



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**DISEÑO MECÁNICO, CONSTRUCCIÓN
VIRTUAL Y SIMULACIÓN CINEMÁTICA EN
SOLIDWORKS DE LOS MODELOS LEGO®
TECHNIC:
VLTM 8480-2, VLTM 8436, VLTM 8458-1 y
LTM 41999**

AUTOR: JUAN CARLOS BAÑÓN GUILLÉN

TUTOR: JOSÉ LUIS OLIVER HERRERO

Curso Académico: 2014-15

MEMORIA

1. RESUMEN Y OBJETO DEL PROYECTO	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1 El modelo Lego® Technic	5
2.2 El modelo Lego® Technic Virtual	5
2.3 Máquinas reales y modelos Lego® Technic	6
2.4 Los modelos de Isogawa Yoshihito	7
2.5 Software utilizado	8
3. ENSAMBLAJE DEL MODELO	9
3.1 Introducción y objetivos	9
3.2 Procedimiento de montaje	9
3.2.1 <i>Elección del modelo a simular</i>	9
3.2.2 <i>Selección de componentes</i>	10
3.2.3 <i>Identificación de las piezas</i>	10
3.3 Ensamblaje en SolidWorks	11
3.3.1 <i>Relaciones de posición</i>	11
3.3.2 <i>El sistema Lego® Technic y Solidworks</i>	13
3.4 Modelos virtualizados	16
3.4.1 <i>Modelos de Isogawa Yoshihito</i>	16
3.4.2 <i>Modelo TnMm-0204</i>	19
3.4.3 <i>Modelo vLTm_8064-2</i>	20
3.4.4 <i>Modelos TnMm-0281 y TnMm-0284</i>	21
3.4.5 <i>Modelo vLTm_8445-2</i>	23
3.4.6 <i>Modelo vLTm_8862-1</i>	26
3.4.7 <i>Modelo vLTm_8480-2</i>	28
3.4.8 <i>Modelo vLTm_8436</i>	30
3.4.9 <i>Modelo vLTm_8458-1</i>	32
3.4.10 <i>Modelo LTM_41999</i>	34
4. PROCESO DE COMPACTACIÓN	42
5. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL	43
5.1 Introducción y objetivos	43
5.2 Modelo cinemático auto-alineado	43

5.2.1	<i>Introducción y objetivos</i>	43
5.2.2	<i>Sistemas mecánicos y conceptos básicos</i>	43
5.2.3	<i>Estudio cinemático</i>	45
5.2.4	<i>Pares cinemáticos</i>	46
5.2.5	<i>Movilidad de los mecanismos</i>	48
5.2.6	<i>Diagramas cinemáticos</i>	49
5.2.7	<i>Mecanismo auto-alineado</i>	52
5.3	Complemento de SolidWorks: Cosmos Motion	53
5.3.1	<i>Presentación e introducción a Cosmos Motion</i>	53
5.3.2	<i>Pares cinemáticos</i>	54
5.3.3	<i>Pares primitivos</i>	60
5.3.4	<i>Acoplamientos y contactos</i>	63
5.3.5	<i>Restricción de movimiento</i>	65
5.4	Modelos simulados	66
5.4.1	<i>Modelo vLTm_8816-1</i>	68
5.4.2	<i>Modelo vLTm_8064-2</i>	70
5.4.3	<i>Modelo vLTm_8459-2</i>	71
5.4.4	<i>Modelo vLTm_8445-1</i>	74
5.4.5	<i>Modelo vLTm_8480-2</i>	76
6.	CONCLUSIONES	78
7.	BIBLIOGRAFÍA	80

1. RESUMEN Y OBJETO DEL PROYECTO

El presente Trabajo Final de Grado (en adelante TFG o trabajo) tiene como objetivo la mejora del conocimiento de algunas herramientas de diseño mecánico computacional en ingeniería mecánica, usadas desde un punto de vista profesional. Es decir, se pretende mejorar las habilidades del alumno en el diseño mecánico virtual, así como en la simulación cinemática virtual, todo ello desde una perspectiva orientada al entorno laboral y profesional.

Para lograr estos objetivos se ha considerado adecuado la utilización como material de referencia de los modelos Lego® Technic, que presentan un nivel de sofisticación bastante elevado y que están comercialmente disponibles en una amplia gama de tamaños, precios y complejidad.

El planteamiento y procedimiento que se ha utilizado, viene usándose desde hace años y ha sido empleado por el tutor de este trabajo en diferentes asignaturas impartidas en la escuela de esta universidad. Es el siguiente:

- Se parten de los componentes Lego®, previamente virtualizados mediante un programa de CAD, y que son exactamente iguales a los que podríamos encontrar en cualquier 'kit' o 'set' de Lego®. Estos componentes se "ensamblarán" entre sí hasta conformar cada modelo mediante el software SolidWorks utilizando una serie de reglas o normas que facilitarán la labor y mejorarán el funcionamiento del programa. (Ver apartado 3 del trabajo).
- En la siguiente parte del trabajo se identificarán las distintas piezas del modelo a crear y simular. Se ha realizado en el apartado 3.2.3. Una pieza está compuesta por un conjunto de componentes (también puede ser un solo componente) que no tienen movimiento relativo entre sí, o que si lo tienen no resulta relevante para el funcionamiento del modelo. Una pieza presenta movimiento relativo con respecto a otras piezas. Ejemplos de piezas muy comunes en los modelos son el chasis, o cada una de las ruedas de un vehículo.
- Una vez identificadas las piezas procederemos al ensamblaje y comprobaremos que los movimientos del modelo son los adecuados y se asemejan a los del modelo real. Todo esto se ha realizado en el apartado 3.3, y en sus subapartados.
- Posteriormente, en el apartado 4 del trabajo, y como paso previo para la simulación de los modelos, se llevará a cabo una compactación de las piezas de éstos, de tal manera que cada pieza ya no será un conjunto de componentes. Así pues cada pieza se convertirá en una única unidad virtual. Esto acelerará el proceso de cálculo que el software utilizado realiza.
- La última fase consiste en simular cinemáticamente el modelo virtual, creando (en la medida de lo posible) un modelo cinemático auto-alineado, es decir, una configuración de pares cinemáticos en la que no existan restricciones en exceso. El proceso y la teoría necesaria para ello se ha descrito en el apartado 5. Realizaremos la simulación con la aplicación Cosmos Motion, integrada en Solidworks.

Además se han detallado cada uno de los modelos ensamblados en el apartado 3.4, y cada uno de los modelos autoalineados y simulados en el apartado 5.4. Entre algunos de esos modelos se encuentran los que se mencionan en el título de este TFG: vLTm_8480-2 (apartados 3.4.7 y 5.4.5), vLTm_8436 (apartado 3.4.8), vLTm_8458-1 (apartado 3.4.9) y el LTM_41999 (apartado 3.4.10).

Así pues, mediante el seguimiento de esta metodología conseguiremos adquirir una serie de competencias y conocimientos que no solo pueden ser aplicados a modelos Lego®, si no que se aplican a un gran número de aplicaciones industriales, ya que el diseño y la simulación de máquinas mecánicas tiene actualmente una gran importancia en la industria.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se ha considerado este TFG desde un punto de vista profesional. Esto es, se entiende al autor de este trabajo como ya ingeniero, que recibe personas (clientes) que le llevan prototipos de máquinas a escala. Estos prototipos o maquetas se suponen construidas con componentes Lego® Technic, que pueden ser fácilmente adquiridos en múltiples webs indicadas para tal efecto. El cliente pide que se le detalle la lista de cojinetes que debería insertar en cada unión de piezas. Quiere, además, que los cojinetes sean los adecuados para que la máquina real sea auto-alineada, lo que hará que su coste se reduzca y que su vida útil se prolongue (evitando la obsolescencia programada y evitando costes de mantenimiento).

Así pues, se entiende que el autor de este trabajo, como ingeniero, acepta el encargo y además acuerda con el cliente entregar:

- Un modelo virtual de su maqueta o máquina a escala, realizado con SolidWorks, y operable en cualquier otro software del mismo tipo.
- Un modelo virtual realizado en la aplicación de SolidWorks, Cosmos Motion, con la identificación de los cojinetes que debe insertar en la máquina.
- Una simulación cinemática del prototipo. Dicha simulación sería útil para una posible mejora o cambio por parte del cliente de su máquina, posibilitando así una retroalimentación del proceso. Además podría formar parte de la presentación del producto final del cliente.
- Además, se podrían entregar periódicamente documentos eDrawings, que no requieren conocimientos por parte del cliente del tipo de software utilizado en las tareas y que permitirían ver cómo va el proceso en todo momento.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 El modelo Lego® Technic

Lego® Technic es un producto desarrollado por la compañía Lego®. Pretende poder crear diferentes máquinas, vehículos, etc., con multitud de partes móviles complejas, como los observables en la Figura 1. Estos modelos se asemejan a máquinas y mecanismos que podemos encontrar en cualquier entorno industrial y también cotidiano. El método de creación de los modelos se basa en la interconexión de los distintos componentes, que han pasado de ser los conocidos bloques con “botones”, a los nuevos sistemas de ejes, barras, vigas y pasadores.



Figura 1. Distintos modelos Lego® Technics
(2007, Lego Technic 41999-1 d)

2.2 El modelo Lego® Technic Virtual

Una vez explicado que es el modelo Lego® Technic, comprender que es el modelo Lego® Technic Virtual no es complicado.

Se trata de una virtualización del modelo real, a partir de los componentes virtuales necesarios, de manera que el resultado sea una máquina virtual equiparable a la real, tanto como por la apariencia externa como por todos los movimientos que la máquina real posee. Esto se consigue con la identificación de las distintas piezas que conforman el modelo. Entendemos por pieza un conjunto de componentes que no tienen movimiento relativo entre sí.

Para la identificación de las piezas, tenemos a nuestra disposición tanto las instrucciones de montaje de cada modelo, como algunos de los modelos reales ya construidos. También resultarán de gran ayuda los documentos eDrawings disponibles.

A continuación se muestran ejemplos de algunos componentes virtualizados:



Figura 2. Componentes Lego® Technic virtualizados

Todos los componentes Lego® Technic han sido creados y concebidos de tal forma que encajan a la perfección entre ellos, independientemente del montaje. Esto hace que el ensamblaje virtual sea considerablemente bueno. Aun así, en los modelos reales, se puede hacer uso de la flexibilidad típica de un componente de plástico, cosa que en el ensamblaje por computador no podremos conseguir.

2.3 Máquinas reales y modelos Lego® Technic

Los modelos Lego® Technic (y sus respectivos virtuales) han resultado de gran utilidad ya que han permitido conocer el funcionamiento de una gran variedad de mecanismos planos y tridimensionales. Además, como se comprobará, han ayudado a aprender a manejar programas del tipo SolidWorks, SolidEdge, CATIA, Inventor... Así pues, con cuantos más mecanismos trabajemos, más conocimiento sobre ellos y sobre estas aplicaciones informáticas se tendrá, permitiendo además una posible innovación o mejora de los mismos.

Otra ventaja muy importante de utilizar los modelos Lego® Technic es su semejanza con máquinas y mecanismos reales de aplicación industrial. Por lo tanto los modelos Lego® Technic ayudan a comprender y conocer el funcionamiento de máquinas reales. Algunos ejemplos de mecanismos muy parecidos, en cuanto a apariencia y funcionamiento, a sus equivalentes reales son los siguientes:



Figura 3. Diferencial real, diferencial Lego® Technic y diferencial Lego® Technic virtual
 (2007, El hilo de mecánica de PabloGTD)
 (MercadoLivre)

En este ejemplo (Figura 3) se aprecia además el paso de un mecanismo real, a un mecanismo Lego® y finalmente a la virtualización del mismo.

Otro buen ejemplo para mostrar la similitud de las máquinas Lego® Technic con máquinas reales son los cilindros hidráulicos o neumáticos. Hay que hacer la observación de que en la Figura 4, el cilindro real es hidráulico, y el cilindro Lego® es neumático.



Figura 4. Cilindro real, cilindro Lego® Technic y cilindro Lego® Technic virtual

2.4 Los modelos de Isogawa Yoshihito

Para una primera toma de contacto con el software que se ha utilizado en el presente TFG y con los ya explicados Lego® Technics, se han empleado modelos ideados y creados por el escritor japonés Isogawa Yoshihito que él mismo ha publicado en un libro que además anima a distribuir libremente.

Estos modelos consisten en pequeños montajes de pocos componentes, pero en los que se pueden observar mecanismos muy diversos, como poleas, engranajes de todo tipo, correas, pares prismáticos, etc. También ha creado pequeños vehículos y modelos con motores eléctricos Lego® Technic.

Así pues, la creación de estos modelos constituye una fase previa de iniciación y familiarización con el entorno SolidWorks y Lego® Technic.

2.5 Software utilizado

Se ha utilizado fundamentalmente el programa informático SolidWorks, de Dassault Systemes, en las versiones 2007 (SP5.0) y 2011. SolidWorks es un software de diseño CAD en 3D que permite crear y modelar componentes, realizar ensamblajes con piezas y componentes, crear planos, simular cinemáticamente ensamblajes, etc. Por eso se ha considerado su utilización como idónea para este TFG.

La versión 2007 (con el Service Pack 5.0) se ha utilizado por su gran estabilidad y buen funcionamiento (pese a haber versiones posteriores) y por la adecuación al hardware que se ha empleado. La versión 2011 se ha utilizado para la parte de simulación, ya que incluye mejoras en cuanto a rendimiento y animación.

También utilizaremos distintas herramientas o aplicaciones de SolidWorks, como Cosmos Motion para la parte de simulación cinemática y como eDrawings. Éste último será de gran ayuda para la virtualización de los modelos.

3. ENSAMBLAJE DEL MODELO

3.1 Introducción y objetivos

Esta fase del trabajo aborda la creación en un entorno virtual de distintos modelos Lego® Technic. Como ya se ha dicho, disponemos de todos los componentes virtualizados necesarios para la elaboración de cada modelo. También dispondremos de un documento eDrawings de cada modelo (menos del LTM_41999), que servirán de referencia a la hora del montaje virtual. Estos documentos proporcionan una visión 3D del modelo a virtualizar y son de gran ayuda, ya que visualizaremos de una forma rápida el nombre y la localización exacta de componentes dentro del modelo. Así pues, de igual manera que para ensamblar el modelo real utilizamos las instrucciones proporcionadas en el 'kit' de Lego®, para ensamblar el modelo virtual usaremos estos documentos eDrawings.

El objetivo no es reproducir virtualmente la máquina real Lego® Technic a partir de sus componentes. El objetivo es reproducirla identificando y construyendo las distintas piezas, que como se ha explicado en la introducción, son conjuntos de componentes sin movimiento relativo entre ellos (o que si lo tienen, es irrelevante).

Así pues, al final de esta fase, deberemos haber obtenido un modelo virtual semejante al real, en cuanto a nivel de componentes y en cuanto a nivel de movimientos. Además conseguiremos familiarizarnos con el entorno y la interfaz de Solidworks.

3.2 Procedimiento de montaje

3.2.1 Elección del modelo a simular

Dependiendo de las clases de mecanismos que deseemos estudiar y el nivel al que se pretenda llegar, nos decantaremos por unos modelos u otros. En el presente TFG se ha seguido un orden creciente en cuanto a la dificultad técnica de los modelos, comenzando por los sencillos modelos de Isogawa, pasando por modelos más complejos y de más componentes, hasta llegar a los cuatro modelos que ponen nombre a este trabajo.

Todos los modelos se encuentran disponibles en páginas webs como www.virtualtechmodels.com (creada por el tutor de este TFG), www.bricklink.com, o la propia página web de Lego®, en la sección Technic. En tales páginas webs podemos encontrar información sobre los modelos, como por ejemplo el listado de todos los componentes que lo componen.

3.2.2 Selección de componentes

Una vez elegido o asignado el modelo a virtualizar, se ha procedido a reunir los componentes necesarios para crear las piezas. Dichos componentes suelen ser suministrados por el tutor de este TFG, pero son fácilmente identificables haciendo uso del documento eDrawings.

Los componentes virtuales deben presentar el color que tienen los componentes reales, y se consigue gracias a la paleta de colores de SolidWorks. Podremos modificar el color a varios niveles: a nivel de componente (cada vez que usemos e insertemos el componente aparecerá con el color que definamos), o a nivel de ensamblaje (es decir, insertaremos el componente y modificaremos su color original).

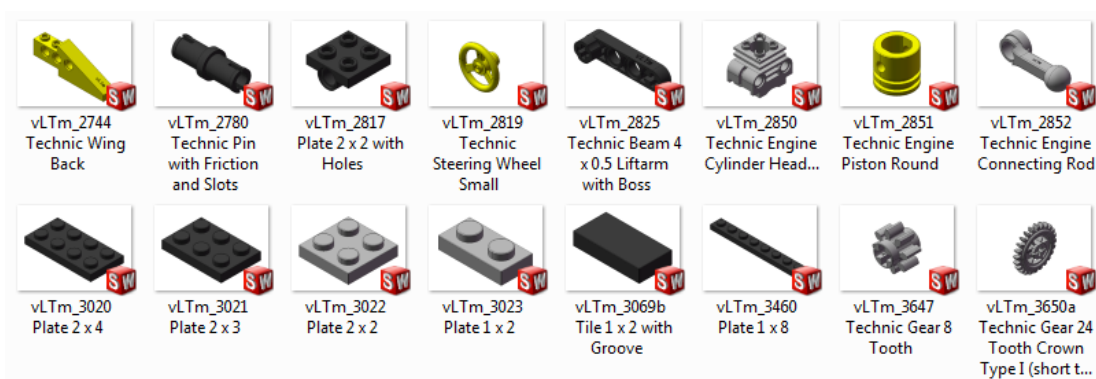


Figura 5. Algunos componentes del modelo 8445-1, con sus respectivos colores

3.2.3 Identificación de las piezas

Como ya tenemos todos los componentes preparados para su ensamblaje, procedemos a identificar en nuestro modelo las distintas piezas que lo conforman. Para ello, es necesario unas normas y procedimientos que permitan una correcta normalización del proceso, y que nos permita identificar qué pieza o trozo estamos tratando. Así pues, la nomenclatura seguida ha sido:

“vLTm_xxxx-x_2015.sldasm” para el ensamblaje principal. Será aquel en el que insertaremos las distintas piezas. Las “x” se sustituirán por el nombre de nuestro modelo.

“vLTm_xxxx-x_part-0yy0_2015.sldasm” para cada una de las piezas del modelo. Las “y” se sustituirán por el número de orden de la pieza en el montaje. Si es una pieza compuesta por trozos, el último cero se sustituye por el número de orden del trozo en la pieza. Por ejemplo “vLTm_8458-1_part-035067_2015” es un trozo de la pieza 035 del modelo 8458-1, concretamente el trozo número 067 de dicha pieza. Se observa en el ejemplo anterior que si un modelo va a tener muchas piezas y trozos se aumentarán los dígitos.

Habitualmente, los modelos Lego® Technic tienen una pieza tipo “chasis”, que, por lógica, insertaremos primeramente (de manera que se llamará “vLTm_xxxx-x_part-00100_2015”) El

chasis además suele ser una pieza de muchos componentes, de manera que estará troceada. Es importante fijar el chasis y hacer coincidir el origen de éste con el del ensamblaje principal. Que el chasis esté fijo significa que no podrá moverse, y que cualquier pieza que insertemos después sí que se podrá desplazar libremente hasta que no establezcamos las relaciones de posición adecuadas. Después del chasis insertaremos las demás piezas, siguiendo un orden adecuado.

Teniendo estas sencillas normas claras, procedemos a identificar qué conjuntos de componentes conforman las piezas. Para ello hacemos hincapié en que cada pieza debe poseer movimiento relativo con las otras, y sus componentes no. A continuación (Figura 6) se muestra un ejemplo de un modelo simple, con sus piezas identificadas y ensambladas:

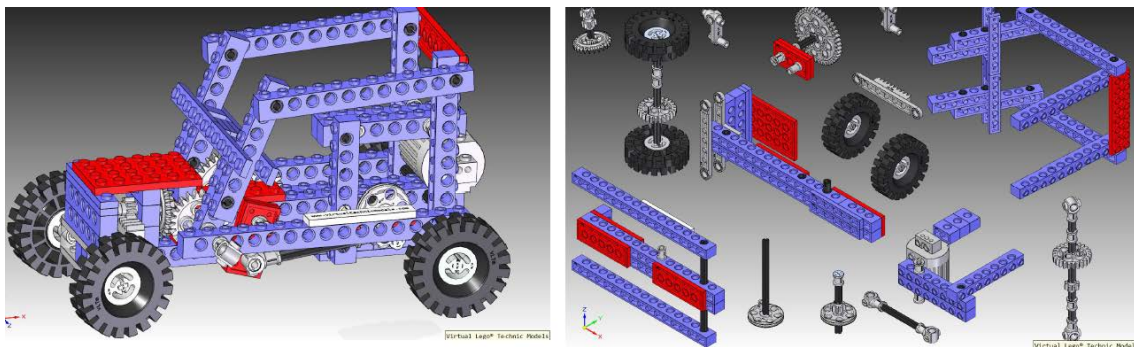


Figura 6. Modelo 8050-5 con sus piezas.

(Oliver Herrero, José L., 2013, Creación Modelos Virtuales Maquinas Lego Technic)

3.3 Ensamblaje en SolidWorks

3.3.1 Relaciones de posición

Dentro del entorno SolidWorks, haremos uso de las restricciones o relaciones de posición para eliminar la movilidad no deseada entre dos componentes o entre dos piezas o trozos. Es decir, agregando relaciones de posición iremos definiendo las posiciones dentro del modelo de componentes, piezas y trozos. Las relaciones de posición son las mismas tanto para nivel de componentes como para nivel de piezas o trozos. A continuación se enumeran:

- **Relaciones de posición estándar:** se pueden establecer entre superficies planas, superficies curvas, aristas, ejes, puntos... Son:
 - *Coincidente*
 - *Paralela*
 - *Perpendicular*
 - *Tangente*
 - *Concéntrica*
 - *Distancia*

- *Ángulo*
- **Relaciones de posición avanzadas:** las utilizadas en este TFG son las dos últimas, y permiten crear el movimiento entre dos engranajes o entre un piñón y su cremallera. Establecen una relación de movimiento directa entre dos elementos.
 - *Simetría*
 - *Leva*
 - *Ancho*
 - *Engranaje*
 - *Piñón cremallera*

Para relacionar dos componentes, piezas o trozos, clicaremos sobre las superficies (o puntos, o aristas...) de los cuerpos a relacionar, y clicaremos sobre la relación de posición deseada, pudiendo cambiar además la alineación de la relación de posición. Un sencillo ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 7.

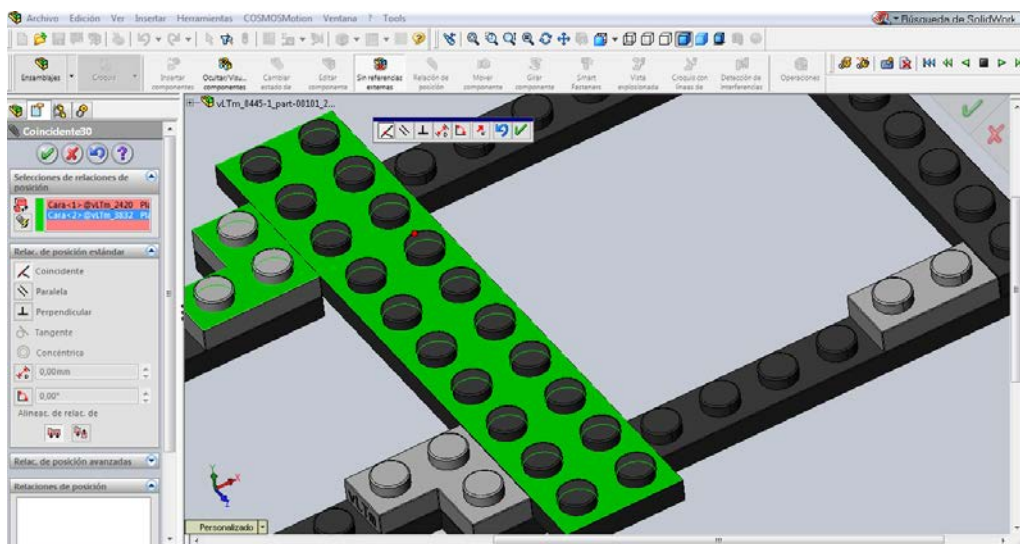


Figura 7. Relación de posición de coincidencia entre dos caras planas

No todas las relaciones se establecerán correctamente, puesto que, por ejemplo, no podemos definir el paralelismo entre dos puntos. Algunas relaciones solo tienen sentido para determinadas superficies, como la de concetricidad, usada en superficies cilíndricas y que hace coincidir el centro o eje central de las superficies. Otras relaciones permiten deslizamiento, como la de tangencia.

Es importante saber que imponiendo varias relaciones adecuadamente podemos fijar componentes, como los de una pieza o trozo. O bien podemos definir un tipo de movimiento deseado entre dos piezas, por ejemplo, el giro de una rueda y su eje respecto del chasis.

Para definir correctamente la relación “Engranaje” necesitaremos saber el número de dientes de los engranajes (o su diámetro). Esta relación de posición también permite definir poleas con correas por ejemplo, simplemente con invertir el sentido de giro de los componentes. También se usa para definir el movimiento de los tornillos sin fin. La relación en sí se establece haciendo clic en las superficies cilíndricas de los engranajes e indicando el número de dientes de los mismos.

Combinando relaciones de posición estándar y avanzadas podemos establecer el movimiento entre dos engranajes por ejemplo, como se observa en la siguiente figura:

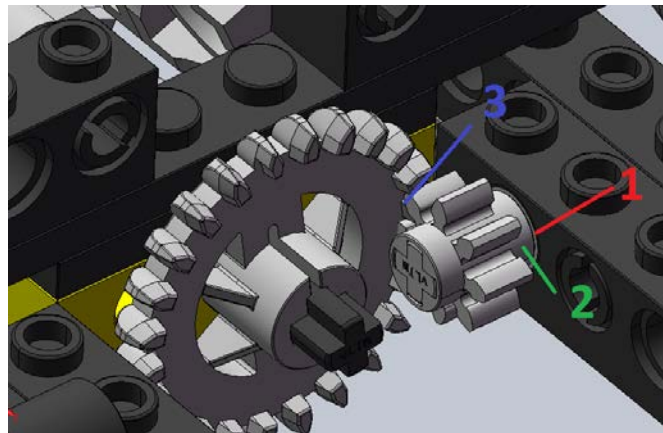


Figura 8. Par de engranajes

En la Figura 8 vemos un par de engranajes. Para conseguir su movimiento tal y como es en el modelo real haremos uso de las relaciones de posición de coincidencia (1), una para cada engranaje, de concurrencia (2), una para cada engranaje, y de engranajes (3).

Dada la variedad de casos y mecanismos existentes, de complejidad diversa, posteriormente se explicarán con más detalle más ejemplos de relaciones de posición y de combinaciones de relaciones de posición cuando se presenten y detallen los modelos creados y simulados.

