecto, o BLOQUE 1, se puede dividir en dos tareas. A su vez, la primera de ellas, también puede dividirse en tres partes.

La primera parte de esta tarea, consiste en modelar diferentes componentes LEGO® Technic del libro de Isogawa, mencionado anteriormente. Estos modelos de menor complicación sirven de aprendizaje básico para el manejo adecuado del software utilizado, SOLIDWORKS 2007 SP 5.0, y disponen de vídeos mp4 realizados por el profesor del proyecto, donde se explica paso por paso el proceso de modelaje virtual.

Una vez adquirido el manejo necesario se comienza la segunda parte de la tarea donde se incrementa la complejidad y el tamaño de los modelos virtuales LEGO® Technic, también pertenecientes al libro citado anteriormente de Isogawa. En esta segunda parte se incrementa notablemente la dificultad de los mecanismos y se introducen componentes virtuales más sofisticados y técnicos.

Para acabar esta primera tarea se realiza un modelo virtual de alta dificultad y complejidad con ayuda de los vídeos mp4 grabados por el profesor y del documento eDrawing correspondiente al modelo virtual, donde podemos observar todos los componentes y piezas de los que se compone dicho modelo virtual. El modelo virtual correspondiente a la última parte de la primera tarea es el vLTm 8862-1-2016.

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

La segunda tarea de este BLOQUE 1 consiste en el ensamblaje de seis modelos LEGO® Technic virtuales, vLTm pw-114-2016, vLTm nico-forest-2016, vLTm nico-piaggio-2016, vLTm nico-jeep-2016, vLTm 42008\_b-2016 y vLTm 42029\_2016. Para la realización de esta tarea solo se dispone de las instrucciones de montaje de los modelos LEGO® Technic reales, por lo tanto, el alumno es quien debe realizar la conveniente compactación de las piezas, cada una de ellas debe contener como máximo diez componentes.

Finalizada esta primera fase del proyecto, el alumno es capaz de obtener un modelo LEGO® Technic virtual, con la única ayuda de las instrucciones de montaje del modelo real, con la correspondiente creación de las piezas que constituyen el ensamblaje conjunto y que introducen en él un movimiento relativo entre las mismas. Esto conlleva haber adquirido los conocimientos necesarios para pasar a la siguiente fase, o BLOQUE 2 del proyecto.

## 3.2 Ensamblaje

### 3.2.1 Selección de los componentes.

Para empezar con el ensamblaje de los modelos LEGO® Technic virtuales, antes de nada, se deben seleccionar todos los componentes necesarios que constituyen el modelo real de entre las carpetas del material personalizado proporcionadas por el profesor. Esta tarea, aunque parezca trivial, no lo es, pues la lista de componentes de los que se dispone es inmensa y muchos de los componentes comparten enormes similitudes entre ellos, dificultando así su correcta distinción.



Ilustración 6.- Selección de componentes

### 3.2.2 Personalización de los componentes

Una vez hemos completado la selección de todos los componentes que van a formar parte del modelo LEGO® Technic virtual nos disponemos a personalizarlos, dotándolos del color adecuado para cada ensamblaje, puesto que todos los componentes vienen por defecto del mismo color.

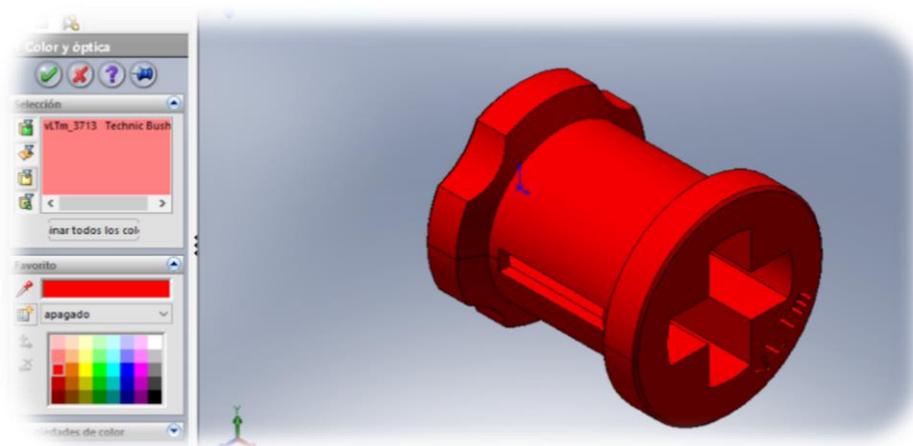


Ilustración 7.- Selección del color

En solidworks existe la posibilidad de aplicar el color a un componente y que lo mantenga para todos los mismos componentes dentro del mismo ensamblaje, o si se desea, se puede todos los colores diferentes que se requieran para un mismo componente dentro del ensamblaje.

### 3.2.3 Nomenclatura del ensamblaje y sus piezas.

Una vez tenemos los componentes adecuados listos para ser integrados en las piezas que conformarán el ensamblaje se debe empezar a nombrar de forma sistemática todas las partes que constituirán el modelo, así como el propio modelo LEGO® Technic virtual.

La nomenclatura utilizada en todos los modelos del presente proyecto es la siguiente:

- vLTm\_ xxxx-x\_part-xxxx\_2016: Las primeras cinco “x” corresponden al número del modelo virtual LEGO® Technic sobre el que se está trabajando. La palabra “part” significa que se trata de una pieza. Las últimas “x” corresponden al número de pieza que se nombra.



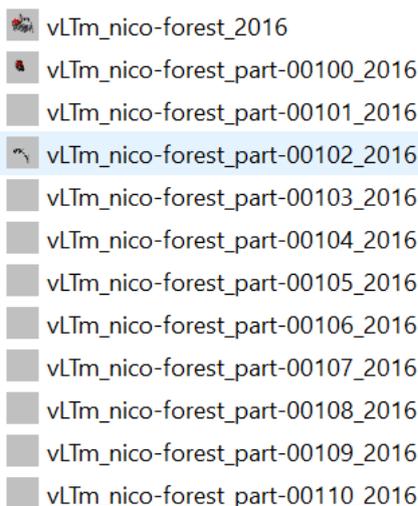
### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

Hay que destacar que las piezas pueden estar compuestas de un máximo de diez componentes. Estas piezas a su vez pueden también agruparse para formar otras piezas más grandes. Un ejemplo muy claro de este tipo de piezas y que encontramos a menudo a lo largo del proyecto son los chasis de los ensamblajes. Al tratarse de un elemento estructural del modelo muy importante y generalmente el más grande, se ha optado en este proyecto por agrupar todas las piezas que lo constituyen de forma sistemática en todos los modelos. De esta forma se pueden destacar dos tipos de nomenclatura para según que pieza se esté nombrando.

Para nombrar una pieza normal basta con seguir el siguiente formato, por ejemplo: vLTm\_46002-b\_part-0010. Nótese que al final se guarda el 0, la explicación de esto tiene que ver con la nomenclatura que se utiliza para las piezas que se agrupan entre ellas para formar una más grande.

Para nombrar una pieza constituyente de otra, es decir, que se ha agrupado junto con otras para formar una más grande, se debe seguir la siguiente nomenclatura: vLTm\_46002-b\_part-0011. Este nombre indica que dentro de la pieza anteriormente nombrada hay otra pieza, y además es la primera de las añadidas. En el caso de que se tengan que introducir más piezas dentro de otra se puede añadir un dígito “x” al final.

- vLTm\_xxxx-x\_2016: Corresponde a la nomenclatura que hay que utilizar para nombrar el ensamblaje del modelo que se está realizando, es decir, sirve para nombrar al conjunto de toda la actividad.



vLTm\_nico-forest\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00100\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00101\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00102\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00103\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00104\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00105\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00106\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00107\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00108\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00109\_2016  
vLTm\_nico-forest\_part-00110\_2016

*Ilustración 8. - Ejemplo de nomenclatura*

### 3.3 Restricciones.

Siguiendo con los procedimientos explicados anteriormente, se procede a la creación de las piezas para su posterior montaje. Para llevar a cabo con éxito el ensamblado del modelo virtual es necesario interconectar las piezas creadas anteriormente entre sí. Para ello es necesario el uso de las restricciones. Estas son las que hacen posible que cada pieza insertada en el modelo cumpla con su función.

Obviamente disponemos de un gran conjunto de piezas y cada una de las cuales debe interconectarse de forma personalizada para llevar a cabo su correcto funcionamiento dentro del modelo, por ello existen varios tipos de restricciones, llamadas relaciones de posición.

Estas restricciones o relaciones de posición, están en todas las piezas del modelo, por lo tanto el acceso a ellas es muy intuitivo. Estas se colocan en el árbol de piezas que hay en la parte izquierda de la pantalla, dentro su correspondiente pieza. De esta forma resulta muy fácil encontrar las restricciones que no actúan de forma correcta y así poder editarlas o eliminarlas.

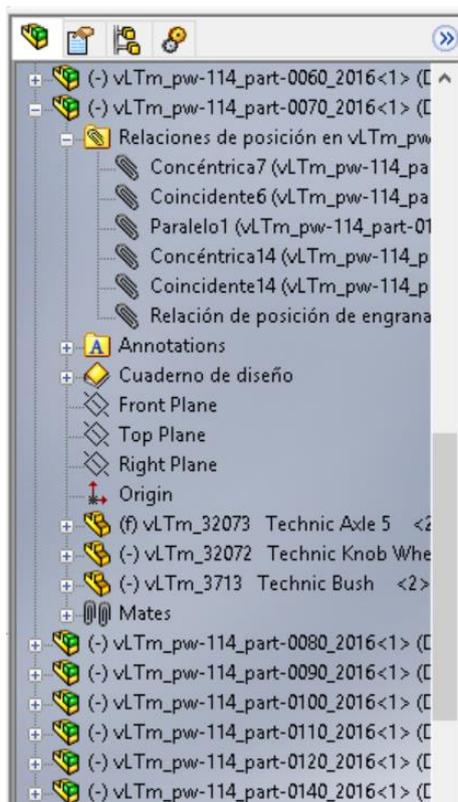
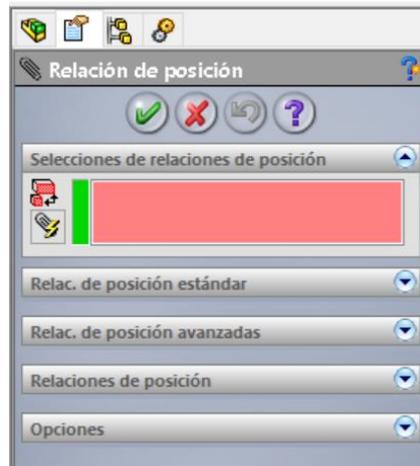


Ilustración 9.- Situación de las restricciones en el árbol de piezas

### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

Como se ha expuesto anteriormente, cada pieza requiere de un tipo de restricción, estas son las siguientes: relaciones de posición estándar y relaciones de posición avanzadas. Seguidamente se procede a su análisis.



*Ilustración 10.- Tipos de relaciones de posición*

#### **3.3.1 Relaciones de posición estándar.**

En el entorno de trabajo de solidworks, se pueden encontrar los siguientes tipos de relaciones de posición estándar.

- Coincidente.
- Paralelismo.
- Perpendicularidad.
- Tangencia.
- Concentricidad.
- Distancia.
- Angulo.
- Fijo.

### 3.3.1.1 Coincidente

Su finalidad es conseguir que cualquier superficie seleccionada de cualquier componente, coincida en el mismo plano, con la otra superficie del otro componente.

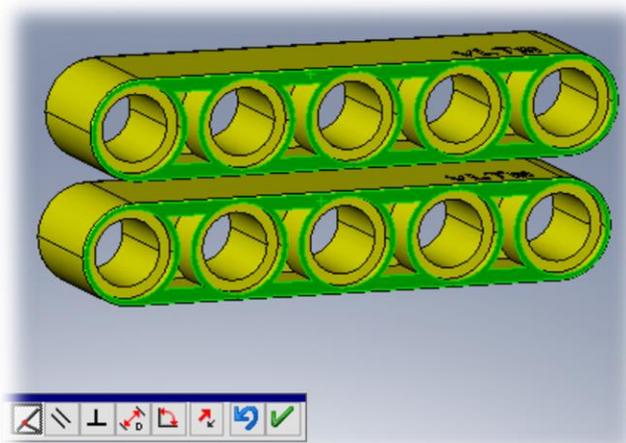


Ilustración 1.- Relación de posición estándar coincidente

### 3.3.1.2 Paralelismo

Esta relación de posición restringe la posición entre dos superficies de diferentes componentes para que sean paralelas entre ellas.

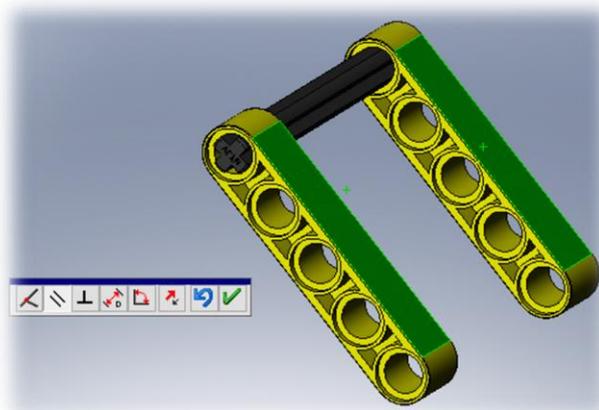


Ilustración 2.- Relación de posición estándar paralela

### 3.3.1.3 Perpendicularidad

Con la relación de posición perpendicularidad, se consigue que entre las dos superficies seleccionadas se determine un ángulo de  $90^\circ$  entre los planos que contienen a las superficies seleccionadas.

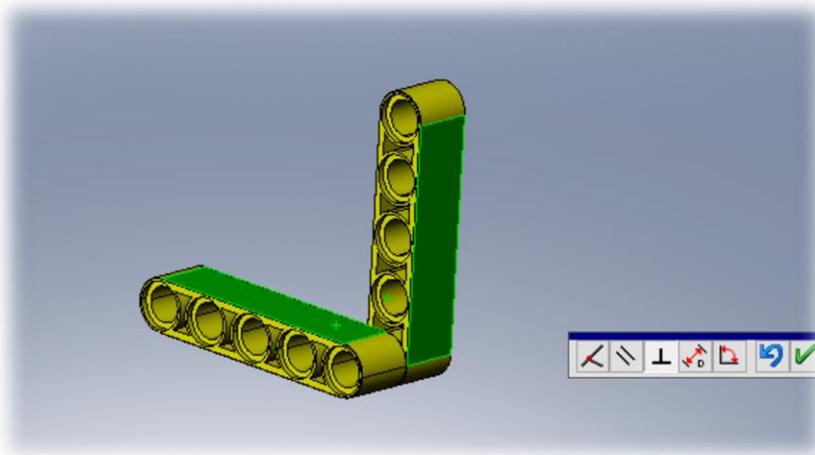


Ilustración 3.- Relación de posición estándar perpendicular

### 3.3.1.4 Tangente

La relación de posición de tangencia se utiliza para definir un contacto entre un punto, arista o plano de cada superficie seleccionada, generalmente entre esférica, cilíndrica o cónica y una superficie plana, aunque hay infinidad de posibles combinaciones.

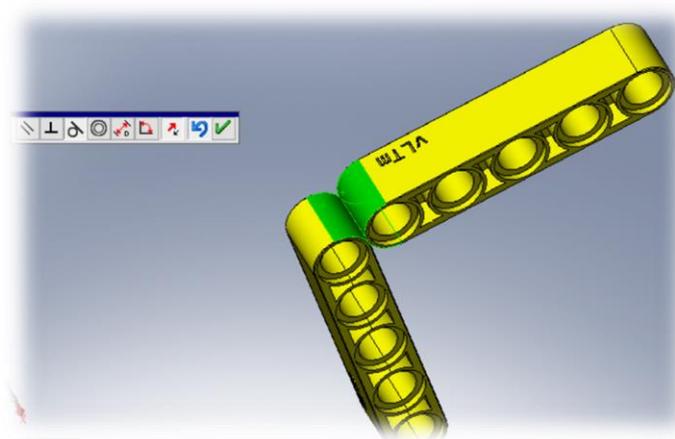


Ilustración 4.- Relación de posición estándar tangente

### 3.3.1.5 Concentricidad

Con la relación de concentricidad se consigue que los puntos o líneas centrales de los componentes seleccionados sean coincidentes. Es una de las relaciones de posición más utilizadas durante el proyecto.

