



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 DE LOS MODELOS
LEGO® TECHNIC:**

**LTm 8480-1; LTm 42000-2; vLTm 8466-1;
vLTm 8285-4.**

AUTOR: ALEJANDRO ALONSO GONZÁLEZ

TUTOR: JOSE LUÍS OLIVER HERRERO

Curso Académico: 2013 – 14



CONTENIDO

MEMORIA _____ 5

PRESUPUESTO _____ 123



MEMORIA

1. Resumen y objeto del proyecto	9
2. Introducción	11
2.1. El modelo LEGO Technic	11
2.2. El modelo LEGO Technic virtual	11
2.3. Utilidad de los modelos LEGO Technic virtuales	12
2.4. Los componentes LEGO Technic	13
2.5. Mecanismos reales y sus equivalentes LEGO Technic	14
2.6. Modelos Isogawa Yoshihito	15
3. Ensamblado	17
3.1. Presentación y objetivos	17
3.2. Proceso de montaje	17
3.2.1. Selección del modelo	17
3.2.2. Selección de los componentes	18
3.2.3. Identificación de las piezas	19
3.2.4. Ensamblado	19
3.3. Ensamblaje en SolidWorks 2007	20
3.3.1. Nomenclatura	20
3.3.2. Condiciones	21
3.3.3. Relaciones de posición	22
3.3.3.1. Relaciones de posición estándar	23
3.3.3.2. Relaciones de posición avanzadas	26
3.3.4. El sistema LEGO Technic en SolidWorks 2007	27
3.3.5. Comprobación	30
4. Compactación	31
5. Modelo cinemático autoalineador	33
5.1. Presentación y objetivos	33
5.2. Introducción a los sistemas mecánicos	33



5.3. Conceptos básicos	34
5.3.1. Impulsor, seguidor y factor de transmisión	34
5.3.2. Máquina y mecanismo	35
5.4. Estudio cinemático	36
5.4.1. Movimiento plano	36
5.4.2. La cadena cinemática	37
5.4.3. Evolución temporal del movimiento en un mecanismo	37
5.5. Pares cinemáticos	38
5.6. Movilidad en los mecanismos	40
5.6.1. Cálculo de la movilidad en mecanismos planos	40
5.6.2. Cálculo de la movilidad en mecanismos espaciales	40
5.6.3. Diagramas cinemáticos	41
5.7. Mecanismo autoalineador	42
5.8. Modelo cinemático autoalineador en SolidWorks; Aplicación integrada	
COSMOS Motion	43
5.8.1. Entorno de trabajo	43
5.8.2. Piezas	44
5.8.3. Pares cinemáticos	44
5.8.3.1. Revolución	45
5.8.3.2. Traslacional	46
5.8.3.3. Cilíndrico	47
5.8.3.4. Esférico	48
5.8.3.5. Universal	49
5.8.3.6. Tornillo	51
5.8.3.7. Planar	51
5.8.3.8. Fijo	51
5.8.4. Pares primitivos	52
5.8.4.1. En la línea	52
5.8.4.2. En el plano	53
5.8.4.3. Orientación	54
5.8.4.4. Paralelismo	54
5.8.4.5. Perpendicularidad	55
5.8.5. Acoplamientos	56
5.8.5.1. Engranajes y poleas	56



5.8.5.2.	Piñón – cremallera	57
5.8.5.3.	Tornillo sin fin	57
5.8.6.	GDL del mecanismo	58
6.	Simulación del modelo virtual	59
6.1.	Introducción	59
6.2.	Simulación del movimiento en COSMOS	59
6.2.1.	Definición del movimiento	59
6.2.1.1.	Constante	59
6.2.1.2.	Armónica	60
6.2.1.3.	Spline	61
6.2.1.4.	Escalón	61
6.2.2.	Entorno y parámetros de la simulación	62
6.2.2.1.	Entorno: creación de la base	62
6.2.2.2.	Entorno: creación del contacto rueda – base	63
6.2.2.3.	Parámetros de la simulación	64
7.	Creación y simulación de modelos virtuales	69
7.1.	Mecanismos Isogawa Yoshihito	69
7.1.1.	Creación modelo virtual TORA - 002	69
7.1.2.	Creación modelo virtual TORA - 008	70
7.1.3.	Creación modelo virtual TORA - 009	72
7.1.4.	Creación modelo virtual TORA - 013	73
7.1.5.	Creación modelo virtual TORA - 026	74
7.1.6.	Creación modelo virtual TORA - 037	75
7.1.7.	Creación modelo virtual TORA - 040	76
7.1.8.	Creación modelo virtual TORA - 051	77
7.1.9.	Creación modelo virtual TORA - 059	78
7.1.10.	Creación modelo virtual TORA - 062	79
7.1.11.	Creación modelo virtual TORA - 075	80
7.1.12.	Creación modelo virtual TORA - 079	81
7.1.13.	Creación modelo virtual TORA - 093	82
7.1.14.	Creación modelo virtual TORA - 098	83
7.1.15.	Creación modelo virtual TORA - 102	84
7.1.16.	Creación modelo virtual TORA - 107	85
7.1.17.	Creación modelo virtual T – 1610	87
7.2.	Creación modelo virtual vLTm – 8890 – 5	89



7.3. Creación modelo virtual TnMm – 2020	91
7.4. Creación modelo virtual vLTm – 8868 – 1	93
7.5. Creación modelo virtual vLTm – 8466 – 1	97
7.6. Creación modelo virtual vLTm – 8480 – 2	105
7.7. Creación modelo virtual vLTm – 42000 – 2	107
7.8. Simulación del modelo virtual TnMm – 0326 desde su creación mediante piezas compactadas	109
7.9. Simulación del modelo virtual vLTm – 8853 – 1 desde su creación mediante piezas compactadas	113
7.10. Simulación del modelo virtual vLTm – 8860 – 1 desde su creación mediante piezas compactadas	115
7.11. Simulación del modelo virtual vLTm – 8285 – 4 desde su creación mediante piezas compactadas	117
7.12. Visualización de las simulaciones	120
8. Bibliografía	121

1. RESUMEN Y OBJETO DEL PROYECTO.

Este proyecto forma parte de una iniciativa que tiene por objeto mejorar el conocimiento que sobre las herramientas de diseño en ingeniería mecánica se debería facilitar en una escuela de ingenieros industriales. Y desde un punto de vista profesional, forma parte de la misma iniciativa, orientada a actualizar los conocimientos que sobre esta rama de la ingeniería tienen los actuales titulados que por motivos de trabajo han de utilizar las mencionadas herramientas.

Para ello se ha considerado adecuado utilizar como material base un sistema de construcción modular muy popular entre personas de todas las edades, y al mismo tiempo de un nivel de sofisticación técnica notablemente elevado debido al equipo de ingenieros que se encargan de crear y proponer nuevos modelos para su comercialización. El sistema elegido es el denominado comercialmente “Lego Technic”, del cual se comercializa una amplia gama de modelos variando el tamaño, complejidad y precio.

El planteamiento que se ha utilizado ha venido desarrollándose desde hace 8 años como material docente en las asignaturas que el profesor responsable de este proyecto ha impartido en la Escuela, y sigue desarrollándose actualmente. El proceso es el siguiente:

1) En primer lugar es necesario crear modelos virtuales de los componentes reales que se suministran al comprar cualquier caja Lego Technic. Para ello es necesario utilizar un programa de CAD.

2) Una vez se dispone de un número suficiente de estos componentes virtuales, tras elegir algunos modelos de los que se pueden encontrar en la página web creada al efecto, www.virtualtechnicmodels.com, se procede a la creación virtual con el mismo programa de CAD utilizado anteriormente, o con cualquier otro que nos pueda interesar, de las piezas que a la vista del modelo real, o de sus instrucciones, lo constituyen. El concepto de pieza es el siguiente: conjunto de componentes virtuales que no poseen movimiento relativo entre ellos en el modelo final, o si lo poseen es irrelevante desde un punto de vista operativo. Una fase del proceso de diseño consiste en la identificación de éstas piezas.

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

4) Partiendo de las piezas que constituyen cada modelo, se procede al montaje virtual del modelo en SolidWorks, y a realizar una labor técnica sofisticada en ingeniería mecánica: la elaboración de un modelo cinemático autoalineador. Proceso que también constituye una innovación en el proyecto.

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

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

2. INTRODUCCIÓN

2.1. El modelo LEGO Technic

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

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

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

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

2.2. El modelo LEGO Technic virtual

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

Así como en la construcción tradicional de Máquinas Lego Technic se dispone del conjunto necesario y suficiente de componentes Lego Technic reales para que siguiendo las instrucciones se pueda obtener la máquina deseada, en el montaje de Máquinas Lego Technic Virtuales, tal y como se plantea en este proyecto, se dispone de los Componentes Lego Technic Virtuales necesarios y suficientes para, con la ayuda de las instrucciones originales de los modelos, documentos virtuales eDrawings o con el modelo real como guía, según el caso, poder crear la Máquina Lego Technic Virtual equiparable a la real, pero con una característica fundamental: durante el proceso de creación del modelo virtual, se han identificado como piezas virtuales aquellos conjuntos de componentes Lego Technic que en la máquina real no tienen movimiento relativo entre ellos.