3.3.2 El sistema Lego® Technic y Solidworks.

Como ya se expuso anteriormente, los modelos Lego® Technic se basan en el acoplamiento de ejes, barras, pasadores y vigas. Se ha considerado adecuado indicar como se establecen las relaciones de posición para lograr dichos acoplamientos, dado que estarán presentes en todos los modelos que se han virtualizado. Además servirán de ejemplo para reforzar los conceptos de pieza, trozo, componente... La consecución de cada acoplamiento no tiene por qué tener una solución única.

Se recuerda que los siguientes sistemas valen tanto como para ensamblar componentes entre sí, como para ensamblar piezas entre sí.

- **Eje sin rotación:** se consigue con las relaciones de posición de concentricidad (1) y paralelismo (2), en la Figura 9. También podríamos añadir una relación de coincidencia para fijar completamente la posición del eje respecto del pasador rojo.

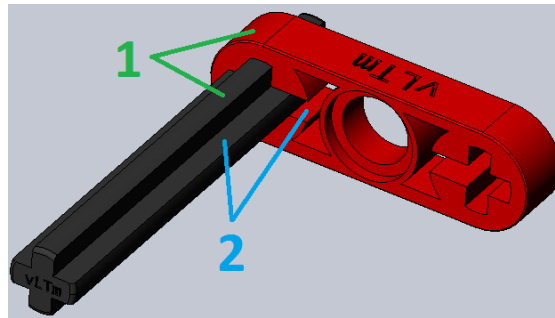


Figura 9. Eje sin rotación

- **Eje con rotación:** es igual que la anterior, pero eliminando la relación de posición de paralelismo. Esto hace que el eje pueda girar libremente (obviamente respecto del eje del agujero central del componente rojo). Así pues necesitaríamos una relación de posición de concentricidad, y si fuera necesario se podría fijar con una relación de coincidencia o distancia.
- **Componentes o piezas sin rotación:** la forma más usual de ensamblar y fijar dos componentes es mediante un eje. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo, en el que se ensamblan los dos trozos de una pieza. En este caso, el trozo verde estaba fijo, y hemos ensamblado y fijado el trozo 2 a éste.

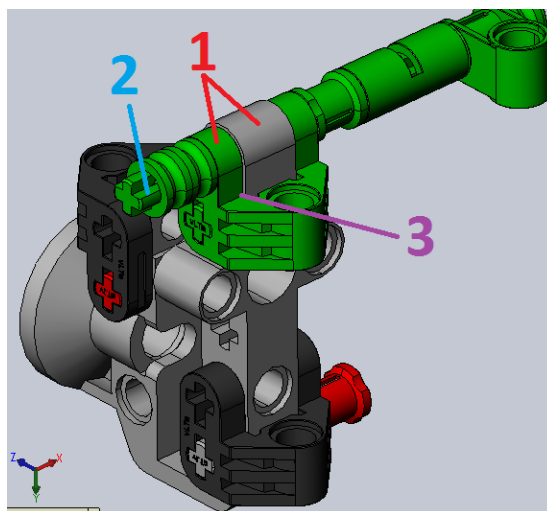


Figura 10. Ensamblaje de dos trozos de una pieza

Como se puede comprobar visualmente, ambas piezas quedan fijadas, sin rotación entre ellas. Lo conseguimos con las relaciones de posición de concentricidad (1) y paralelismo (2), a las que le hemos añadido una relación de coincidencia (3), para terminar de fijar el sistema.

- **Componentes o piezas con rotación:** de igual manera que en el caso anterior fijábamos las dos partes, podemos encontrarnos con una unión que requiera movimiento rotacional respecto de un eje. Se consigue con las mismas relaciones de posición, pero sin la de paralelismo.
- **Componentes de botones:** unir dos piezas de botones es sencillo, basta con crear una relación de posición de concentricidad entre las superficies cilíndricas de los botones (una relación por cada par de botones) y añadir una relación de coincidencia entre las caras planas de los componentes. En la Figura 11 vemos una de las dos relaciones concéntricas necesarias. (Con relacionar dos pares basta).

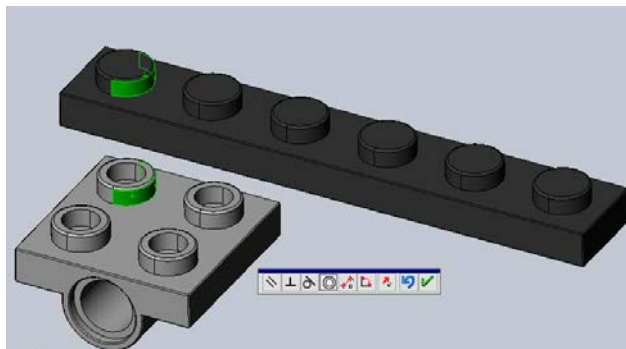


Figura 11. Unión entre componentes con botones

- **Uniones con Geometría de Referencia:** SolidWorks da la opción de añadir geometría (planos, puntos, ejes...) a los distintos componentes y piezas, gracias a lo cual se puede lograr otro tipo de uniones que con la geometría de los propios componentes solamente no se podría lograr. Un buen ejemplo, y que ha sido bastante utilizado en el presente TFG, es la creación de una unión esférica, que se consigue con una relación de posición de coincidencia entre puntos creados con geometría de referencia. Lo podemos apreciar en la figura 12.

Además de a uniones esféricas, se puede extrapolar las relaciones de posición con geometría de referencia a infinidad de casos. Algunos de ellos se abordarán en los siguientes apartados, en los que se detallarán uniones menos comunes, y más complejas.

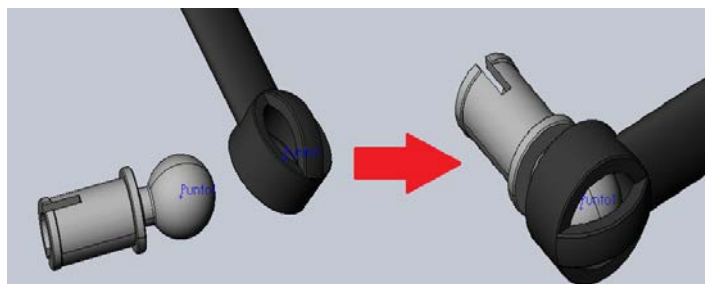


Figura 12. Unión esférica creada mediante geometría de referencia

3.4 Modelos virtualizados

3.4.1 Modelos de Isogawa Yoshihito

Como ya se ha explicado brevemente en el apartado 2.4, los modelos creados por Isogawa Yoshihito han resultado ideales para iniciarse en el aprendizaje de la creación de relaciones de posición, distinción de piezas, mecanismos, etc. Así pues, algunos de los primeros modelos ensamblados han sido los siguientes:

- **Isogawa 002:** consistente par de engranajes simples, con sus respectivos ejes. El número de dientes de los engranajes es 8 y 24, respectivamente. Está compuesta por tres piezas: un cuerpo fijo o chasis (componente rojo) y los dos engranajes con sus ejes.



Figura 13. Modelo Isogawa TnMm-002, virtual y real
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 026:** consiste en la transmisión de rotación entre dos ejes. Tanto en el 002 como en este, se utilizan las relaciones de posición avanzada tipo engranaje. Número de dientes: 8 y 20. Compuesta por una pieza tipo chasis (componentes verde, rojo y eje gris que los une) y dos piezas (engranaje negro con su eje y engranaje gris con el suyo).

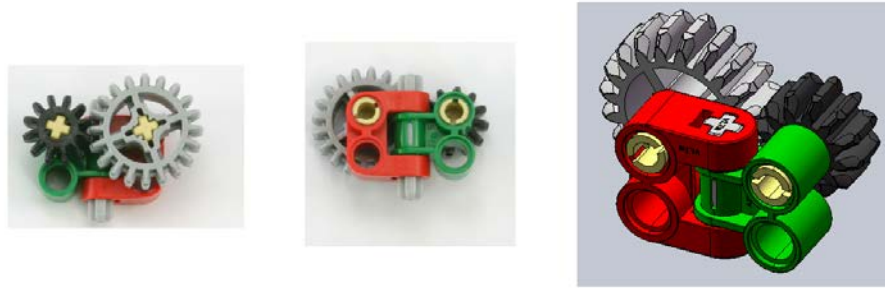


Figura 14. Modelo Isogawa TnMm-026, real y virtual
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 040:** ensamblaje de dos engranajes, uno de ellos (el grande) sobre una base giratoria deslizante. Este ensamblaje está compuesto por un chasis, que incorpora la base deslizante, un engranaje de 24 dientes con su eje, y el engranaje grande, de 56 dientes.

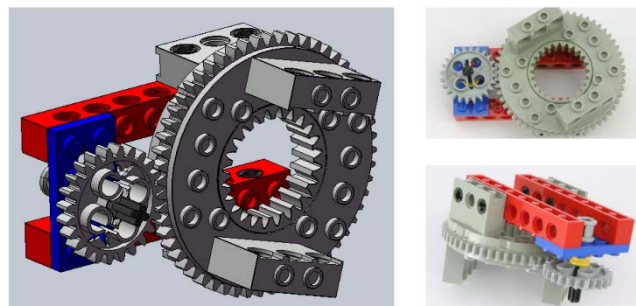


Figura 15. Modelo Isogawa TnMm-040, virtual y real
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 062:** este modelo consta de un cuerpo fijo y de dos engranajes perpendiculares tipo bola. Pese a no ser engranajes convencionales, establecer el movimiento adecuado entre ellos se consigue de la misma manera que en los anteriores modelos: mediante la relación de posición avanzada “Engranaje”, indicando en este caso 4 dientes en cada engranaje.

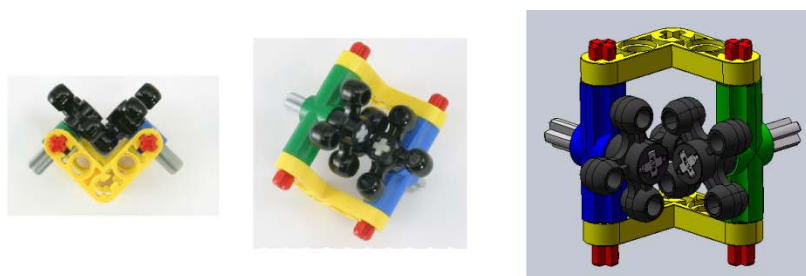


Figura 16. Modelo Isogawa TnMm-062, real y virtual
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 079:** este modelo es un pequeño mecanismo de tornillo sin fin, conseguido con la relación de posición avanzada de engranaje. En dicha relación de posición debemos definir que 1 vuelta del engranaje se traduce en 24 vueltas del tornillo. El ensamblaje se compone de un chasis y dos piezas (el tornillo sin fin y el engranaje de 24 dientes).

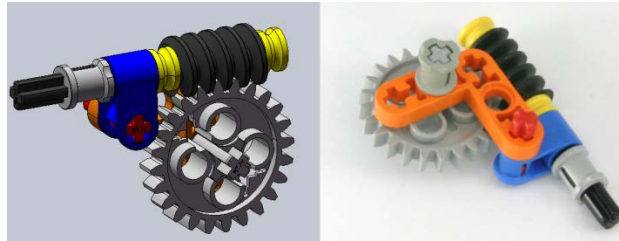


Figura 17. Modelo Isogawa TnMm-079, virtual y real
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 098:** este modelo es una pequeña reproducción de un sistema o mecanismo biela-manivela. Es un mecanismo muy habitual en ingeniería (motor de combustión interna, por ejemplo). Como podemos observar en la Figura 18, consta de tres piezas: el cuerpo fijo o chasis, el engranaje con su eje, la biela y la manivela. El movimiento circular del engranaje se transforma en movimiento lineal o de traslación.

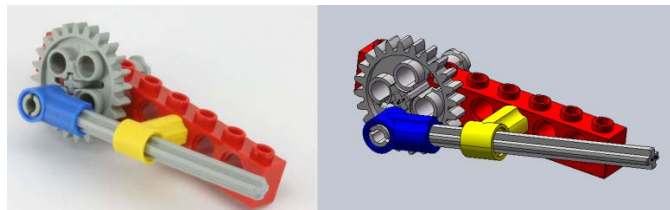


Figura 18. Modelo Isogawa TnMm 098, real y virtualizado
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

- **Isogawa 102:** este modelo, algo más complejo que los anteriores, consta de dos mecanismos, uno que convierte el movimiento circular en movimiento de traslación y un piñón-cremallera. Para diferenciar mejor las piezas que componen este modelo, en la Figura 19 se pueden apreciar las mismas, así como el ensamblaje del modelo.

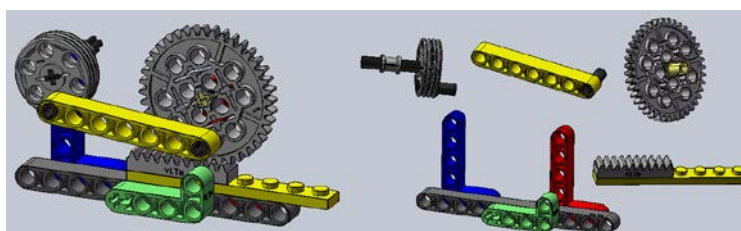


Figura 19. Modelo Isogawa 102. Ensamblaje y sus piezas
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

Para establecer la relación de posición piñón-cremallera, seleccionamos primero el piñón (engranaje grande de la Figura 19) y a continuación seleccionaremos una línea recta (arista) que indique la dirección del movimiento. Finalmente indicaremos el desplazamiento de la cremallera por cada vuelta o revolución del piñón.

- **Isogawa 107:** un mecanismo muy utilizado en la industria es la junta universal, junta Cardán o junta Hook. Las juntas universales se utilizan para transmitir el giro entre dos ejes desalineados, permitiendo además la articulación de la unión. En los modelos Lego® Technic, esta junta ya viene ensamblada, pero para virtualizar su movimiento debemos hacerlo nosotros, desde sus componentes básicos, que son tres. En este modelo de Isogawa podemos ver un pequeño mecanismo de este tipo.

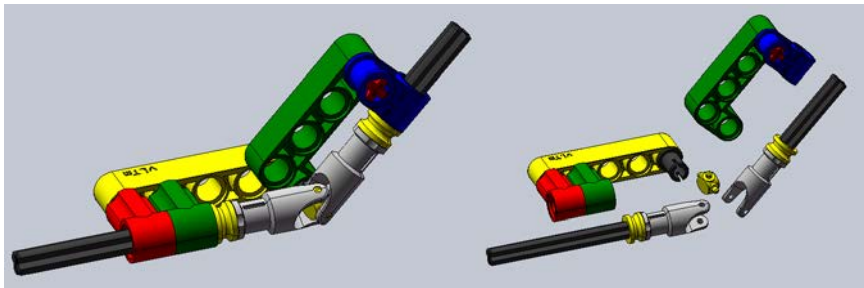


Figura 20. Modelo Isogawa TnMm 107, ensamblado y por piezas
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

3.4.2 Modelo TnMm-0204

Este modelo, también de Isogawa, representa un avance ligero en cuanto a dificultad. Así como en los modelos anteriores contábamos con dos, tres, cuatro... piezas, en éste contaremos con diecinueve. Pese a ello, las uniones o relaciones de posición entre piezas y/o componentes son similares a las anteriormente explicadas. Se trata de un modelo “andante”. Consta de un motor que transmite movimiento a un sistema de engranajes que van a parar a un eje compuesto de tornillos sin fin (puestos en una misma pieza). Este eje rota y engrana con los tres ejes con engranajes que mueven las patas.

El modelo cuenta con seis patas, que a su vez están compuestas por dos piezas cada una. El resto de las piezas son engranajes y la pieza de los tornillos sin fin, así como el chasis.

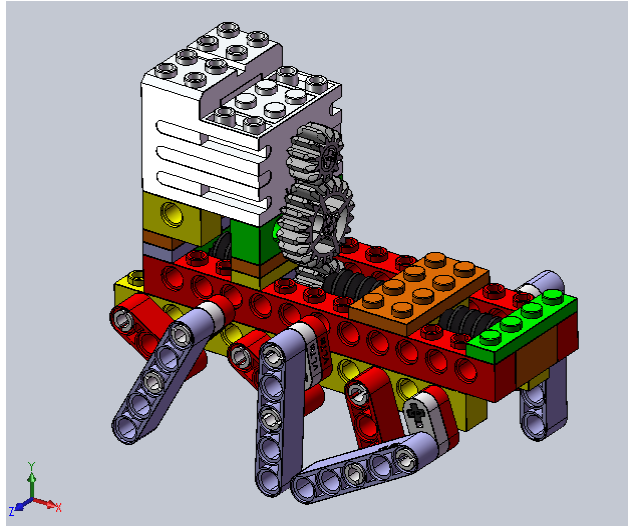


Figura 21. Modelo Isogawa TnMm 0204

3.4.3 Modelo vLTm_8064-2

Se trata de un modelo comercializado por Lego® bastante antiguo (1990). Es un vehículo motorizado, en el que podemos observar mecanismos como engranajes, poleas, piñón-cremallera, tornillo sin fin... También vemos que el chasis empieza a tener un tamaño considerable (12 trozos).

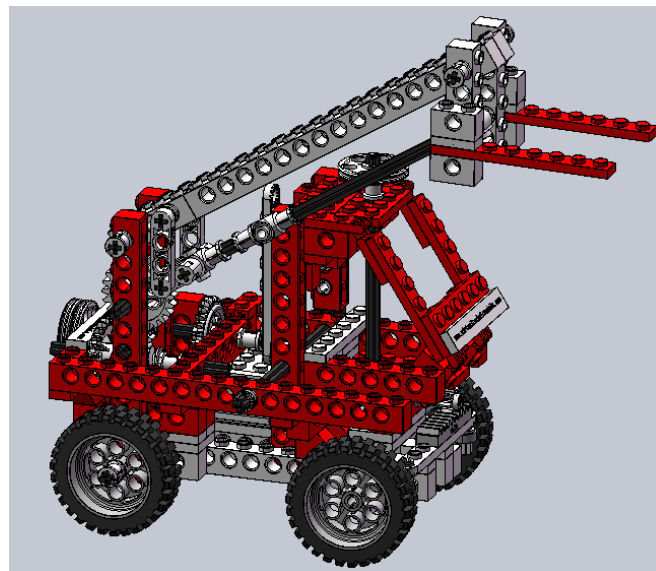


Figura 22. Modelo vLTm_8064-2

Por primera vez observamos un mecanismo de dirección para las ruedas delanteras. Está formado por un total de 6 piezas (todas en verde en la Figura 23).

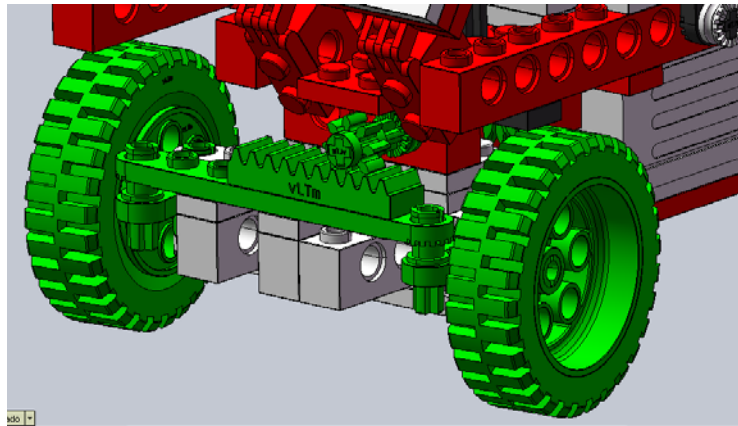


Figura 23. Sistema de dirección (en verde) del modelo vLTm_8064-2

El giro del pequeño motor, alimentado por unas baterías no representadas en el modelo virtual, es empleado para subir y bajar una pequeña plataforma elevadora del montacargas. En las siguientes figuras se observan dichos mecanismos.

Una vez ensamblado el modelo podemos ocultar el chasis, así como las piezas o componentes que queramos, lo cual nos permite visualizar el resto de piezas de una manera más clara, como en la siguiente imagen.

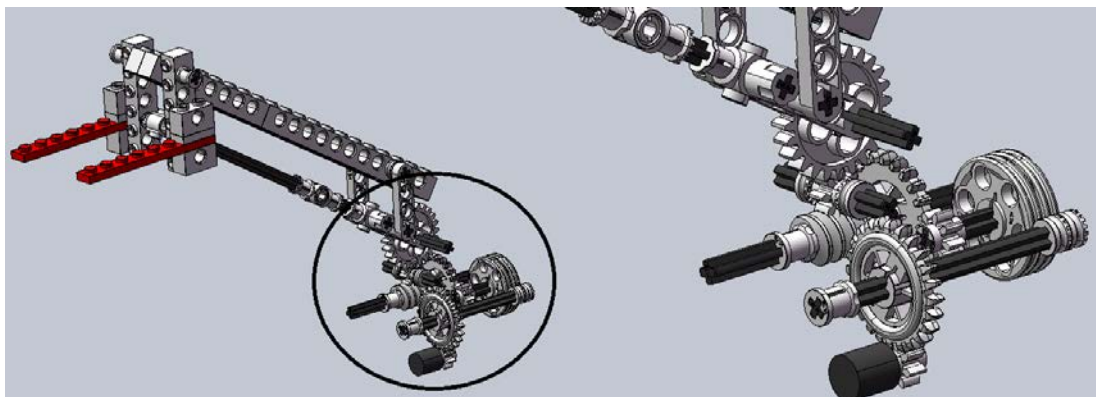


Figura 24. Mecanismo para subir y bajar el brazo del montacargas

3.4.4 Modelos TnMm-0281 y TnMm-0284

Estos dos modelos, de Isogawa, se han ensamblado paralelamente, dado que uno de ellos (el 0281) puede ser insertado en el otro, conformando el modelo TnMm-0281c. La dificultad de estos modelos ha consistido en que se han ensamblado virtualmente sin disponer de los modelos físicos y sin disponer del documento eDrawings de ninguno de ellos. Se han ensamblado a partir de las imágenes disponibles en el libro de Isogawa Yoshihito (Figura 25)

Se ha empezado por el primero, el TnMm-0281, que consiste en un pequeño vehículo con motor, y unos pocos engranajes. Consta de apenas 7 piezas unidas mediante relaciones de posición ya explicadas. Así pues, este modelo no ha entrañado más dificultad que los anteriores.

El modelo TnMm-0284 es un vehículo de 10 piezas, que no dispone de motor, ya que al acoplar ambos modelos se sirve del motor del 0281 para funcionar.



Figura 25. Imágenes de los modelos 0281, 0284 y 0281c del libro de I. Yoshihito a partir de las cuales se ha realizado el ensamblaje virtual del modelo
(Yoshihito, I., 2007, *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*)

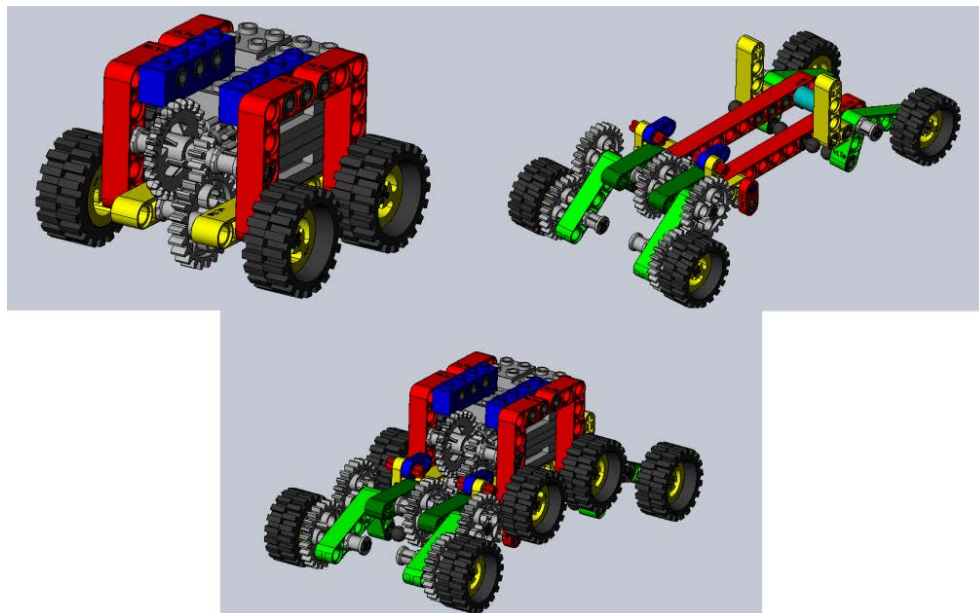


Figura 26. Modelos virtuales TnMm-0281, TnMm-0284 y TnMm-0281c

El acoplamiento entre ambos modelos se produce gracias al engrane entre el engranaje que mueve las ruedas del modelo 0281 (accionado por el motor) y el engranaje que mueve las ruedas del 0284, que como ya se ha dicho, no dispone de motor propio. Así pues, el giro del motor del 0281 hace girar las ruedas de ese modelo (que no están en contacto con el suelo) y las del 0284 (que sí que lo están).

3.4.5 Modelo vLTm_8445-2

Este modelo ha representado un avance significativo en cuanto a dificultad. Se trata de un coche de Fórmula 1. Para su realización se ha contado con la ayuda del documento eDrawings correspondiente y del folleto de instrucciones del modelo real y comercializado.

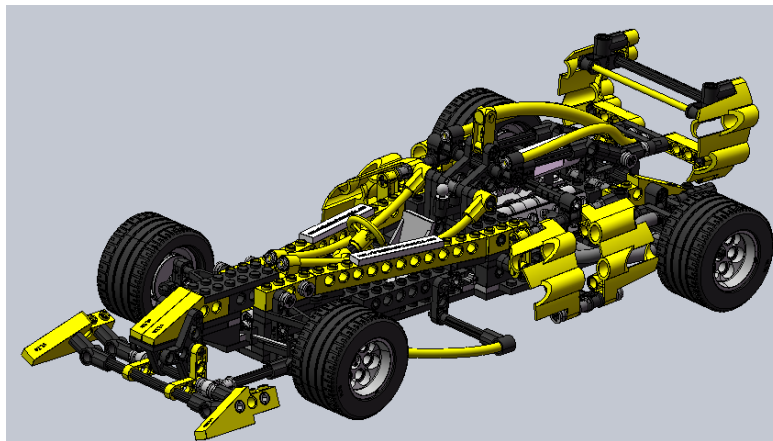


Figura 27. Modelo vLTm 8445-2

Ha constado de 36 piezas en total y se pueden encontrar mecanismos de todo tipo. Algunos de ellos ya se han comentado y explicado anteriormente, pero otros son totalmente nuevos. Es el caso del motor de 6 cilindros totalmente funcional, el diferencial trasero, así como del sistema de dirección.

También encontramos un nuevo tipo de componente, que no se encuentra virtualizado, pues en el modelo real es flexible. Así pues, se han creado con SolidWorks.