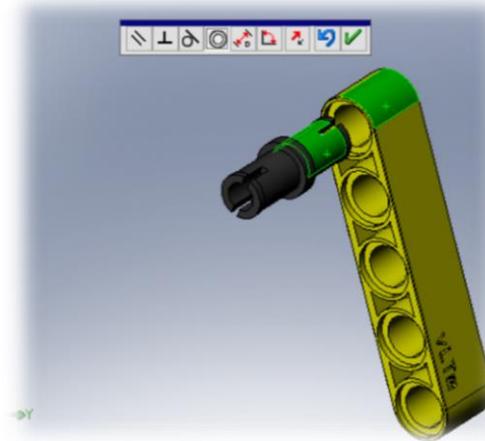


Ilustración 5.- Relación de posición estándar concéntrica

### 3.3.1.6 Distancia

Esta relación restringe una posición de distancia entre dos componentes.

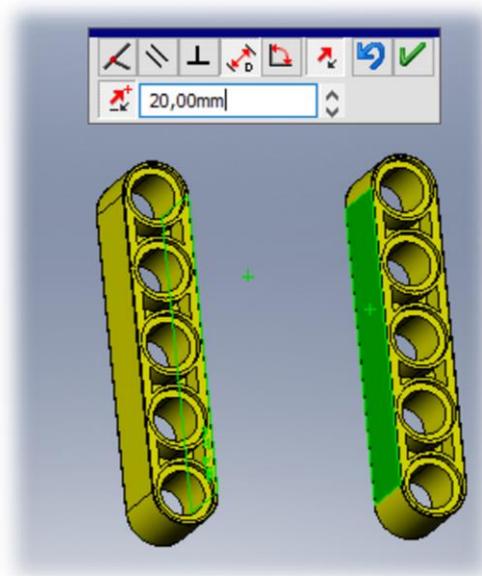


Ilustración 6.- Relación de posición estándar distancia



### 3.3.1.7 Ángulo

Restringe el ángulo entre dos superficies seleccionadas de sus componentes.

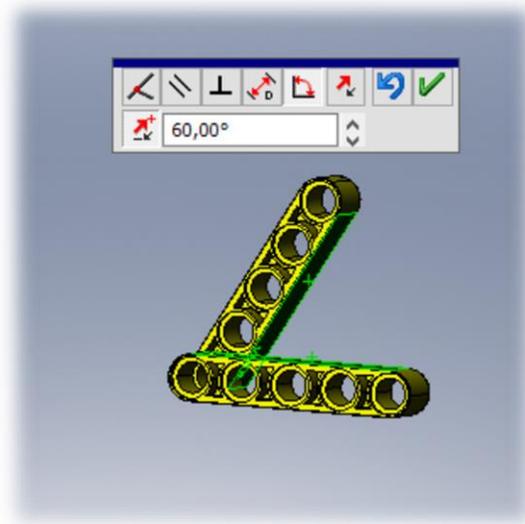


Ilustración 7.- Relación de posición estándar ángulo

### 3.3.1.8 Fijo

Esta restricción limita totalmente el movimiento de la pieza seleccionada, quedando de esta manera fija en el plano, o planos, que la contienen. Esta restricción ha sido una herramienta muy útil durante el proyecto, pues es a partir de una pieza fija desde donde se empiezan a ensamblar el resto.

### 3.3.2 Relaciones de posición avanzadas.

A lo largo del proyecto, estas relaciones de posición han tenido una importancia vital, ya que son las responsables de que los mecanismos en los que se integran componentes de tipo engranajes, piñones, cremalleras...etc, puedan funcionar correctamente. Estas restricciones introducen relaciones móviles entre dos piezas.

Las relaciones de posición avanzadas que se han empleado durante el transcurso del presente TFG son:

- Engranajes.
- Piñón-cremallera

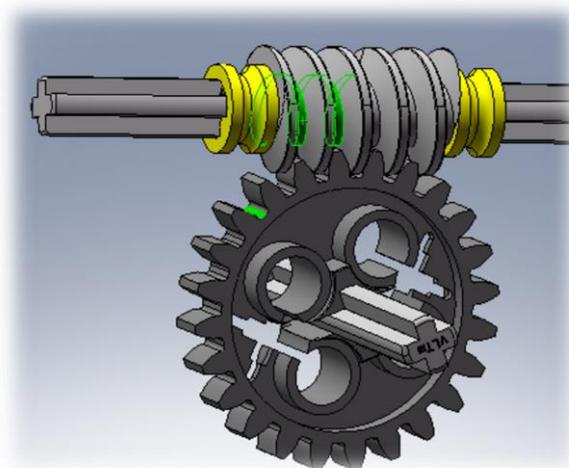
### 3.3.2.1 Engranajes

La función de la relación de posición avanzada, engranajes, correlaciona el giro de dos engranajes/piñones, en función de sus dientes o diámetros. En la elaboración del presente trabajo se han relacionado únicamente los giros de dichos cuerpos en función del número de dientes de cada componente.



*Ilustración 8.- Relación de posición avanzada engranajes*

Esta relación de posición también es muy útil para establecer la correlación de giro entre un tornillo sinfín y cualquier engranaje.



*Ilustración 9.- Relación de posición avanzada engranaje/tornillo sinfín*

### 3.3.2.2 Piñón cremallera

Esta operación sincroniza el giro de una rueda dentada sobre una cremallera, de tal forma que no se superpongan los dientes de los componentes y se realice con éxito el movimiento relativo entre ambos.

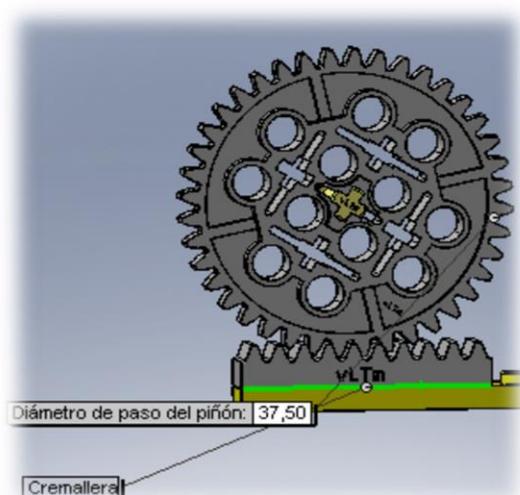


Ilustración 10.- Relación de posición avanzada piñón cremallera

## 3.4 Operaciones auxiliares.

### 3.4.1 Geometría de referencia

Dada la alta complejidad existente en los montajes de los modelos LEGO® Technic virtuales no siempre es posible establecer las relaciones de posición de cualquier tipo sobre las superficies de los componentes seleccionados. Cuando ocurre esto, se deben buscar otras alternativas para poder dotar del movimiento necesario a cada mecanismo que compone el ensamblaje.

En este caso la geometría de referencia consigue crear nuevos nexos de unión entre componentes, necesarios para aplicar la correspondiente relación de posición, y así conseguir el resultado final esperado. Estos nexos de unión o geometría de referencia, se crean a partir de nuevos puntos, ejes o planos insertados en los componentes a los que se aplican estas operaciones auxiliares.

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

Seguidamente pueden observarse ejemplos de operaciones auxiliares, que permiten crear dicha relación de posición.



*Ilustración 11.- Unión de un componente esférico y otro cilíndrico*

En este caso, se ha unido el origen de la cabeza del pistón, (a efectos prácticos realiza la misma función que un punto) con un punto situado en el interior de la cabeza de la biela, que previamente se ha situado mediante una operación auxiliar. Posteriormente se ha recurrido a la relación de posición coincidente para unir los dos puntos.



### 3.4.2 Elementos flexibles

Como su propio nombre indica, estos elementos son capaces de modificar su forma en función de las tensiones que el modelo real LEGO® Technic aplica sobre el elemento, adecuándose correctamente al modelo.

En solidworks, esta capacidad no existe, ya que todos los componentes utilizados son completamente rígidos, es decir, no admiten variación ninguna de su forma en el ensamblaje final, por lo que pueden aparecer problemas a lo largo del montaje.

Es por esta razón por la cual se procede a crear este tipo de elementos, dotándolos de la forma exacta que van a ocupar en el montaje final.

El proceso a seguir, es el siguiente:

En primer lugar se crea un croquis 3D, que unirá los puntos de referencia entre los dos componentes que se quieran unir a través de este elemento flexible. Gracias a la función “spline”, se lleva a cabo la unión de varios puntos, trazando así la trayectoria que la pieza final debe seguir para encajar perfectamente en el modelo.

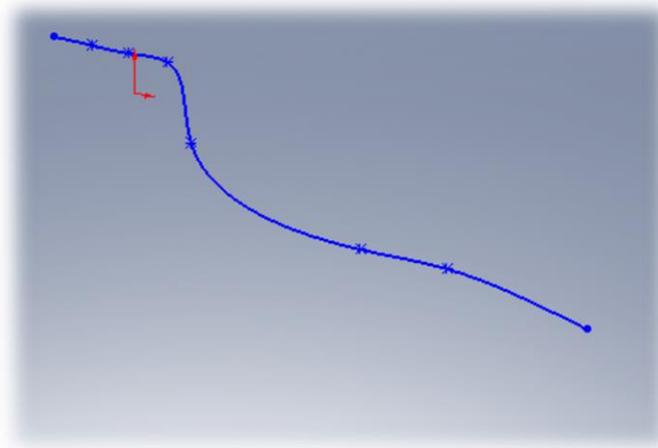


Ilustración 12.- Spline

Una vez creada la spline, se procede a crear un nuevo croquis en un punto de cualquier extremo de la spline. Este croquis está contenido en el plano al cual pertenece dicho punto.

Con la función “círculo” se crea uno con el radio requerido para dicho elemento flexible, en este caso de 2,6mm.

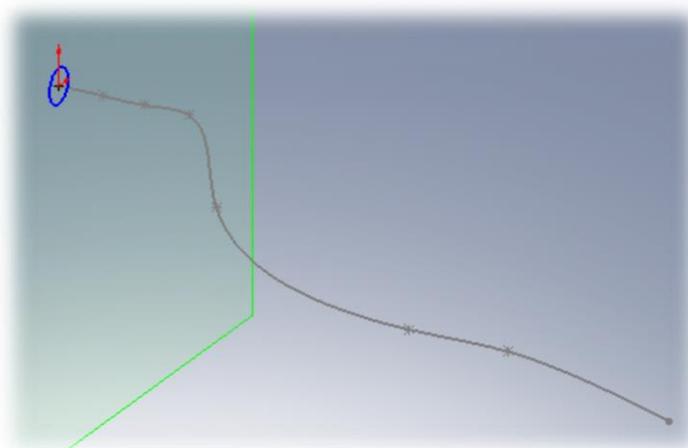


Ilustración 13.- Croquis en el extremo de la Spline

A continuación se procede a aplicar la operación de barrido a lo largo de la trayectoria seguida por la spline y de radio constante igual a 2,6mm, en este caso, delimitado por el croquis realizado en el paso previo.

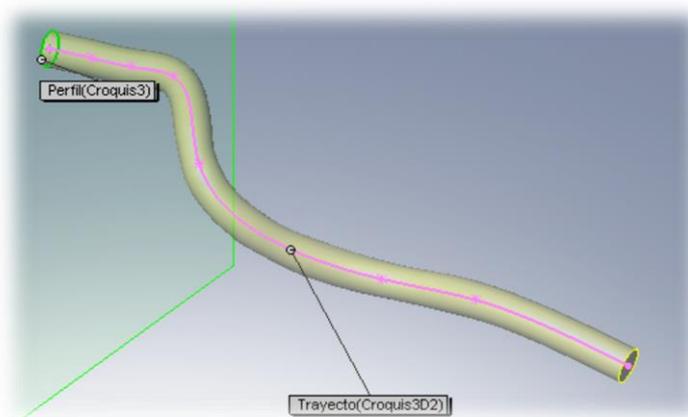


Ilustración 14.- Operación de barrido

Una vez obtenida la pieza resultante se dispone a guardarla con el nombre "Flex" y se introduce en el montaje final.

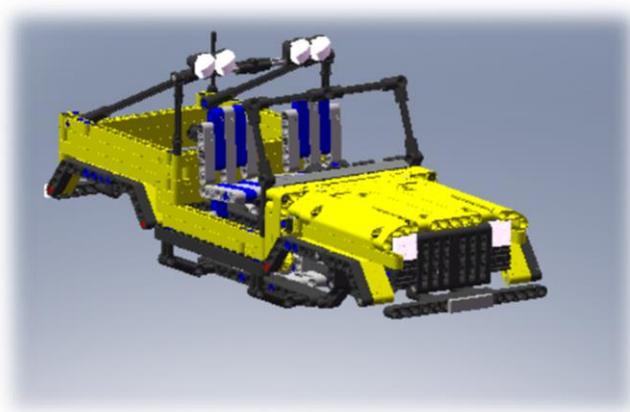


### 3.5 El proceso de ensamblado

El proceso de ensamblado de piezas de los modelos LEGO® Technic virtuales, constituye una de las tareas principales del presente TFG. Dicho lo cual, se presupone una metodología clara y concisa asociada al proceso en cuestión, cuyo estricto seguimiento garantiza la correcta construcción del ensamblaje.

Como se ha expuesto anteriormente en la presente memoria, los ensamblajes son un conjunto de piezas, las cuales, están formadas por componentes y que en ningún caso superarán el límite de diez componentes por pieza.

Para empezar el nuevo ensamblaje, se inserta en él la primera pieza. En este proyecto esta pieza será siempre el chasis, como consecuencia de su gran tamaño, pues es la pieza que más componentes integra de todo el montaje. Esta pieza está compuesta por muchas piezas más pequeñas, que a su vez también han sido creadas y compactadas, con las relaciones de posición anteriormente introducidas, una a una sin exceder la limitación de los diez componentes, y se han introducido en un ensamblaje también, una a una, de manera que en su conjunto forman el chasis. Será requisito primordial, que el chasis insertado, esté fijo y bien localizado en el espacio, coincidiendo su origen con el origen de coordenadas.



*Ilustración 15.- Primera pieza del montaje*

Una vez insertada la primera pieza del modelo LEGO® Technic virtual, se procede a seguir insertando el resto de piezas constituyentes del mismo, de manera sistemática. Todas estas piezas deben interaccionar entre ellas para que en el modelo final, sus mecanismos funcionen tal y como deben. El uso de las restricciones de posición, por lo tanto, está presente en cada pieza insertada, y permiten así que cada una desempeñe su función dentro del ensamblaje.



Ilustración 16.- Ensamblaje completo

#### 4. MODELOS LEGO® TECHNIC VIRTUALES

Estos modelos virtualizados por el alumno, corresponden al BLOQUE 1, o primera fase del proyecto. Como bien se ha explicado al principio de la memoria, esta primera fase, está dividida en dos partes. La primera de ellas, es la parte guiada, que cuenta con el apoyo de los mp4 grabados por el profesor. Esta primera parte consta de tres actividades, incrementando gradualmente la dificultad. Son las siguientes: m1-a1a, m1-a2a, m1-a5a.