Fig. 1. Componentes LEGO Technic virtuales

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

2.3. Utilidad de los modelos LEGO Technic virtuales.

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

Considerando esto, la utilidad de una colección de modelos LEGO Technic virtuales es evidente ya que, abarcando mecanismos desde los más simples a modelos de complejidad

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

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

2.4. Los componentes LEGO Technic.

La característica fundamental de estos componentes es que sus dimensiones siguen una norma que permiten la creación de innumerables mecanismos utilizando los mismos componentes. Existen componentes de tipo engranaje, pasador, viga, eje... que en combinación unos con otros permiten ensamblar los diferentes modelos de los set comerciales LEGO Technic (si bien algunos modelos pueden contener componentes creados exclusivamente para dicho modelo), así como cualquier mecanismo ideado por el usuario.

A continuación se muestran algunos componentes LEGO Technic reales junto a sus equivalentes virtuales.

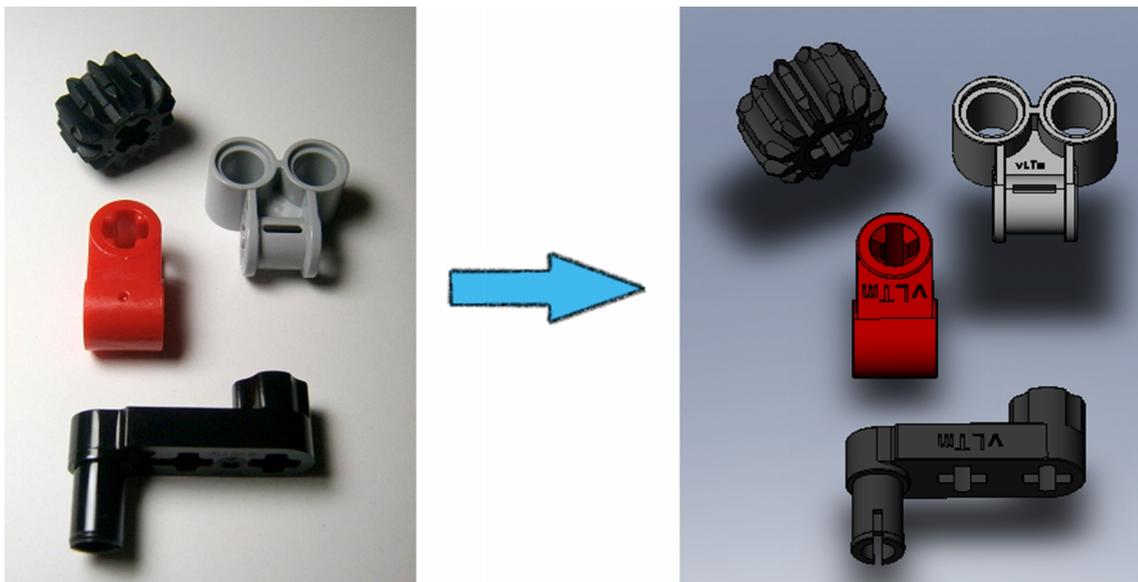


Fig. 2. Componentes LEGO Technic y sus equivalentes virtuales

2.5. Mecanismos reales y sus equivalentes LEGO Technic.

Se ha de insistir en que, si bien los modelos LEGO Technic son un producto de entretenimiento, han llegado a alcanzar un nivel de sofisticación y de fidelidad a mecanismos reales muy elevados.

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

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

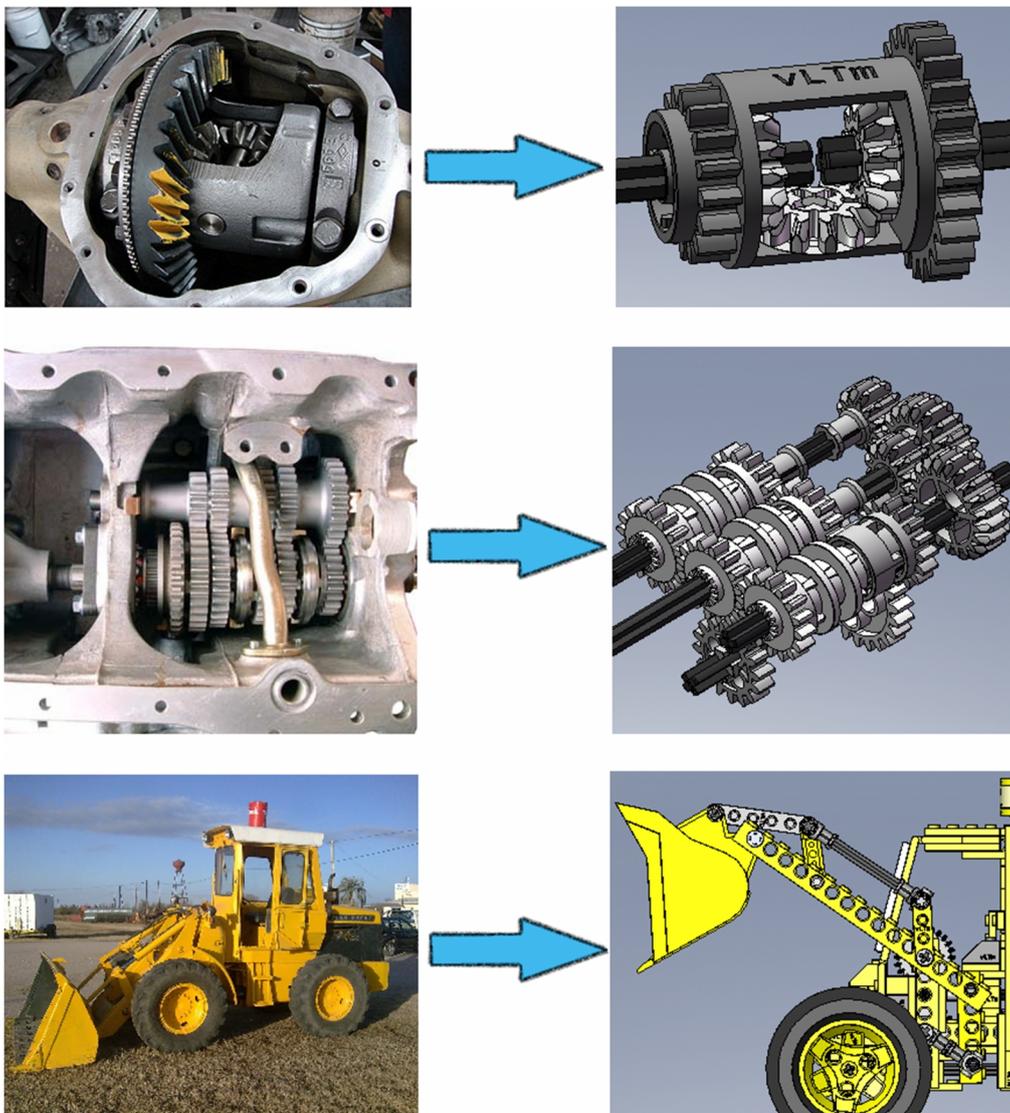


Fig. 3. Mecanismos reales y sus equivalentes virtuales:

Transmisión diferencial, caja de cambios y pala cargadora

2.6. Modelos Isogawa Yoshihito.

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

En la fase inicial de este trabajo de fin de grado, con el objetivo de familiarizarse con el entorno de trabajo de SolidWorks 2007 y con el sistema LEGO Technic, se han construido virtualmente varios mecanismos sencillos extraídos del libro “*LEGO Technic Tora no Maki*”, de Isogawa Yoshihito.

Estos modelos de Isogawa Yoshihito forman una colección de mecanismos simples reproducibles virtualmente con la que es fácil iniciarse en la construcción virtual de modelos LEGO Technic.



3. ENSAMBLADO

3.1. Presentación y objetivos.

En esta fase del trabajo se aborda por vez primera la creación de mecanismos en un entorno virtual.

Ya se ha descrito en qué consisten los conceptos de componente y pieza. Es ahora cuando combinando los diferentes componentes se crearán las piezas que a su vez formen el modelo. Para ello se definirá que relaciones de posición existen entre los componentes/piezas y qué movimientos habrán de transmitir si es el caso.

Al igual que en un *set* comercial LEGO Technic, a la hora de abordar la construcción de un mecanismo virtual lo primero es disponer de los componentes necesarios que formarán el mecanismo virtual para, tras identificar las piezas que lo constituyen, proceder al ensamblado del mismo.

Es objetivo de esta fase el obtener una máquina LEGO Technic virtual habiendo diferenciado las piezas que la forman y comprobando que el movimiento del mecanismo es el apuntado teóricamente. Durante esta fase se consigue la familiarización con el entorno de trabajo de SolidWorks 2007 así como afianzar los conocimientos sobre los pares cinemáticos que permitirán definir el movimiento del mecanismo.