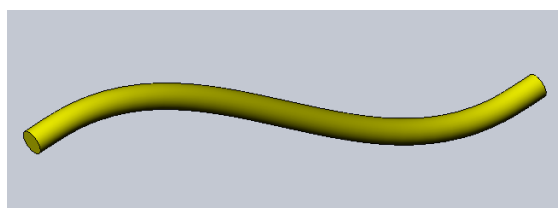


Figura 28. Componente flexible utilizado en chasis del modelo vLTm_8445-2

El procedimiento para crear cualquier elemento flexible es el siguiente:

- a. Como primer paso se crean los puntos inicial y final dentro de la pieza entre los que irá el elemento flexible (ayudándose de geometría de referencia si es preciso).
- b. Después se crea en un Croquis 3D una 'Spline' que vaya desde un punto al otro. Una 'Spline' no es más que una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios, que SolidWorks calcula.
- c. Copiar y pegar el croquis creado en un documento SolidWorks de tipo componente.
- d. Crear un plano que pase por uno de los puntos extremos y que sea perpendicular a la curva Spline. Dibujar en dicho plano una circunferencia del radio deseado y con centro el punto extremo anteriormente citado.
- e. Realizar una operación de barrido, dar color al elemento flexible creado y guardar el componente, que ya está listo para ser insertado en el modelo.

Este modelo ha tenido hasta 12 componentes flexibles, todos ensamblados en el chasis.

A continuación se detallan la creación de los mecanismos que se citaban anteriormente, válidos para cualquier otro modelo.

El montaje del motor no es demasiado complicado. Requiere un componente "vLTm_2850 Technical Engine Cylinder Head" por cada cilindro que vaya a tener nuestro motor. Este componente estará instalado y fijo en el chasis del vehículo, en configuración 'V', como se aprecia en la Figura 29. Sirve para alojar los cilindros.

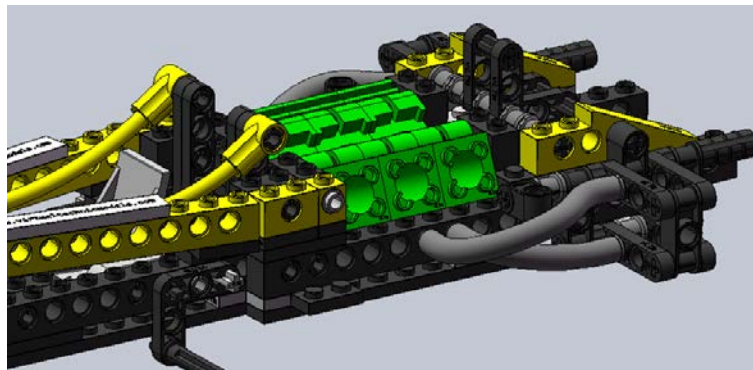


Figura 29. Componentes base del motor en 'V', dentro de la pieza chasis

Para crear el resto del motor, se han empleado los componentes Lego® equivalentes a los pistones y las bielas de cualquier motor real. Se ha construido una pieza que será nuestro cigüeñal, que engranará en un extremo con el sistema diferencial trasero. Cada pistón y cada biela constituirán una sola pieza, pues tienen movimiento entre sí. Para ensamblar el motor se utilizan las relaciones de posición de concetricidad para el movimiento del pistón dentro de su alojamiento y para situar la biela en el eje del cigüeñal. También definimos una relación de coincidencia entre dos puntos utilizando geometría de referencia, uno en el centro del hueco interior del pistón y otro en el centro de la bola de la biela.

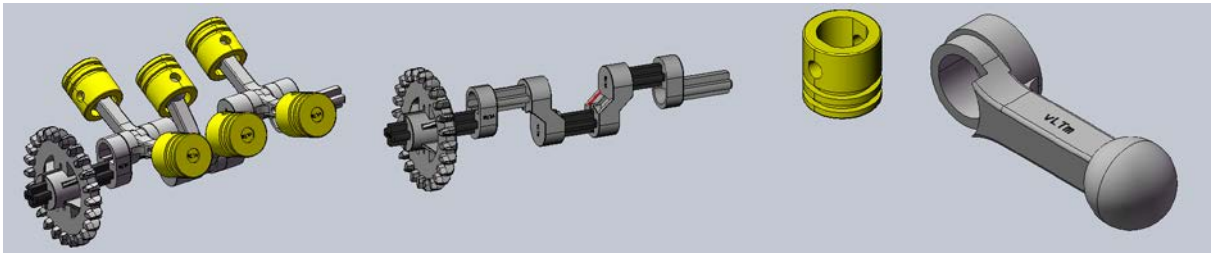


Figura 30. Motor sin la base, pieza cigüeñal, pieza pistón y pieza biela

Como se ha explicado, el cigüeñal del motor engrana con el sistema diferencial trasero, que consta de la pieza diferencial propiamente dicha, dos piezas iguales con un eje con engranaje y la rueda y el engranaje satélite (en otra pieza). El engranaje satélite está insertado en la pieza diferencial. Se puede intuir que cuando el diferencial gira, el satélite gira con él y transmite la rotación a los ejes de las ruedas, pero no rota sobre su eje (de ahí el nombre de satélite). Todo esto se puede observar en la Figura 31:

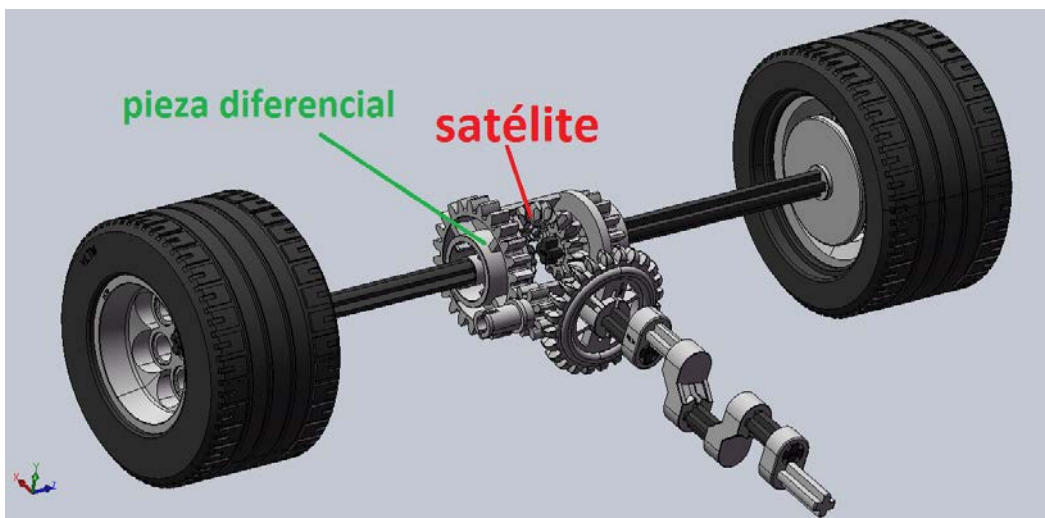


Figura 31. Sistema diferencial para las ruedas traseras

Por último, el modelo 8445-2 incorpora un sistema de dirección delantera, que incluye un volante conectado a una junta universal, de manera que al girar el volante, se produce el giro del eje con la junta. Cómo funciona el sistema queda más claro con la Figura 32, en la que se observan dos vistas del ensamblaje de todas las piezas que componen el mecanismo de dirección.



Figura 32. Mecanismo de dirección del modelo 8445-2 en dos vistas

3.4.6 Modelo vLTm_8862-1

Este modelo ha resultado muy didáctico en el sentido de que posee una cantidad considerable de mecanismos. Se trata de un tractor-excavadora de los vehículos denominados MOP (Maquinaria de Obras Públicas). Consta de dos palas excavadoras, trasera y delantera, de distinto tamaño y función. Cuenta además con un mecanismo de sujeción al firme, tal y como los modelos reales de este tipo.

En la Figura 33 podemos ver el modelo ya ensamblado. Se ha desactivado la opción “visualizar aristas” en SolidWorks, algo muy conveniente, ya que consume muchos recursos de nuestro computador.

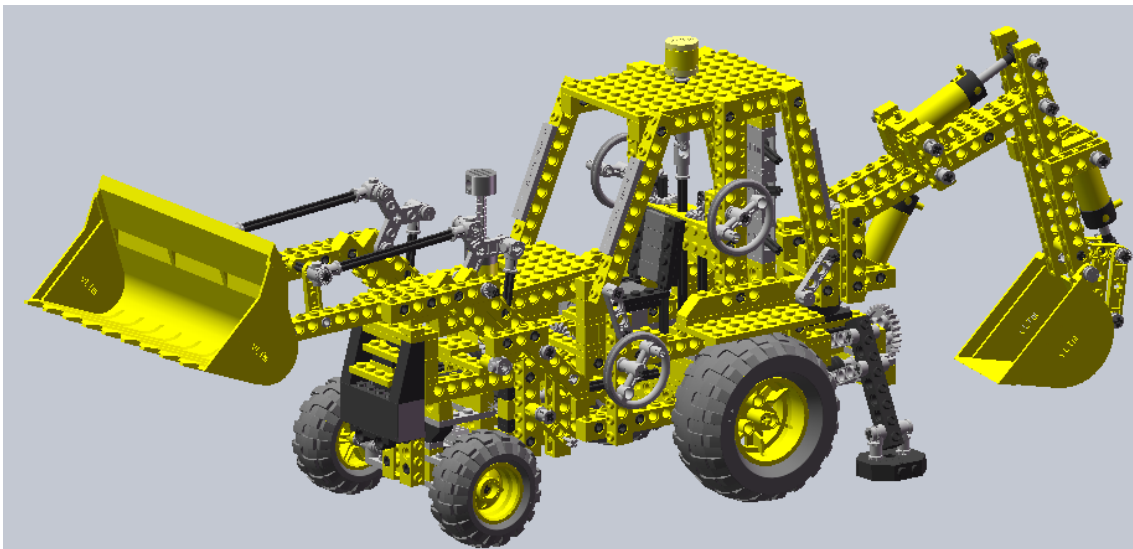


Figura 33. Ensamblaje final del modelo vLTm_8862-1 visualizado sin aristas

El mecanismo de la pala trasera, como se aprecia en la Figura 34, está activado por los conocidos cilindros neumáticos Lego® Technic.

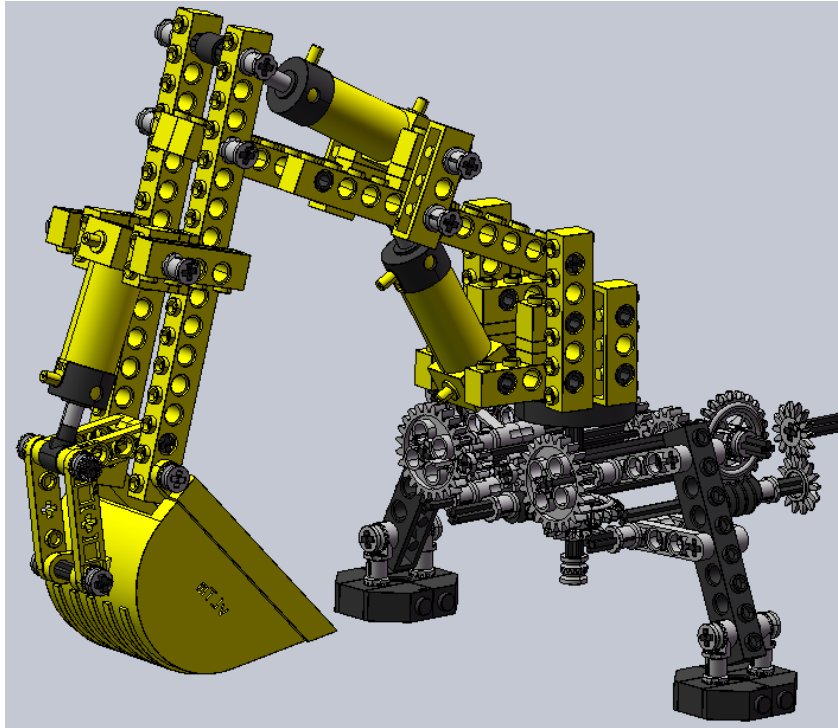


Figura 34. Mecanismos de anclaje al suelo y pala excavadora trasera

El modelo cuenta con el clásico sistema de dirección mediante piñón-cremallera, acompañado por una junta universal que transmite el giro del eje a la propia dirección. Mientras que la pala trasera es activada mediante cilindros neumáticos, la delantera se desplaza gracias a la acción de dos volantes o ruedas, como se puede comprobar en la siguiente figura:

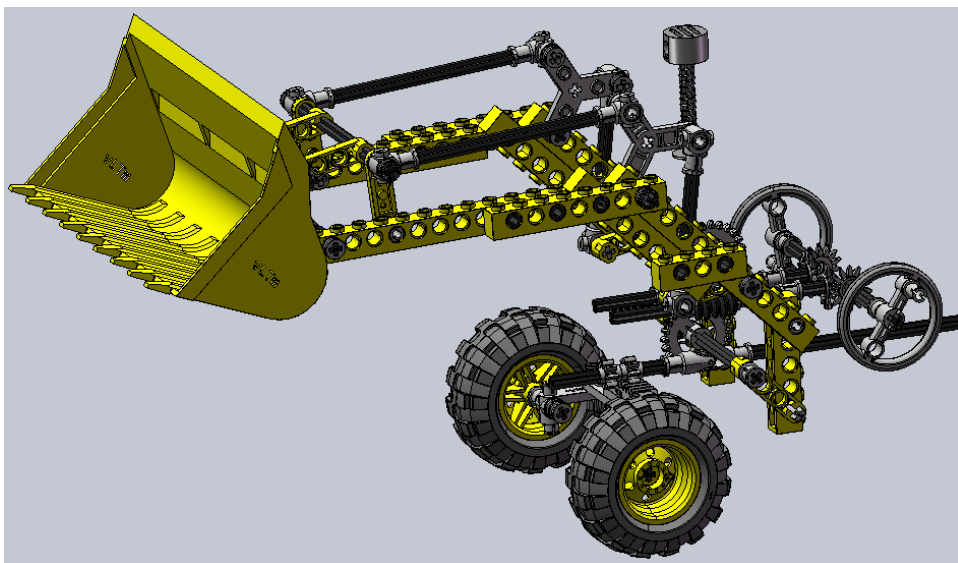


Figura 35. Mecanismos de dirección y pala delantera

3.4.7 Modelo vLTm_8480-2

Este modelo corresponde al primero de los que lleva por nombre este TFG. Se trata de un modelo Lego® Technic que puede transformarse en nave espacial (8480-1) o en submarino (8480-2). Se ha optado por la virtualización de éste último.

Como es habitual, el nivel de dificultad aumenta. De nuevo contamos con la ayuda del documento eDrawings y del libreto de instrucciones del modelo. Además, esta vez, y dado que el director de este proyecto disponía del modelo real en su colección, se ha contado con dicho modelo real. Ha supuesto de gran ayuda esto último, debido al complejo funcionamiento del modelo y que se detalla a continuación.

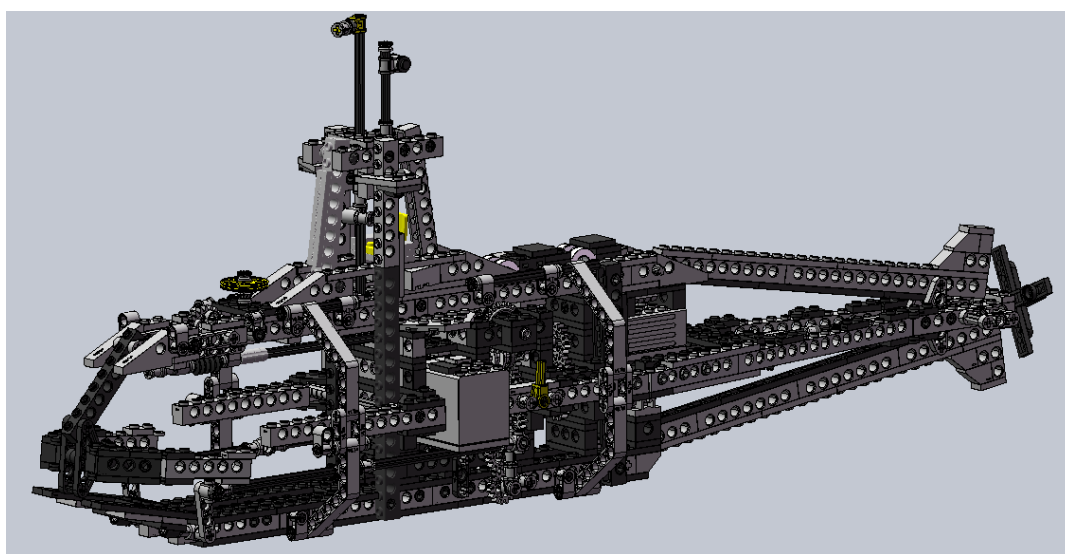


Figura 36. Modelo vLTm_8480-2

Como se aprecia en la Figura 36, el modelo presenta un chasis de tamaño considerable (alrededor de 70 piezas). Incorpora un motor alimentado por unas baterías que mueven tanto la hélice trasera, como un sistema que permite la apertura del morro del submarino y que consta además de una rampa para la salida de un supuesto vehículo de exploración de pequeño tamaño.

Lo más importante de este modelo es que es el giro de un solo eje (motor) el que acciona tanto la hélice, como la apertura y cierre del morro del submarino, como la subida y bajada de la rampa. Esto se consigue gracias a un complejo y avanzado sistema de engranajes, que incluye dos cambios de marchas. Dicho sistema se muestra y detalla a continuación:

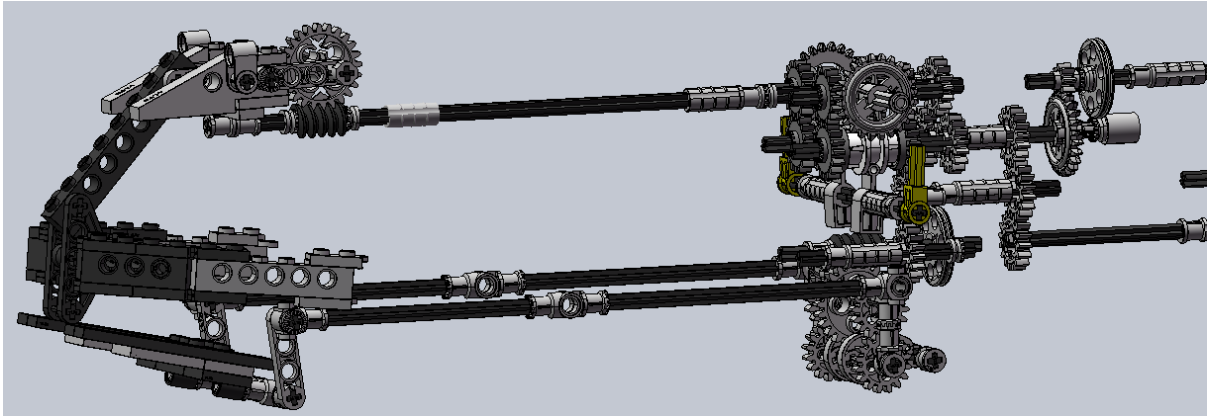


Figura 37. Sistema de palancas, engranajes, cambios de marcha del modelo vLTm_8480-2

El funcionamiento es el siguiente: el modelo tiene dos palancas (amarillas en las figuras), que accionan a un cambio de marcha cada una. Una palanca sirve para activar la subida-bajada de la rampa y la otra para la apertura-cierre del morro. Cada una dispone de 3 posiciones, izquierda, centro y derecha. Cuando el motor está funcionando, al girar una palanca (a la izquierda o a la derecha), se mueve a su vez el componente “anillo de accionamiento de transmisión” (2). Dicho componente siempre está girando con su eje gracias a unas muescas interiores, pero no es hasta que se gira su palanca que engrana con el engranaje que tiene a su lado, transmitiendo su giro al resto del sistema de engranajes. Dicho engrane se produce gracias a las muescas (en azul en la Figura 38) que tienen ambos componentes.

Así pues, según el sentido en el que se giren las palancas se abrirá o cerrará el morro y se subirá o bajará la rampa. En la Figura 38 se muestra en detalle este mecanismo:

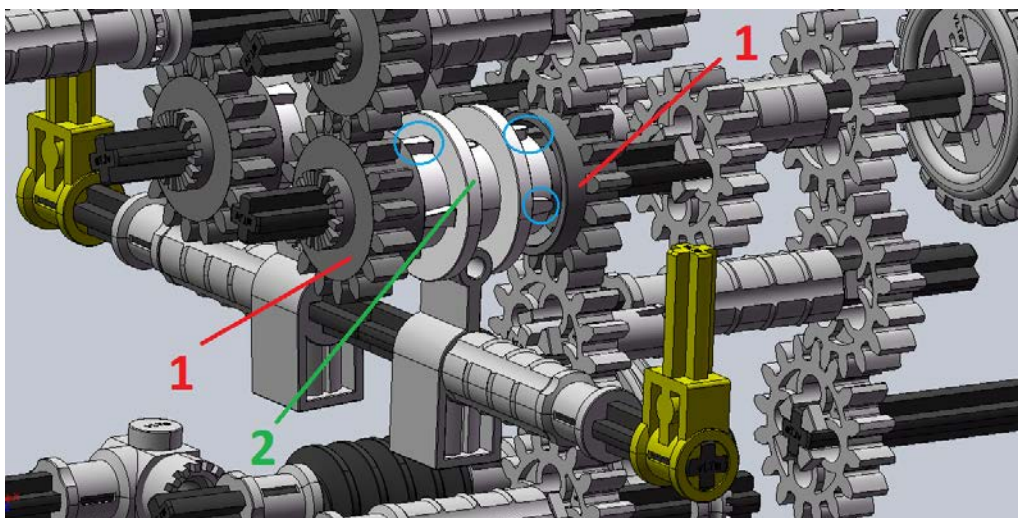


Figura 38. Mecanismo de cambio de marcha

3.4.8 Modelo vLTm_8436

Este modelo es el segundo de los que lleva por título el presente trabajo. Tiene tres variantes, y se han virtualizado todas. De nuevo se disponen de las instrucciones de montaje, así como de los documentos eDrawings, que facilitan la tarea de visualizar cada modelo e identificar cada componente. Cada modelo consiste en un camión con una plataforma trasera, en la que se pueden situar varios mecanismos.

Cada versión se corresponde con el mismo camión y un tipo diferente de mecanismo. El chasis del camión, la parte de los asientos, volante, etc., y así como las piezas del motor, sistema de dirección, piezas del diferencial, etc., son las mismas para las tres versiones y se muestran en la Figura 39. Además, como se puede apreciar, la “cabeza” del camión es abatible, tal y como suele ser en los camiones reales de este tipo.

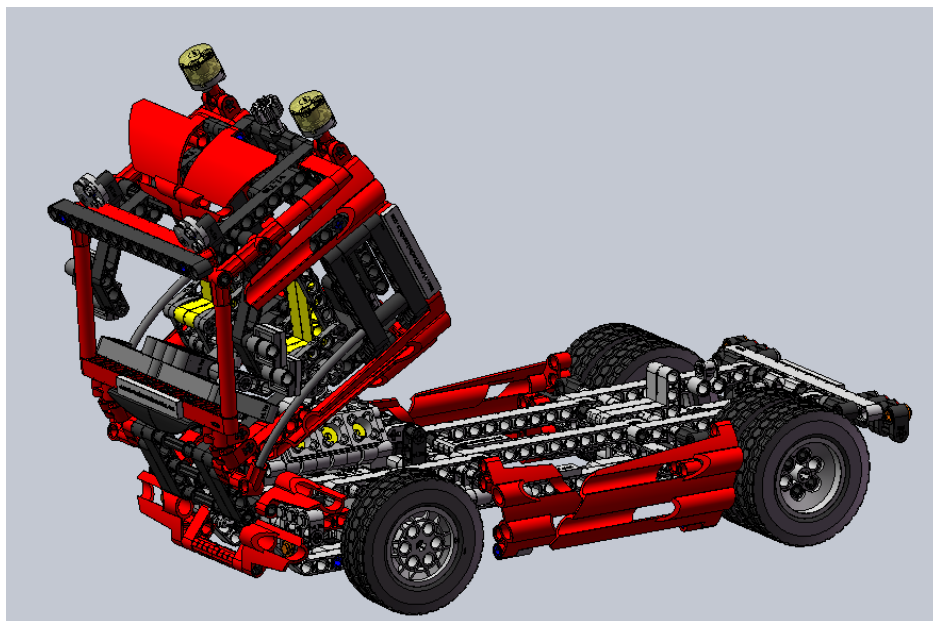


Figura 39. Piezas comunes a todas las versiones del modelo vLTm_8436

En todas las versiones del modelo vLTm_8436 se hace uso de los cilindros neumáticos Lego® Technic.

La primera versión simulada, consiste en una grúa, acabada en un gancho tal y como se puede visualizar en la Figura 40. Constituye el modelo vLTm_8436-1. Consta de una plataforma giratoria, que es un mecanismo de unión del chasis con la grúa y se detalló en el apartado 3.4.1, Modelo 040.

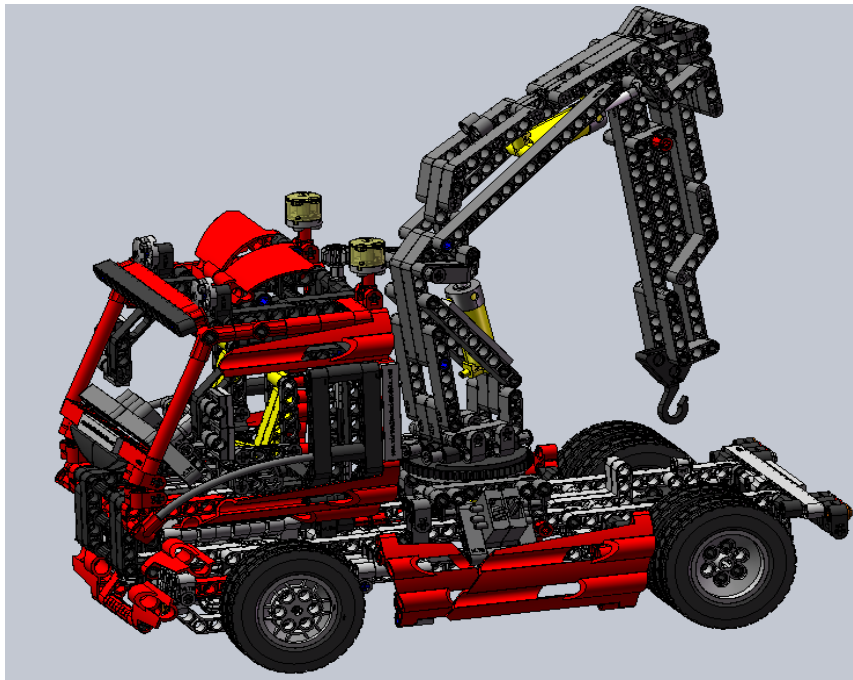


Figura 40. Modelo vLTm_8436-1

La segunda versión virtualizada consiste en el mismo camión, esta vez con una plataforma elevadora accionada por dos cilindros neumáticos, utilizada para levantar peso en camiones de este tipo (“palets” de ladrillos por ejemplo). Lo vemos en la siguiente figura:

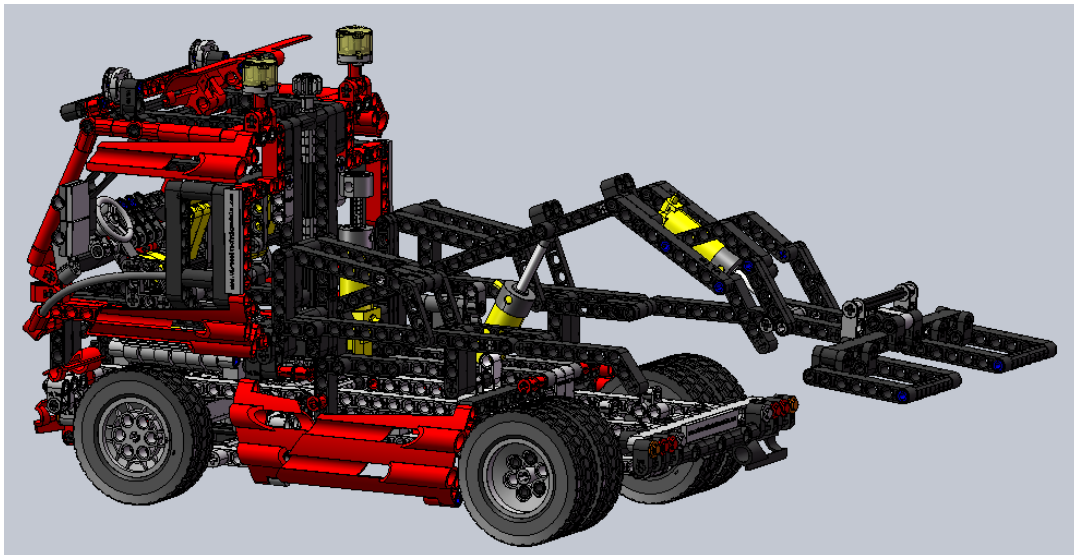


Figura 41. Modelo vLTm_8436-2

Por último, la tercera versión se trata de una garra, cuyos cuatro dedos o pinzas se abren y se cierran gracias a la acción de un cilindro neumático. También se trata de un modelo en el que el mecanismo trasero puede girar gracias a la misma plataforma descrita anteriormente.