##### 4.1 Actividad m1-a1a

###### 1. Modelo LEGO® Technic virtual T-0002

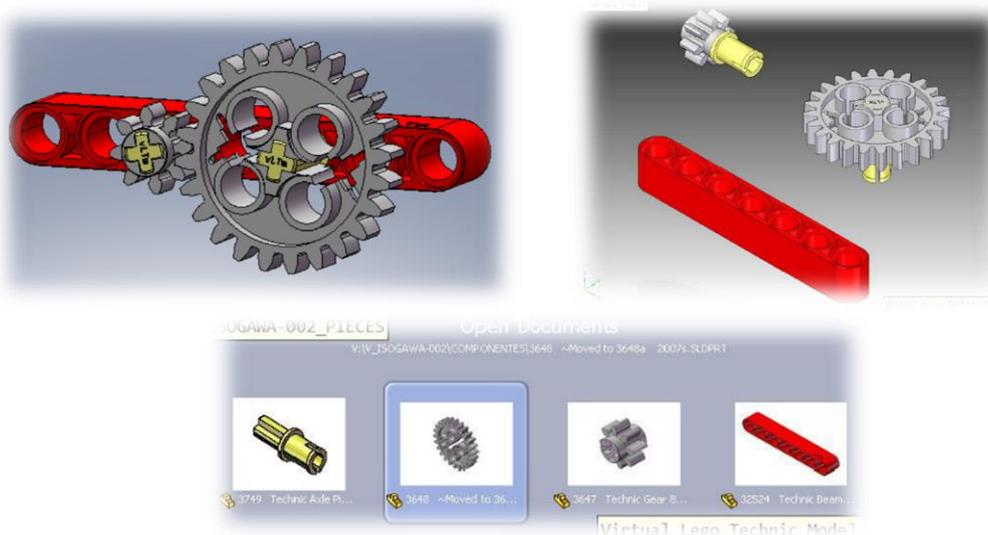


Ilustración 17.- Modelo Lego Technic Virtual T-0002.



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

## 2. Modelo LEGO® Technic virtual T-0008

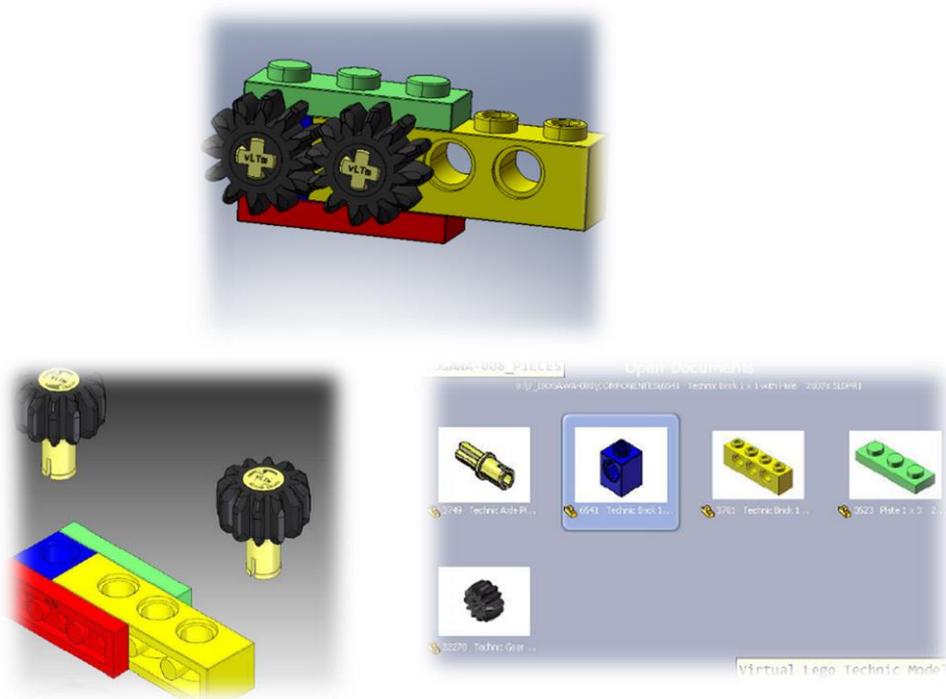
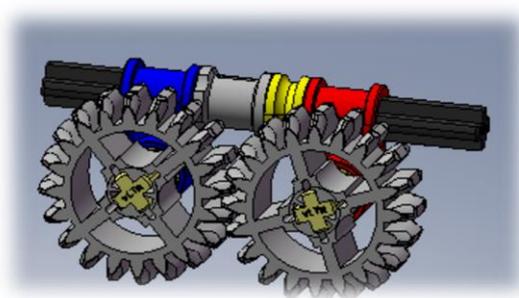


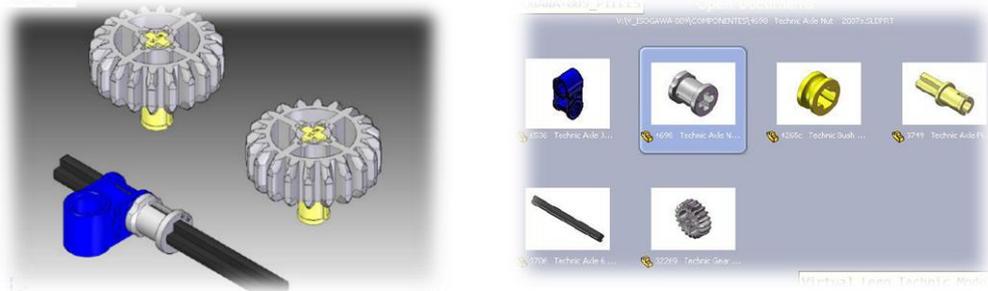
Ilustración 18.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0008

## 3. Modelo LEGO® Technic virtual T-0009



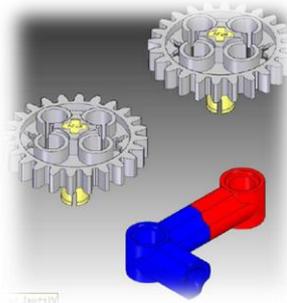
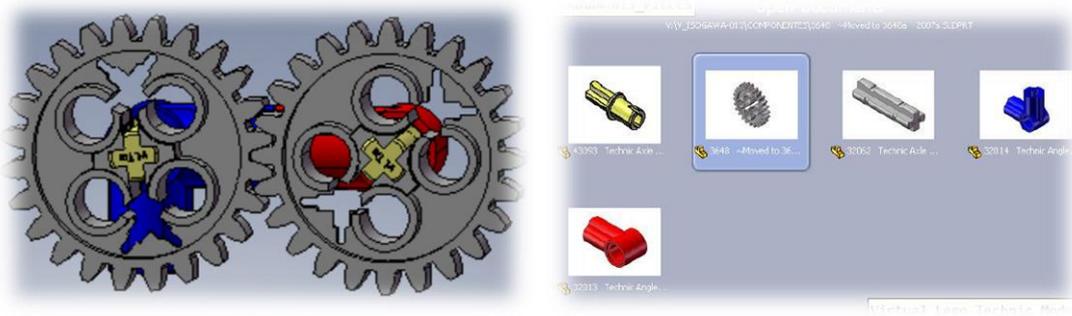


*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



*Ilustración 19.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0009*

**4. Modelo LEGO® Technic virtual T-0013**



*Ilustración 20.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0013*

**5. Modelo LEGO® Technic virtual T-0026**



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

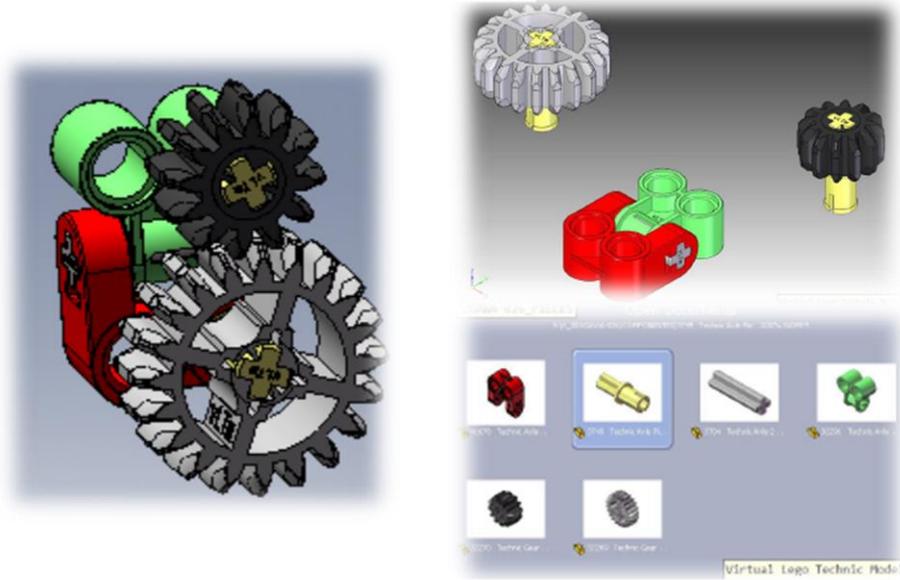


Ilustración 21.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0026

6. Modelo LEGO® Technic virtual T-0037

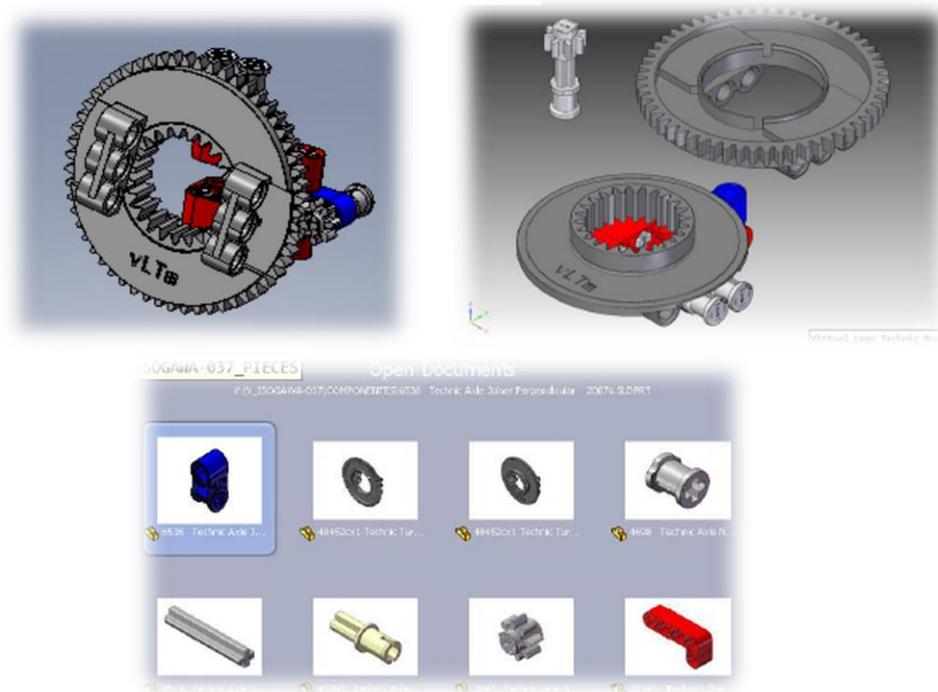


Ilustración 22.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0037



### 7. Modelo LEGO® Technic virtual T-0040

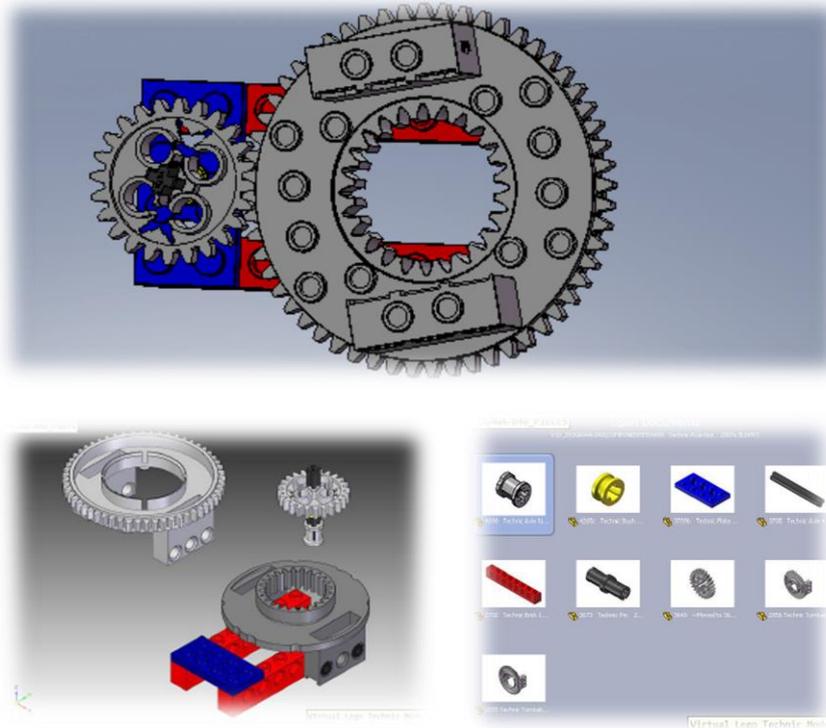
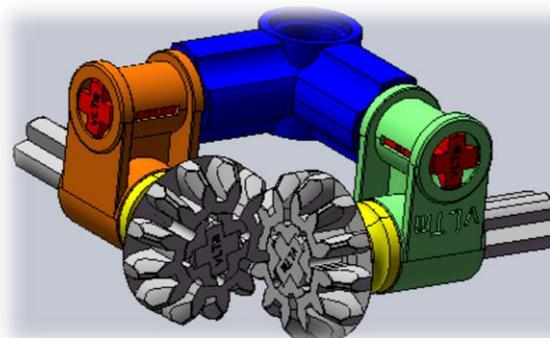


Ilustración 23.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0040

1

### 8. Modelo LEGO® Technic virtual T-0051





Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

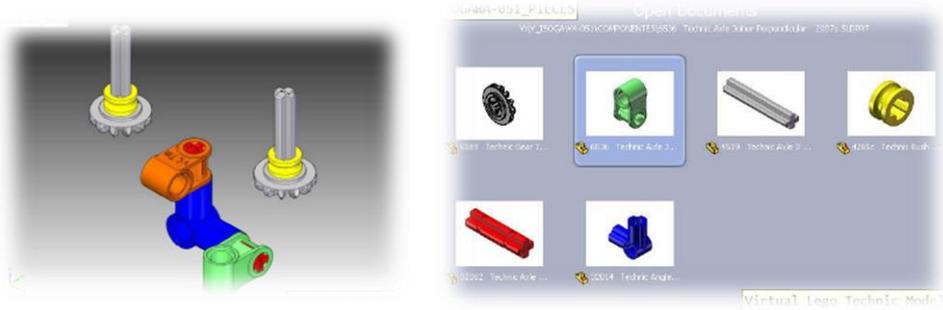


Ilustración 24.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0051

9. Modelo LEGO® Technic virtual T-0059

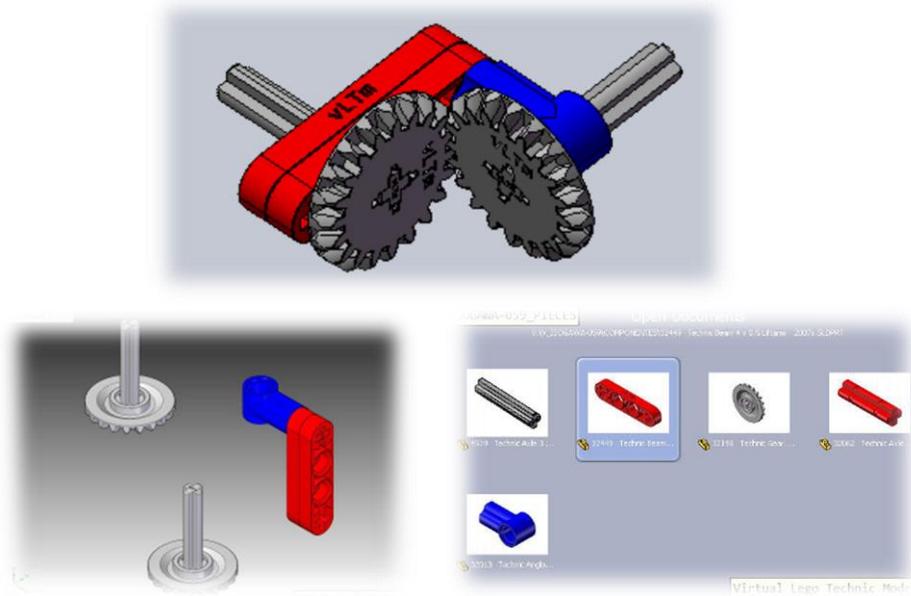


Ilustración 25.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0059



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

**10. Modelo LEGO® Technic virtual T-0062**

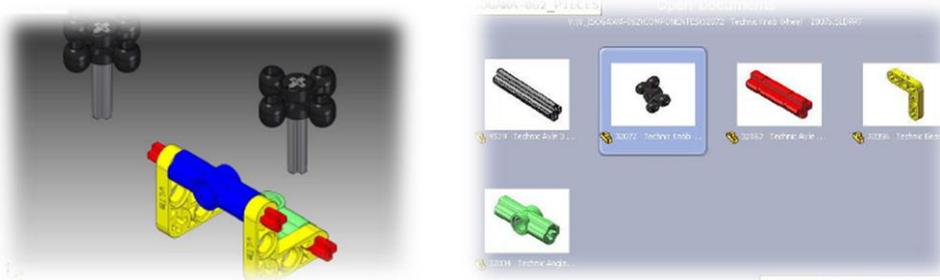
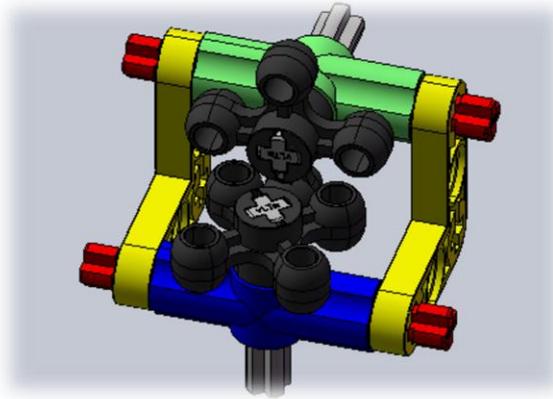
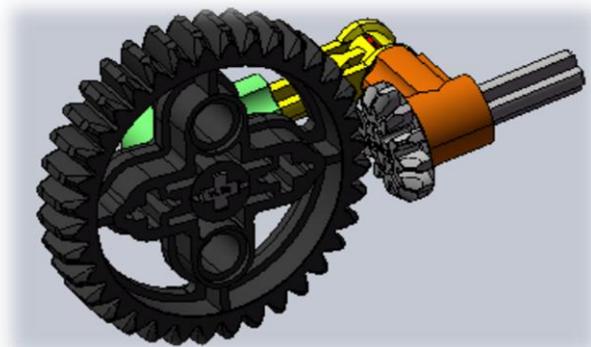