3.2. Proceso de montaje.

Independientemente del modelo que se pretenda construir virtualmente se seguirán los mismos pasos durante la ejecución: elección del modelo, selección de los componentes necesarios, identificación de las piezas y ensamblado.

3.2.1. Selección del modelo

Dependiendo del nivel de dificultad en cuanto a la complejidad del mecanismo y al número de componentes que forman el modelo, se seguirá un proceso de aprendizaje comenzando con mecanismos simples, elegidos de entre la colección de modelos de Isogawa Yoshihito, para después comenzar la construcción de modelos LEGO Technic cada vez más complejos mecánicamente.

Este procedimiento permitirá una familiarización progresiva tanto con el entorno de trabajo de SolidWorks como con el sistema LEGO Technic y con los mecanismos básicos que forman parte de modelos más complejos.

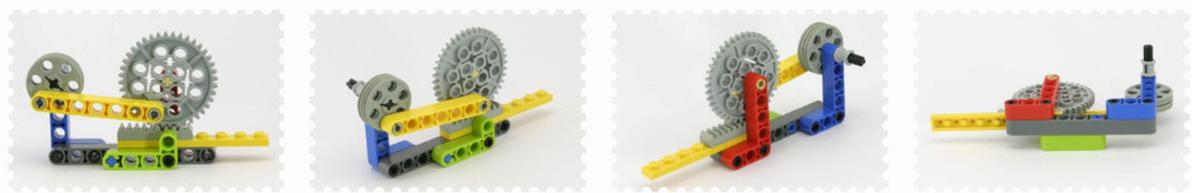


Fig. 4. Mecanismo 102 - Isogawa Yoshihito

3.2.2. Selección de los componentes

Una vez se tiene el modelo objetivo, el siguiente paso es seleccionar los componentes necesarios para su montaje.

En modelos sencillos como el mostrado en la figura 4, la identificación visual de los componentes es fácil. Para modelos más grandes se tienen las propias instrucciones del modelo LEGO Technic o se puede recurrir a documentos **eDrawings (*.easm)** si el modelo ha sido creado con anterioridad y se dispone de éste documento, en el cual se pueden identificar fácilmente los componentes necesarios.

Con los componentes ya identificados se procede a la identificación de las piezas.

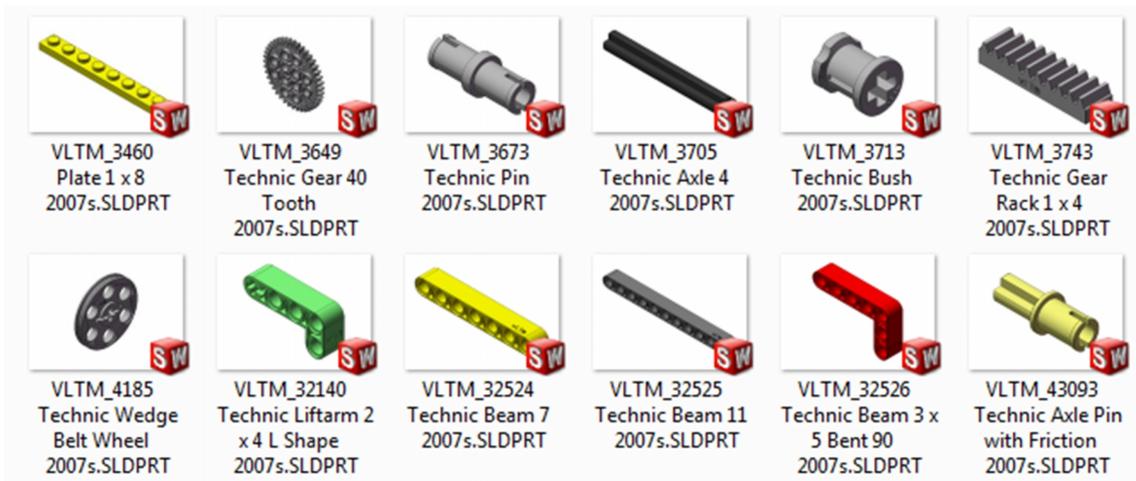


Fig. 5. Componentes necesarios para el mecanismo 102 - Isogawa Yoshihito

3.2.3. Identificación de las piezas

El siguiente paso es identificar qué componentes se agruparán en bloques sin movimiento relativo entre ellos y qué movimiento relativo respecto al resto de componentes existirá.

Este es un proceso crítico, pues requiere una buena visión espacial. Si bien es fácil identificar el movimiento de un mecanismo sencillo, en modelos avanzados en los que se combinen varios de estos mecanismos simples la tarea es ya complicada.

Como en la identificación de los componentes, una gran ayuda es la disponibilidad del documento **eDrawings** del modelo, pues proporciona una primera idea de las piezas creadas para la construcción del modelo. Si el caso es que no se dispone de este documento, el modelo real montado muestra el movimiento que el mecanismo posee, si bien es más complicado pasar esta información al entorno virtual.

Con las piezas identificadas se procede al ensamblado de las mismas, construyendo con componentes virtuales (archivos ***.sldprt**) las piezas en ensamblajes (archivos ***.sldasm**)

Si bien en archivos tipo ensamblaje se puede incluir repetidas veces un mismo componente virtual, cada pieza que forme el modelo final ha de ser única y por ello, aun cuando existan piezas iguales dentro de un modelo, cada pieza ha de ser guardada en un archivo ensamblaje diferente.



Fig. 6. Piezas constituyentes del mecanismo 102 - Isogawa Yoshihito

3.2.4. Ensamblado

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



Fig. 7. Ensamblaje del mecanismo 102 - Isogawa Yoshihito

3.3. Ensamblaje en SolidWorks 2007.

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

3.3.1. Nomenclatura

Las piezas se nombrarán siguiendo el siguiente formato:

vltm_xxxx-x_part-0yy0_2014.sldasm

Donde “xxx-x” responde al código del modelo LEGO Technic (la última cifra tras el guión muestra en qué configuración se monta el modelo, pues según el modelo, los *sets* comercializados permiten montar el modelo en su configuración principal o secundaria, dando como resultado una máquina similar). Las cifras “yy” responden al número de orden de la pieza dentro del montaje. Habrá ocasiones en las que una pieza se deberá formar a su vez de otras piezas con lo que la cifra “0” tras “yy” reflejará el orden de cada ensamblaje dentro de la pieza “yy”. Más adelante se explican las condiciones en las que se deberá proceder de tal modo.

Se creará entonces el ensamblaje del montaje final así como un ensamblaje que muestre las piezas necesarias sin conexión entre ellas para una inmediata visualización de las piezas que forman el modelo. Se nombrarán respectivamente, y siguiendo el criterio anteriormente expuesto:

vLTm_xxxx-x_2014.sldasm

vLTm_xxxx-x_parts_2014.sldasm

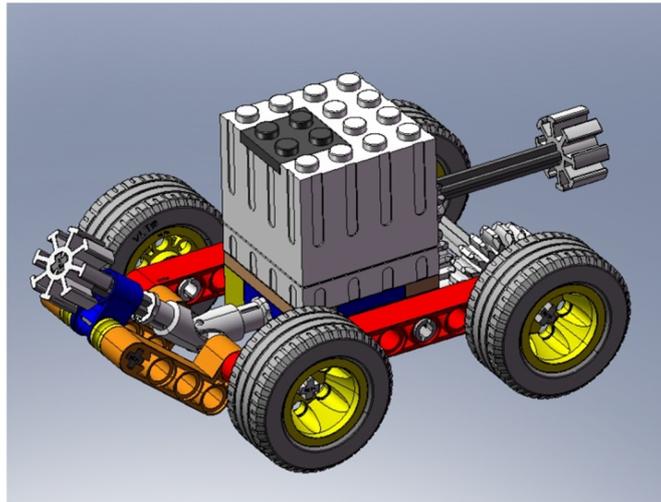


Fig. 8. Ensamblaje del montaje TnMm_1610_2014.sldasm

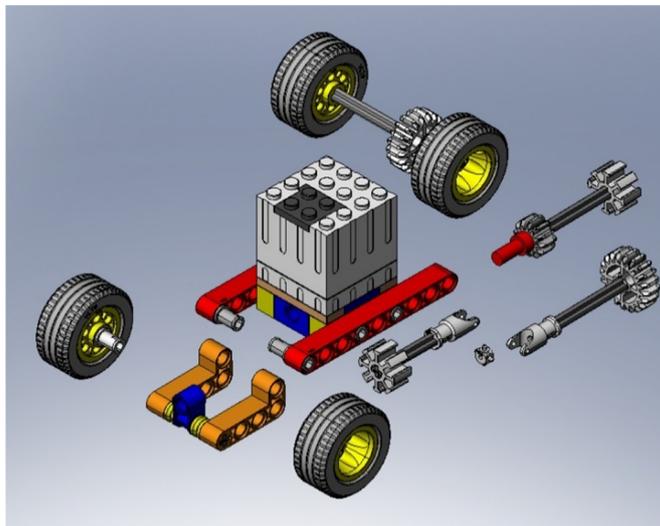


Fig. 9 Ensamblaje de las partes TnMm_1610_2014-parts.sldasm

3.3.2. Condiciones

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

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

Con todo lo expuesto anteriormente ya se puede proceder al montaje del modelo.