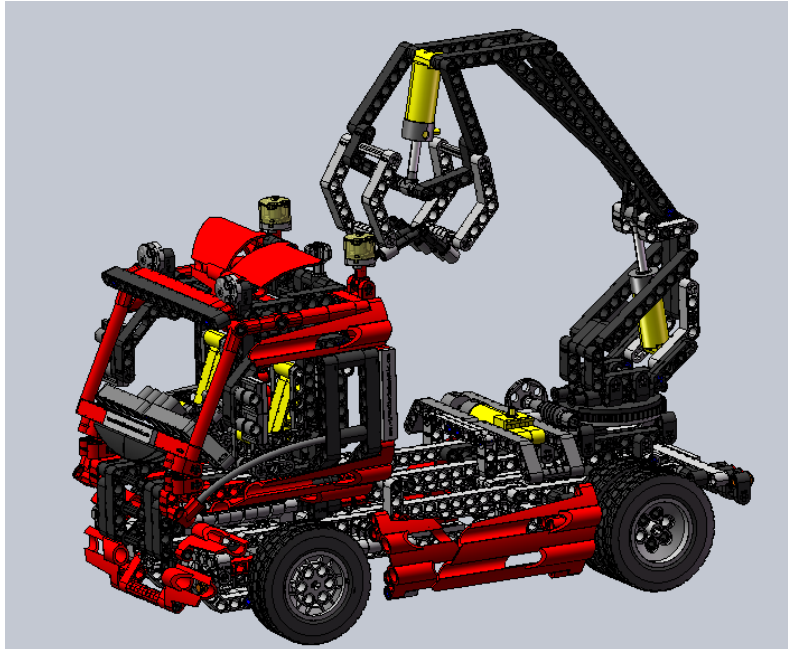


Figura 42. Modelo vLTm_8436-3

Cada versión constituye un tipo de máquina de las llamadas MOP (Maquinaria de Obras Públicas) y es muy común encontrarla en entornos industriales. Todas las versiones hacen uso de cilindros Lego® Technic. También las versiones reales de estos camiones hacen uso de cilindros.

El sistema de dirección de todos los modelos es del tipo piñón-cremallera, el motor es en 'V', de 6 cilindros, y tales mecanismos, así como el diferencial, son similares a los ya explicados en otros modelos.

3.4.9 Modelo vLTm_8458-1

El tercer modelo del enunciado de este TFG que se ha virtualizado se trata de un vehículo tipo Fórmula 1. Para su creación contamos con el habitual archivo eDrawings y con las instrucciones de montaje. A diferencia del creado y explicado en el apartado 3.4.5, este Fórmula 1 tiene un tamaño considerablemente superior. Tanto es así, que el chasis ha contado con 108 trozos (el mayor creado hasta ahora), y el modelo con 96 piezas (el mayor también hasta el momento).

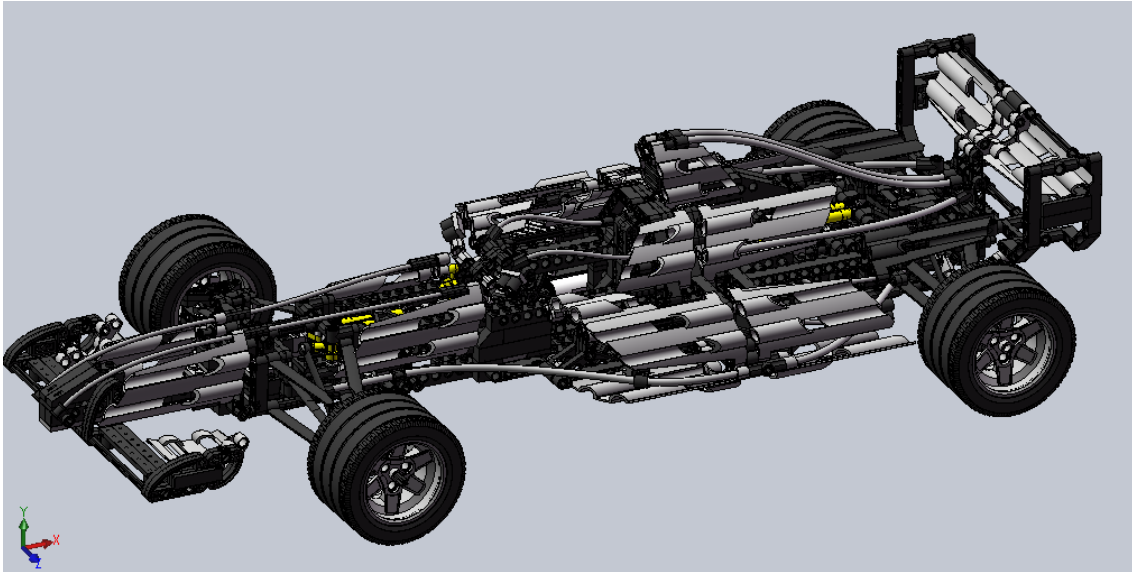


Figura 43. Modelo vLTm_8458-1

El modelo cuenta con una capota que puede subir y bajar, dejando a la vista el motor, que es en 'V', con 10 cilindros (V10). El montaje del motor es idéntico al ya explicado, simplemente se le añaden 4 bielas más con sus 4 pistones al cigüeñal, que obviamente es más largo.

Lo más llamativo del vLTm_8458-1 es el avanzado y complejo sistema de amortiguadores, suspensiones y dirección de las ruedas. Observando la Figura 44 se puede vislumbrar el funcionamiento de la parte delantera. Las circunferencias azules indican los puntos donde el sistema de dirección amortiguación y suspensión está sujeto al chasis del vehículo. Podemos observar que el movimiento rotatorio del volante (1) se transmite a través de una junta universal o junta Hook (2), y se transforma en lineal gracias a un piñón cremallera (3). Las flechas naranjas indican que ambas ruedas, con sus sistemas de dirección pueden subir y bajar gracias a la acción de los amortiguadores (4).

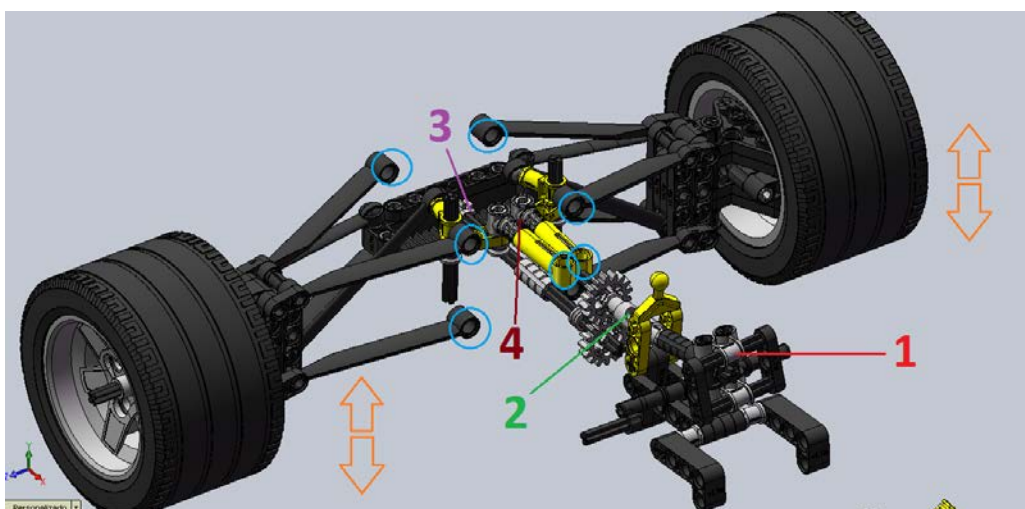


Figura 44. Sistema de dirección, suspensión de la parte delantera del modelo vLTm_8458-1

La parte trasera del Fórmula 1 presenta un sistema de suspensión idéntico al de la parte delantera, en la Figura 45 se observa el cigüeñal, cilindros, biela del motor 'V10', cuyo movimiento final de rotación se transmite por un sistema de engranajes hasta el diferencial (1). El giro del diferencial se transmite a las ruedas por medio de dos juntas universales (2) para cada eje. Ambas ruedas, al igual que en la parte delantera pueden subir y bajar.

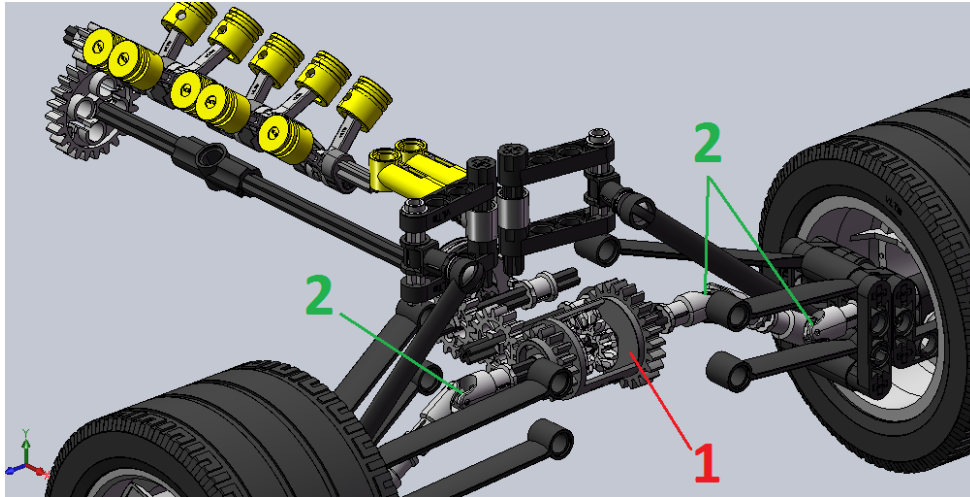


Figura 45. Sistema de tracción, suspensión y amortiguación de la parte trasera del modelo vLTm_8458-1

3.4.10 Modelo LTM_41999

Este modelo es el último de los que se ha virtualizado. A diferencia de los demás modelos creados, se nos ha suministrado el 'kit' Lego® Technic correspondiente, con sus instrucciones de montaje y todos los componentes.

El modelo LTM_41999 surge de un concurso creado por Lego® llamado "Tú lo diseñas nosotros lo hacemos" en el que los participantes creaban modelos y el ganador podía ver como el suyo era producido en serie y comercializado. Por lo tanto se trata de una edición limitada. (Salieron unas 20000 unidades a la venta).



Figura 46. Fotografía del modelo LTM_41999

Se trata de un vehículo tipo “todoterreno” 4x4, con tracción a las cuatro ruedas, que además constan de un sistema de dirección. También dispone de un sistema de remolque delantero motorizado, para arrastrar otros vehículos por ejemplo, y que consiste en un gancho y un cable que sale y se recoge según se accione un interruptor. Además, el modelo real dispone de luces Leds delanteras.

El 4x4 también presenta un sistema de suspensiones muy avanzado. El modelo además incorpora puertas, maletero y un techo abatible.

El modelo real incorpora un mando y un receptor inalámbrico (de varias frecuencias) para controlar el avance-retroceso del vehículo, así como la dirección de las 4 ruedas (giro izquierda y giro derecha).

El todoterreno tiene un total de 4 motores. Uno para el sistema de remolque delantero, uno para la tracción delantera, otro para la tracción trasera, y el último para las direcciones delantera y trasera.

Así pues, para la creación virtual de este modelo, ha habido una primera parte de montaje del modelo real, en el que se han seguido las instrucciones de montaje suministradas con el ‘set’. Más tarde, y con el modelo real construido, se ha procedido a la identificación de las distintas piezas del vehículo y a la virtualización de las mismas. Por lo tanto, el modo de proceder, al contrario de lo que se podría pensar, es hacer primero el modelo real, y a partir de éste construir el virtual. Se ha decidido hacerlo de ese modo debido a que un ensamblaje real paralelo al virtual es más lento y costoso ya que en las instrucciones del ‘set’ no se tiene en cuenta la definición de pieza de este TFG. Por ello, en las instrucciones se van construyendo a la vez distintas piezas, lo que puede provocar confusión al construir el modelo virtual paralelamente.

- **Construcción del modelo real:** cómo ya se ha explicado, se nos han suministrado tanto los componentes necesarios para el ensamblaje como las instrucciones. Como el hecho de seguir las instrucciones del modelo real no es una tarea propia de este TFG, en las siguientes figuras se presenta el modelo real ya montado.



Figura 47. Modelo LTM_41999



Figura 48. Modelo LTM_41999. Vista lateral.



Figura 49. Parte trasera del modelo VLT_41999



Figura 50. Interior del modelo LTM_41999

- **Construcción del modelo virtual:** como en los modelos anteriores, la primera pieza creada ha sido el chasis. El del presente modelo ha constado de 89 trozos. Se puede observar en la Figura 51. El chasis incluye partes como el motor del remolcador delantero, el motor de las direcciones delantera y trasera, el receptor inalámbrico, etc. La construcción de una pieza tan grande a partir del modelo real no ha sido tarea fácil, pues muchos componentes eran de difícil acceso y de visualización complicada.

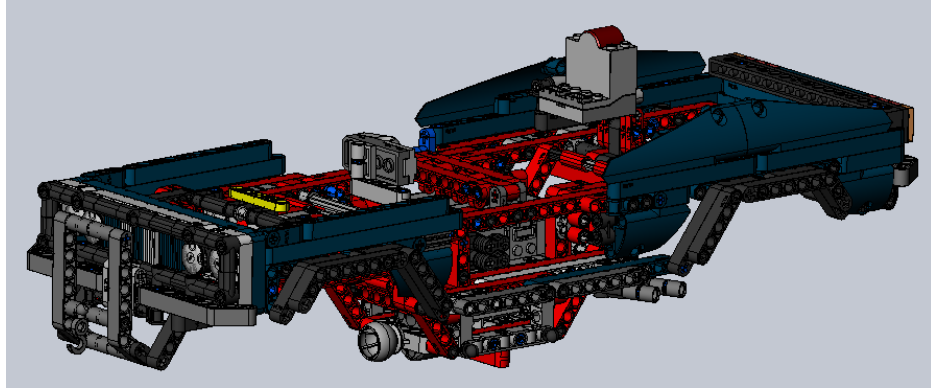


Figura 51. Chasis del modelo VLT_41999

La siguiente parte del vehículo virtualizada ha sido la pieza que incorpora la tracción delantera. Dicha pieza es idéntica y simétrica a la de la tracción trasera, por lo que los trozos de una pieza han servido para otra. Observando la Figura 52, vemos que el motor que hace girar las ruedas está en dicha pieza.

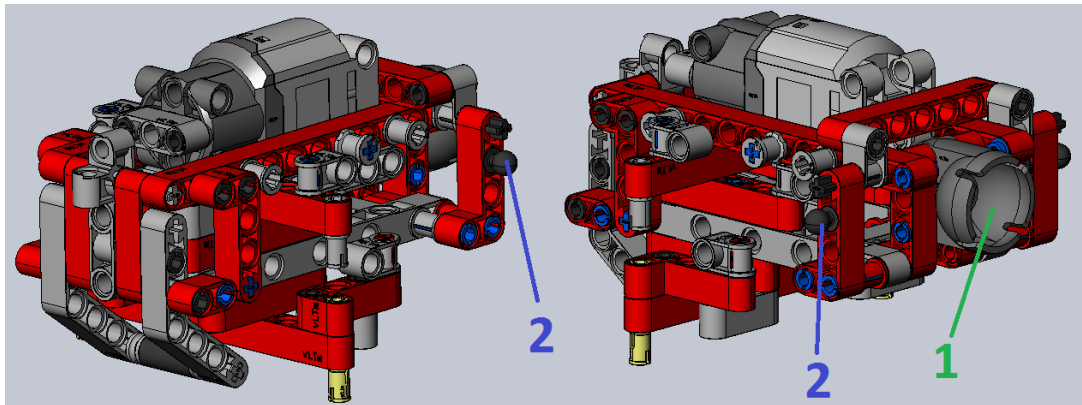


Figura 52. Vistas de la pieza que alojará al sistema de dirección y tracción

El chasis se conecta a la pieza de la Figura 52 mediante: dos amortiguadores, el componente señalado como (1) en la Figura 52, y mediante otro componente que va enganchado en los puntos señalados como (2). Se hace hincapié en que la misma pieza sirve para la parte de delante como para la parte de detrás (sólo ha hecho falta cambiar la nomenclatura de los trozos y de la pieza).

Después de insertar las piezas anteriormente descritas se ha pasado a la virtualización del techo (con los asientos) y de las piezas que permiten su apertura y cierre, así como de las puertas, de los espejos y del maletero (enganchado en el techo abatible). (Ver Figura 53).

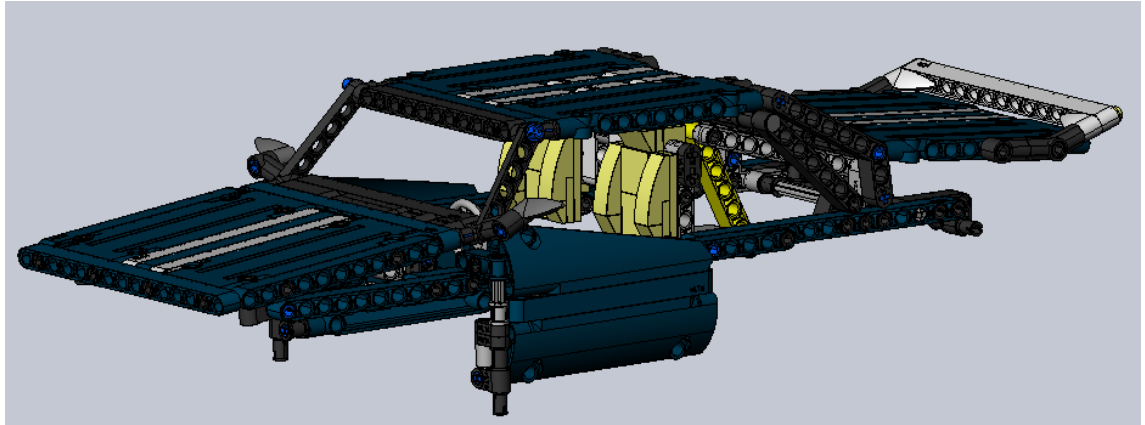


Figura 53. Techo, puertas, espejos y maletero del modelo VLT_41999

Una vez virtualizadas e insertadas las piezas más grandes y voluminosas del vehículo se ha procedido a insertar todas aquellas piezas que hacen posible que el 4x4 avance, gire y saque o recoja el cable con el gancho.

A continuación se detalla el funcionamiento de dichos sistemas:

-Gancho y cable para remolcar: dicho sistema consta de un motor cuyo eje hace rotar un engranaje que mueve un tornillo sin fin. Este tornillo hace girar a un engranaje que conecta directamente con el carrete donde va enrollado el cable. (El cable por motivos obvios no se ha representado en el modelo virtual).

-Mecanismo de dirección: como se ha explicado antes, el motor que acciona la dirección de ambas ruedas es el mismo. Así pues el mismo eje (en naranja en la Figura 54) acciona ambas direcciones (trasera y delantera). Como ese motor va insertado en el chasis es necesaria la utilización de una juntas universales para transmitir el giro del eje del motor al eje de la dirección, que se encuentra a diferente nivel. El funcionamiento es bastante común en los modelos Lego® Technic y se basa en la utilización de un mecanismo piñón-cremallera.

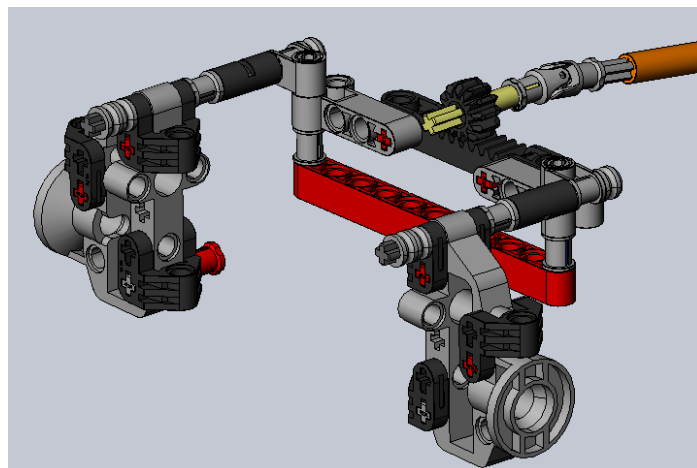


Figura 54. Mecanismo de dirección (delantero)

-*Sistema de tracción*: el funcionamiento se puede intuir en la Figura 55. Es el siguiente: el eje del motor (1) instalado en la pieza de la Figura 52 hace mover unos engranajes que finalmente accionan la pieza del diferencial (2), que como todas, consta de un satélite y dos ejes (3). Dichos ejes mueven a otro par de engranajes conectados a sendas juntas universales (4), que tras otro engrane hacen girar las ruedas del vehículo.

Se recuerda que el sistema de tracción anteriormente explicado es el mismo para las partes delantera y trasera.

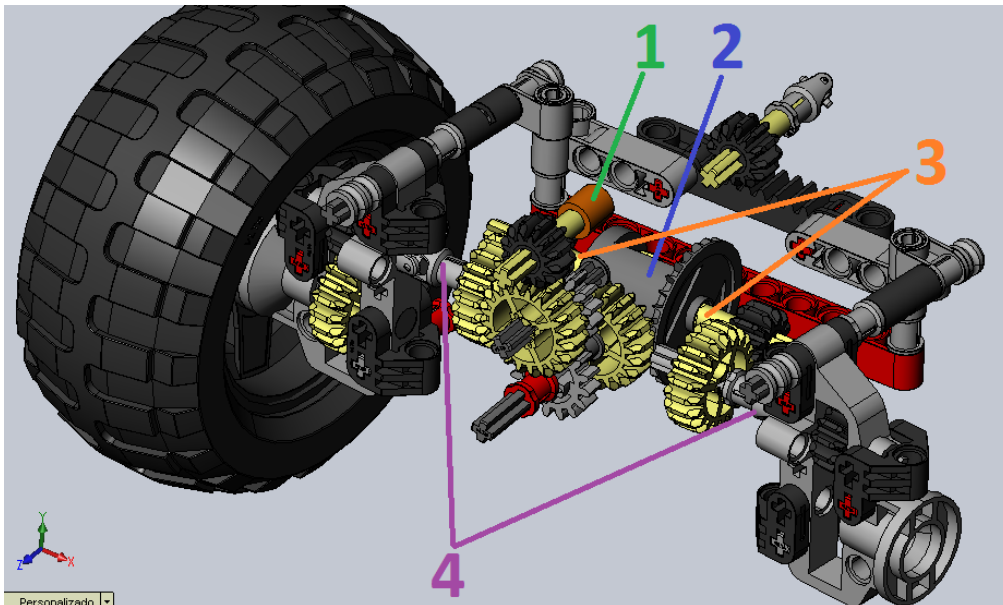


Figura 55. Sistema de tracción del modelo VLT_41999

Así pues queda explicado el montaje real y virtual del modelo VLT_41999. Se hace hincapié en que su virtualización ha sido a partir del modelo real una vez construido. Por lo tanto, el tiempo empleado para ello ha sido mayor que si hubiéramos dispuesto del documento eDrawings correspondiente.

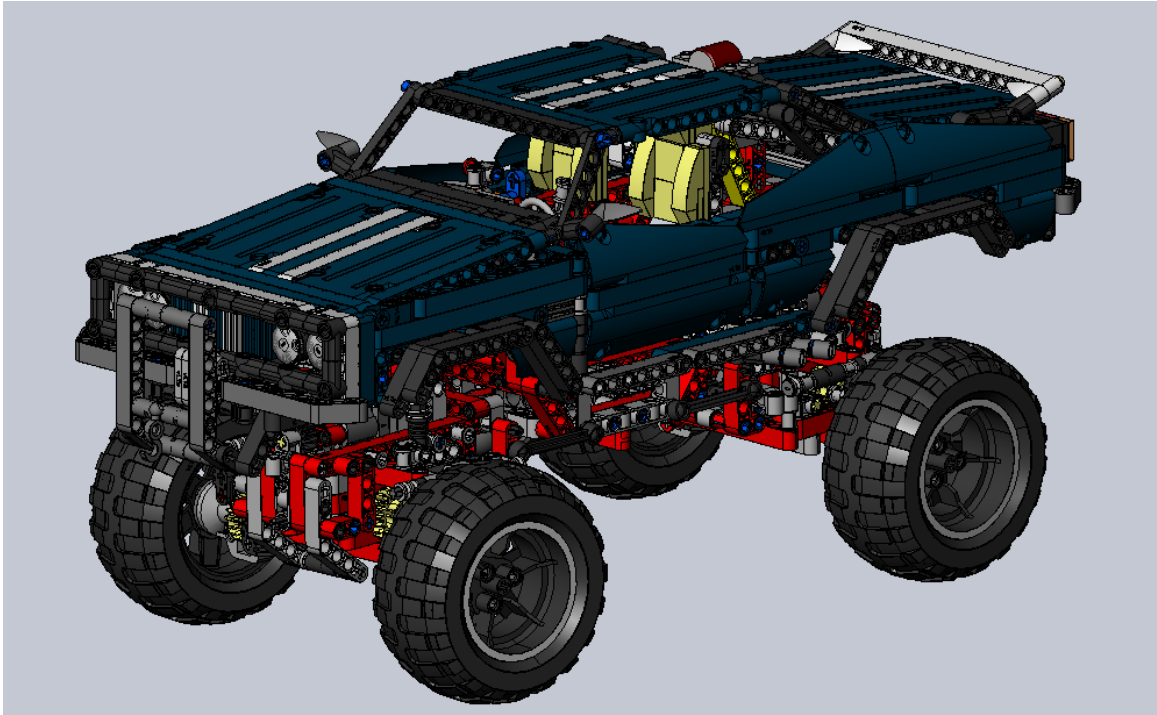


Figura 56. Modelo VLT_41999 virtualizado



Figura 57. Modelo VLT_41999 real y virtual, comparativa

4. PROCESO DE COMPACTACIÓN

Cuando acabamos de ensamblar cada modelo, obtenemos una máquina virtual, totalmente operativa que está formada por piezas. Dichas piezas pueden estar formadas a su vez por trozos, que están formados por componentes.