Ilustración 26.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0062

**11. Modelo LEGO® Technic virtual T-0075**



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic



Ilustración 27.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0075

12. Modelo LEGO® Technic virtual T-0079

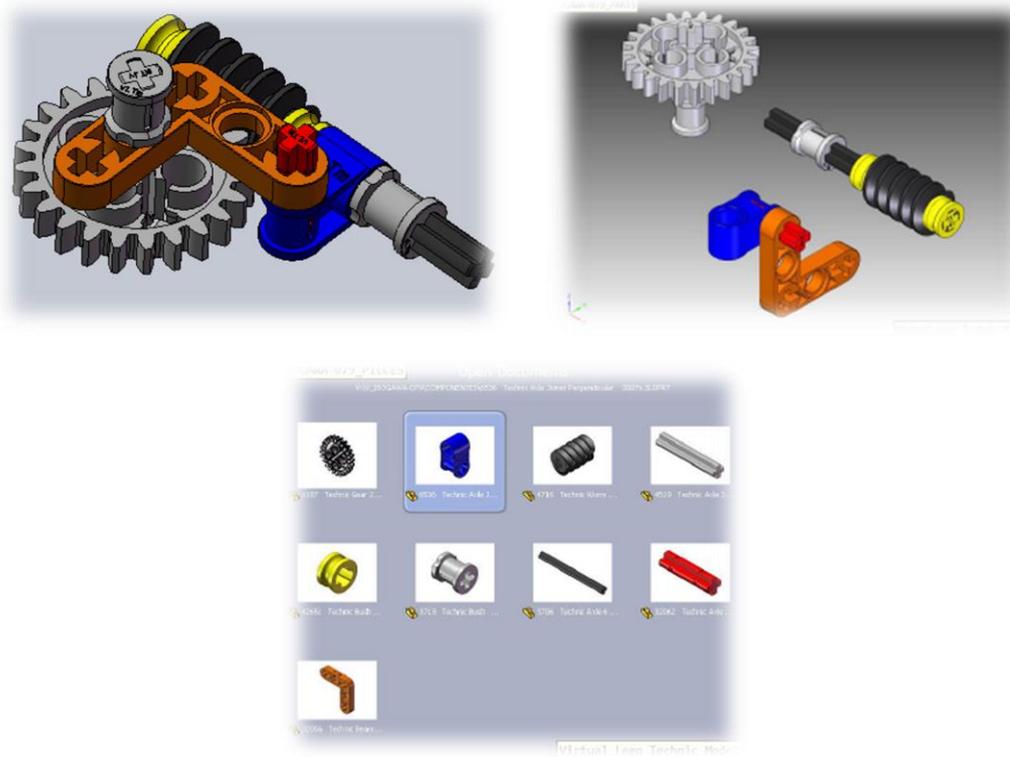
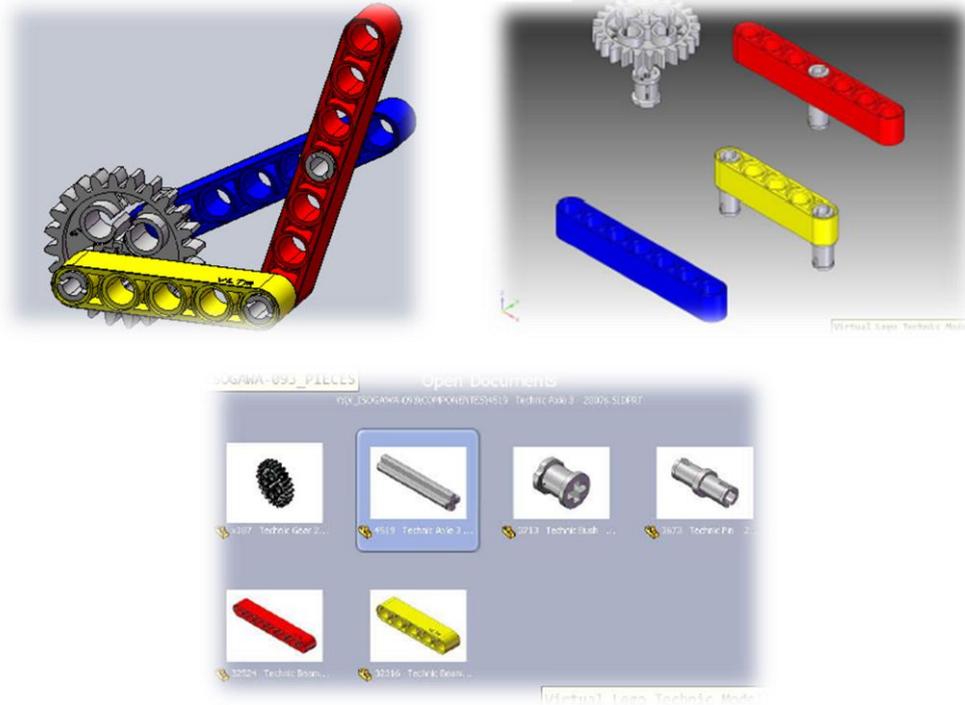


Ilustración 28.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0079

13. Modelo LEGO® Technic virtual T-0093

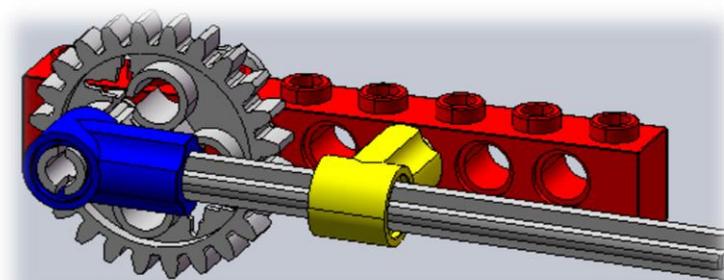


*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



*Ilustración 29.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0093*

**14. Modelo LEGO® Technic virtual T-0098**



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

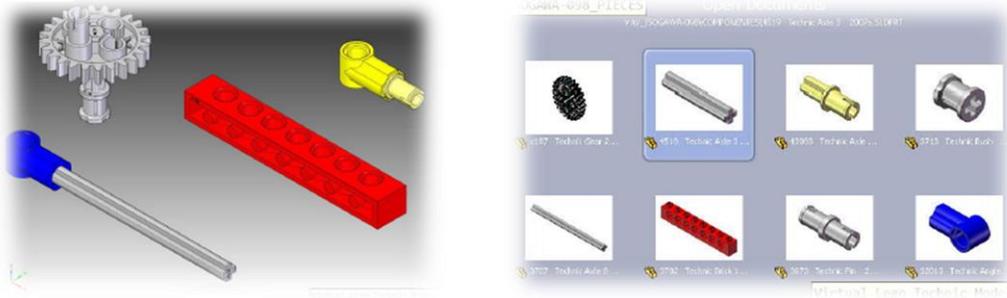


Ilustración 30.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0098

15. Modelo LEGO® Technic virtual T-0102

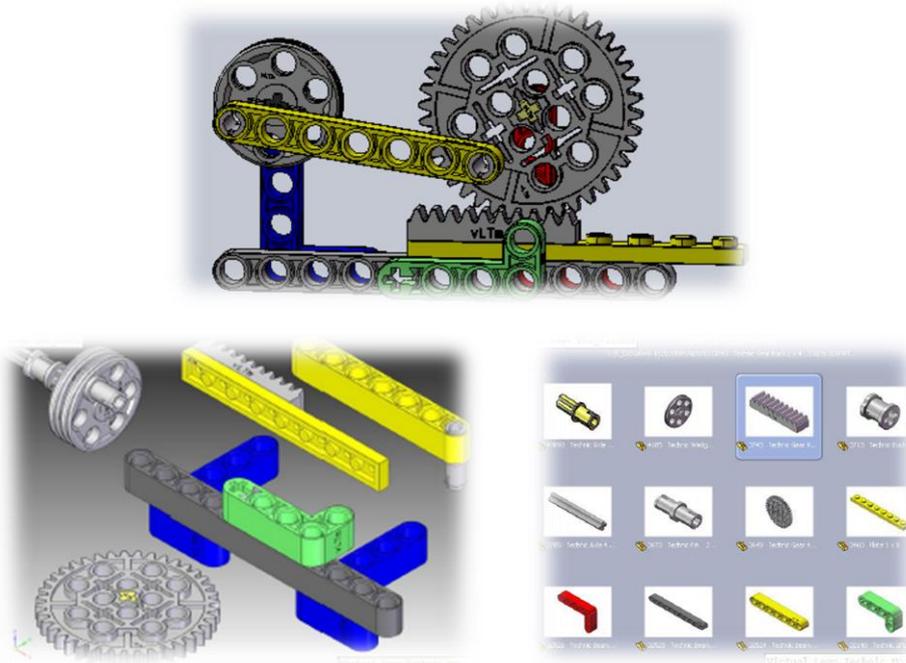
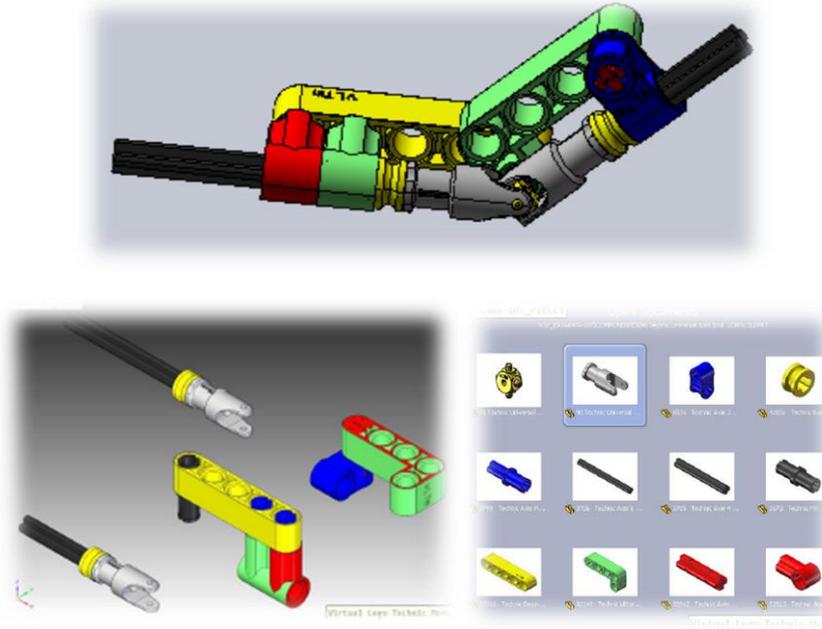


Ilustración 31.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0102

16. Modelo LEGO® Technic virtual T-0107



Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

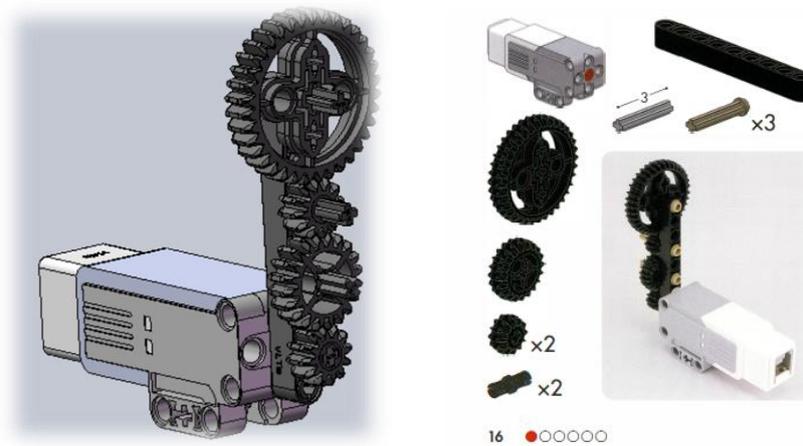


Il·lustració 32.- Modelo LEGO® Technic virtual T-0107

#### 4.2 Actividad m1-a2a

En esta segunda actividad se incrementa la dificultad de los modelos. Seguidamente se exponen los cinco modelos virtualizados. Dichos modelos han sido extraídos del libro “The LEGO mindstorms” de Isogawa Yoshihito.

##### 1. Ev3-024



Il·lustració 33.- Ev3-024



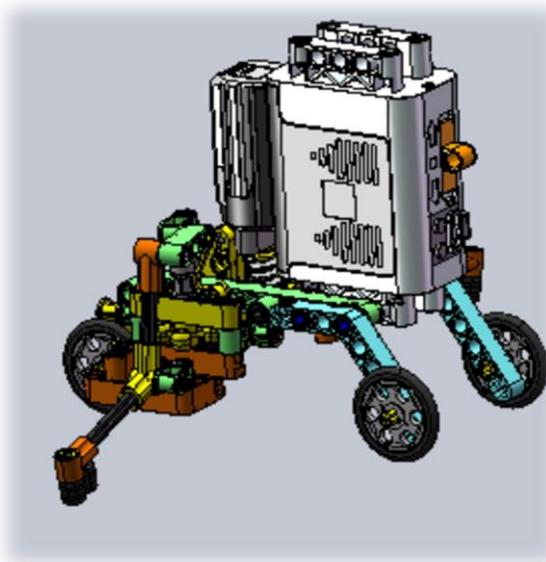
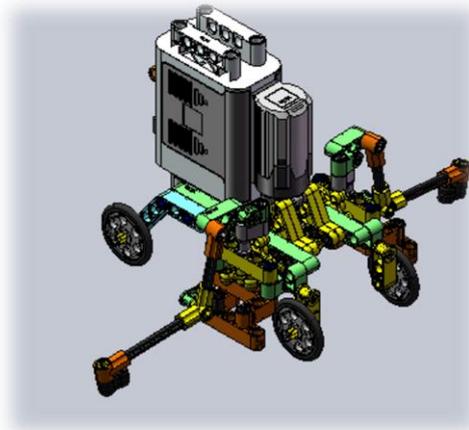




#### 4.4 Actividades “no guiadas”

Estas actividades se han realizado con la única ayuda de las instrucciones de montaje del modelo real correspondiente. Hay un total de cinco modelos, cada uno de ellos ha sido posteriormente simulado, como más adelante se mostrará.