Para ello, sobre el ensamblaje del modelo final (“vLTm_xxxx-x_2014.sldasm”) se van añadiendo las piezas definiendo qué relaciones de posición existirán entre ellas.

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

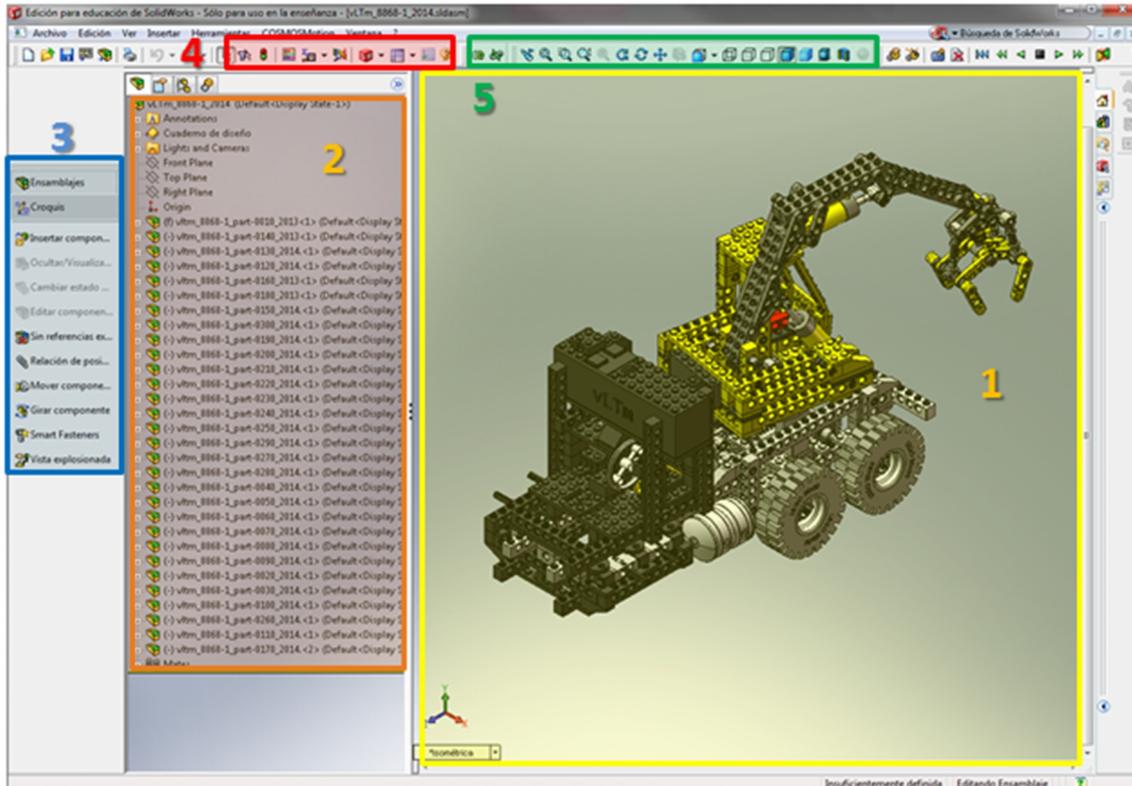


Fig. 10. Entorno de Trabajo de SolidWorks 2007

En la Fig. 10 se muestra el entorno de trabajo de SolidWorks 2007. Se puede apreciar la zona de visualización del modelo (1), desde la cual se interactúa con el mismo; la lista de entidades (2), que comprende los componentes o ensamblajes que forman el montaje, el listado de relaciones de posición creadas, anotaciones, planos de referencia... ; el listado de comandos (3), como “insertar componente”, “relaciones de posición”, “girar componente”, “croquis”... todos ellos necesarios durante el trabajo con el modelo; Herramientas (4) como “medir”, “editar color”, “reconstrucción”...; y los comandos de visualización (5). Estas son las características más destacables en este entorno de trabajo, si bien SolidWorks posee otras características no mencionadas muy interesantes, pero que no han sido de importancia para este trabajo.

3.3.3. Relaciones de posición

Como se muestra en la Figura 11, en SolidWorks 2007 existen dos conjuntos de relaciones de posición: las estándar y las avanzadas. El primer conjunto sirve para definir la posición y orientación del elemento, pudiendo restringirlo hasta eliminar todo grado de

libertad espacial (esto es, fijarlo). El segundo grupo permite definir relaciones como las de tipo engranaje, que permitirán especificar cómo se transmite el movimiento entre elementos.

Asimismo, como se ha comentado anteriormente, es conveniente fijar el chasis en el espacio tridimensional para, sobre esta pieza, ir definiendo la posición del resto que forman el modelo. Al tener una pieza fija el movimiento se comprueba con facilidad y de forma más intuitiva.

Pasamos ahora a explicar las diferentes relaciones de posición en SolidWorks 2007.

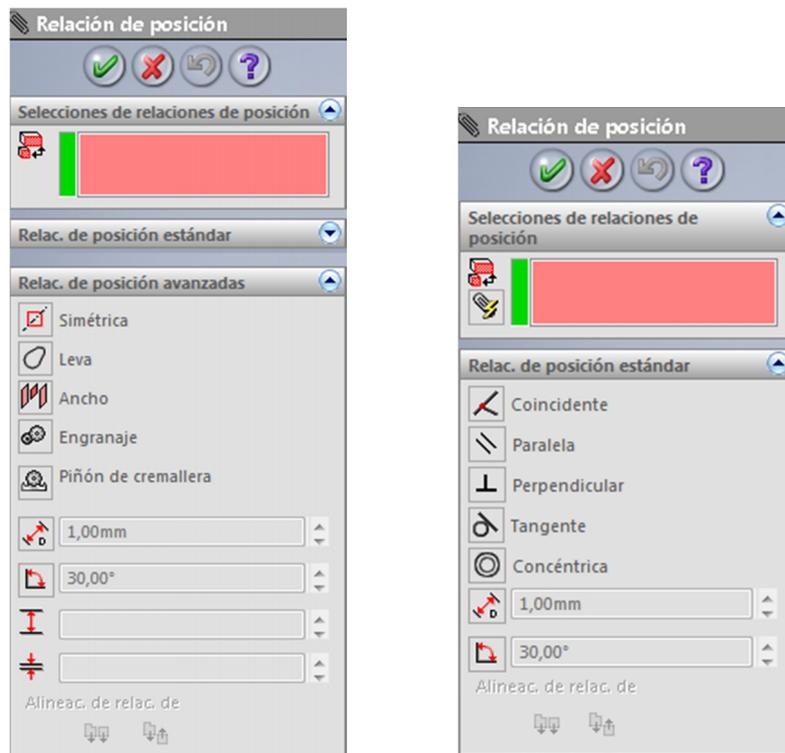


Fig. 11. Menú de relaciones de posición avanzadas y estándar en SolidWorks 2007

3.3.3.1. Relaciones de posición estándar

- **Coincidente:** Con esta relación se consigue que superficies, puntos o rectas contengan la una a la otra o que pasen a ser un único elemento si son del mismo tipo (Figura 12).
- **Paralelo / Perpendicular:** Permite definir paralelismo o perpendicular entre los planos definidos por dos caras planas, recta-plano o dos rectas (Figura 13).
- **Tangente:** Permite que dos superficies o curvas mantengan una relación de tangencia sobre toda la superficie. Útil cuando se quiere conseguir un deslizamiento (Figura 14).
- **Concéntrica:** Muy importante en la línea LEGO Technic por su sistema viga-pasador para crear las estructuras. Hace coincidir el eje o centro de una superficie curva con el de otra o recta o punto (Figura 15).

- Distancia / Ángulo: Fija la distancia entre dos elementos o el ángulo que forman (Figura 16).