En la compactación se considera cada pieza como una única entidad virtual, y no como un conjunto de componentes ensamblados. Los porqués de este paso intermedio entre la creación de los modelos y la simulación de los mismos son:

- Los modelos creados, sobre todo los que llevan por título este trabajo, constan de más de 1000 componentes. Esto se traduce en que el computador va a trabajar con dichos componentes y sus relaciones de posición, que a nivel del modelo solo tienen función estructural. Así pues la compactación del modelo ayudará al computador a reducir cálculos (tiempo) y a aumentar por tanto el rendimiento.
- Así pues, se consiguen archivos menos pesados, con las consecuentes ventajas.
- Obviamente también conseguimos una reducción del número de archivos. Ya no es necesario de disponer de los innumerables trozos del chasis por ejemplo, sólo se necesita la pieza chasis, con sus trozos y componentes ya compactados, en un único archivo.
- Mediante el compactado de los modelos se protegen los componentes, de modo que si suministráramos o distribuyéramos el modelo nadie podría obtener dichos componentes. De este modo aseguramos la continuidad de nuestro trabajo.

Así pues, mediante el compactado, hemos obtenido una máquina virtual a partir de piezas compactadas, en lugar de a partir de piezas de componentes. Al final del proceso deberemos volver a ensamblar el modelo pero a partir de las piezas compactadas, obteniendo así el mismo resultado en cuanto a movimientos, mecanismos, etc.

5. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL

5.1 Introducción y objetivos

En esta parte del trabajo se van a simular parte de los modelos virtuales creados y que se han expuesto y explicado anteriormente. El objetivo no es llegar a simularlos todos, sino comprender y estudiar todo lo que la herramienta de SolidWorks, Cosmos Motion puede ofrecernos, tanto a nivel teórico como práctico.

Se ha realizado una parte previa a la simulación de aprendizaje de conceptos como modelo cinemático auto-alineado, grados de libertad, impulsor-seguidor, par cinemático, cinemática en general. Por lo tanto, esta parte del trabajo tiene más contenido teórico que la anterior, ya que el estudio de la cinemática requiere de unos conocimientos teóricos previos. Se ha intentado simplificar al máximo esta parte teórica, contextualizándola además con los modelos Lego® Technic, y relacionándola con ejemplos de aplicación industrial.

Para la realización de esta parte del trabajo se parte de los modelos virtuales creados anteriormente, ya compactados.

5.2 Modelo cinemático auto-alineado

5.2.1 *Introducción y objetivos*

La finalidad de este apartado es mostrar cómo llegar a configurar el modelo cinemático de una máquina virtual de forma que no existan restricciones en exceso, desde el punto de vista del diseño mecánico. Esto es, cómo conseguir un modelo cinemático auto-alineado.

Para el logro de tal propósito se ha utilizado la aplicación de SolidWorks, basada en Adams, Cosmos Motion. Esta aplicación realiza análisis sobre mecanismos y modelos, permitiendo además hacer simulaciones del funcionamiento. Así pues, la aplicación Cosmos Motion, integrada en SolidWorks, será adecuada para esta parte del trabajo.

5.2.2 *Sistemas mecánicos y conceptos básicos*

Una parte fundamental en el campo de la ingeniería es el diseño de mecanismos. Esta área está en constante movimiento y cambio, y la informática ha ayudado mucho a hacer avances, haciendo la exploración e innovación de diseños más efectiva, rápida y precisa. Esto se debe a que antiguamente todo lo anterior se debía hacer a mano, con herramientas y útiles de dibujo.

Así pues, la aparición de programas CAD ha acelerado y automatizado esta creación, innovación y diseño de mecanismos.

Utilizando la cinemática se desarrollaron formulaciones analíticas y sobre ellas se programaron los algoritmos adecuados que ofrecen soluciones óptimas en problemas de diseño mecánico.

Con estos algoritmos trabajan los softwares actuales, como el utilizado en este TFG, Cosmos Motion. Con ellos podemos interactuar con la máquina virtual, tratándola como un sistema cinemático y visualizándola tridimensionalmente. Todo esto hará que podamos lograr la creación del modelo cinemático auto-alineado.

A continuación se explican algunos de los conceptos básicos a los que se hará referencia en los siguientes apartados y que se deben tener claros:

- **Máquina:** es un sistema que transmite potencia. Se asocia a la rama de la dinámica.
- **Mecanismo:** sistema capaz de transmitir y transformar, al contrario que una máquina, el movimiento. Este concepto se asocia al campo de la cinemática. La cinemática es el estudio del movimiento, y por tanto, su comprensión es el problema inicial en el diseño de un de un sistema mecánico.
- **Impulsor:** en un mecanismo, es la pieza a la que se da el primer movimiento. Es decir, el movimiento del mecanismo se inicia con esta pieza.
- **Seguidor:** hilando con la definición anterior, el seguidor recibe el movimiento del impulsor y puede transmitirlo a otro, transformándolo o no.

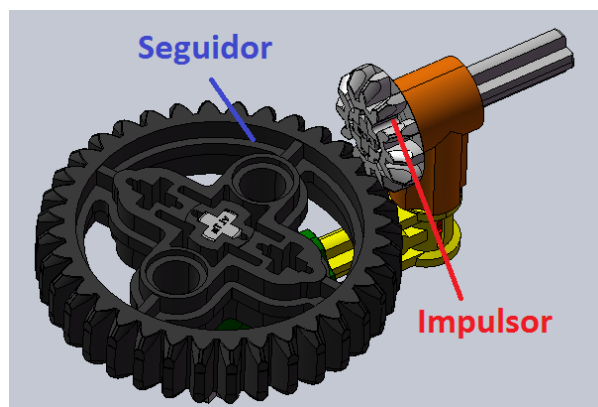


Figura 58. Impulsor y seguidor de un modelo Isogawa

- **Factor de transmisión:** es la relación entre el movimiento del impulsor y el del seguidor. Suele tratarse de relaciones tipo ángulo girado por ángulo girado o de ángulo girado por distancia recorrida o viceversa. Es un parámetro esencial para el análisis de los mecanismos, y está determinado por la geometría de los mismos.
- **Par cinemático:** se denomina par cinemático a la unión de dos elementos de un mecanismo que limita o permite su movimiento relativo. La *clase de par* nos indica la cantidad de movimientos que no permite o que restringe. Y la *movilidad* del par no es más que el número de movimientos que permite. Seis son los movimientos totales en

el espacio tridimensional, por lo tanto, la suma de la clase de par y de su movilidad debe ser igual a seis.

- **Grados de libertad (gdl):** son los números de coordenadas independientes necesarias o número de parámetros necesarios para especificar de una única forma la posición de un cuerpo en el espacio, respecto de un sistema de referencia dado. Los términos *movilidad* y *conectividad* se usan para referirse a los grados de libertad de un mecanismo.

Así pues, los términos par cinemático y grados de libertad están fuertemente relacionados, ya que usando pares cinemáticos se logra aumentar o disminuir los grados de libertad de un mecanismo.

5.2.3 Estudio cinemático

La cinemática es el estudio del movimiento, concretamente el estudio del espacio, tiempo y sus magnitudes derivadas. Este estudio se hace sin tener en cuenta las fuerzas que puedan intervenir (dinámica) y considerando las piezas que componen los distintos mecanismos como **cuerpos rígidos**. Esto quiere decir que se trata de piezas cuya geometría permanecerá invariable con el tiempo y será independiente de las fuerzas que se le puedan aplicar.

Para poder realizar el estudio cinemático se deben conocer términos como **mecanismo plano**, que no es más que un mecanismo en el que todos los puntos cumplen la condición de tener movimiento plano. Esto quiere decir que todos los puntos son pertenecientes a planos que en todo momento son paralelos entre sí. En la Figura 59 podemos ver un mecanismo plano, consistente en un brazo articulado y una garra.

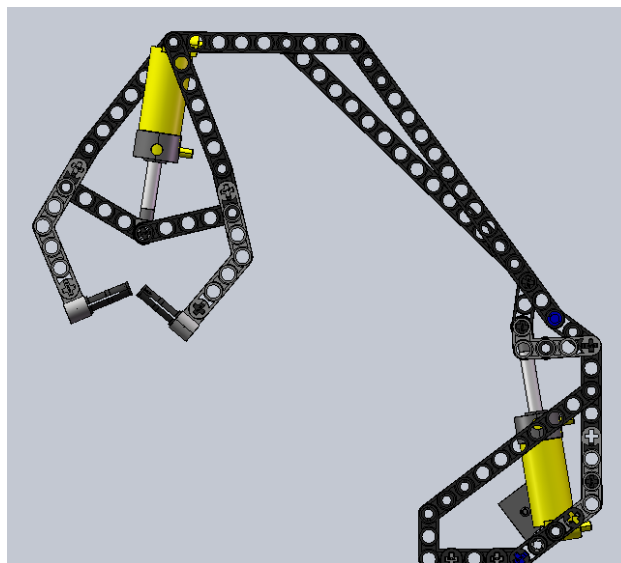


Figura 59. Ejemplo de mecanismo plano (Modelo vLTm_8436-5)

Si en el ejemplo anterior se considerara la plataforma rotativa con la que el modelo contaba (ver apartado 3.4.7), estaríamos hablando de un mecanismo tridimensional. Así pues, podemos “extraer” mecanismos planos de mecanismos tridimensionales, para facilitar el estudio cinemático de éstos por separado.

En un mecanismo plano se pueden distinguir los movimientos de rotación y traslación en sus piezas. Si la pieza se mueve de manera que cada punto de ella se desplaza una distancia constante en una dirección determinada hablaremos de rotación, mientras que si la pieza y sus puntos se mueven alrededor de un eje, se tratará de rotación.

Por último, cabe decir que llamaremos cadena cinemática al conjunto de piezas que están unidas entre sí mediante relaciones de posición, de modo que el movimiento de una pieza condiciona y determina el movimiento del resto.

5.2.4 Pares cinemáticos

Como ya se ha introducido antes, los pares cinemáticos son las uniones de las piezas de un mecanismo. Estas uniones son mediante contacto directo y dependiendo de qué partes de las piezas sean las que están en contacto se dividirán o clasificarán en dos tipos:

- **Pares inferiores:** son aquellos en el que el contacto entre las dos piezas o cuerpos rígidos se efectúa entre todos los puntos de uno o más segmentos de superficie. Tipos:


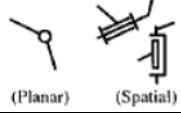

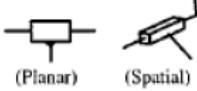
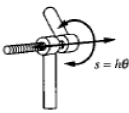

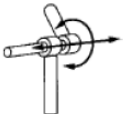
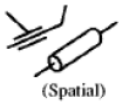

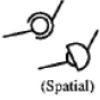
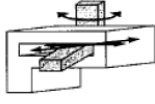

DENOMINACIÓN	CONECTIVIDAD (gdl)	SÍMBOLO	FORMA	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA
Par giratorio, articulación de pasador	1	R		 (Planar) (Spatial)
Par prismático, par de deslizamiento	1	P		 (Planar) (Spatial)
Par helicoidal, par de tornillo	1	H		 (Spatial)
Par cilíndrico	2	C		 (Spatial)
Par esférico	3	S		 (Spatial)
Par plano	3	P		 (Spatial)

Tabla 1. Tipos de pares inferiores
(L.N. Reshetiov, 1982, Self-aligning mechanisms)

- **Pares superiores:** son aquellos pares cinemáticos en los que el contacto sólo tiene lugar entre una arista o entre un punto. Tipos:


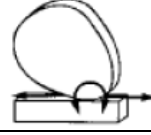


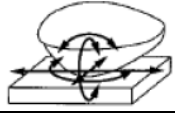
DENOMINACIÓN	CONECTIVIDAD (gdl)	FORMA
Rodadura sin deslizamiento, rodadura simple	1	
Rodadura con deslizamiento, par leva	2	
Bola con rodadura sin deslizamiento	3	
Bola dentro de cilindro	4	
Contacto puntual espacial	5	

Tabla 2. Tipos de pares superiores
(L.N. Reshetiov, 1982, Self-aligning mechanisms)

- **Pares compuestos:** son pares combinación de los anteriores, es decir, habrá partes donde el contacto sea puntual por ejemplo, y partes en las que el contacto sea superficial. Hay 3 tipos:


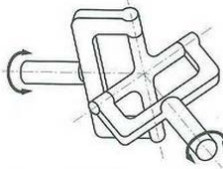
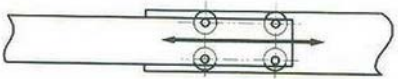
DENOMINACIÓN	CONECTIVIDAD (gdl)	FORMA
Cojinete de bolas, cojinete antifricción, cojinete de contacto por rodadura	1	
Junta universal, junta Carda, junta Hook	2	
Deslizadera de rodillos	1	

Tabla 3. Tipos de pares compuestos
(L.N. Reshetiov, 1982, Self-aligning mechanisms)

Cabe decir que la forma de todos los pares de las tablas no es la única forma posible, por lo tanto, se pueden encontrar distintas formas bajo la misma denominación, que cumplirán los requisitos para pertenecer a ese tipo de par.

Todos estos pares admiten unos movimientos y limitan otros. Como ya se ha dicho, el número de movimientos limitados será la clase de par, y se representará con números romanos. Habrá por lo tanto clases I, II, III, IV, V y VI.

5.2.5 Movilidad de los mecanismos

Conocer la movilidad de un mecanismo resulta muy útil en la tarea de reconocer un sistema mecánico por primera vez. Una movilidad inconsistente (negativa, excesiva...) nos indica que puede haber componentes del sistema mal identificados, que hay grados de libertad pasivos, o que hay pares o actuadores que no cumplen correctamente su función.

Volviendo a la definición de grados de libertad del apartado 5.2.2, diremos que el número de coordenadas necesarias para establecer (de forma única) la posición de todos los componentes de un sistema mecánico será el número de grados de libertad de ese sistema. También podremos referirnos a los grados de libertad de un par cinemático o a los grados de libertad de un mecanismo. Como ya se ha dicho, se han usado los términos conectividad y movilidad. Concretamente, cuando nos refiramos a los grados de libertad de un par utilizaremos conectividad, y movilidad lo reservaremos para referirnos a un mecanismo.

A continuación se detalla cómo realizar el cálculo de la movilidad de los mecanismos. Se ha considerado primero el caso de los mecanismos planos, para luego pasar al caso tridimensional.

- *Cálculo de la movilidad de mecanismos planos:* es el caso en que los cuerpos del mecanismo se mueven en un mismo plano, o en planos que son paralelos. Así pues, consideraremos un mecanismo, con N componentes (cuerpos rígidos), con P pares cinemáticos o uniones entre los componentes y f_i será la conectividad de cada par:

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

En esta ecuación (criterio de movilidad), f_i vale 1 si se trata de un par inferior y 2 en el caso de par superior. El '3' del principio de la ecuación se debe a que en el plano, un cuerpo que pueda moverse con libertad tiene 3 grados de libertad.

- *Cálculo de la movilidad en mecanismos tridimensionales o espaciales:* en este caso, un cuerpo que se mueve libremente por el espacio tridimensional posee 6 grados de libertad (en lugar de tres), y la ecuación para calcular la movilidad queda como:

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

Esta ecuación, que puede tomar otras formas, recibe el nombre de ecuación de Gruebler, y es usada por la aplicación de SolidWorks, Cosmos Motion, para el cálculo de la movilidad o grados de libertad del sistema.

5.2.6 Diagramas cinemáticos

Se puede representar el mecanismo plano en papel, mediante el llamado diagrama cinemático. No es más que un esquema dibujado del mecanismo en cuestión, en el que se representa de forma simplificada cada parte del mismo.

Se pueden hacer más o menos elaborados, pero todos han de cumplir un mínimo de especificaciones: a) Para una mejor visualización se han representado en la medida de lo posible cada cuerpo de un color diferente; b) Las uniones o pares giratorios se han representado con un pequeño círculo, y las uniones o pares cilíndricos con un pequeño rectángulo; c) Se han enumerado los cuerpos o barras, partiendo del 1, que se ha reservado para la barra fija; d) Además, se ha elaborado un cajetín con 3 filas. En la primera se indica el número de unión o par, en la segunda el tipo de par con los grados de libertad que restringe, y en la última las barras que une.

La elaboración del diagrama cinemático se considera muy recomendable para comprender el funcionamiento y calcular la movilidad teórica del mecanismo.

A continuación se presentan algunos ejemplos de diagramas cinemáticos, con sus correspondientes mecanismos para una mejor identificación.

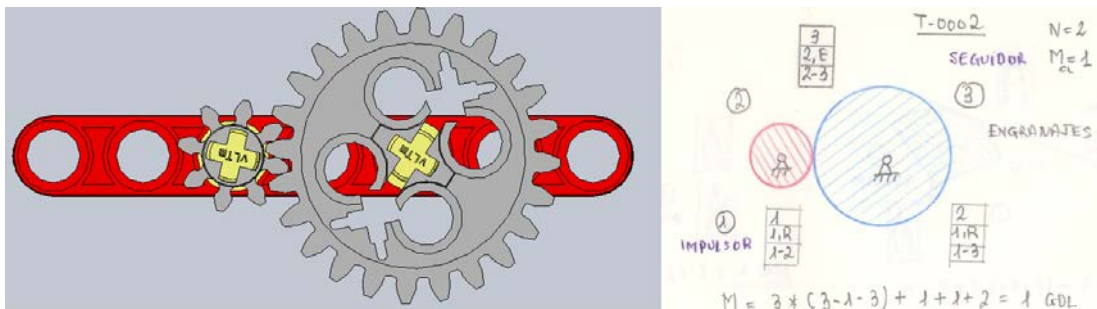


Figura 60. Mecanismo plano y diagrama cinemático del modelo de Isogawa 002

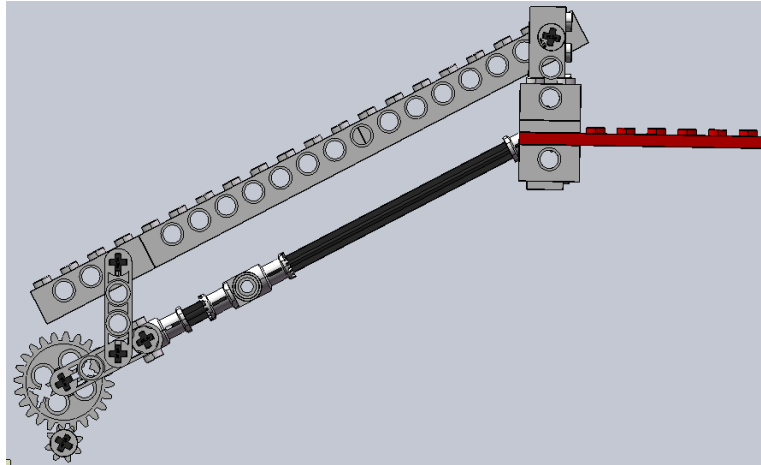


Figura 61. Mecanismo plano del modelo vLTm_8064-2

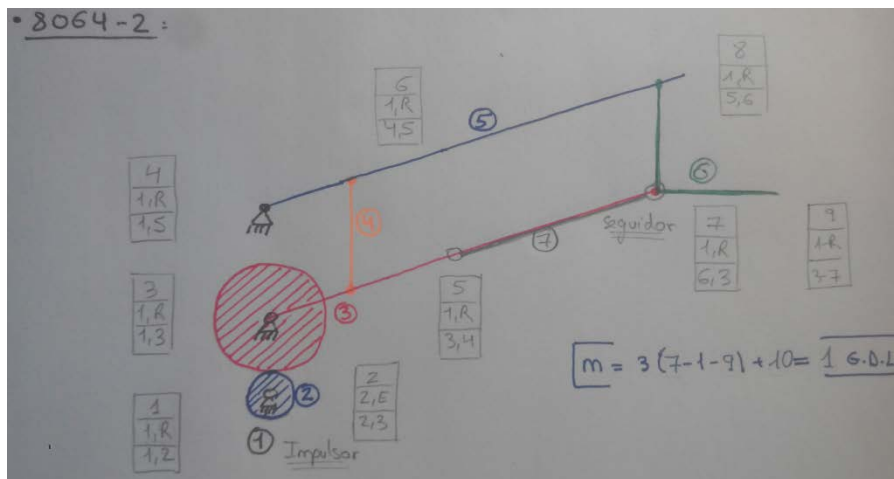


Figura 62. Diagrama cinemático del mecanismo plano de la Figura 61

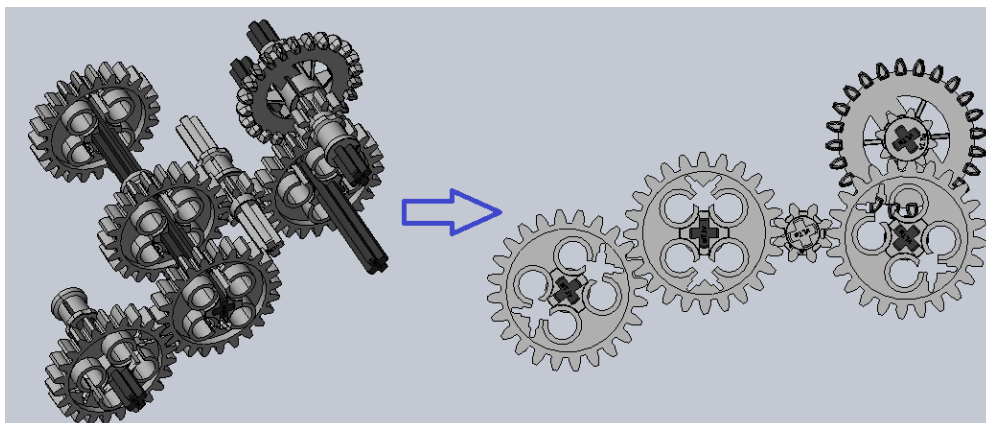


Figura 63. Mecanismo plano del modelo TnMm-0281c

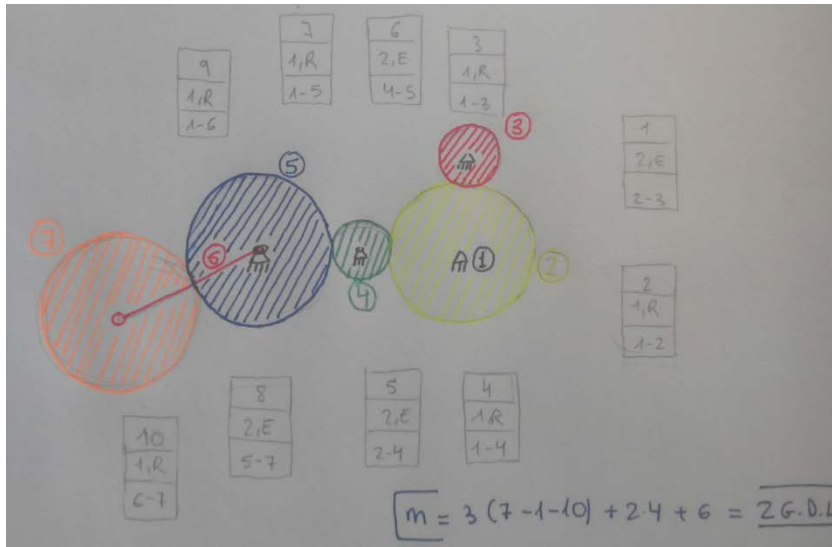


Figura 64. Diagrama cinemático del mecanismo plano de la Figura 63

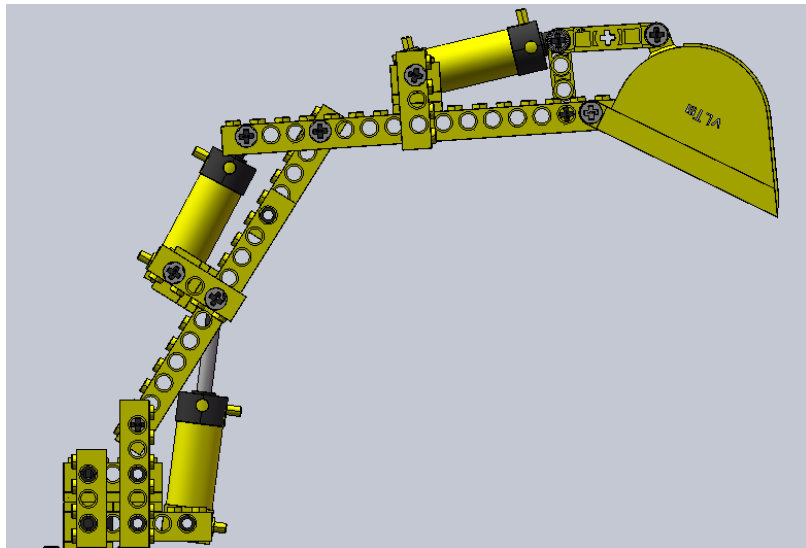


Figura 65. Mecanismo plano del modelo vLTM_8862-1, consistente en una pala excavadora

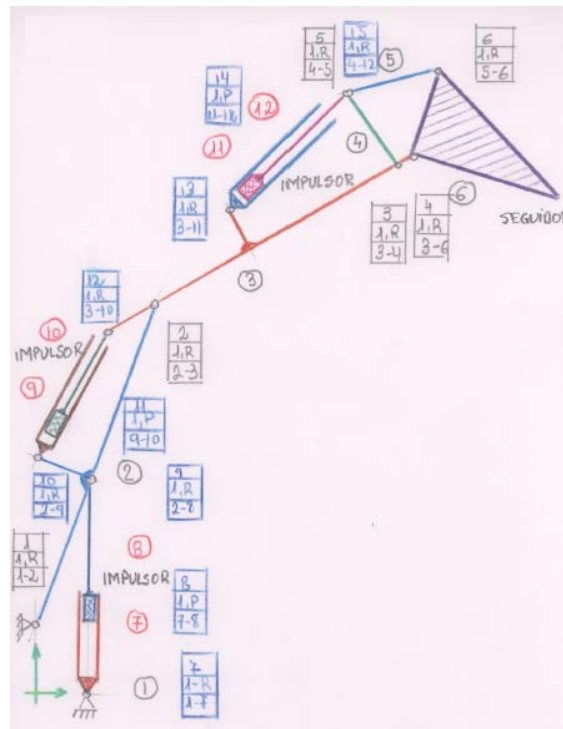


Figura 66. Diagrama cinemático de la pala excavadora del modelo vLTm_8862-1
(Oliver Herrero, J.L., 2013, Creación Modelo Virtuales Lego Technic)

En los algunos de los anteriores ejemplos además se han calculado las movilidades de los respectivos mecanismos.