##### 1. vLTm pw-114



*Ilustración 39.- vLTm-pw-114*

##### 2. vLTm nico-forest



Ilustración 40.- vLTm nico\_forest

### 3. vLTm nico piaggio





Ilustración 41.- vLTm nico piaggio

#### 4. vLTm nico jeep





Ilustración 42.- vLTm nico jeep

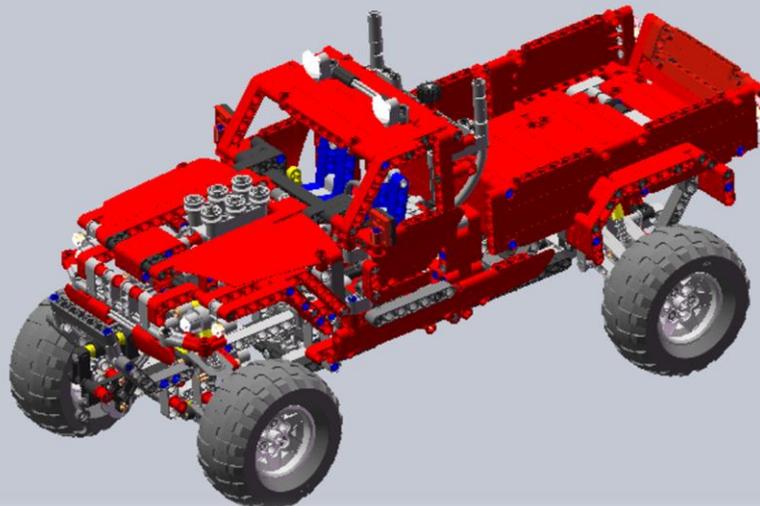
5. vLTm 42008-b

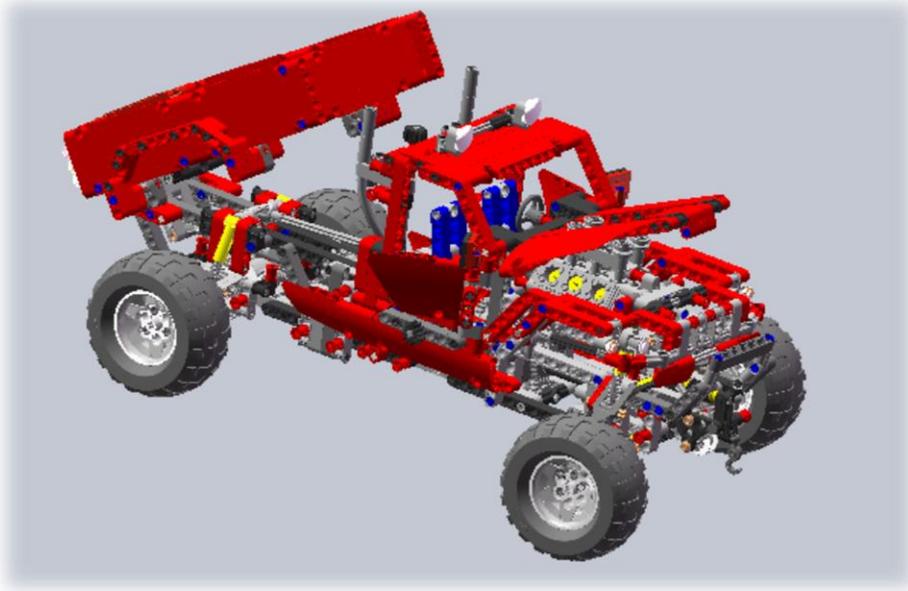




Ilustración 43.- vLTm 42008-b

6. vLTm 42029





*Ilustración 44.- vLTm 42029*

## 5. MODELO CINEMÁTICO AUTO-LINEADOR

### 5.1 Introducción al modelo cinemático auto-alineador.

El objetivo principal de este apartado, es aprender a configurar el modelo cinemático auto-alineador de un montaje virtual. Dicho modelo debe estar ausente de restricciones en exceso.

En esta segunda tarea, que conforma el BLOQUE 2, se van a simular los modelos montados en las actividades no guiadas del BLOQUE 1, pero previamente también se van a realizar actividades de aprendizaje.

Todos los modelos que se van a simular, han sido previamente compactados, reduciendo así el tiempo de cálculo del programa. Este proceso consiste en agrupar las componentes de las piezas para que actúen como un único componente.

Para llevar a cabo este proceso se utiliza la extensión COSMOS MOTION del programa solidworks, basado en el programa ADAMS. Uno de los principales softwares para el cálculo cinemático y dinámico de sistemas mecánicos. En esta simulación se insertarán todos los pares cinemáticos correspondientes de tal forma que la máquina simulada quede operativa y lista para su funcionamiento.



## 5.2 Conceptos básicos.

### 5.2.1 Par cinemático

Se define como unión entre elementos, que limita ciertos movimientos relativos y a su vez admite otros.

El número de movimientos limitados lineales, o angulares, ambos respecto de un eje, se designa como clase de par. Y define el número de momentos que el par considerado puede transmitir.

La cantidad de movimientos relativos libres se denomina movilidad del par, de tal forma que la suma de estos y la clase de par debe ser igual a seis grados de libertad.

### 5.2.2 Grados de libertad

El número de grados de libertad de un cuerpo, es el mínimo número de coordenadas independientes necesarias para especificar la posición del mismo con respecto de un sistema de referencia. En referencia a los grados de libertad de un par cinemático se denominará conectividad. Si de lo contrario se hace referencia a los grados de libertad de un mecanismo, entonces se emplea el término movilidad.

### 5.2.3 Movilidad de un mecanismo

Un mecanismo debe tener como mínimo un grado de libertad. Para calcular la movilidad de un mecanismo, en primer lugar, se considera el caso plano.

#### 5.2.3.1 Mecanismo plano

Un mecanismo plano se define cuando todos los cuerpos que los componen se mueven en un plano o, en su defecto, en planos paralelos. Para calcular la movilidad de dicho mecanismo se emplea la siguiente fórmula.

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

N, es el número de componentes y P es el número de pares cinemáticos que los conectan entre ellos.

#### 6.2.1.1 Mecanismo espacial

En el espacio, cada cuerpo libre tiene seis grados de libertad, en lugar de tres para el caso plano. La fórmula para calcular su movilidad es la siguiente.

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

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

Esta ecuación recibe el nombre de criterio de Gruebler, y es el que se utiliza en el software utilizado para llevar a cabo la simulación.

**5.2.4 Clases de pares cinemáticos.**

Se define mecanismo como un ensamblaje de cuerpos rígidos que permiten transmitir y transformar el movimiento. Estas piezas se unen entre ellas mediante los pares cinemáticos, que a su vez se clasifican en pares superiores o inferiores.

En un par inferior el contacto entre los dos sólidos rígidos se produce 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		
1	Par prismático Deslizadera Par de deslizamiento	P		
1	Par helicoidal Par de tornillo	H		
2	Par cilíndrico	C		
3	Par esférico	S		
3	Par plano	P <sub>L</sub>		

*Ilustración 45.- Pares cinemáticos inferiores*

Por el contrario el par superior es aquel cuyo contacto entre sólidos tiene lugar a través de una arista o punto.

Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

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 pase por el punto de contacto, y deslizar en cualquier dirección en el plano tangente.

Ilustración 46.- Pares cinemáticos superiores

La combinación de un par superior e inferior, es lo que se denomina como par compuesto.

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	

Ilustración 47.- Pares cinemáticos compuestos

El par cinemático se caracteriza por el número de grados de libertad que restringe, referidos a cada uno de los ejes coordenados. Para tener una idea clara de los tipos de pares cinemáticos existentes se adjunta una tabla. El número de restricciones de cada par se designa mediante los números romanos en las diferentes filas. En contraposición se puede observar en las columnas numeradas del 1 al 5, todas las posibles soluciones constructivas para cada clase.

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

Ilustración 48.- Clases de pares cinemáticos

- **Par puntiforme:** Es el par más simple, con las superficies de los dos componentes en contacto. Es un par de primera clase, ya que impide el desplazamiento relativo y transmite la fuerza normal a las dos superficies en contacto, facilitando los demás desplazamientos relativos. Posee cinco grados de libertad.

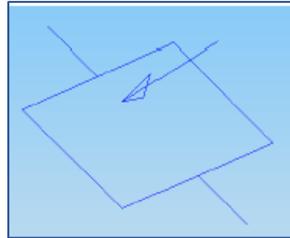


Ilustración 49.- *Par inplane*

- **Par lineal:** Es un par de segunda clase, con sus dos superficies de trabajo en contacto a través de una línea recta. Transmite una fuerza normal a las superficies y un momento alrededor del eje perpendicular a la línea de contacto.

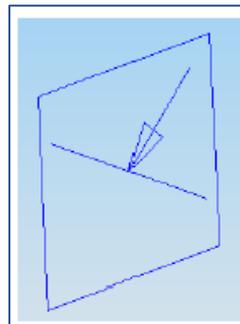


Ilustración 50.- *Par inline*

- **Par anular:** Par de segunda clase, se diferencia del par lineal en que la superficie de contacto se produce a través de una línea curva. El efecto inducido es como si un punto de la superficie en contacto se moviera a través de dicha línea curva. Puede transmitir dos fuerzas en dos direcciones perpendiculares al eje del tubo.

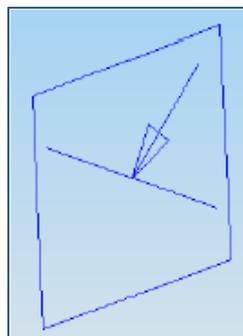


Ilustración 51.-*Par anular*



- **Par esférico:** Es un par de tercera clase. Sus superficies de contacto son esféricas. Restringe los desplazamientos por los tres ejes y puede transmitir las fuerzas correspondientes, posibilitando la rotación alrededor de los tres ejes.

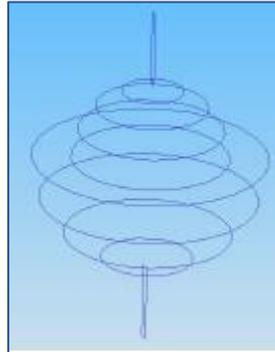


Ilustración 52.- Par esférico

- **Par plano:** También de tercera clase. Sus superficies de contacto son planas. Se restringe el desplazamiento en dirección normal al plano de contacto, permitiendo la transmisión de la fuerza normal y los giros alrededor de los dos ejes coordenados que definen el plano. Transmite los momentos correspondientes alrededor de dichos ejes.

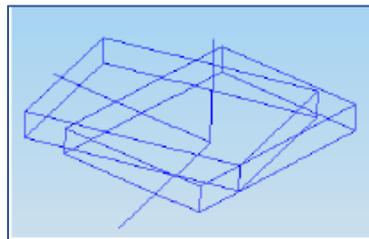
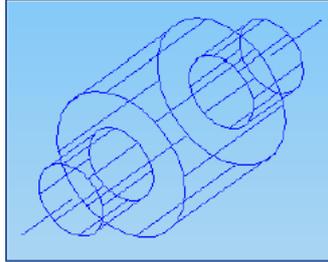


Ilustración 53.- par planar

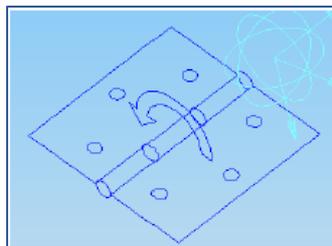
- **Par cilíndrico:** Es de cuarta clase. Las superficies de trabajo son cilíndricas. Se restringen los desplazamientos perpendiculares al eje de traslación y rotación y transmite los momentos correspondientes. Se limitan los giros alrededor de los ejes perpendiculares al eje principal. Se permite el giro y desplazamiento a lo largo de su eje longitudinal.

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



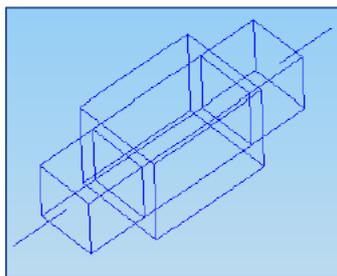
*Ilustración 54.- Par cilíndrico*

- **Par giratorio:** Es de clase cinco. Se requiere que se mantenga exactamente la perpendicularidad del par plano al eje del par cilíndrico en dos direcciones.



*Ilustración 55.- Par giratorio*

- **Par de traslación:** Par de clase cinco. Este par tiene una restricción en exceso, por lo que el ángulo formado por los planos sea el mismo que en los dos elementos del par.



*Ilustración 56.- Par de traslación*



### 5.3 Mecanismos auto-alineados en COSMOS MOTION.

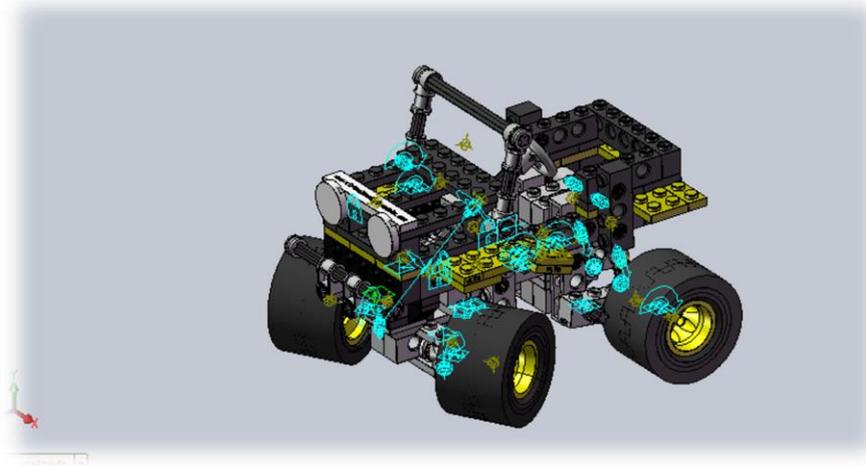
#### 5.3.1 Introducción a COSMOS MOTION

Esta aplicación permite simular mecanismos reales para ver cuáles son los movimientos que pueden realizar y qué tipo de pares cinemáticos se deben poner para que funcione correctamente.

Resulta una ventaja evidente que ésta aplicación este dentro del programa ya que se utiliza el mismo entorno de trabajo y además se evita la exportación de archivos entre programas con diferentes formatos.

#### 5.3.2 El entorno de trabajo

El entorno de trabajo es muy similar al de solidworks. La ventana principal de visualización que contiene el montaje a simular se puede observar en la siguiente imagen. Los elementos coloreados en azul cian se corresponden con los pares cinemáticos del montaje.

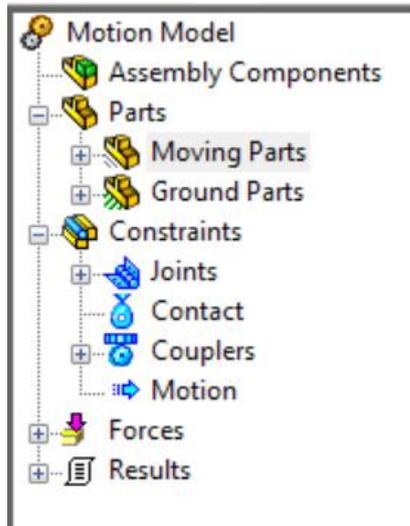


*Ilustración 57.- Ventana de visualización.*

El cuadro de tareas de COSMOS MOTION, se observa en la siguiente imagen. Como se ha mencionado anteriormente la estructura es muy similar a la de solidworks. Dicho

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

cuadro alberga todas las acciones que se pueden realizar al montaje. Conteniendo las partes de la pieza, las restricciones, las fuerzas y los resultados.



Las partes del modelo se dividen en móviles o fijas. A las partes móviles hay que definirles el movimiento relativo con respecto al resto, dotándolas de sus correspondientes “joints” o pares cinemáticos. La parte fija quedará inmóvil durante la simulación.

Las restricciones o “constrains”, se dividen en los “joints” o pares cinemáticos, que hay que insertar en las diferentes piezas móviles. Los contactos, se aplican a las en este caso a las ruedas del vehículo en contacto con la base. Esto permite que se desplace sobre ella. Por último existen los acoplamientos que posibilitan como bien dice su nombre, acoplar el movimiento de piezas móviles a través de sus pares cinemáticos.