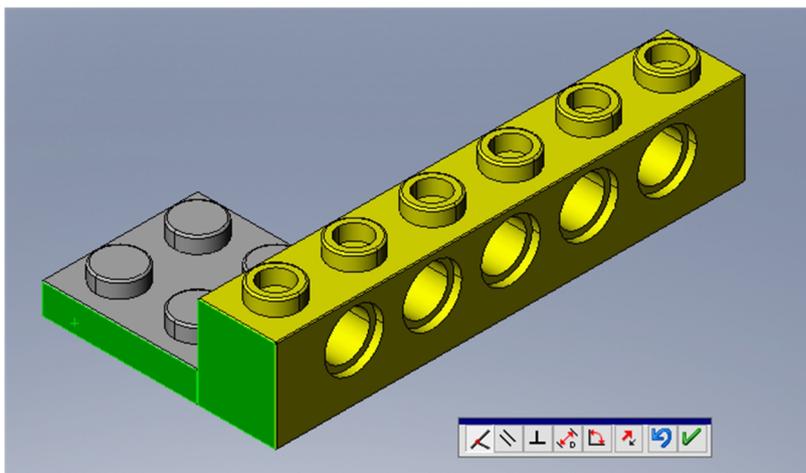


Fig. 12. Relación de coincidencia entre dos caras planas

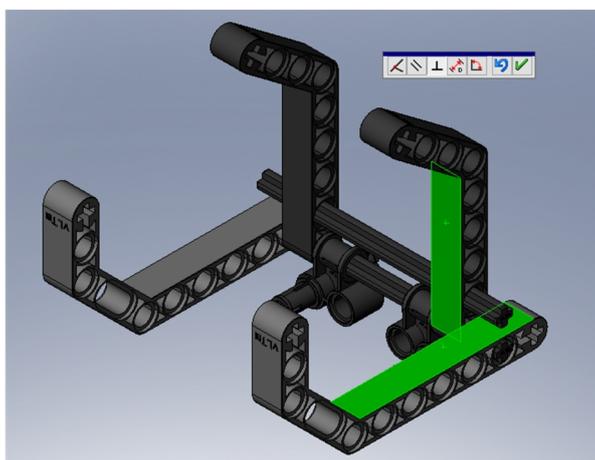


Fig. 13. Relación de perpendicularidad entre dos caras planas

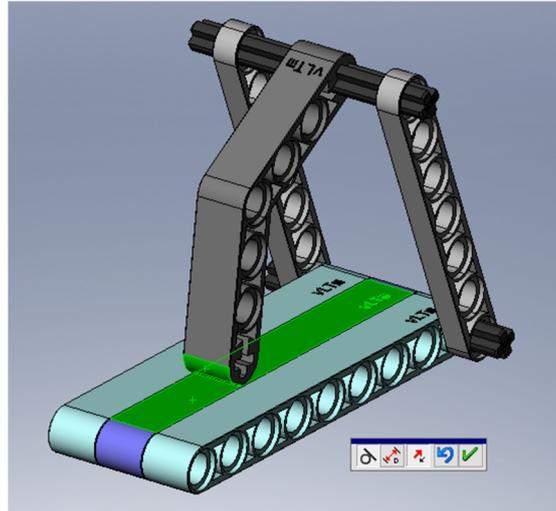


Fig. 14. Relación de tangencia entre dos superficies

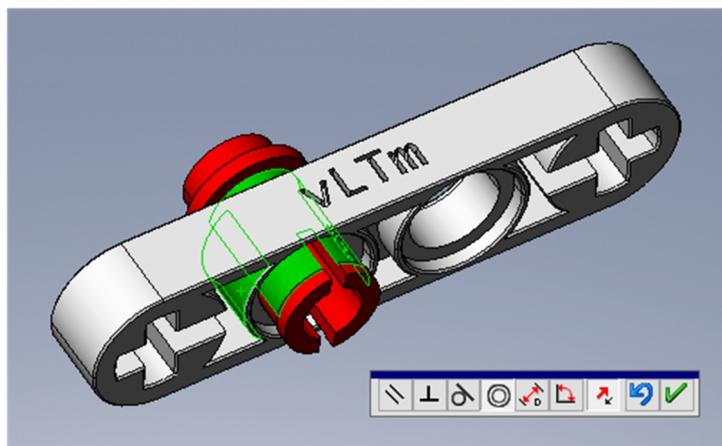


Fig. 15. Relación de concetricidad entre dos superficies cilíndricas

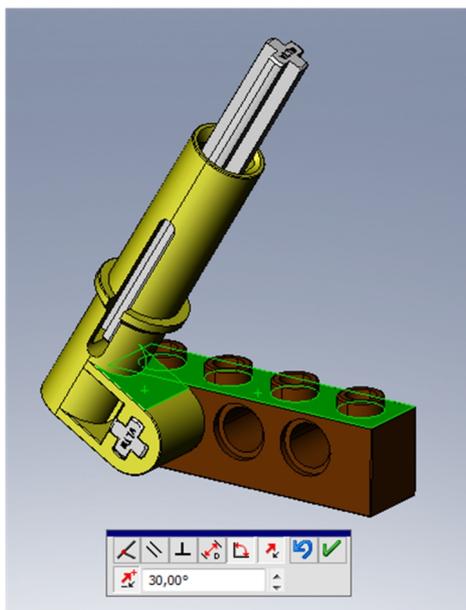


Fig. 16. Relación de ángulo entre dos caras planas

3.3.3.2. Relaciones de posición avanzadas

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

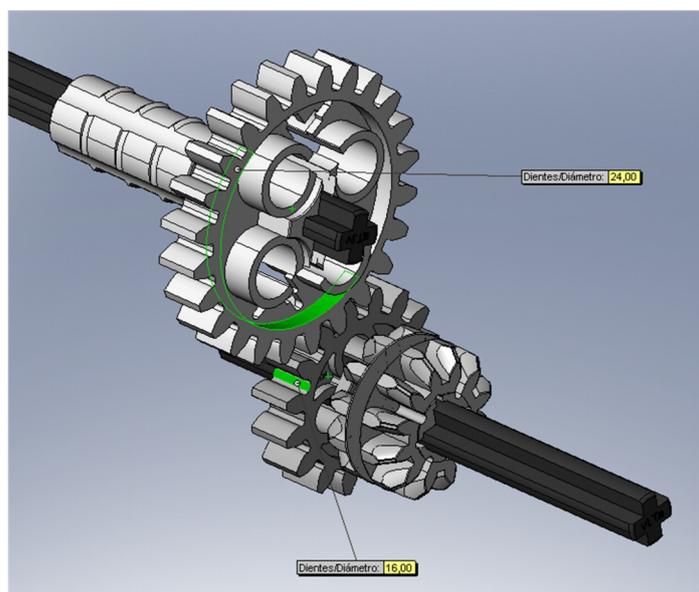


Fig. 17. Relación de engranaje entre dos ruedas dentadas

- Piñón cremallera:** Análogamente al caso de engranaje, define el desplazamiento lateral de la cremallera por vuelta completa de la rueda dentada.

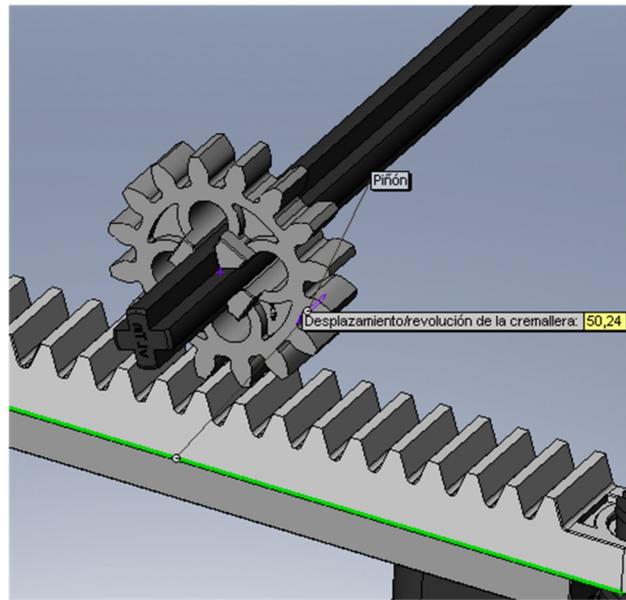


Fig. 18. Relación piñón-cremallera

3.3.4. El sistema LEGO Technic en SolidWorks 2007

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

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

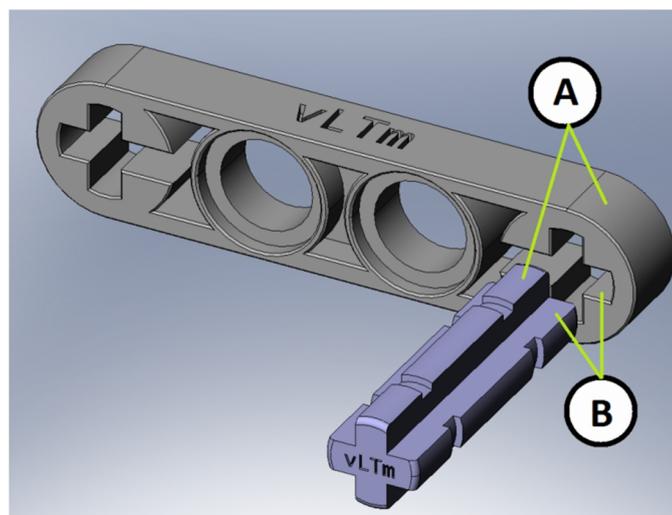


Fig. 19. Unión eje-componente sin rotación

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

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

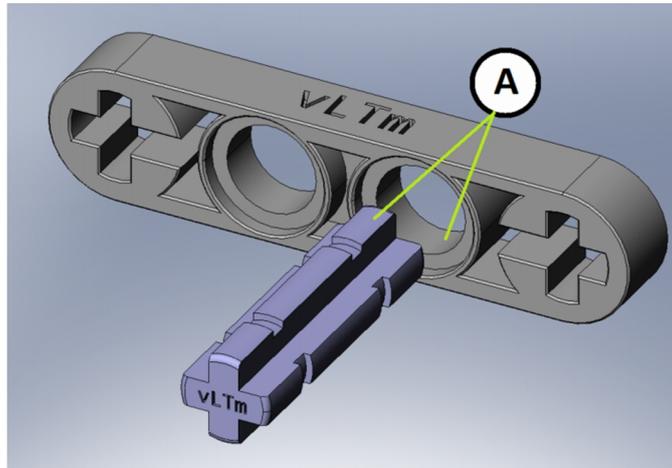


Fig. 20. Unión eje-viga con rotación

- Componente-componente sin rotación:

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

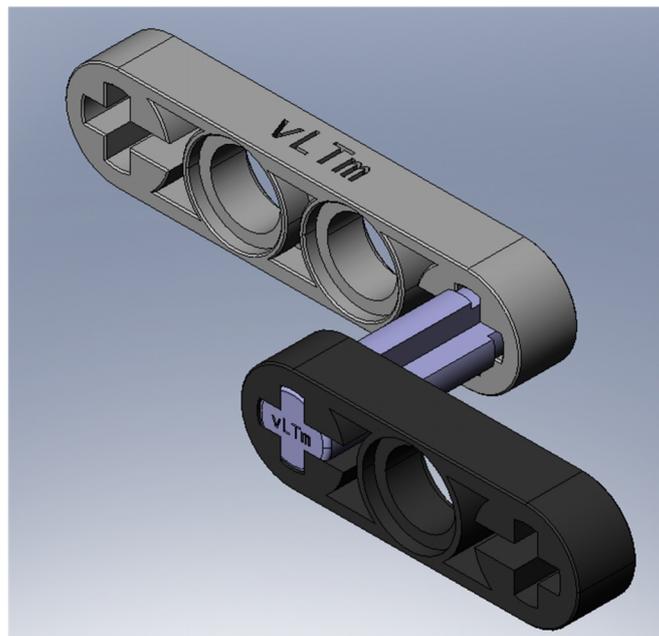


Fig. 21. Unión componente-componente sin rotación

- Componente-componente con rotación:

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

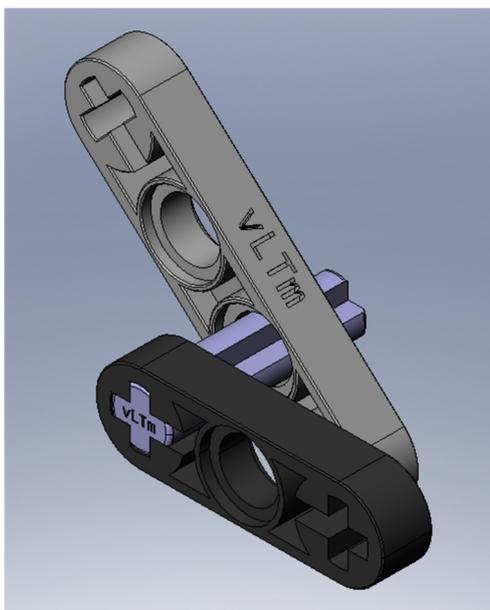


Fig. 22. Unión componente-componente con rotación

- Unión de componentes del sistema de botones:

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

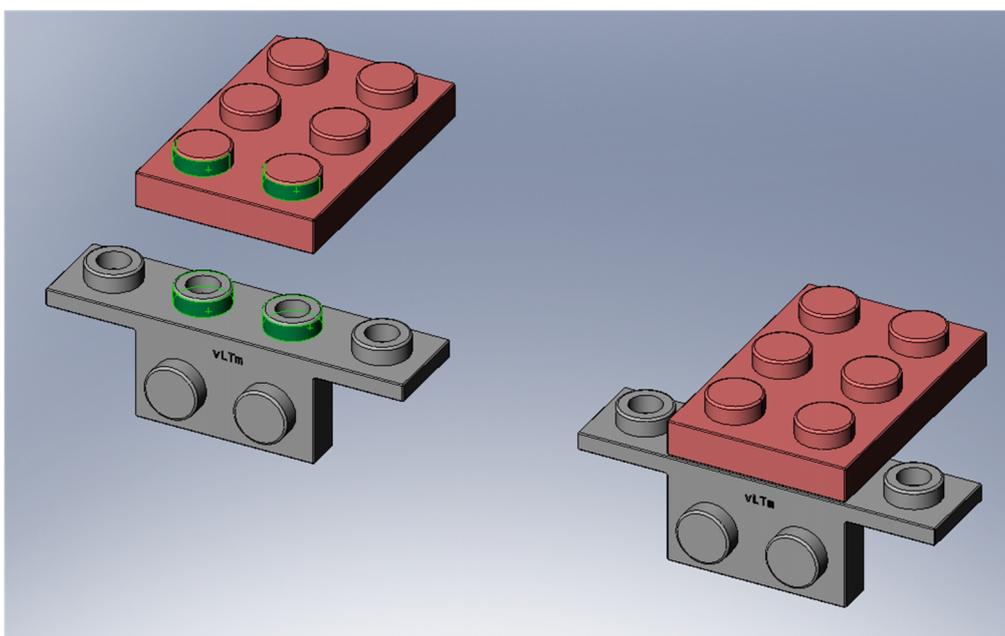


Fig. 23. Unión de componentes del sistema de botones

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

3.3.5. Comprobación

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

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

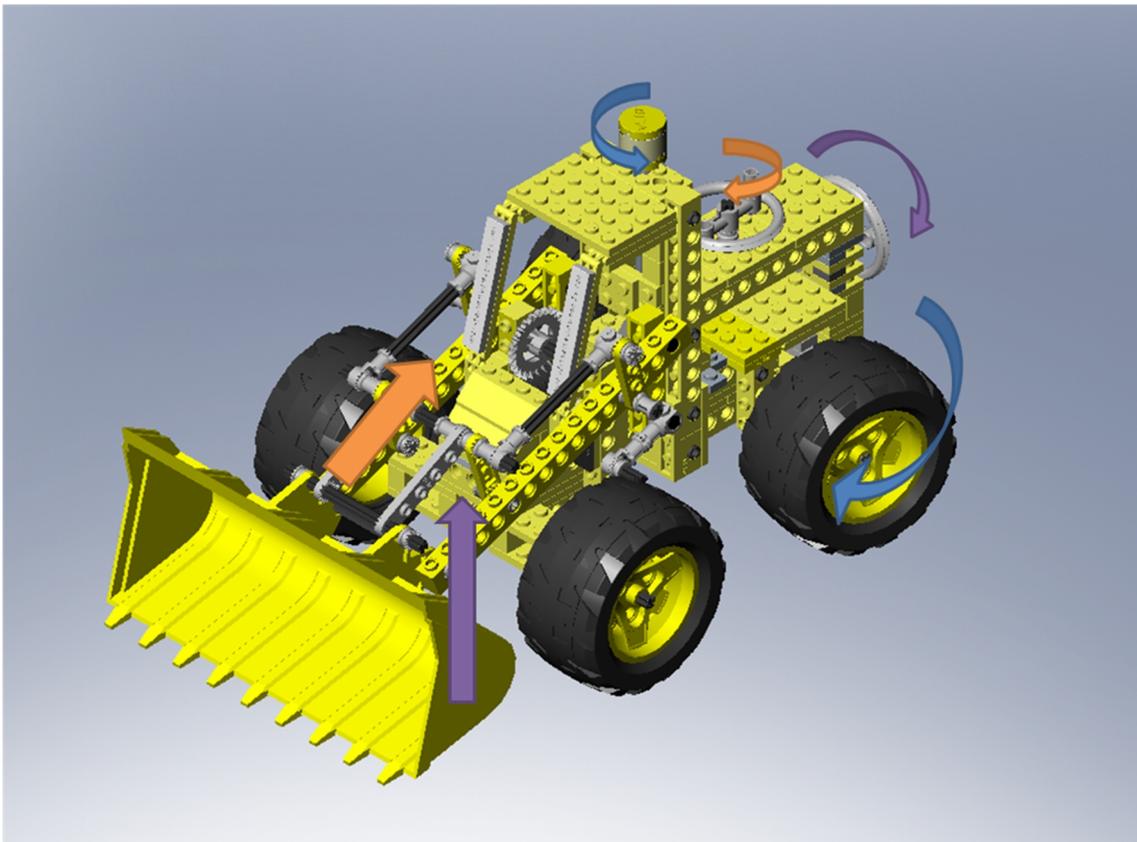


Fig. 24. Comprobación del movimiento de los mecanismos

4. COMPACTACIÓN

Tras el proceso de montaje se tiene una máquina virtual compuesta de piezas, a su vez compuestas de varios componentes.