Las movilidades de los mecanismos por lo general suelen ser igual a 1. En el caso de que sea igual a cero se tratará de una estructura, que además estará estáticamente determinada. Si la movilidad resulta igual a 1 negativo significa que no existe una solución para el mecanismo, lo que significa que no se podrá ensamblar tal mecanismo. Que la movilidad de un mecanismo sea mayor que 1 querrá decir que el movimiento de éste no será único, pudiendo haber varias opciones de movimiento.

Por último es necesario nombrar los grados de libertad no útiles, que pueden aparecer al aplicar la fórmula de Gruebler. Se trata de movimientos del mecanismo que no afectan a la entrada y salida del movimiento. Estos grados de libertad sí que intervendrán en la conectividad del par.

5.2.7 Mecanismo auto-alineado

Volviendo al objetivo de conseguir un modelo cinemático auto-alineado, se introduce el concepto de mecanismo auto-alineado, presentado por primera vez en un libro del profesor L. Reshetiov. En tal libro se explican las recomendaciones a ingenieros y diseñadores para conseguir dicho mecanismo.

Según el autor, en el montaje de los mecanismos se debe seguir una metodología tal que si las dimensiones finales de los cuerpos rígidos no son las teóricas, no haya ningún problema. Es decir, es conveniente usar mecanismos sin restricciones pasivas (restricciones en exceso, que si se eliminan no afectan a la movilidad del mecanismo).

Algunas de las ventajas de conseguir el llamado mecanismo auto-alineado por lo tanto son obvias: por ejemplo, las piezas en un mecanismo real pueden desgastarse y perder su geometría original, lo cual podría suponer un problema más grave de lo que sería si las piezas pertenecen a un mecanismo auto-alineado.

Así pues, hemos considerado las restricciones en exceso que pueden aparecer en un mecanismo como un factor de riesgo y trataremos de eliminarlas. Para ello es fundamental contar con un equipo con el que practicar la creación de mecanismos auto-alineados. La aplicación de SolidWorks, Cosmos Motion, junto con los modelos virtuales Lego® Technic son muy buenas herramientas para tal efecto.

5.3 Complemento de SolidWorks: Cosmos Motion

5.3.1 Presentación e introducción a Cosmos Motion

Para la conseguir que nuestros mecanismos virtualizados sean mecanismos auto-alineados y, conseguir por tanto, el modelo cinemático auto-alineados, se ha hecho uso de Cosmos Motion.

Cosmos Motion es una aplicación o complemento de SolidWorks, integrada en este programa, que nos permite evaluar y simular sistemas mecánicos. También permite obtener y editar información sobre éstos, como desplazamientos, velocidades, aceleraciones... La ventaja de usar este software es que, al estar integrado en SolidWorks, utiliza su mismo entorno, con el que ya estamos familiarizados. Además, evita la tarea de tener que cambiar la extensión de los archivos a formatos usados en otros programas.

Cuando se abre un modelo en SolidWorks y se pasa a la parte de Cosmos Motion, el entorno con el que nos encontramos es idéntico a cuando operábamos en la pantalla principal de SolidWorks. El único elemento que cambia es el menú desplegable de la parte izquierda, donde, al clicar en el símbolo de Cosmos Motion, aparecerá la información relativa al modelo (piezas, restricciones, pares, fuerzas...).

Se debe activar también un panel relativo a la simulación y el cálculo de grados de libertad del modelo. Cada vez que se le diga al programa que calcule se nos mostrará una pantalla emergente con la información del cálculo de los números de grados de libertad, posibles errores durante el proceso, etc.

En lo referente a las piezas del modelo, ya compactadas, cabe destacar que se diferenciarán entre piezas móviles y fijas, dejando a nuestro criterio cuales serán de cada tipo. Por lo

general, el chasis del vehículo del modelo a simular será la pieza fija, y todas las demás serán móviles. Al definir una pieza como fija queda totalmente restringida (0 gdl), mientras que las piezas móviles tendrán 6 gdl, hasta que establezcamos los pares cinemáticos necesarios para guiar su movimiento.

Por último, cabe decir que cada vez que establecemos relaciones de posición en SolidWorks entre dos piezas, automáticamente se crean pares cinemáticos en Cosmos Motion. Estos pares en determinadas ocasiones serán válidos para lograr el modelo cinemático auto-alineado, pero por norma general los deberemos de eliminar o suprimir, ya que ciertas características no serán editables.

5.3.2 Pares cinemáticos

Así pues, para conseguir el mecanismo auto-alineado debemos conocer previamente qué tipos de pares cinemáticos nos ofrece Cosmos Motion, pues dependiendo de los pares que establezcamos en las uniones de las piezas conseguiremos el correcto movimiento de los cuerpos y la consecución del modelo cinemático auto-alineado.

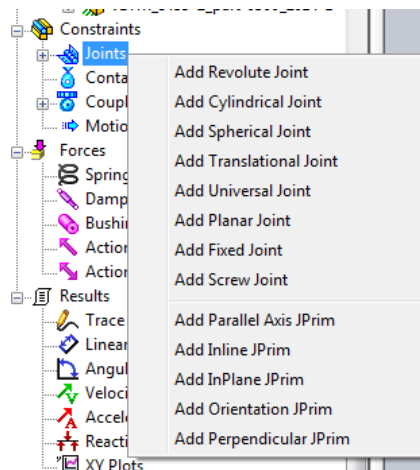


Figura 67. 'Joints' o pares en Cosmos Motion

Cada vez que se crea un par cinemático, aparece una ventana como la de la Figura 68. El cuadro es similar para todos los pares. En él se puede volver elegir el tipo de par que deseamos establecer (lo habremos elegido previamente, ver Figura 67). Para insertar cualquier par se debe elegir los cuerpos entre los que queremos establecerlo (1 y 2 en la Figura 68), así como la localización (3) y la dirección (4).

La localización del par y su dirección se establece de modo automático al seleccionar los cuerpos, pero es editable, y conviene hacerlo para situar el par en el sitio correcto. Es importante hacerlo, para evitar un funcionamiento inadecuado del par. La localización puede

establecerse seleccionando aristas, puntos, ejes, etc., mientras que la dirección suele ser una arista o eje.

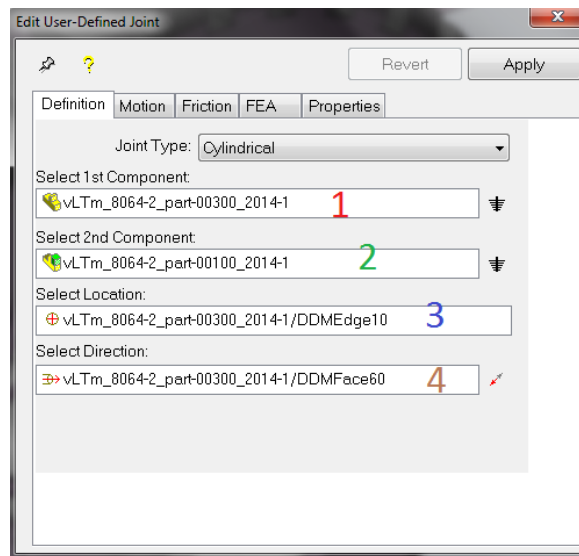


Figura 68. Edición de un par cilíndrico. Ejemplo

A continuación se detallan los pares que ofrece Cosmos Motion, reflejados en la lista de la Figura 67. Los esquemas que acompañan la explicación de cada par son muy parecidos a los que Cosmos Motion inserta en el modelo, que también se adjuntan (en color azul), y que además son de gran ayuda para comprender el funcionamiento de cada uno, ya que son muy gráficos.

- **Par de revolución:** este par permite la rotación alrededor de un eje de un cuerpo rígido respecto de otro, pudiendo situar el origen de la articulación en cualquier punto del eje. El eje del giro dependerá como orientemos del par. El par de revolución restringe 5 grados de libertad (tres traslaciones y 2 rotaciones), dejando libre un solo grado (el de la rotación restante).

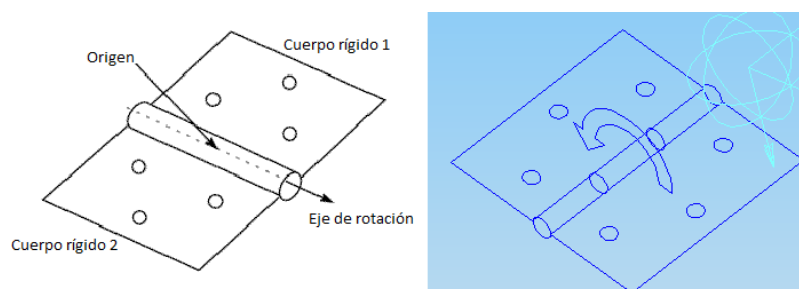


Figura 69. Esquemas del par de revolución
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

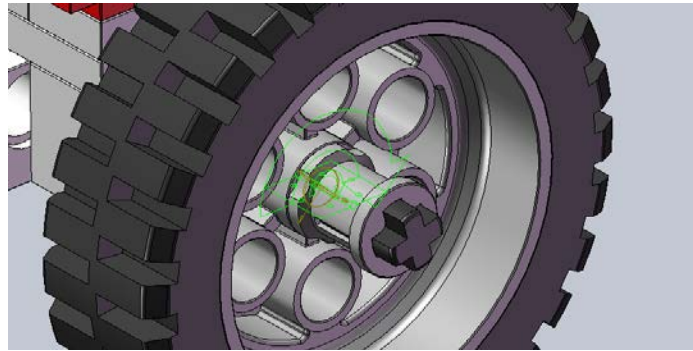


Figura 70. Ejemplo de aplicación de un par de revolución, entre una rueda y su eje

- **Par traslacional:** esta articulación permite el desplazamiento a lo largo de un eje y respecto de otro cuerpo, pero sin permitir la rotación alrededor del eje. Este par restringe, al igual que el de revolución 5 grados de libertad (2 traslaciones y 3 rotaciones), dejando por tanto un grado de libertad libre.

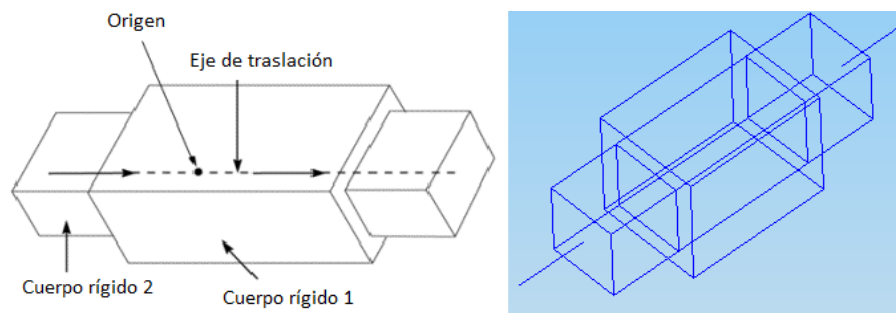


Figura 71. Esquemas del par traslacional
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

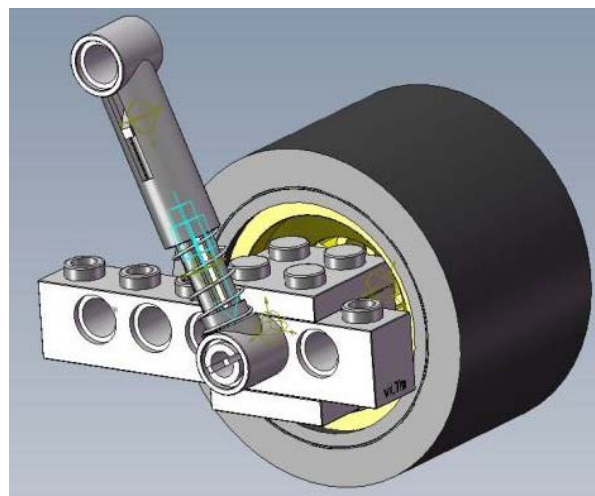


Figura 72. Ejemplo de aplicación de par traslacional, en el mecanismo de suspensión de una rueda

El par esférico se puede encontrar en los cojinetes esféricos por ejemplo. Éstos son muy usados en la aviación, en engranajes reductores de velocidad.

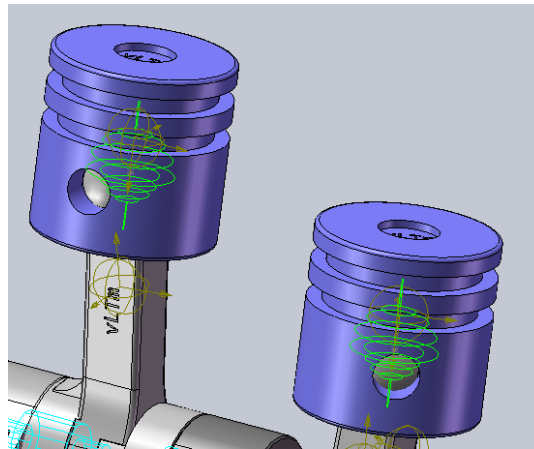


Figura 76. Ejemplo de par cilíndrico, establecido para definir el movimiento del bulón de la biela dentro del pistón

- **Par universal:** este par es muy específico, pues se utiliza para establecer el movimiento de las juntas universales, que transmiten el giro entre ejes desalineados, permitiendo además la articulación entre ambos. Sin embargo, las uniones de este tipo se pueden crear en Cosmos mediante otros tipos de pares, sin que afecte al resultado final. En el presente TFG se ha optado por esta última opción.

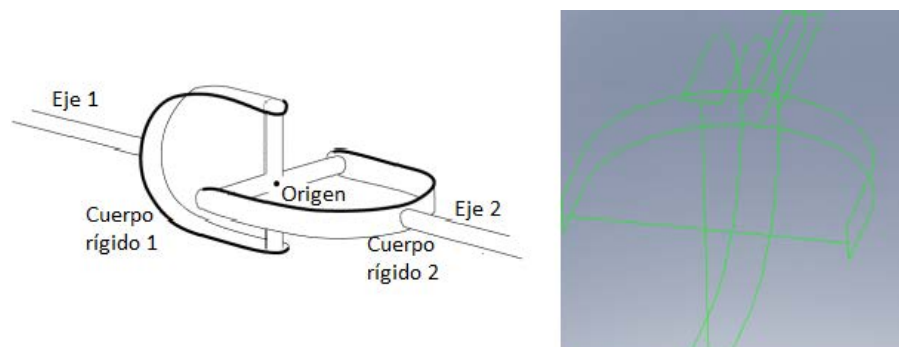


Figura 77. Esquemas del par universal
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

Para establecer este par, como se puede apreciar, debemos especificar una segunda dirección (eje 2).

Con este par se restringen 4 grados de libertad, quedando libre por tanto dos.

- **Par tornillo:** como su nombre parece indicar, este par permite a un cuerpo girar respecto a otro mientras se traslada, todo alrededor del mismo eje. La rotación y la

traslación dependen la una de la otra, y por lo tanto solo queda restringido un grado de libertad (se coge 0.5 de un movimiento y 0.5 de otro).

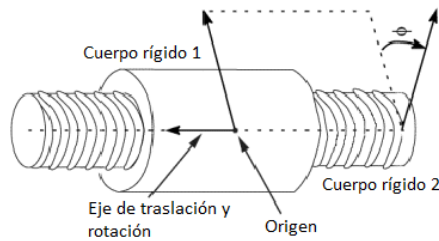


Figura 78. Esquema del par tipo tornillo
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

- **Par planar:** este tipo de par permite a un plano contenido en un cuerpo rígido trasladarse y girar en el plano del otro cuerpo rígido. Es decir, permite el deslizamiento (desplazamiento en dos direcciones más giro respecto a las direcciones normales de las anteriores).
Restringe por lo tanto 3 grados de libertad.

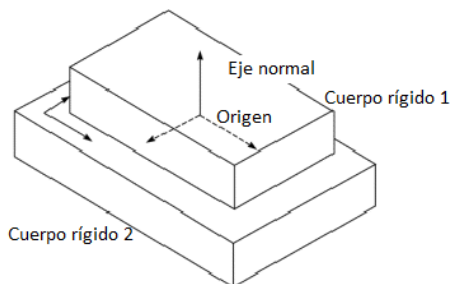


Figura 79. Esquema del par planar
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

- **Par fijo:** no es un par cinemático como tal. Se utiliza para eliminar el movimiento entre los dos cuerpos rígidos que se están tratando. La localización de dicho par no es importante.
Para el estudio cinemático no es relevante en absoluto, pero para un posible estudio dinámico sí, ya que seleccionar un cojinete que impida todos los movimientos y resista distintos tipos de esfuerzos puede ser importante.

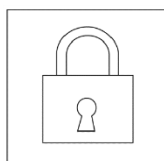


Figura 80. Símbolo del 'par' fijo
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

5.3.3 Pares primitivos

Los pares primitivos ('Jprim' en la Figura 67) representan otro tipo o clase de pares cinemáticos. Se usan para la aplicación de ciertas restricciones geométricas.

En este TFG se han usado fundamentalmente para lograr el modelo cinemático auto-alineado, así como para lograr que un mecanismo tenga exactamente el movimiento que deseamos. Son los siguientes:

- **Par en la línea:** este par primitivo permite una traslación y tres movimientos de rotación de un cuerpo respecto de otro, sumando así 4 grados de libertad.

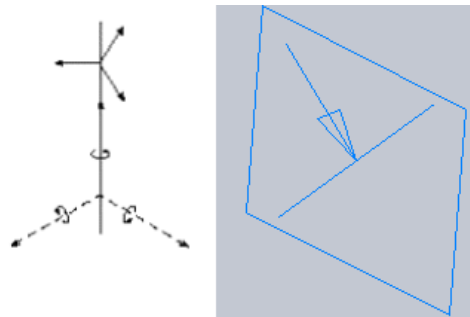


Figura 81. Esquemas del par primitivo en la línea (inline)
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

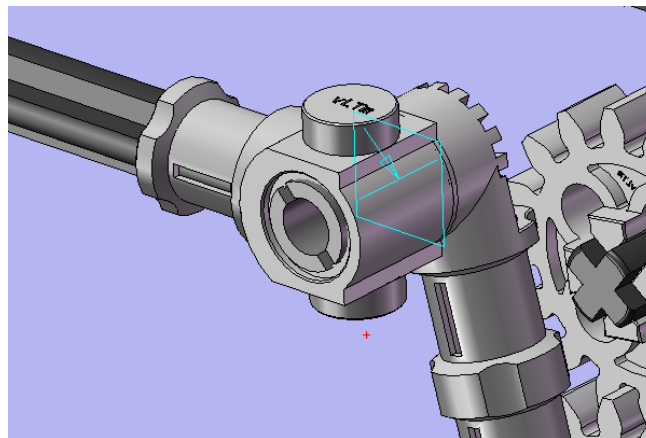


Figura 82. Ejemplo de par en la línea

En un entorno industrial, podemos encontrar este tipo de par en mecanismos de levas con rodillos cilíndricos, en el contacto entre dientes de engranajes, y en cojinetes de agujas.

- **Par en el plano:** restringiendo un solo grado de libertad (una traslación), este par primitivo permite que un cuerpo rígido se mueva libremente sobre un plano contenido

en otro cuerpo rígido. Este par primitivo no debe confundirse con el par cinemático planar, que como se explicó, restringía 3 gdl.

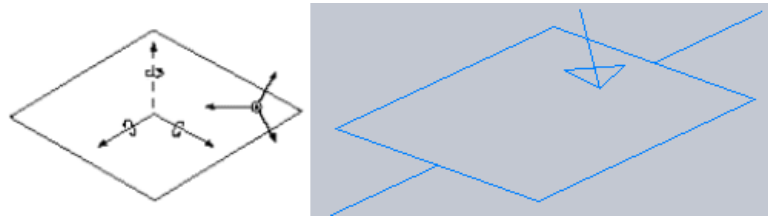


Figura 83. Esquemas del par en el plano (inplane)
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

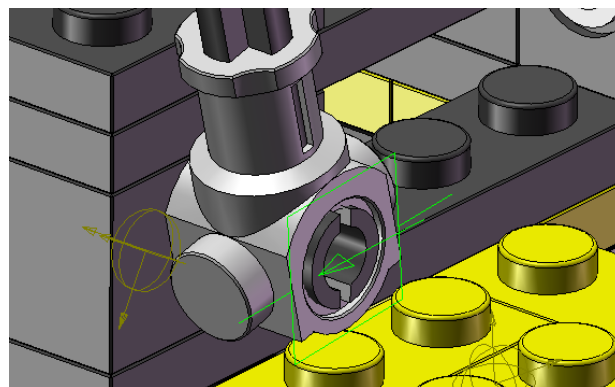


Figura 84. Ejemplo de aplicación del par primitivo en el plano

Este tipo de par podemos encontrarlo en un entorno más industrial, en mecanismos de levas con rodillo en forma de barrilete y en dientes de los piñones con mancha de contacto concentrada. La mancha de contacto de los dientes caracteriza la concentración de carga sobre los dientes

- **Par orientación:** con este tipo de par primitivo conseguimos que quede impedido el giro de un cuerpo respecto a otro, permitiendo solamente la traslación. Así pues restringe las 3 rotaciones y permite las 3 traslaciones. Tendrá 3 grados de libertad por lo tanto.

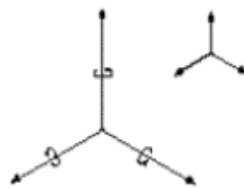


Figura 85. Esquema del par orientación
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

- **Par paralelismo:** este par impone la condición de que un cuerpo rígido se mantenga paralelo a un segundo. Así pues, impide dos rotaciones y permite las tres traslaciones y una rotación. (Tendrá 4 grados de libertad)

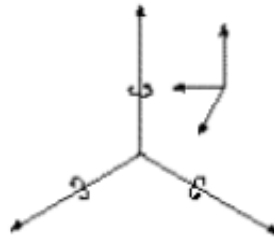


Figura 86. Esquema del par primitivo paralelismo
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

- **Par perpendicularidad:** con este par primitivo se impide solamente una rotación entre los dos cuerpos rígidos. Permite por tanto dos de las rotaciones y las tres traslaciones. El objetivo del par es que uno de los tres ejes de cada componente se mantengan perpendiculares en todo momento entre sí.

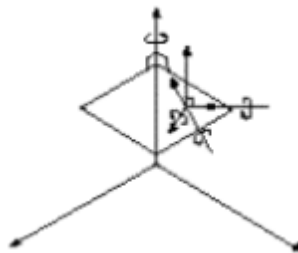


Figura 87. Esquema del par perpendicularidad
(Documento de ayuda de COSMOSMotion)

Quedan por tanto explicados todos los pares de los que podemos hacer uso en Cosmos Motion para lograr, entre otras cosas, el modelo cinemático auto-alineado.

Cabe decir, en último lugar, que combinando pares de distinto tipo podemos conseguir el mismo efecto que con uno solo, y viceversa. Por ejemplo, un par cinemático de tipo revolución puesto en un apoyo, equivale a poner un par cilíndrico y otro de tipo en el plano en dos apoyos. En estos dos casos se consigue 5 restricciones y un solo grado de libertad. Sin embargo, desde un punto de vista dinámico así como en casos reales, interesará más repartir los apoyos siempre que se pueda para distribuir los esfuerzos.

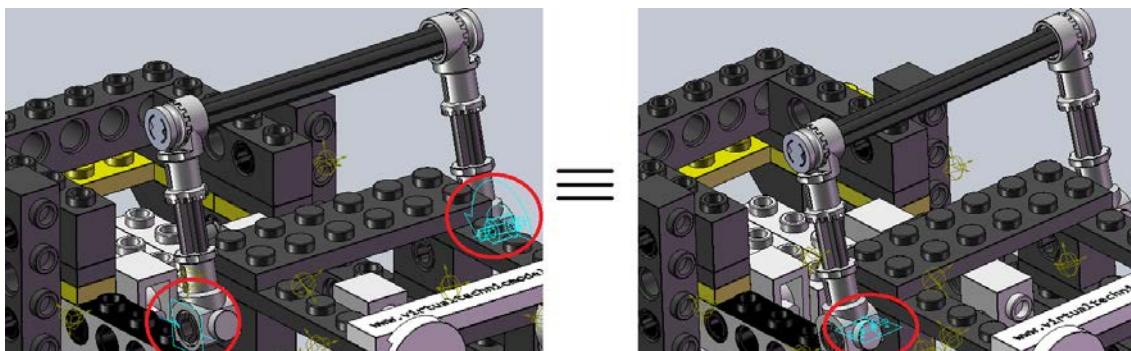


Figura 88. Equivalencia entre par cilíndrico más par en el plano, y par de revolución

En el ejemplo de la Figura 88 el efecto conseguido con los distintos pares es el mismo. Conseguimos que la pieza móvil quede fijada al chasis del vehículo, restringiendo 5 grados de libertad y permitiendo solamente que esa pieza gire en torno a un eje.

Otro ejemplo es la combinación de los pares esféricos y en la línea, para conseguir de nuevo el mismo efecto que poniendo un par de revolución.

5.3.4 Acoplamiento y contactos

El complemento de SolidWorks, Cosmos Motion permite relacionar pares cinemáticos, distintos, o del mismo tipo, entre sí. Esto es importante de cara a simular el movimiento de mecanismos como engranajes, poleas, tornillos sin fin, mecanismos piñón-cremallera...

Cada relación o acoplamiento que establezcamos restará un grado de libertad a nuestro sistema cinemático. Los acoplamientos se representan en Cosmos mediante la unión con una línea de los pares involucrados, con el símbolo de la Figura 89 en medio de dicha línea.

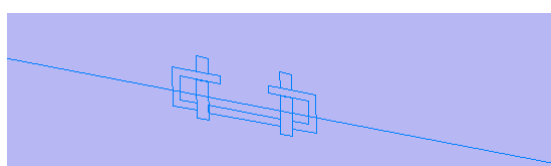


Figura 89. Simbología del acoplamiento entre pares

Para imponer estas relaciones debemos averiguar qué deben hacer los pares involucrados en el acoplamiento. Es decir, que si un par gira tantos grados, cuántos grados lo hará el otro par. O que si un par gira tantos grados, cuánto se desplazará el otro par cinemático. Estas relaciones suelen ser las que poníamos al crear una relación de posición de engranaje en la parte de ensamblaje del modelo, es decir, número de dientes, diámetros, etc.

Una vez averiguado la relación entre los pares rellenaremos el cuadro de la Figura 90.

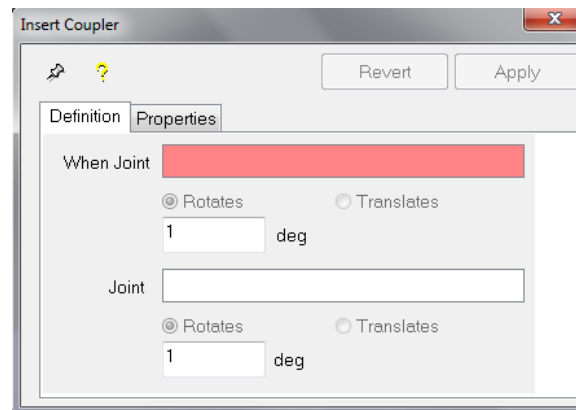


Figura 90. Ventana para insertar un acoplamiento

Así pues se pueden establecer relaciones entre pares de todo tipo, de manera que al final se consiga el movimiento deseado. En la ventana anterior se puede poner que cuando un par gire '+x' grados el otro lo haga '-y', ya que dependiendo de la orientación de cada par, las rotaciones serán las deseadas o no.