Ilustración 58.- Cuadro de operaciones

Por último aparecen las fuerzas, las cuales podemos aplicar a los pares cinemáticos para posterior análisis y los resultados, donde se muestran gráficas de las fuerzas aplicadas. Estas funciones no se han utilizado para la realización del presente proyecto ya que no se ha hecho ningún análisis de resistencia de los materiales empleados.

También se puede observar el panel de simulación, que resulta de vital importancia ya que, se encarga de calcular, pinchando en el botón “calculate”, los grados de libertad del sistema utilizando el método Greubler y muestra también el número de restricciones en exceso del montaje.

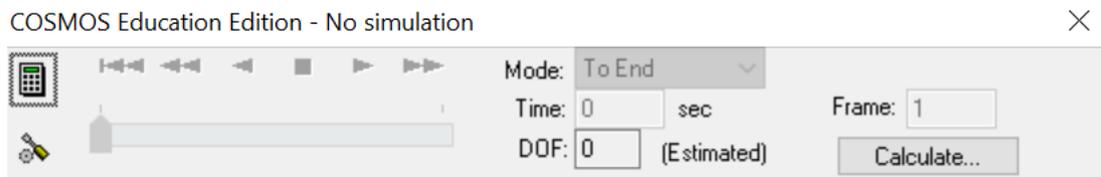


Ilustración 59.- Panel de simulación

### 5.3.3 Pares cinemáticos en COSMOS Motion.

En COSMOS Motion hay una gran variedad de pares cinemáticos, que deben colocarse correctamente entre las dos piezas en contacto, asegurando así que se cumplen las condiciones de movilidad anteriormente expuestas. A continuación se puede observar los tipos de pares cinemáticos disponibles en este software, ya explicados en párrafos precedentes.

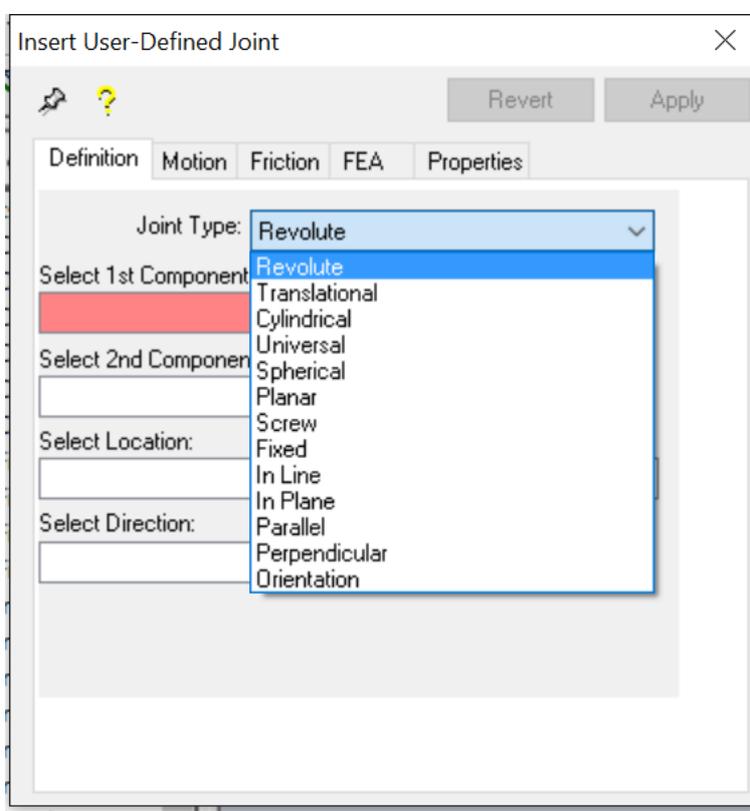


Ilustración 60:- Pares cinemáticos en COSMOS Motion

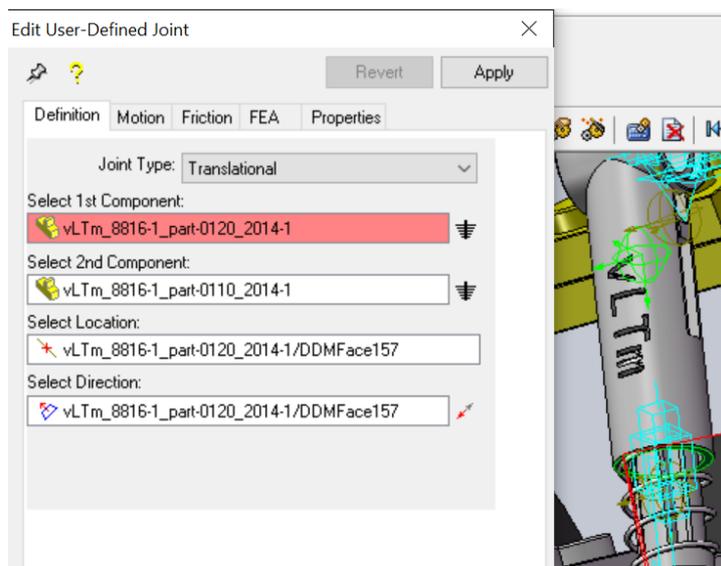
A la hora de aplicar los pares cinemáticos correspondientes es conveniente conocer la metodología a seguir.

En primer lugar se debe seleccionar el tipo de “joint” que se desea aplicar, la imagen de arriba, ofrece todas las posibilidades disponibles.

En segundo lugar se procede a la selección de las piezas que están en contacto para posteriormente seleccionar la localización exacta donde se va a insertar el cojinete, o par cinemático.

**Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic**

Por último se selecciona la dirección del joint. Esto es muy importante ya que como se ha podido introducir antes, según la dirección del mismo dependerán los grados de libertad y restricciones en exceso que se generen en el sistema.



**Ilustración 61.- Aplicación del par cinemático entre dos piezas.**

En la siguiente tabla se puede observar el resumen de los grados de libertad restringidos y permitidos por cada tipo de par utilizado durante el presente proyecto.

<i>Pares cinemáticos</i>	<i>Restricciones traslacionales</i>	<i>Restricciones rotacionales</i>	<i>Grados de libertad</i>
<i>Revolución</i>	3	2	1
<i>Cilíndrico</i>	2	2	2
<i>Traslacional</i>	2	3	1
<i>Esférico</i>	3	0	3
<i>Fijo</i>	3	3	0
<i>En línea</i>	2	0	4
<i>En plano</i>	1	0	5

**Tabla 1. -Resumen de GDL restringidos y permitidos**

### 5.3.4 Acoplamientos.

Los acoplamientos se encargan de definir el movimiento entre pares cinemáticos, así se consigue simular la transmisión del movimiento de un mecanismo. Cabe destacar que los acoplamientos solo se pueden realizar entre los pares cinemáticos de tipo cilíndrico, revolución y traslacional.

Existen varios tipos de acoplamientos, entre ejes, tornillos sinfín, engranajes y poleas, ruedas, cremalleras...etc. Seguidamente se van a exponer los acoplamientos más utilizados.

#### 5.3.4.1 Engranajes

Llevando a cabo este acoplamiento se consigue que el par conductor, que gira con respecto a su eje longitudinal, con una velocidad angular determinada previamente, transmita el movimiento al par conducido, según la relación de transmisión entre ambos. Para realizar el acoplamiento se seleccionan los dos pares y se crea dicha relación utilizando el número de dientes por engranaje.

Se ha de comprobar con la simulación posterior si el sentido de giro es el correcto, pues dependiendo de la orientación de cada par el resultado será positivo o negativo. En cualquier caso, basta con cambiarle el signo a la relación de transmisión para invertir el sentido del giro.

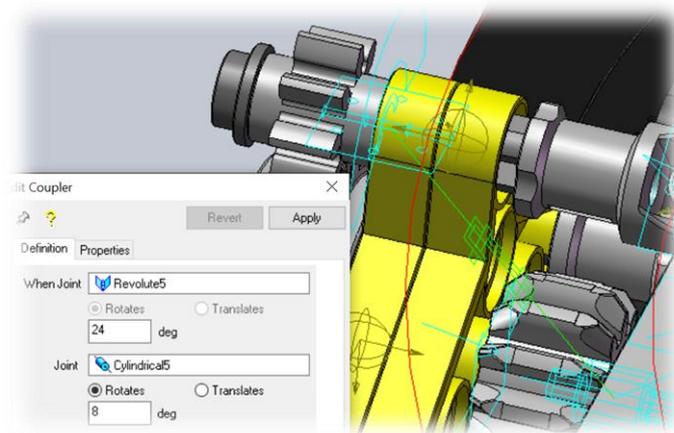


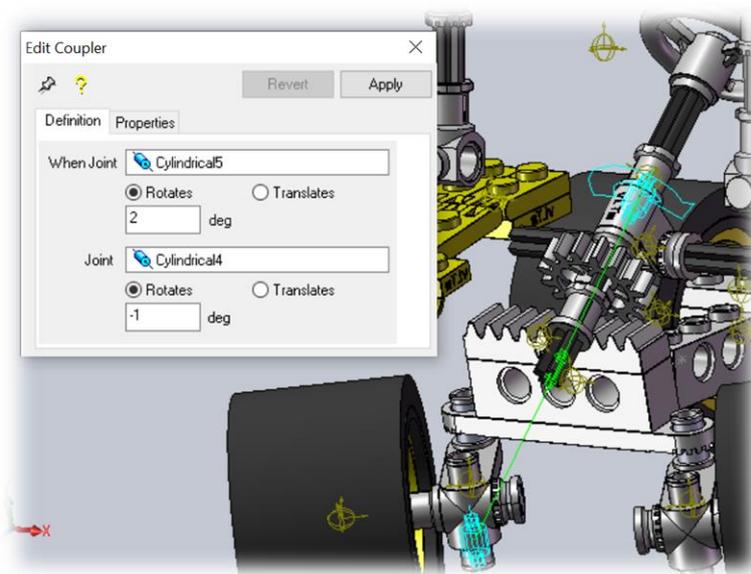
Ilustración 62.- Acoplamiento entre engranajes

#### 5.3.4.2 Piñón-cremallera

Este acoplamiento se ha utilizado en el presente proyecto para relacionar los pares cinemáticos del mecanismo de la dirección de los vehículos simulados. Se trata de relacionar el ángulo girado por el eje del volante, con el ángulo que debe girar el

### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

soporte móvil de las ruedas. Para ello se deben realizar algunos cálculos, ya que la cremallera se desplaza horizontalmente sobre un plano. Se debe relacionar el ángulo girado por dicho engranaje con el desplazamiento de la cremallera. Se sabe que el paso de la cremallera es de 3.14mm. Por lo tanto con simples operaciones trigonométricas aplicadas directamente sobre el soporte de las ruedas se puede calcular el ángulo girado por esta.



*Ilustración 63.- Acoplamiento piñón cremallera.*

#### **5.3.4.3 Tornillo sinfín**

Este acoplamiento es muy similar al de engranajes, la diferencia radica en la relación de transmisión, que debe hacerse entre engranaje y tornillo sinfín. La relación de transmisión entre el tornillo sinfín y el engranaje es sencilla. Por cada vuelta que da el engranaje, el tornillo debe girar un número de veces igual al número de dientes de dicho engranaje.

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

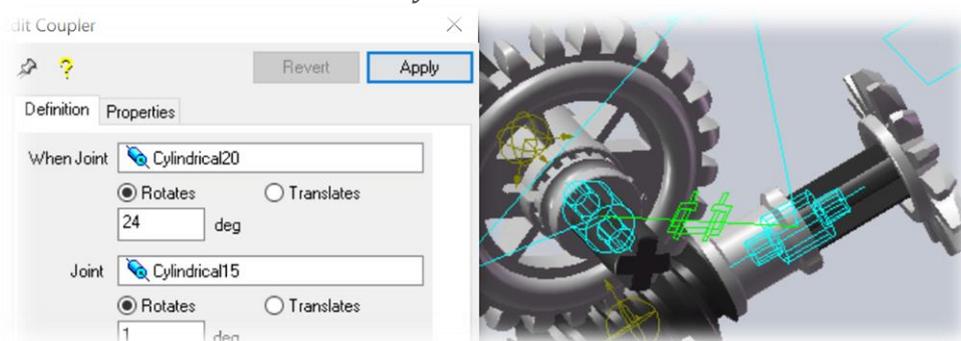


Ilustración 64.- Acoplamiento piñón-cremallera

#### 5.3.5 “Motion” definido en el par cinemático.

Es el movimiento conducido que se le aplica a un par cinemático del montaje para eliminar así un grado de libertad, o los que sean necesarios. Hay que destacar que los montajes, son parecidos a los de la realidad pero en ningún caso igual, por lo tanto en muchas ocasiones hay que definir movimientos conducidos en los mecanismos, que en la realidad estarían definidos por motores.

Así mismo estos movimientos son velocidades, desplazamientos o aceleraciones. Como no podía ser de otra forma, hay diferentes tipos de funciones para definir los movimientos adecuadamente según la necesidad de cada montaje.

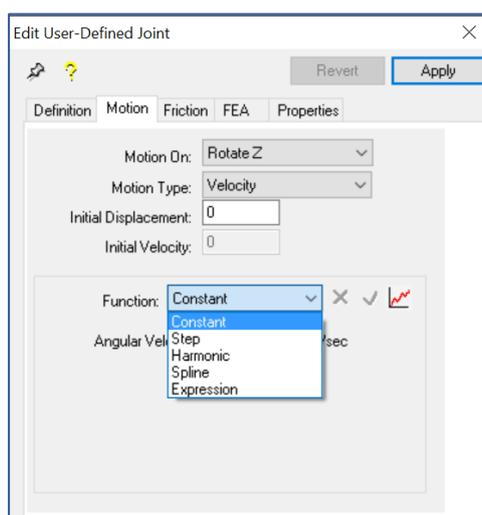


Ilustración 65.- Funciones del movimiento definido en el par cinemático

De esta forma se distinguen cinco funciones disponibles: Constante, Escalón, Armónica, Spline, Expresión.

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

- **Constante:** El valor del desplazamiento, velocidad o aceleración definidos se mantiene constante a lo largo del movimiento realizado por el mecanismo durante la simulación.

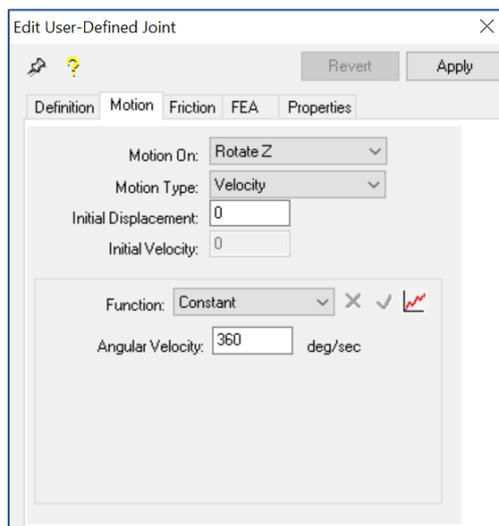


Ilustración 66.- Función constante

- **Escalón:** Con esta función es posible determinar el movimiento inducido en un instante de tiempo conocido. Es decir, se puede controlar en qué momento de la simulación va a empezar el movimiento y en qué instante se va a terminar. También se puede determinar el valor inicial y final de la magnitud definida.

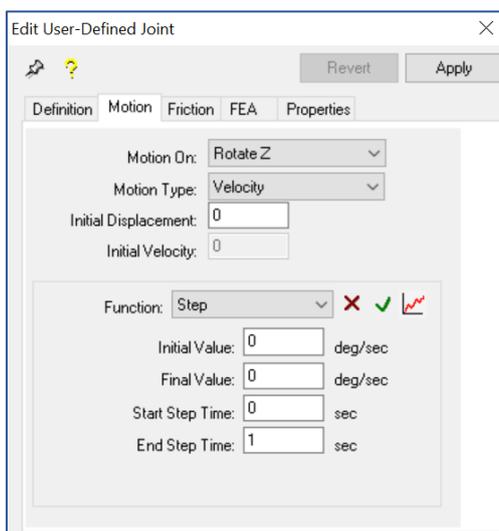


Ilustración 67.- Función escalón

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

- **Armónica:** Este tipo de expresión es de tipo senoidal. Por lo tanto se pueden variar en el tiempo parámetros de la magnitud definida tales como la amplitud, la frecuencia, el desfase temporal y espacial y la media.