En este trabajo se han montado modelos que superan los 1000 componentes. Esto se traduce en que el ordenador debe trabajar con toda esa cantidad de elementos ya tengan un papel relevante o meramente estructural, lo cual reduce el rendimiento de la computadora.

Es por este motivo que se ha ideado un proceso de compactación, mediante el cual cada pieza pasa a ser una única entidad virtual, no un conjunto de éstas, logrando una serie de ventajas: aumento del rendimiento computacional, mejor organización entre los archivos informáticos y la protección del trabajo de creación de las piezas.

Así, una vez se pasa del montaje en base a componentes al montaje en base a las piezas compactadas, se tiene la misma máquina virtual en términos de mecanismo la cual requerirá menos trabajo computacional para las siguientes fases.



5. MODELO CINEMÁTICO AUTOALINEADOR

5.1. Presentación y objetivos.

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

Otra de las finalidades fundamentales de este apartado desde el punto de vista del diseño mecánico es mostrar cómo es posible llegar a configurar el modelo cinemático de una máquina virtual de tal manera que no existan restricciones en exceso. Es decir, como llegar a construir un modelo **cinemático autoalineador**. Para ello se utiliza la aplicación integrada en SolidWorks, Cosmos Motion, basado en el programa clásico ADAMS, referente de la simulación cinemática y dinámica de sistema multicuerpo desde los años 70.

La importancia de este tipo de modelos sólo se logra entender cuando se plantea la necesidad de comprobar el comportamiento resistente de algunas de las piezas que constituyen la máquina mediante la técnica de los elementos finitos. Es un requisito fundamental que el modelo cinemático no tenga restricciones en exceso.

5.2. Introducción a los sistemas mecánicos.

En ingeniería mecánica una parte fundamental es el diseño de mecanismos y esta es un área en constante cambio, pues el avance en tecnología informática permite abordar estos diseños de una forma cada vez más potente, productiva y eficiente. Es por ello que se insiste en formar a los alumnos de ingeniería en las nuevas técnicas que se aplican en el diseño mecánico.

Anteriormente el diseño mecánico debía realizarse a mano y con herramientas gráficas sobre planos, precisando de un esfuerzo a la hora de aplicar visión espacial e intuición para predecir el movimiento del mecanismo, sin tener que recurrir a un prototipo. Con el desarrollo del CAD este proceso se ha ido automatizando, siendo más interesante abordar el diseño

ahora mediante la geometría cinemática fundamental, desarrollando formulaciones analíticas que permitan la creación de algoritmos que ofrezcan la solución al problema de diseño más adecuada.

Es en esta base en la que se sustentan los paquetes informáticos utilizados para la creación del modelo cinemático autoalineador objeto de este capítulo, como es COSMOS, integrado en SolidWorks.

Con estas nuevas técnicas es posible interactuar con la máquina virtual en un espacio tridimensional, salvando las complicaciones físicas de poder acceder a cualquiera de sus puntos en un prototipo y proporcionando una visualización y comprobación directas del comportamiento de la máquina en sus planos tridimensionales, algo no realizable con los anteriores diseños en dos dimensiones.

5.3. Conceptos básicos.

5.3.1. Impulsor, seguidor y factor de transmisión.

Para poder lograr obtener un movimiento diferente del aplicado a un mecanismo y poder comprobar que se ha logrado crear el diseño teórico es necesario introducir los conceptos de **impulsor**, **seguidor** y **factor de transmisión**.

Ya que de un mecanismo se espera obtener un movimiento diferente (ya sea en sentido, dirección o ubicación) del aplicado, deberá pues incluir una pieza que reciba este primer movimiento (**impulsor**) y otra que proporcione el segundo (**seguidor**). Desde un enfoque matemático se puede equiparar el impulsor a la variable independiente, y el seguidor a la variable dependiente en una ecuación. Luego, al igual que en una ecuación se pueden combinar varias variables independientes y dependientes, en un mecanismo pueden existir diferentes impulsores y seguidores.

Cabe introducir pues el **concepto de factor de transmisión**, que es la relación existente entre la magnitud del movimiento aplicado en el impulsor y el obtenido en el seguidor, pudiendo ser cualquiera de estos de traslación, rotación o una combinación de ambos. Así, este factor se expresa con un escalar con signo, dando idea el escalar sobre el cambio en la magnitud del movimiento y el signo, el cambio en el sentido.

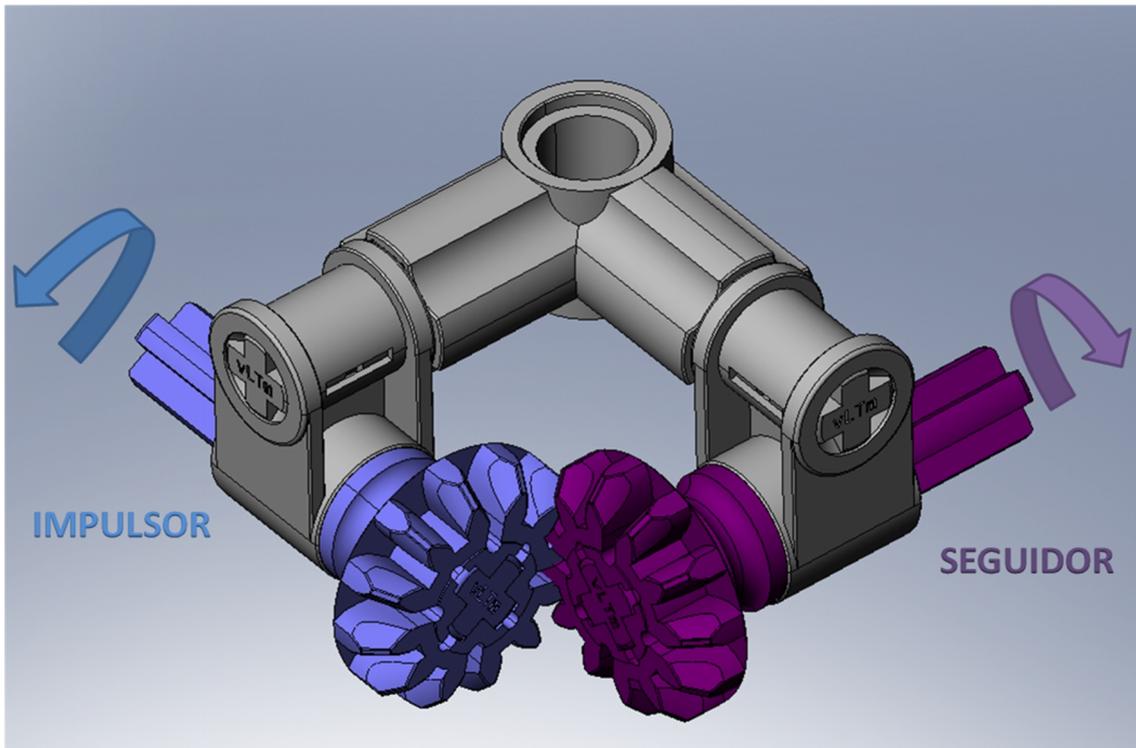


Fig. 25. Conceptos de impulsor y seguidor

5.3.2. Máquina y mecanismo.

Para poder introducir estos conceptos es necesario antes entender qué son y en qué se diferencian la **cinemática** y la **dinámica**: la **cinemática** se encarga del estudio del movimiento y de la transmisión de éste entre los cuerpos sin atender a las causas del mismo, mientras que la **dinámica** incluye el análisis de las fuerzas que intervienen.

Así pues, un **mecanismo** es un sistema capaz de transmitir y transformar el movimiento, mientras que una **máquina** transforma y transmite potencia.

En este TFG se aborda el estudio de la cinemática de los modelos virtuales, es decir, del mecanismo del modelo si bien el modelo real es una máquina. Así, se aborda la construcción del modelo atendiendo a la posición, desplazamiento, rotación, velocidad y aceleración de cada una de sus piezas y cómo han de transformar y transmitir el movimiento entre ellas.

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

5.4. Estudio cinemático.

La cinemática es el estudio de la posición de los cuerpos y de sus derivadas temporales. Específicamente, trata con las posiciones, velocidades y aceleraciones de puntos, y con las posiciones angulares, velocidades angulares, y aceleraciones angulares de cuerpos rígidos. Todas estas entidades juntas son suficientes para describir las posiciones, velocidades y aceleraciones de los cuerpos rígidos. La posición de un cuerpo puede definirse indicando la posición de uno de sus puntos, y la posición angular del cuerpo. En algunas circunstancias, se está interesado no solo en conocer la posición, sino también las derivadas temporales correspondientes, ya que el estudio cinemático no es sino el estudio geométrico añadiendo el factor tiempo.