En la Figura 91 se puede observar el acoplamiento entre distintos pares cinemáticos, conformando así los movimientos de engrane correspondientes.

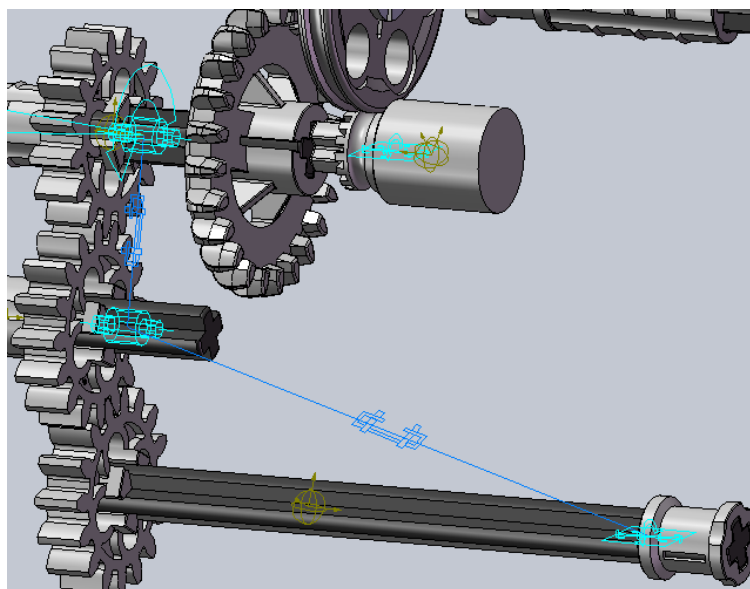


Figura 91. Ejemplos de acoplamientos

Los pares cinemáticos típicos que relacionaremos serán cilíndricos, de revolución, traslacional (en una cremallera por ejemplo)...

Por último debemos hablar de la creación de contactos en Cosmos, que serán útiles a la hora de simular respecto de una base. Como se comprobará, restringen movimientos, haciendo que por ejemplo un cuerpo se mantenga en contacto con otro en todo momento.

5.3.5 Restricción de movimiento

Una aspecto muy importante que se ha tenido en cuenta a la hora de conseguir el modelo cinemático auto-alineado es la necesidad de guiar cada lazo cinemático, dando movimiento a los actuadores. Por ejemplo, en un sistema cinemático compuesto por un motor con su eje y distintos engranajes, deberemos dar movimiento al eje del motor. Este movimiento restará un grado de libertad al sistema.

Hay distintas formas de dar movimiento a los actuadores. El movimiento se define en un par cinemático que haya en el actuador, y dependiendo del tipo de par y de los grados de libertad que tenga podremos dar un tipo de movimiento u otro. Por lo general, podremos dar movimiento de tipo rotatorio y de tipo traslacional.

Cuando se crea un 'Joint' o par cinemático en Cosmos, el movimiento que viene por defecto es libre ("Free"). Para restringir ese grado de libertad extra, se debe cambiar el movimiento deseado (rotación en el eje X, en el eje Y, traslación en Z, etc.) a "Desplazamiento", "Velocidad" o "Aceleración".

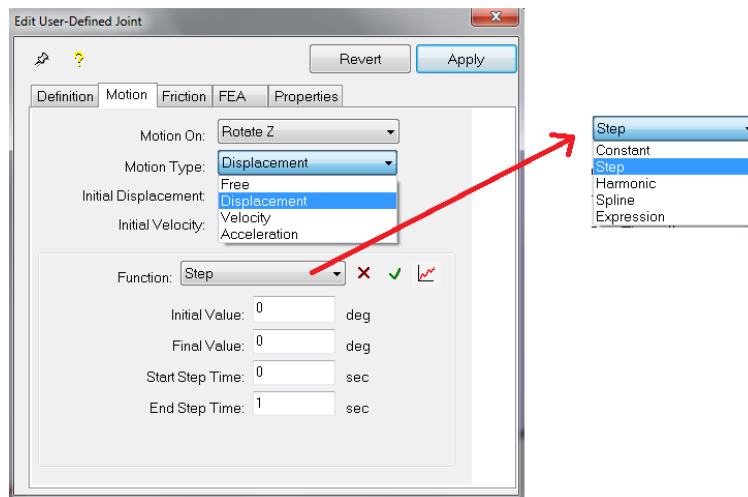


Figura 92. Edición del movimiento de un par cinemático

Además, como se puede ver en la Figura 92, se puede definir de múltiples maneras el tipo de movimiento, ya sea desplazamiento, velocidad o aceleración. También tenemos opción de elegir el tipo de curva o función a la que se ajustará nuestro movimiento:

- *Constante*: establece un valor fijo de posición, velocidad o aceleración. La magnitud mantendrá el valor asignado durante la simulación. Ejemplo: par cilíndrico, a una velocidad constante de rotación en el eje 'y' de 15 grados por segundo.
- *Escalón o pasos*: se define un incremento de posición para un incremento de tiempo. Por tanto se debe especificar la posición inicial y final del cuerpo rígido, ya sean grados (rotacional) o milímetros (traslacional). Por último indicaremos el momento de la simulación en el que queremos que empiece el escalón y el momento en que queremos que termine. (Ver Figura 92). Cosmos Motion suaviza el escalón, para un mejor funcionamiento de los mecanismos.
- *Función armónica*: se puede definir también un movimiento tipo senoidal, seleccionando esta función. La ecuación que gobierna el movimiento es:

$$f(t) = A * \sin(w * (t - T0) - j) + B \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde A es la amplitud, w la frecuencia, T0 el desfase, j el incremento de la fase y B el valor medio que se desee.

- *Función Spline*: permite interpolar entre distintas magnitudes que se establecen para distintos tiempos. Así pues, por ejemplo, se podrá indicar cuatro diferentes velocidades para cuatro tiempos, y en la simulación se verá la interpolación entre esos puntos definidos.
- *Expresión*: por último, Cosmos Motion nos ofrece la posibilidad de introducir las expresiones o funciones que deseemos, cumpliendo con una sintaxis determinada. En el presente TFG se ha utilizado mayoritariamente para hacer 'Steps' de 'Steps', es decir para implementar funciones escalón dentro de otras funciones escalón.

5.4 Modelos simulados

Explicada la teoría, el modo de proceder y el funcionamiento básico de la aplicación de SolidWorks, Cosmos Motion, es momento ahora de presentar los modelos simulados cinemáticamente.

Recordamos que el objetivo ha sido lograr que los modelos virtuales sean modelos cinemáticamente auto-alineados. En los siguientes apartados se describirá la manera de proceder, con modelos virtuales, para conseguir tal propósito. El procedimiento ha sido por ensayo y error, es decir, en primer lugar ponemos los pares que consideramos adecuados, y calculando la movilidad se comprueba si son los correctos o se deben sustituir.

Se han realizado simulaciones estáticas (respecto del chasis de cada modelo) y simulaciones respecto de una base, por la que puede moverse el modelo. También se han realizado simulaciones en la versión 2011 de SolidWorks, ya que esta versión incluye mejoras en cuanto a rendimiento y animación.

El primer paso en todos los modelos simulados ha sido el ensamblaje de las piezas previamente compactadas. Después, al pasar a Cosmos Motion, como ya se ha comentado anteriormente, se han eliminado los pares creados de forma automática por el programa. El modo de operar ha sido lazo cinemático a lazo cinemático, esto es, mecanismo a mecanismo.

En la parte de simulación respecto de una base, se ha llevado a cabo un proceso de cilindrado de las ruedas mediante una operación de extrusión.

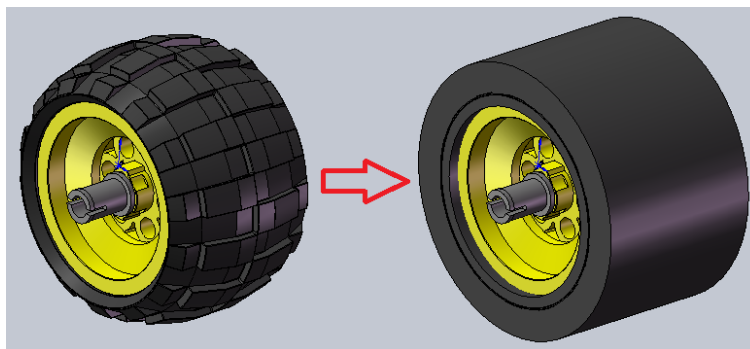


Figura 93. Cilindrado de una rueda

La justificación de este cilindrado es que las ruedas de la mayoría de los modelos tienen una geometría complicada, con muescas y ranuras (imitando ruedas de vehículos reales). Como ya se ha dicho al final del apartado 5.3.4, se crearán contactos en Cosmos, entre la base y las distintas ruedas de los modelos. Simular estos contactos requiere de mucha capacidad de nuestro ordenador y requerirá mucha más todavía si se hace entre superficies con geometría compleja. Por ello, el cilindrado de las ruedas incrementa el rendimiento y no supone ninguna diferencia en cuanto a objetivos.

En la simulación respecto de la base, claro está, también deberemos crear esta base. Se hará en una pieza, que nombraremos como pieza 'cero'. Será un cuadrilátero de grandes proporciones (dependerá del modelo y de sus movimientos), creado mediante extrusión de un croquis en el plano superior.

Por último cabe decir que esta parte del trabajo lucirá más en la presentación visual del mismo, ya que lo que se ha conseguido al final son simulaciones de los modelos, en vídeos.

5.4.1 Modelo vLTm_8816-1

Este modelo consiste en un pequeño vehículo tipo 'jeep', con pocos mecanismos, ideal para inicializarse en el proceso de consecución del modelo cinemático auto-alineado y en la simulación.

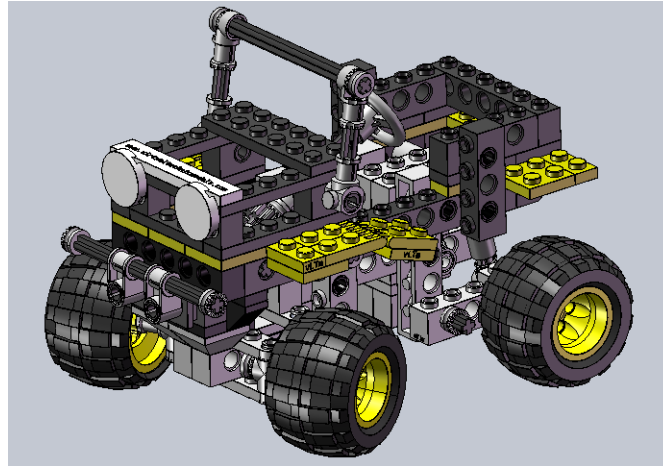


Figura 94. Modelo vLTm_8816-1

Así pues, ensamblando la piezas compactadas, observamos algunos mecanismos que incorpora el modelo, como la dirección mediante piñón-cremallera delantera, controlada por un volante. También vemos que incorpora amortiguadores en las ruedas traseras y por último un parabrisas abatible.

Una vez en Cosmos Motion, eliminamos o suprimimos los pares que el programa crea de forma automática y podemos empezar a insertar los pares para realizar la simulación respecto del chasis y conseguir un modelo cinemáticamente auto-alineado.

En la Figura 95 se ofrece un ejemplo de un mecanismo con los pares cinemáticos ya establecidos. En los pares de revolución de las ruedas se ha definido movimiento, así como en los amortiguadores.

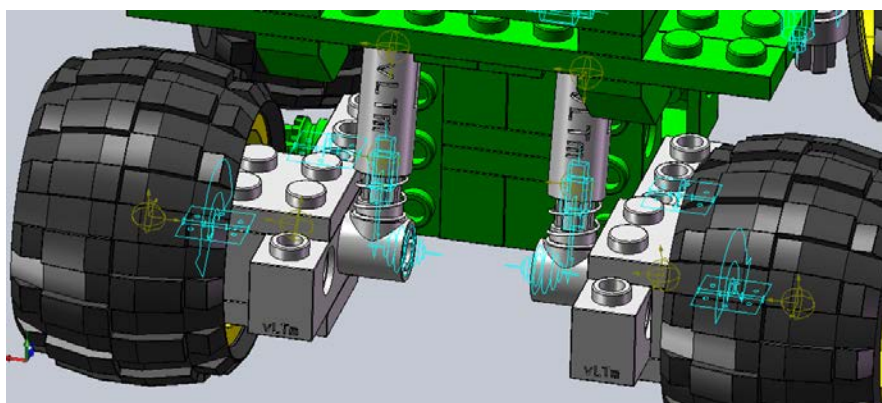


Figura 95. Mecanismos de tracción y suspensión trasera del modelo vLTm_8816-1. Chasis en verde

Estableciendo, mecanismo a mecanismo, los pares necesarios, y comprobando de tiempo en tiempo los grados de libertad del sistema, se ha llegado al modelo cinemático auto-alineado. El análisis de los grados de libertad realizado por Cosmos así lo demuestra (Figura 96). En él se puede ver la cantidad de grados de libertad que tiene el modelo inicial, y el número de pares y tipo que se ha insertado, así como la cantidad de grados de libertad que restan al sistema.

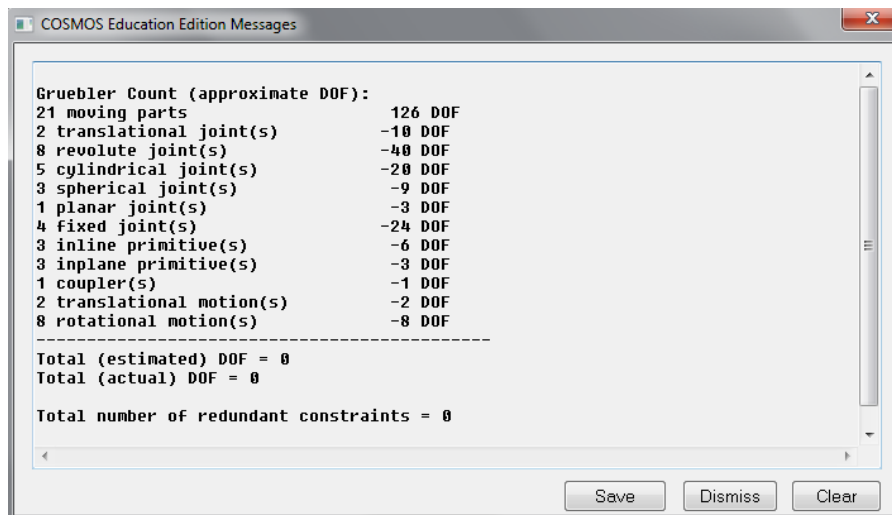


Figura 96. Análisis del movimiento de Cosmos Motion

Para finalizar, creamos la pieza '0000', construimos una base en ella, ponemos como cuerpo fijo esa base y ponemos cómo móvil el chasis. Definiendo los contactos entre las ruedas y la base ya podemos realizar la simulación respecto de la base.

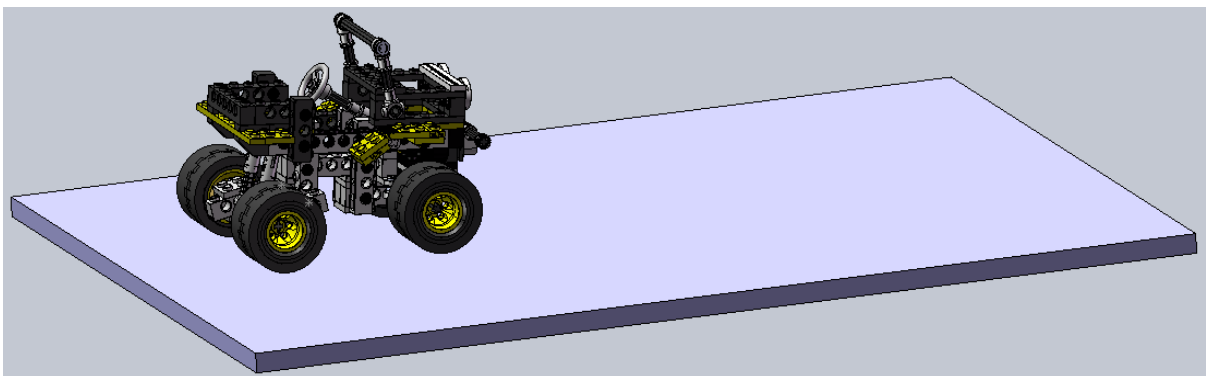


Figura 97. Modelo vLTm_8816-1 sobre la base, listo para avanzar por ella.

5.4.2 Modelo vLTm_8064-2

Se trata de un modelo que ya se ha visto y construido virtualmente en la parte de ensamblado de modelos (apartado 3.4.3). Se trata de un pequeño vehículo con montacargas y sistema de dirección delantera.

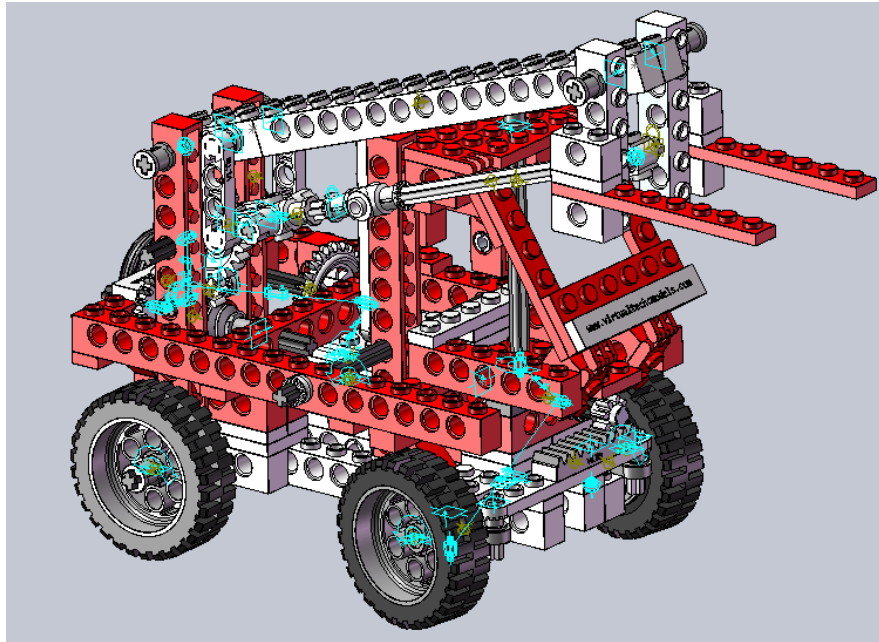


Figura 98. Modelo vLTm_8064-2, con los pares o 'joints' insertados

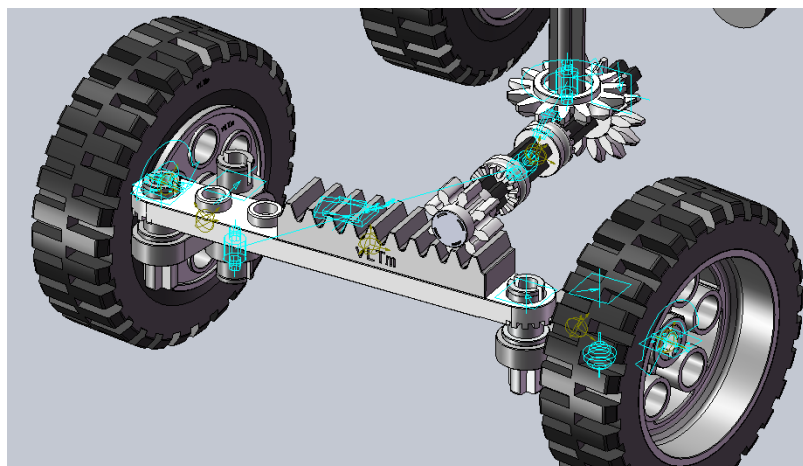


Figura 99. Sistema de dirección, con los pares cinemáticos necesarios

Así pues, estableciendo los pares necesarios, así como las relaciones entre ellos, se ha llegado al modelo cinemático auto-alineado:

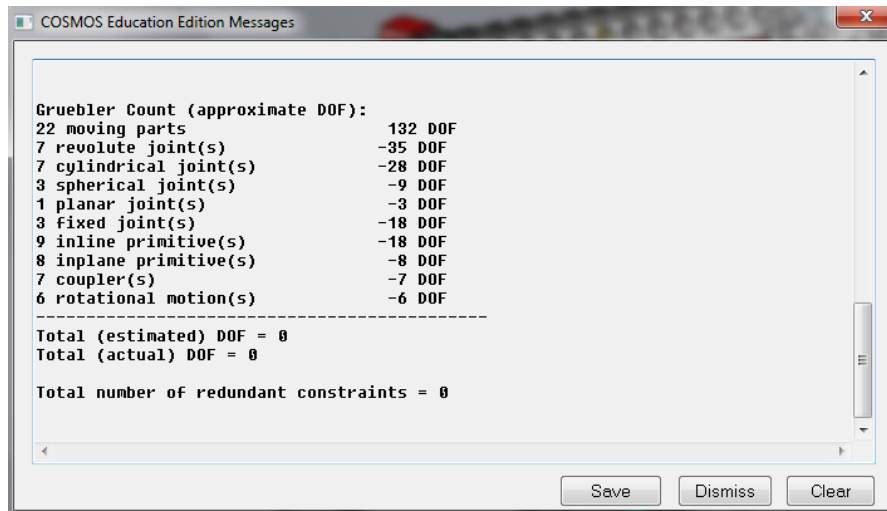


Figura 100. Análisis del movimiento realizado por Cosmos del modelo vLTm_8064-2

Queda pues, por último realizar una simulación respecto de la base. Base que se ha creado en una nueva pieza, considerada como fija en Cosmos. Luego se ha procedido con el cilindrado de las ruedas y la creación de los contactos entre la pieza base y dichas ruedas.

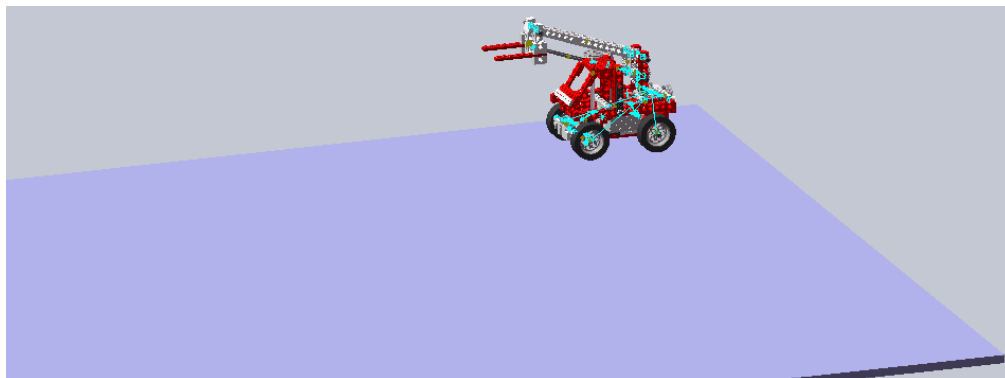


Figura 101. Imagen de la simulación respecto de la base del modelo vLTm_8064-2

5.4.3 Modelo vLTm_8459-2

Se trata de un modelo bastante más complejo que los anteriores. Se trata de un vehículo que incorpora motor de seis cilindros para la tracción delantera, parte trasera giratoria, que además lleva una grúa acabada en pinza y accionada por cilindros neumáticos. Es un vehículo de los llamados MOP (maquinaria de obra pública).

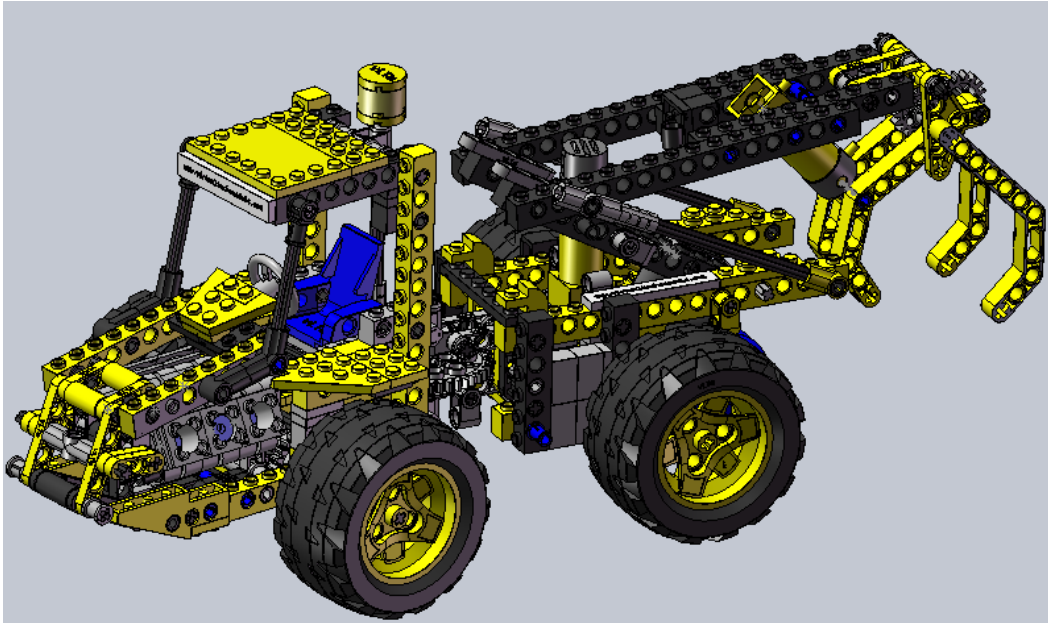


Figura 102. Modelo vLTm_8459-2 virtual

Tras proceder con el ensamblaje de las piezas compactadas previamente, se ha realizado la inserción de los pares necesarios en los mecanismos para lograr que sean auto-alineados.