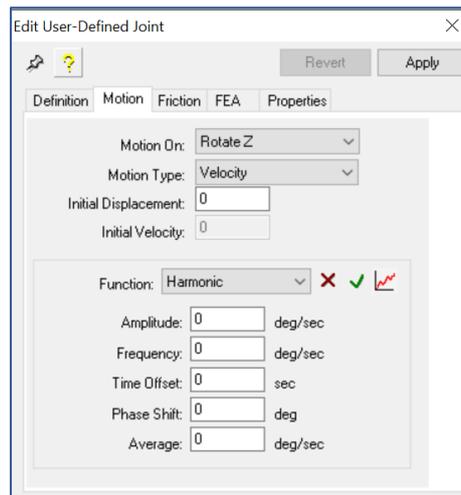


Ilustración 68.- Función armónica

- **Spline:** Esta función permite definir magnitud de movimiento en instantes determinados, interpolando la función entre los puntos definidos, para conseguir la simulación.

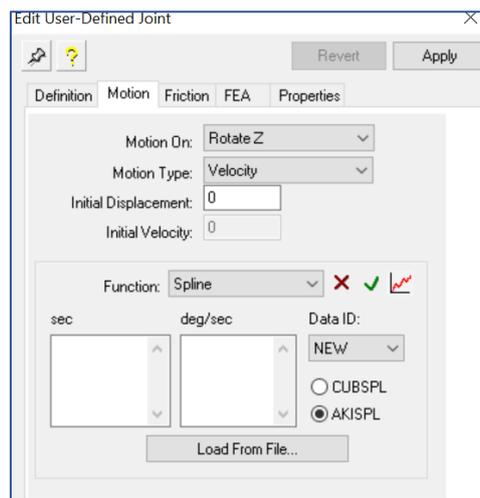


Ilustración 69.- Función spline

### Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic

- **Expresión:** Esta función permite escribir una expresión donde definir el movimiento del par cinemático. La expresión utilizada en este trabajo es un STEP (TIME (0, 0, 0, 0)). Los primeros ceros corresponden con los instantes de tiempo inicial y la velocidad angular, desplazamiento o aceleración inicial. Los dos ceros finales corresponden a sus respectivos valores finales de tiempo y magnitud. Existe la posibilidad de crear una función anidada, para que se repita en bucle la operación, o incluso según las exigencias del movimiento a lo largo de toda la simulación.

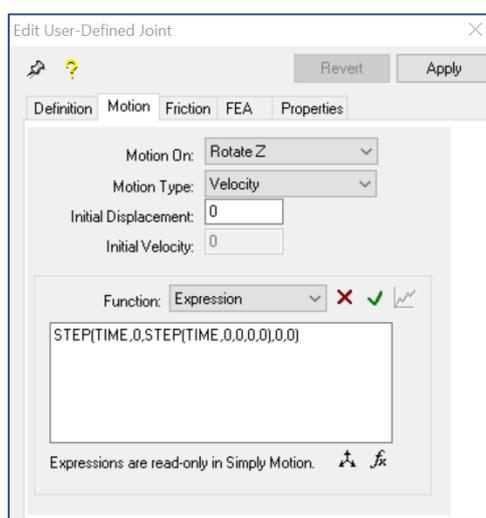


Ilustración 70.- Función expresión

## 6. Simulación de los modelos LEGO® Technic virtual en COSMOS Motion.

Se procede a la simulación de los modelos realizados previamente en solidworks. La parte de simulación se divide en dos fases. La primera de ellas es la simulación cinemática y la última es la simulación dinámica.

### 6.1 Simulación cinemática.

Para empezar la simulación es imprescindible clasificar la pieza principal como pieza base o fija, “ground part”. Esto permitirá que el resto de piezas se puedan ir añadiendo secuencialmente como piezas móviles al montaje de la simulación, “moving parts”.

Con cada pieza que se va introduciendo como parte móvil, CosmosMotion genera automáticamente un par cinemático. El par creado está relacionado con las relaciones de posición que tenía la pieza en solidworks. Generalmente se borran todas y se van definiendo



### *Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

los cojinetes o pares cinemáticos a aplicar en las zonas de contacto, uno a uno, de tal forma, que no se creen restricciones en exceso. El hecho de hacerlo manualmente otorga la posibilidad de modificar los cojinetes o “joints”, según las restricciones en exceso que se puedan generar, pues los joints colocados de forma automática no se le pueden cambiar las propiedades.

Lo que se busca en la simulación es que se asemeje lo máximo a la realidad, por eso siempre se ponen dos cojinetes en las zonas de contacto en tres piezas y no uno, como crea el cosmos motion de forma automática. En ocasiones donde solo hay un punto de contacto entre piezas, sí es posible respetar el joint creado por el software.

La combinación habitual es el par cilíndrico junto con el in plane. Esto suma los seis grados de libertad que posee un cuerpo libre en el espacio. Otra combinación habitual es el par esférico in line. Generalmente se usa más la primera combinación ya que el par cilíndrico admite acoplamientos con otros pares y el esférico no.

Lo importante es tener controlado el número de restricciones en exceso y el de grados de libertad durante el montaje, para así ir cambiando según las exigencias del momento los pares cinemáticos para conseguir la combinación correcta que no genere restricciones en exceso.

Una vez introducidas todas las partes móviles se comprueba que no existen restricciones en exceso ni grados de libertad. Comprobado esto se arranca la simulación y se observa que todos los mecanismos que definen la totalidad del conjunto operan correctamente.

## **6.2 Simulación dinámica.**

En cuanto a la simulación dinámica se debe crear una pieza base del tamaño adecuado en solidworks, con respecto de la cual el modelo construido se desplazará. El modelo debe reposar sobre la base, mediante unas relaciones de posición tangentes.

Una ajustada la base, en CosmosMotion, se procede a clasificarla como parte fija. A su vez, el chasis que antes formaba parte del “ground part” ahora se mueva al apartado de partes móviles. Acto seguido se borran todos los pares cinemáticos que el programa ha creado de forma automática con respecto al chasis, debido a todas las relaciones de posición existentes en él, y que antes al estar como parte fija, no se habían creado.

El siguiente paso ahora es definir los contactos entre las ruedas y la base. Este es un contacto 3D, y consigue que el vehículo se deslice sobre la base sin ningún problema. Cabe comentar que es conveniente cilindrar las ruedas, como en imágenes más adelante se podrá observar, ya que la geometría original es bastante complicada de acoplarla con la base.



*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

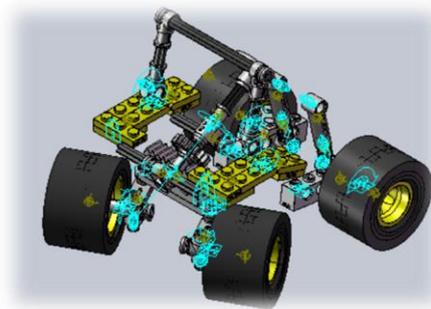
Realizados estos procedimientos se comprueba que los grados de libertad son seis, debido a la pieza móvil, que es el vehículo, y se procede a la simulación.

## 7. MODELOS SIMULADOS

En esta sección se muestran todos los modelos simulados durante el TFG. Hay que destacar que los tres primeros modelos de esta sección se corresponden con los modelos de aprendizaje, de los cuales el profesor responsable proporcionaba vídeos explicativos del proceso de simulación. Los posteriores cinco modelos, se han simulado sin ningún documento de ayuda.

- vLtm 8816-1\_2016
- vLTm 8459-2\_2016
- vLtm 8862-1\_2016
- vLtm pw-114\_2016
- vLtm nico-forest\_2016
- vLtm nico-piaggio\_2016
- vLtm nico-jeep\_2016
- vLtm 42008-2\_2016

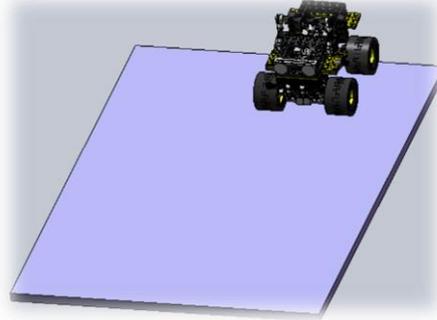
### 7.1 vLtm 8816-1\_2016



*Ilustración 71 .- vLTm 8816-1\_2016*

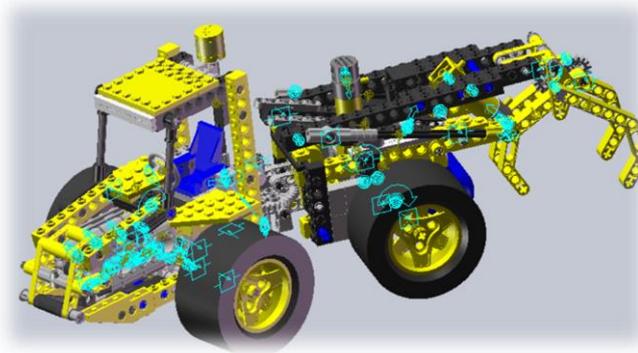


*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

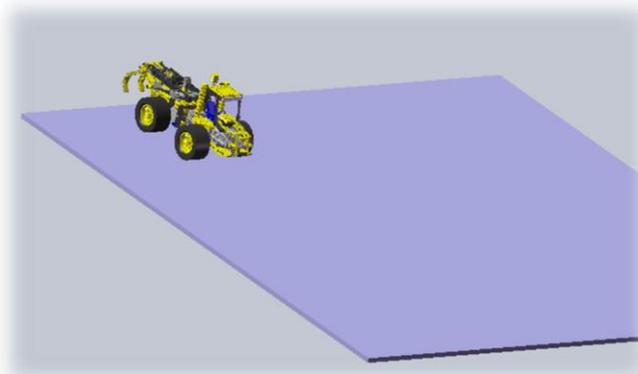


*Ilustración 72.- vLTm 8816-1\_2016 sobre base*

**7.2 vLTm 8459-2\_2016**



*Ilustración 73.- vLTm 8459-2\_2016*



*Ilustración 74.- vLTm 8459-2\_2016 sobre base*



### 7.3 vLTm 8862-1\_2016

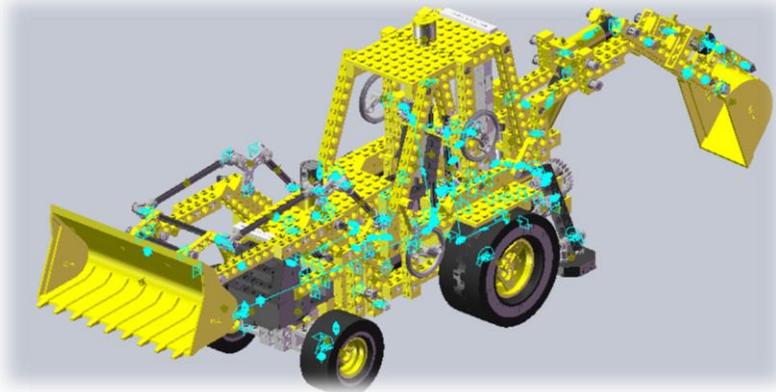


Ilustración 75.- vLTm 8862-1\_2016

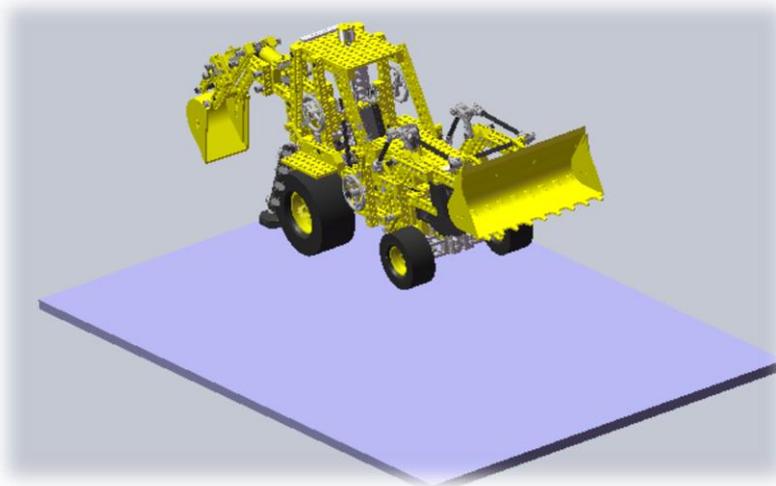


Ilustración 76.- vLTm 8862-1\_2016 sobre base



#### 7.4 vLTm pw-114\_2016

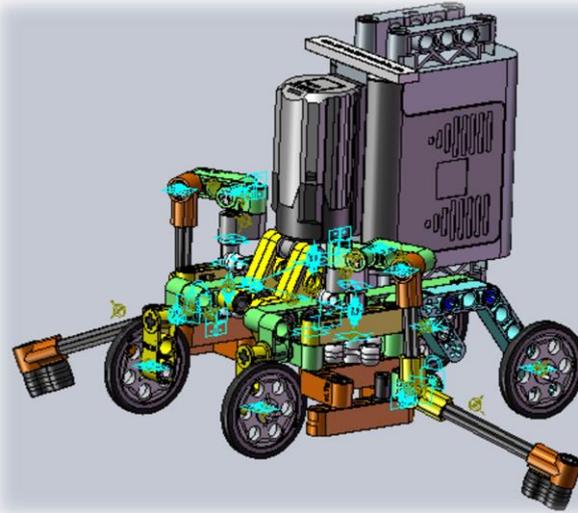


Ilustración 77.- vLTm pw-114\_2016

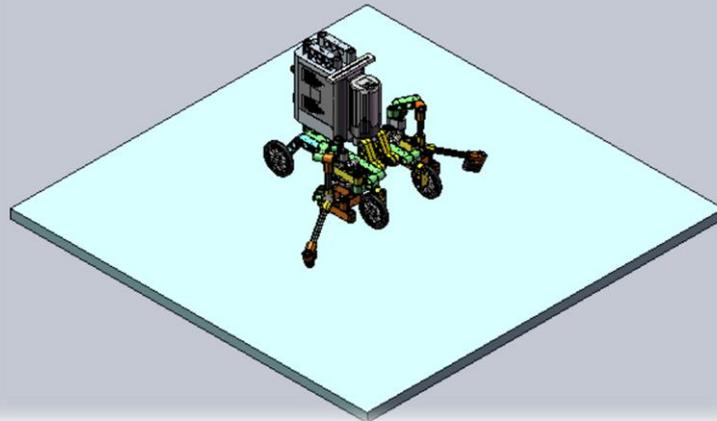


Ilustración 78.- vLTm pw-114\_2016sobre base



## 7.5 vLTm nico-forest-2016

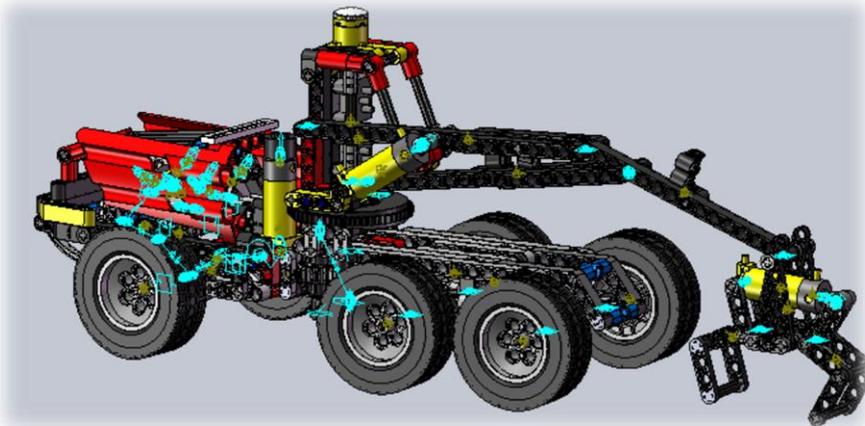


Ilustración 79 .- vLTm nico forest\_2016

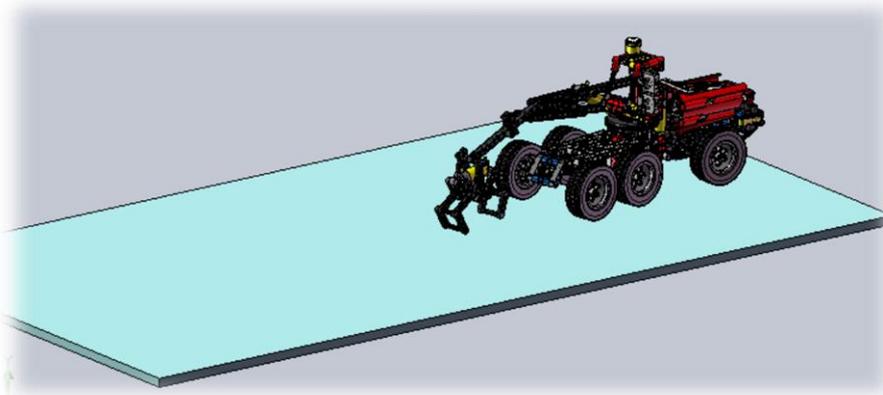


Ilustración 80 .- vLTm nico forest\_2016 sobre base

## 7.6 vLTm nico-piaggio\_2016

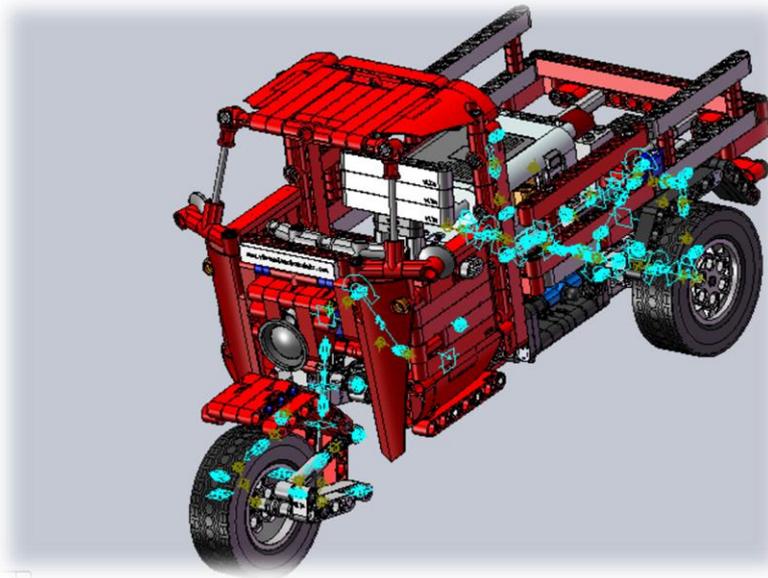


Ilustración 81.- vLTm nico piaggio\_2016

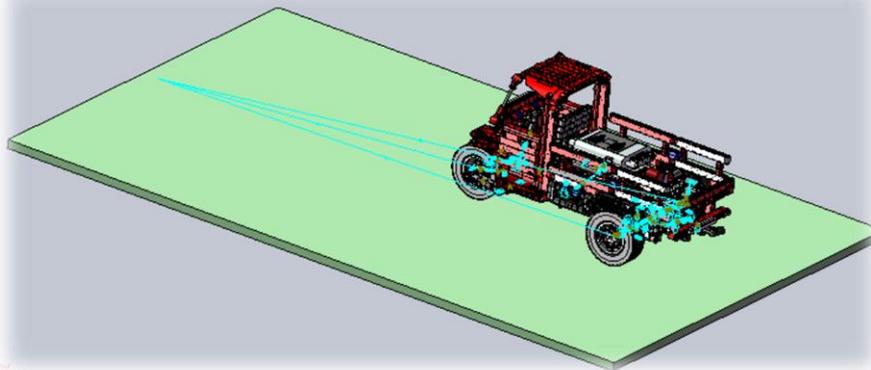


Ilustración 82.- vLTm nico piaggio\_2016 sobre base

## 7.7 vLTm nico-jeep\_2016

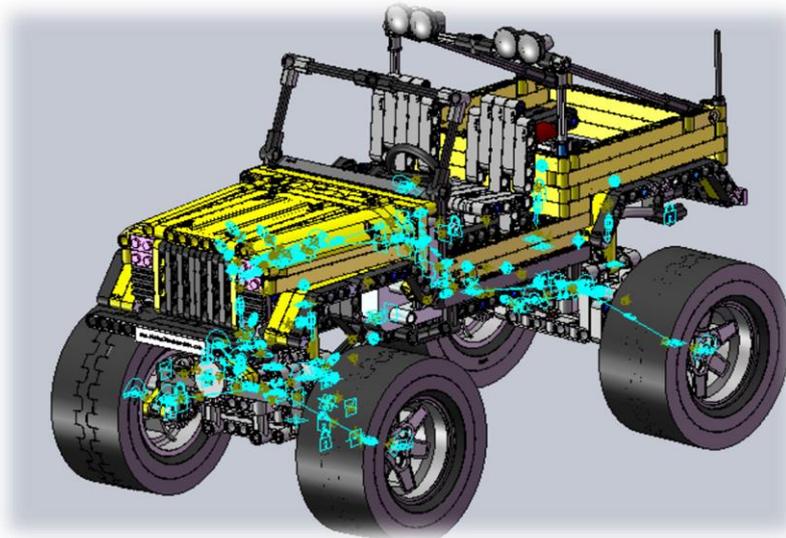


Ilustración 83.- vLTm nico jeep\_2016

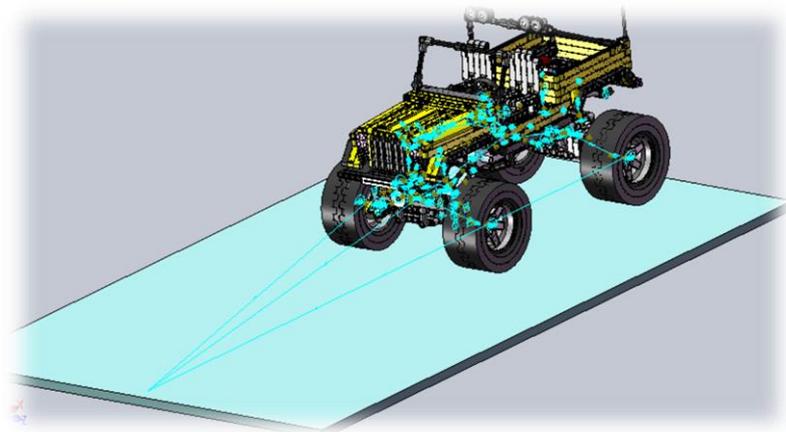
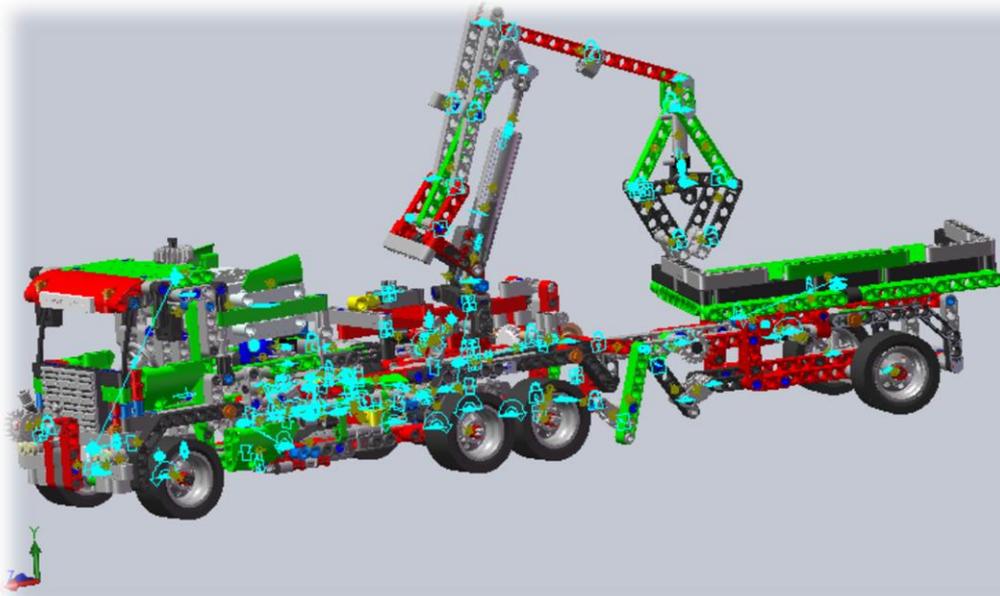
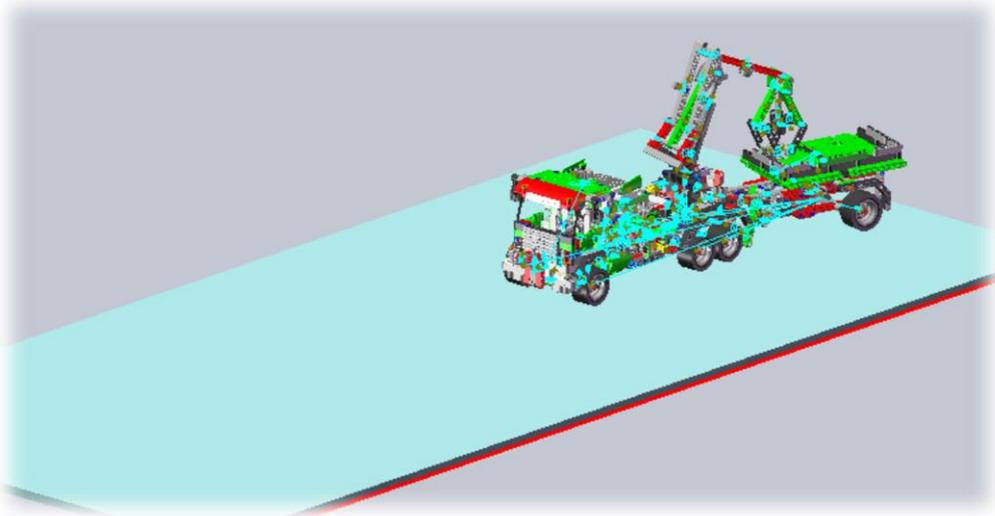


Ilustración 84.- vLTm nico jeep\_2016 sobre base

## 7.8 vLTm 42008-2\_2016



*Ilustración 85.- vLTm 42008-2\_2016*



*Ilustración 86 .- vLTm 42008-2\_2016 sobre base*



## 8. BIBLIOGRAFÍA

### 8.1 Libros y manuales

- The lego mindstorms ev3idea book –Isogawa Yoshihito
- Lego technic tora no maki- Isogawa Yoshihito
- Self-aligning mechanisms, Mir, 1982- L. Reshetov
- Manuales de las actividades- José Luis Oliver Herrero

### 8.2 Páginas web

- [www.nico71.fr/](http://www.nico71.fr/)
- [www.technicbricks.com](http://www.technicbricks.com)
- [www.lego.es](http://www.lego.es)
- [www.bricklink.com](http://www.bricklink.com)
- [www.brickset.com](http://www.brickset.com)
- [www.virtualtechmodels.com](http://www.virtualtechmodels.com)
- [www.lego.com/es-es/technic](http://www.lego.com/es-es/technic)



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*



## ÍNDICE PRESUPUESTO

1.	Introducción al presupuesto.....	79
2.	<i>Capítulo 1.</i> Licencia del software. ....	79
3.	<i>Capítulo 2.</i> Equipo informático. ....	79
4.	<i>Capítulo 3.</i> Modelos LEGO® Technic.....	80
5.	<i>Capítulo 4.</i> Modelos LEGO® Technic virtuales.....	81
6.	RESUMEN DEL PRESUPUESTO .....	82



## 1. Introducción al presupuesto.

En el apartado del presupuesto se van a detallar los costes del presente TFG. Para ello se va a dividir en los siguientes capítulos.

- Licencia del software
- Equipo informático
- Modelos LEGO® Technic
- Modelos LEGO® Technic virtuales

## 2. Capítulo 1. Licencia del software.

Para el montaje y su posterior simulación de todos los modelos virtuales se ha empleado el programa solidworks 2007 SP 5.0 junto con su extensión CosmosMotion. El coste del programa y su licencia se detallan a continuación.

Programa	Unidades	Horas/año	Horas del proyecto	Precio unitario (€/Ud.)	Amortización	Coste (€)
SolidWorks 2007 + COSMOS Motion	1	1780	300	5300	17%	901€
<b>TOTAL</b>						<b>901€</b>

**Tabla 2.- Software**

## 3. Capítulo 2. Equipo informático.

Para este TFG se ha utilizado un ordenador portátil MSI GP62 2QE Leopard Pro. Es muy importante disponer de las suficientes prestaciones en el PC, ya que los softwares utilizados realizan cálculos muy potentes.

En este caso algunas de sus prestaciones son:

- Procesador Intel® Core i7-5700HQ
- Memoria RAM 8GB DDR3 SODIUM
- Disco duro 1TB + 128GB SSD
- Controlador gráfico Nvidia GeForce GX950M 2GB GDDR3



*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*

Se considera un periodo de amortización de 4 años.

<i>Equipo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Horas/año</i>	<i>Horas del proyecto</i>	<i>Precio unitario (€/Ud.)</i>	<i>Amortización</i>	<i>Coste €</i>
<i>Ordenador Portátil</i>	1	1780	300	1004€	17%	170.68€
					<b>TOTAL</b>	<b>170.68€</b>

**Tabla 3.- Equipo informático**

#### 4. Capítulo 3. Modelos LEGO® Technic

Los modelos LEGO® Technic que han servido de modelo para realizar los montajes virtuales son los siguientes:

<i>Modelo LEGO® Technic</i>	<i>Unidades</i>	<i>Precio unitario (€/ud)</i>	<i>Coste (€)</i>
<i>vLTm Pw-114</i>	1	32,5 €	32,5 €
<i>Nico-forest</i>	1	60,70 €	60,70 €
<i>Nico-piaggio</i>	1	93,90 €	93,90 €
<i>Nico-jeep</i>	1	130 €	130 €
<i>vLTm 46002-b</i>	1	170 €	170€
<i>vLTm 42029</i>	1	100 €	100 €
<b>TOTAL</b>			<b>587,1 €</b>

**Tabla 4.- Modelos LEGO® Technic**



## 5. Capítulo 4. Modelos LEGO® Technic virtuales.

En este capítulo se exponen los costes de ensamblar y simular los modelos virtuales.

<i>Modelo virtual</i>	<i>LEGO® Technic Operación</i>	<i>Horas empleadas</i>	<i>Precio (€/h)</i>	<i>Coste operación</i>	<i>Coste modelo LEGO®Technic virtual (€)</i>
-----------------------	--------------------------------	------------------------	---------------------	------------------------	--

<b>vLTm pw-114_2016</b>	Ensamblaje	22	50	1100	1350
	Simulación	5		250	
<b>vLTm nico-forest_2016</b>	Ensamblaje	36	50	1800	2200
	Simulación	8		400	
<b>vLTm nico-piaggio_2016</b>	Ensamblaje	46	50	2300	2900
	Simulación	12		600	
<b>vLTm nico-jeep-2016</b>	Ensamblaje	64	50	3200	3950
	Simulación	15		750	
<b>vLTm 46002-b_2016</b>	Ensamblaje	72	50	3600	4600
	Simulación	20		1000	
<b>vLTm 46029_2016</b>	Ensamblaje	43	50	2150	2150
				<b>TOTAL</b>	<b>17.150 €</b>

Tabla 5.- Modelos LEGO® Technic virtuales



## 6. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Para finalizar, se expone una tabla resumen con el presupuesto total.

<i>Capítulo 1. Licencia del software</i>	901 €
<i>Capítulo 2. Equipo informático</i>	170.68 €
<i>Capítulo 3. Modelos LEGO Technic</i>	587,1 €
<i>Capítulo 4. Modelos LEGO Technic virtuales</i>	17150 €
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>18808,78 €</b>
12% Gastos generales	2257,05 €
6% Beneficio industrial	1128,53 €
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA</b>	<b>22194,36 €</b>
21% IVA	4660,82 €
<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	<b>26855,18 €</b>

**Tabla 6.- Resumen presupuesto**

El presupuesto total del proyecto asciende a un total de: VEINTISEIS MIL OCHOCIENTOS CINCUENTA Y CINCO EUROS Y DIECIOCHO CÉNTIMOS.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



INDUSTRIALES VALENCIA

*Creación y simulación de modelos virtuales LEGO® Technic*