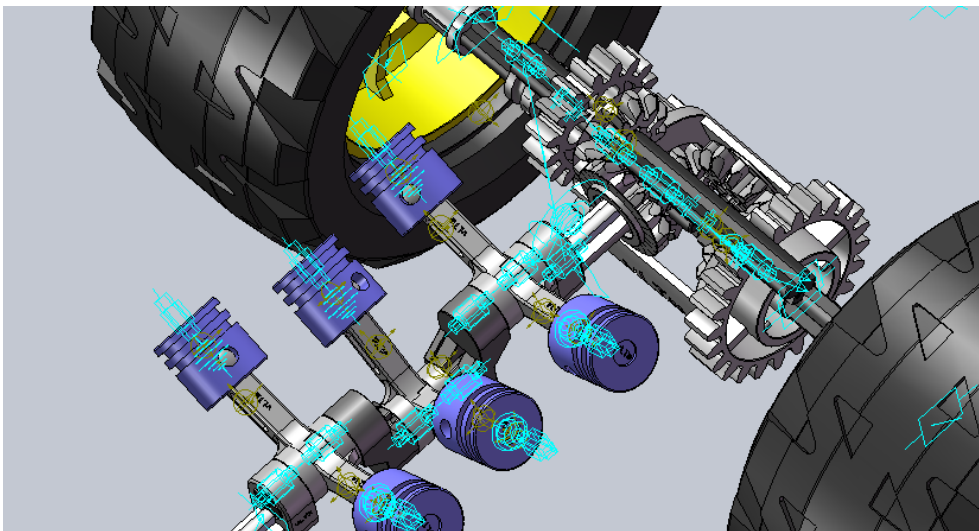


Figura 103. Pares del motor V6 y del diferencial

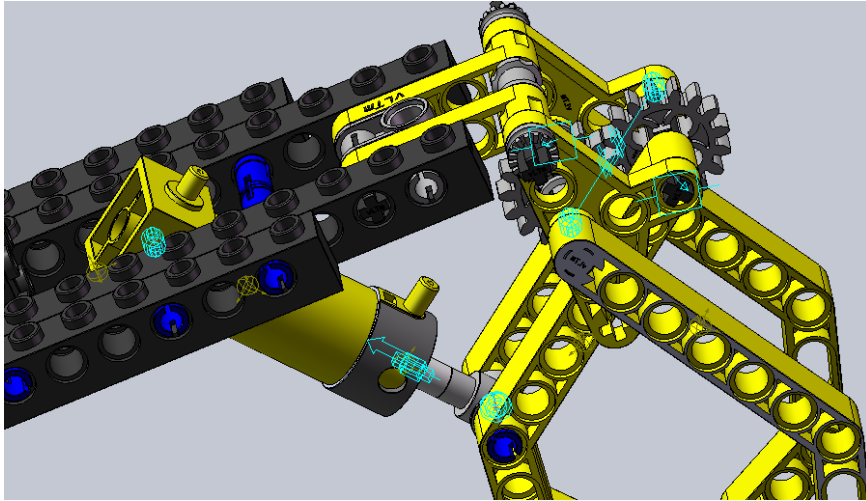


Figura 104. Pares cinemáticos de la garra

En este modelo no se ha podido llegar exactamente a la condición de auto-alineado. El problema es que hay dos barras de la grúa que realmente se comportan como una sola, pero que se han construido en el modelo como piezas independientes. Esto hace que haya resultado imposible conseguir cero restricciones en exceso y así auto-alinear el modelo. Estas barras son las señaladas como '1' en la Figura 105. Si estuvieran unidas entre sí podríamos considerarlas como una sola pieza, y el problema desaparecería.

En dicha figura también podemos observar el mecanismo que permite el giro entre la parte trasera y la delantera (2).

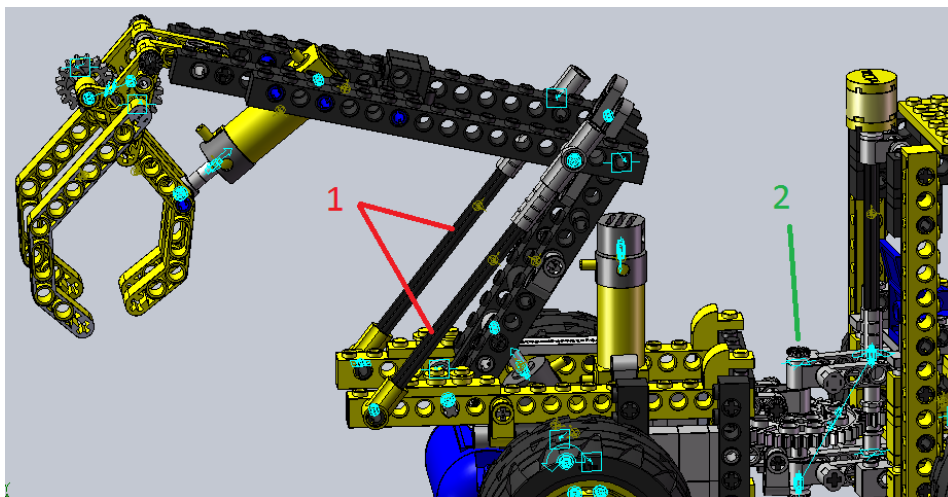


Figura 105. Barras "duplicadas" y mecanismo de giro

Así pues, nos quedará una restricción en exceso o redundante, que no podremos eliminar:

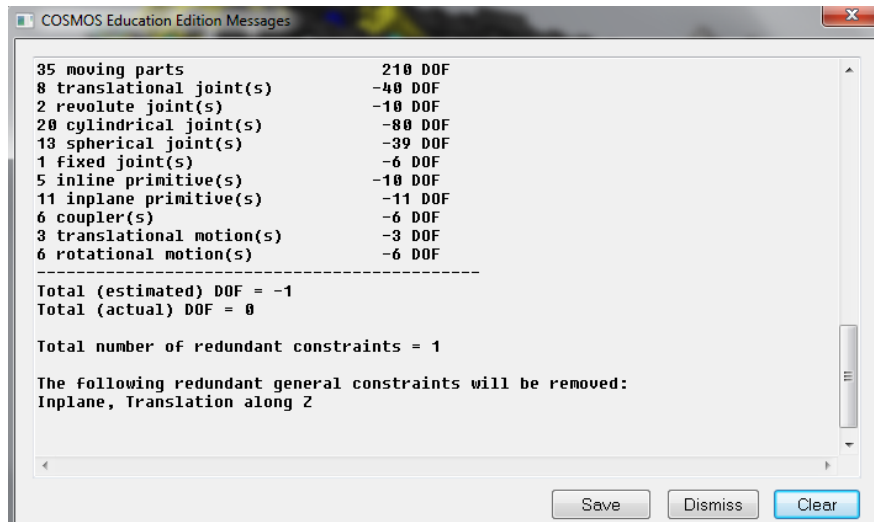


Figura 106. Análisis cinemático de Cosmos

Por último, realizamos la simulación respecto de una base:



Figura 107. El modelo vLTm_8459-2, encima de la base en su posición inicial

5.4.4 Modelo vLTm_8445-1

Este modelo ha sido construido virtualmente también (ver apartado 3.4.5). Después de compactar sus piezas se ha procedido a la simulación virtual.

Recordamos que el modelo consiste en un Fórmula 1 con varios mecanismos: sistema de dirección delantero, capota abatible y motor en 'V' de seis cilindros que mueve la tracción trasera.

En el mecanismo de dirección delantera se ha dotado con movimiento de giro a los pares que unen volante con chasis y ruedas con sistema de dirección, de manera que queden conducidos.

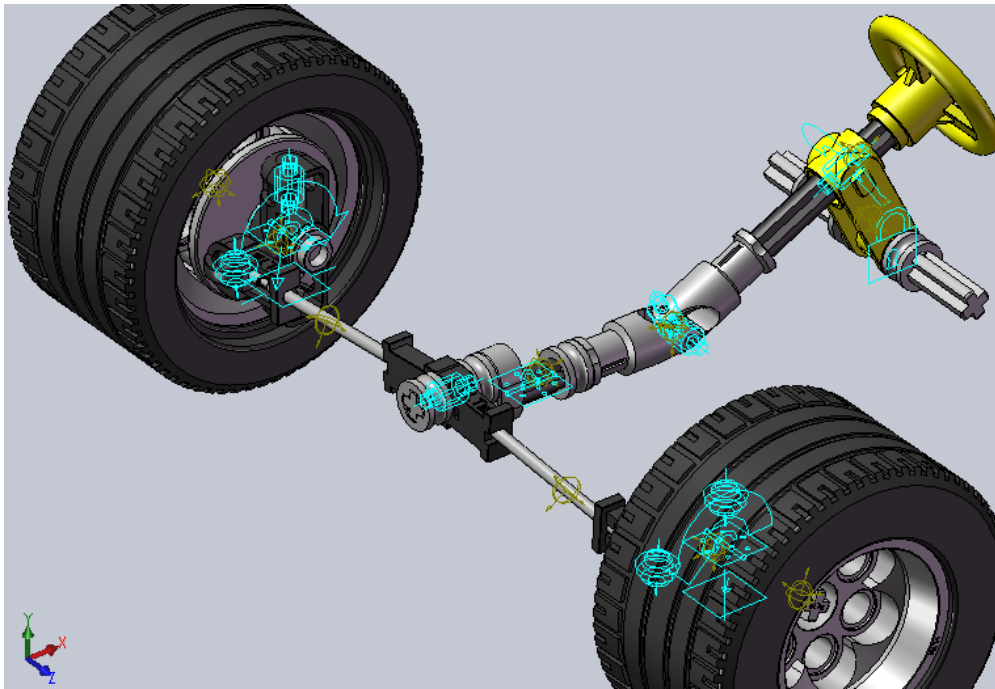


Figura 108. Mecanismo de dirección con sus pares cinemáticos del modelo vLTm_8445-1

En la figura 108 se intuye que los pares cinemáticos de la junta universal han consistido en dos pares cilíndricos, que equivalen al par universal, que también se podría haber usado.

También se ha dotado de movimiento al par cinemático del amortiguador que hace que la capota se eleve y baje, así como al cigüeñal, que conducirá finalmente el giro de las ruedas.

Finalmente, se ha logrado el objetivo de conseguir el modelo cinemático auto-alineado, con ninguna restricción en exceso y sin grados de libertad.

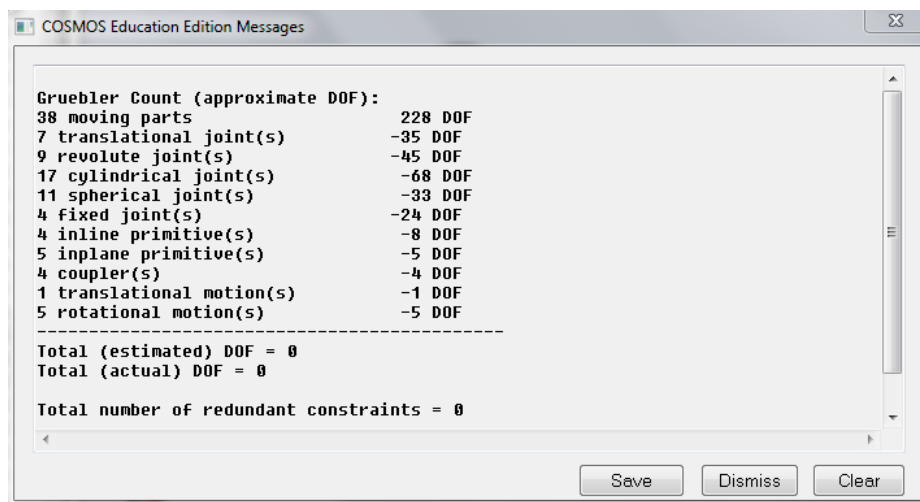


Figura 109. Análisis del movimiento del modelo vLTm_8445-1

Por último se ha realizado una simulación respecto de una base, que como ya se ha dicho, se mostrará mejor en la presentación visual de este trabajo.

5.4.5 Modelo vLTm_8480-2

Este modelo es el primero de los que este trabajo lleva por nombre, y ya se explicó su ensamblaje en apartados anteriores.

La parte de simulación ha constituido un reto importante, pues el complejo sistema de engranajes y cambios de marcha que el submarino incorpora es de complicado ajuste.

En la figura siguiente se puede observar la magnitud del problema.

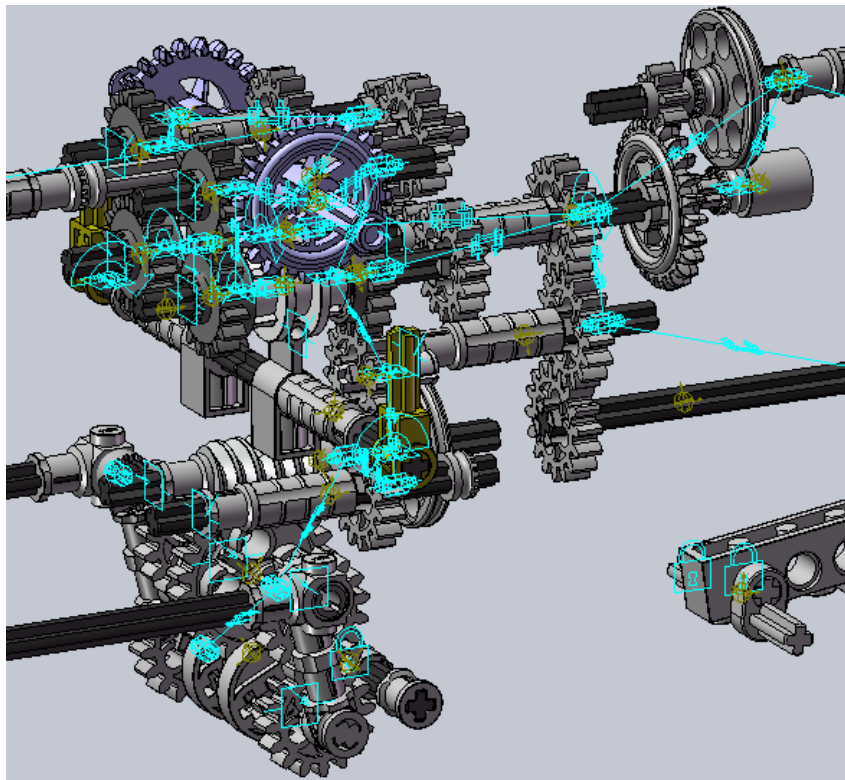


Figura 110. Sistema de engranajes y cambios de marcha del modelo vLTm_8480-2

El principal reto en la simulación ha sido coordinar los cambios de marcha, que requieren que los engranajes se temporicen. Es decir, se han creado los pares adecuados y se han dotado de movimiento entre unos instantes de tiempo, que son los mismos entre los que hemos dotado de movimiento a los actuadores.

Por ejemplo, ente los segundos 0 y 3, se moverán las palancas amarillas, entre los segundos 3 y 8 se moverán los mecanismos de bajada de la rampa y apertura del morro del submarino. Así pues, entre los segundos 3 y 8 se deben acoplar los engranajes que controlan dichos

movimientos. Lo que se ha realizado dotando de movimiento a los pares que unen esos engranajes con el chasis entre esos precisos segundos.

Como el sistema ha requerido de tantas restricciones de movimiento y dada la complejidad evidente del mismo, llegar a conseguir el modelo cinemático auto-alineado no ha sido posible en este caso. Pero se ha llegado a un sistema muy próximo al auto-alineado, como se puede observar en la siguiente figura.

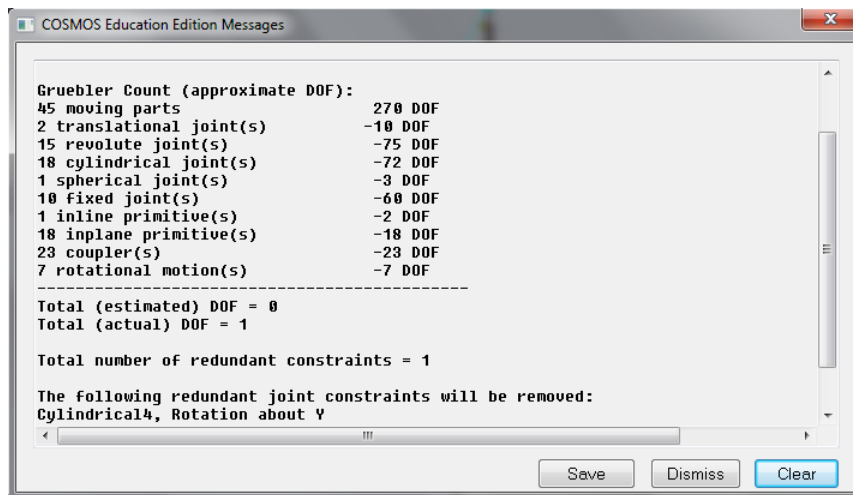


Figura 111. Análisis cinemático realizado por Cosmos del modelo vLTm_8480-2

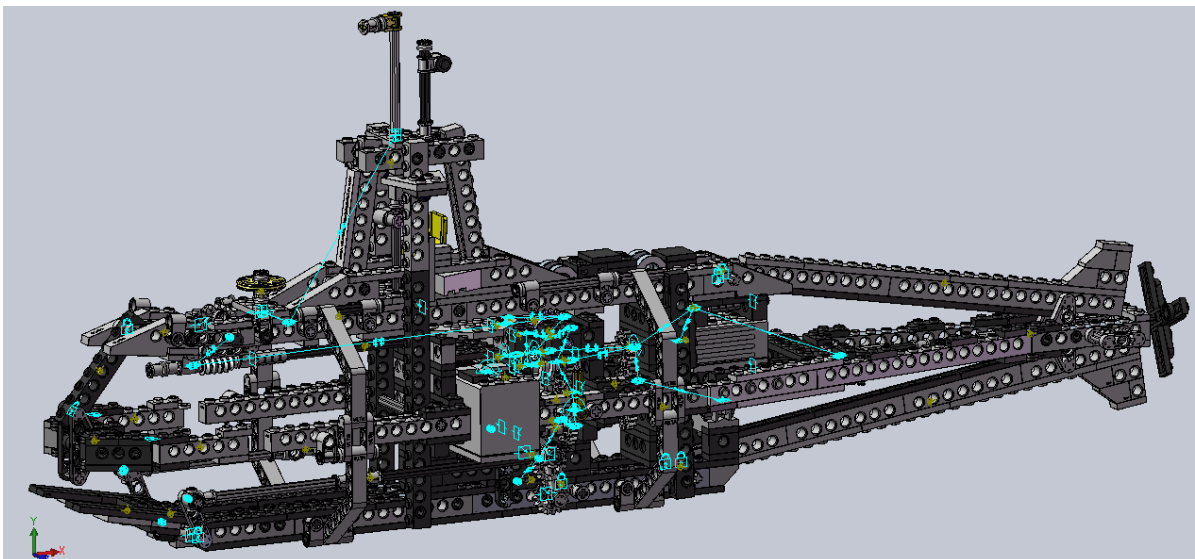


Figura 112. Modelo vLTm_8445-2 con sus pares cinemáticos y acoplamientos

6. CONCLUSIONES

Así pues, con el trabajo realizado, se han logrado adquirir una serie de conocimientos y competencias de grandísima utilidad de cara a un futuro laboral cada vez más inminente.

Está demostrado que la ingeniería mecánica ha sido, es y será una rama de la ingeniería muy importante. Por eso, con este trabajo, se ha pretendido mejorar conocimientos y adquirir otros nuevos relativos a esta parte de la ingeniería. Concretamente en el campo del diseño mecánico computacional.

También se han mejorado ciertas competencias adquiridas en el Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Algunas de estas competencias son: el diseño, cálculo y ensayo de todo tipo de máquinas y dispositivos industriales, desarrollo de la creatividad, resolución de problemas con iniciativa propia, la aplicación de conocimientos de ingeniería mecánica a conceptos y desarrollos tecnológicos del ámbito industrial, analización de procesos, equipos, instalaciones..., gestión de información y recursos provenientes de distintas fuentes, trabajo en un entorno multidisciplinar, así como la obvia capacidad de realizar un trabajo individual que sintetice e integre distintas competencias.

El uso de programas como SolidWorks (y Cosmos Motion), SolidEdge, Catia, y otros similares, así como el uso de los modelos Lego® Technics ha permitido la adquisición y mejora de otras habilidades. Entre ellas cabe destacar:

- El propio manejo del software, que ya de por sí ofrece una ventaja competitiva a la hora de encontrar trabajo por ejemplo.
- Se ha producido una clara mejora de la visión espacial, una cualidad muy necesaria por los ingenieros, que se enfrentan en muchas ocasiones a planos, instrucciones de montaje, simulaciones y visualizaciones en 3D.
- Aunque para la realización de este trabajo se han utilizado las máquinas Lego® Technic, el trabajo se puede extender a maquetas de todo tipo y a máquinas reales industriales.
- Se ha ampliado el conocimiento que se tenía sobre mecanismos, tanto como en aspectos de montaje, como de funcionamiento. Los modelos Lego® Technic han contribuido notablemente a ello.
- Se ha obtenido un amplio conocimiento sobre pares cinemáticos, que son los equivalentes a los cojinetes y rodamientos, y que son usados en entornos industriales.
- Seguir una metodología es algo que los ingenieros deben saber hacer. Mediante la realización de este trabajo se ha llevado a cabo una metodología (explicada en el apartado de introducción) propia de un entorno profesional y que es de aplicación para otras tareas similares. Se ha conseguido ser metódico, constante y ordenado, cualidades básicas propias de ingenieros.
- Como se dijo en la introducción, este TFG tiene un propósito de preparación profesional. Así pues, se ha conseguido una introducción en las tareas propias de un ingeniero industrial.

- Se ha entendido mediante aplicación directa el concepto de mecanismo auto-alineado, así como el de modelo cinemático auto-alineado. También se han justificado las ventajas notables que la consecución de ese modelo cinemático auto-alineado presenta.

Por tanto, esas son muchos de los conceptos, habilidades, conocimientos, competencias que se han adquirido con la realización de este trabajo final de grado y que además han supuesto la realización personal de este alumno y casi ingeniero industrial.

7. BIBLIOGRAFÍA

Publicaciones escritas

- Yoshihito, I., *The LEGO Technic Idea Book: FANTASTIC CONTRAPTIONS*, 2010.
- Yoshihito, I., *The LEGO Technic Idea Book: SIMPLE MACHINES*, 2010.
- Yoshihito, I., *The LEGO Technic Idea Book: WHEELED WONDERS*, 2010.
- Oliver Herrero, José L., *Modulo 5 - Simulación Cinemática y Dinámica Computacional de Máquinas - Elección Cojinetes - v2014-v*, 2014.
- Oliver Herrero, José L., *Modulo-1 - Creación Modelos Virtuales Máquinas - v2014*, 2014.
- Oliver Herrero, José L., *Módulo-1 – Creación Modelo Virtuales Lego Technic – Actividad 5 – v2013*, 2013
- L. N. Reshetiov, *Self-aligning mechanisms*, Mir, 1982

Ayuda de programas

- Guía del usuario en línea de SolidWorks 2007
- Documento de ayuda de COSMOSMotion

Páginas Web

- <http://www.Lego.com>
- <http://www.Lego.com/en-us/technic>
- <http://www.virtualtechnmodels.com>
- <http://www.isogawastudio.co.jp>
- <http://www.bricklink.com>
- <http://www.brickset.com>
- <http://www.technicbricks.com>
- <http://www.wikipedia.com>
- <http://wahackforo.com/t-19471/hilo-mecanica-pablogtd>
- <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-655714500-Lego-technic-mindstorms-nxt-ev3-robotica-diferencial-modelo2- JM>
- http://sanchezmecanica.mex.tl/844518_UNIDAD-1.html

PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	83
2. CAPÍTULO 1: SOFTWARE	83
3. CAPÍTULO 2: HARDWARE.....	84
4. CAPÍTULO 3: MODELOS LEGO® TECHNIC	84
5. CAPÍTULO 4: MODELOS VIRTUALES LEGO® TECHNIC	85
6. RESUMEN	86

1. INTRODUCCIÓN

Un objetivo de este Trabajo Final de Grado es evaluar económicamente el trabajo que se ha realizado, realizando un presupuesto.

El presupuesto de este TFG se ha dividido en capítulos, según el tipo de gasto o tipo de partida que se va a evaluar. Un presupuesto debe dividirse en tantos presupuestos parciales como unidades o partes diferenciadas tenga el proyecto. Estos capítulos han sido Software, Hardware, Modelos Lego® Technic y Modelos Virtuales Lego® Technic.

También cabe decir en esta introducción que el presupuesto se ha enfocado de manera individualizada, es decir, se ha supuesto que un solo cliente acepta el encargo y es él el que corre con todos los gastos. Para un enfoque más comercial, con múltiples clientes, oferta, demanda, etc., se deberían hacer estudios de mercado, diferentes evaluaciones y demás.

2. CAPÍTULO 1: SOFTWARE

El software que se ha utilizado para la realización de este proyecto y que por tanto debe contemplarse en este presupuesto es SolidWorks, de Dassault Systemes. Debe adquirirse una licencia anual como mínimo. Como el coste de la licencia es unitario, se divide éste entre las horas de trabajo dedicadas a este proyecto, pues supondremos que podemos llevar a cabo proyectos similares a lo largo del año, y repartir así esta carga económica.

Software	Unidades	Horas al año (h)	Horas de proyecto (h)	Coste unitario (€/unidad)	Coste (€)
SolidWorks 2007 SP5.0	1	2000	300	5300	795
				TOTAL	795

Tabla 4. Costes Software

3. CAPÍTULO 2: HARDWARE

Para la realización de este trabajo se ha hecho uso de un ordenador personal que ha tenido que cumplir con unas mínimas especificaciones.

Algunas de estas especificaciones o requisitos son:

- Sistema operativo Windows 7, Windows Vista o Windows XP.
- 2 GB o más de memoria RAM.
- 5 GB o más de memoria en disco.
- Procesador Intel o AMD con soporte SSE2.

Para un mejor funcionamiento del software se ha optado por un ordenador personal con Windows 7 (SP1), procesador Intel Core i7, y 6 GB de memoria RAM, con espacio más que suficiente en disco.

Como el cliente no va a correr con todos los gastos de este ordenador personal se ha considerado un período de amortización del mismo de 5 años.

Hardware	Unidades	Horas al año (h)	Horas de proyecto (h)	Coste unitario (€/unidad)	Amortización (%)	Coste (€)
Ordenador Personal	1	2000	300	1100	20%	33
					TOTAL	33

Tabla 5. Costes Hardware

4. CAPÍTULO 3: MODELOS LEGO® TECHNIC

Se ha hecho uso de unos modelos Lego® Technic reales que deberemos reflejar en el coste del trabajo. Como se ha contado con los documentos eDrawings para casi todos los modelos simulados sólo se han reflejado en el presupuesto el modelo 41999 y el modelo 8480-2, ya que son los que el director del proyecto tenía en su colección y de los que hemos dispuesto.

Modelo	Unidades	Coste unitario (€/unidad)	Coste (€)
41999	1	178.18	178.18
8480-2	1	141,47	141.47
TOTAL			319.65

Tabla 6. Costes Modelos Lego® Technic

5. CAPÍTULO 4: MODELOS VIRTUALES LEGO® TECHNIC

En esta parte del presupuesto se ha detallado el coste que supone ensamblar, auto-alinear y simular los modelos que llevan por título este trabajo.

Modelo	Procesos	Tiempo invertido (h)	Coste unitario (€/h)	Coste procesos (€)	Coste modelo (€)
8480-2	Ensamblaje virtual	35	30	1050	2130
	Auto-alineado	30	30	900	
	Simulación	6	30	180	
8436	Ensamblaje virtual	55	30	1650	1650
8458-1	Ensamblaje virtual	45	30	1350	1350
41999	Ensamblaje real	10	30	300	2100
	Ensamblaje virtual	60	30	1800	
TOTAL					7230

Tabla 7. Costes Modelos Virtuales Lego® Technic

6. RESUMEN

A continuación se ofrece un resumen con los costes totales de cada apartado, y el coste total del proyecto. Se ha aplicado un 21% de IVA, y un 6% en concepto de beneficio industrial.

CAPÍTULO	Coste (€)
1. Software	795,00
2. Hardware	33,00
3. Modelos Lego® Technic	319,65
4. Modelos Virtuales Lego® Technic	7230,00
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	8.377,65
Beneficio Industrial (6%)	502,66
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	8.880,31
IVA (21%)	1.864,87
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	10.745,18

Tabla 8. Costes Totales

Asciende el presente presupuesto a la expresada cantidad de:

DIEZ MIL SETECIENTOS CUARENTA Y CINCO EUROS CON DIECIOCHO CÉNTIMOS.