Para poder realizar el estudio cinemático es necesario comprender una serie de conceptos:

5.4.1. Movimiento plano

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

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

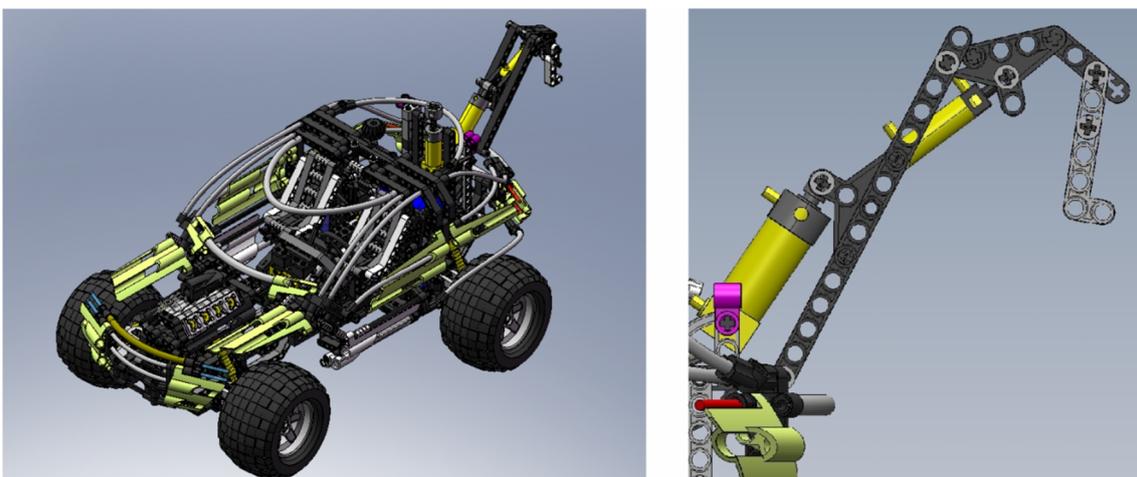


Fig. 26. vLTm-8466 con detalle del mecanismo plano de la grúa

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

5.4.2. La cadena cinemática

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

En una cadena cinemática existirá un cuerpo fijo, dando lugar a un mecanismo distinto según qué cuerpo se fije.

5.4.3. Evolución temporal del movimiento en un mecanismo

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

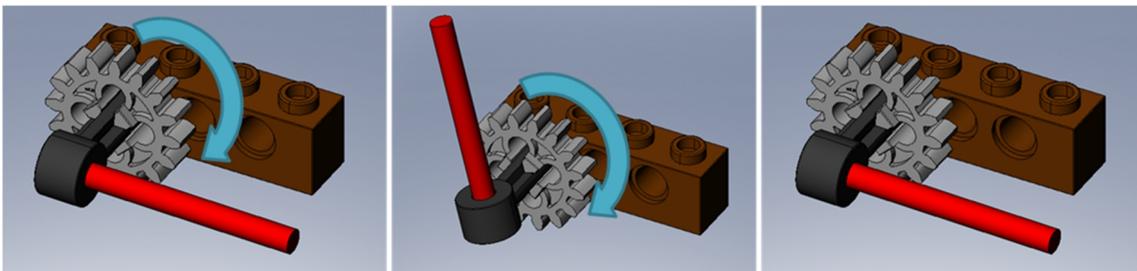


Fig. 27.

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

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

5.5. Pares cinemáticos.

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

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

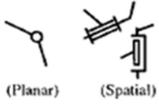
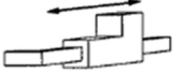
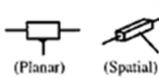
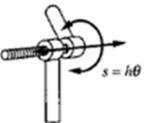
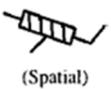
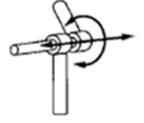
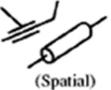
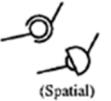
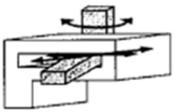
Conectividad (Nº de gdl)	Denominaciones	Símbolo literal	Forma típica	Representación esquemática (Diagrama cinemático)
1	Par Giratorio Articulación de pasador	R		 (Planar) (Spatial)
1	Par prismático Deslizadera Par de deslizamiento	P		 (Planar) (Spatial)
1	Par helicoidal Par de tornillo	H		 (Spatial)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

Fig. 28. Pares cinemáticos inferiores

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

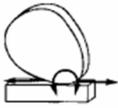
Conectividad (Nº de gdl)	Denominación	Forma típica	Comentarios
1	Rodadura sin deslizamiento Rodadura simple		El rodillo gira alrededor de la línea señalada con la flecha en el instante considerado. El rodillo no desliza sobre la superficie sobre la que gira.
2	Par leva Rodadura con deslizamiento		La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

Fig. 29. Algunos pares superiores

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

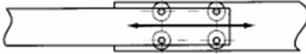
Conectividad (Nº de gdl)	Denominación	Forma típica
1	Cojinete de bolas Cojinete antifricción Cojinete de contacto por rodadura	
2	Junta Universal Junta Hooke Junta Cardan	
1	Deslizadera de rodillos	

Fig. 30. Pares compuestos

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

Un sólido libre tiene en el espacio **6 grados de libertad (GDL)**, esto es, tiene permitidos tanto desplazamientos como rotaciones respecto a cada eje coordenado. Así, un par

cinemático tendrá tantos grados de libertad como movimientos relativos permita por lo que restringirá el resto de movimientos. Según la cantidad de movimientos relativos que un par cinemático restrinja, éste será de clase I, II, III, IV, V o VI (unión rígida).

5.6. Movilidad en los mecanismos.

Hemos definido los grados de libertad de un sólido como la cantidad de movimientos (traslaciones y rotaciones) libres posee. Otra forma de verlo es que un cuerpo en el espacio necesita de tantas coordenadas independientes como GDL tenga para conocer su posición y orientación exactas.

En el apartado 5.4.3. se ha mencionado que un mecanismo pasa por diferentes configuraciones, refiriéndonos a las posiciones relativas de los cuerpos que lo componen, a lo largo de su movimiento. Así se entiende como **movilidad** de un mecanismo como la cantidad de GDL posee, esto es, el número de movimientos independientes que es necesario aplicar en los impulsores para definir completamente la posición relativa de cada una de sus piezas.

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

5.6.1. Cálculo de la movilidad en mecanismos planos

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

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

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

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

5.6.2. Cálculo de la movilidad en mecanismos espaciales

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

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

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

5.6.3. Diagramas cinemáticos

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

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

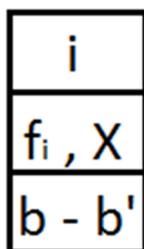


Fig. 31. Cajetín de identificación de pares

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

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

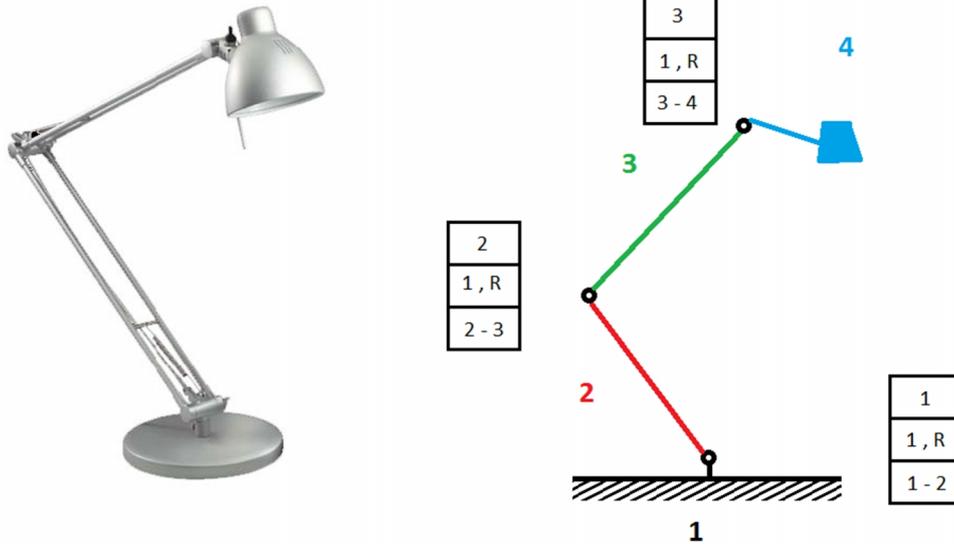


Fig. 32. Diagrama cinemático del mecanismo de una lámpara tipo flexo

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

5.7. Mecanismo autoalineador.

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

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

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

autoalineadores (llámese excesivas, pasivas, a las restricciones cuya eliminación no aumenta la movilidad del mecanismo).

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

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

5.8. Modelo cinemático autoalineador en SolidWorks; Aplicación integrada COSMOS Motion.

COSMOS Motion es una aplicación que permite simular y evaluar sistemas mecánicos sin necesidad de construir un prototipo del mecanismo en cuestión, lo cual convierte permite ganar en eficiencia y eficacia a la hora de aplicar diseños teóricos.

El hecho de estar integrado en SolidWorks facilita el trabajo con los modelos virtuales, ya que utiliza el mismo entorno de trabajo en el que se ha diseñado el mecanismo, evitando además la conversión entre archivos informáticos para poder utilizar la aplicación.

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

5.8.1. Entorno de trabajo

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

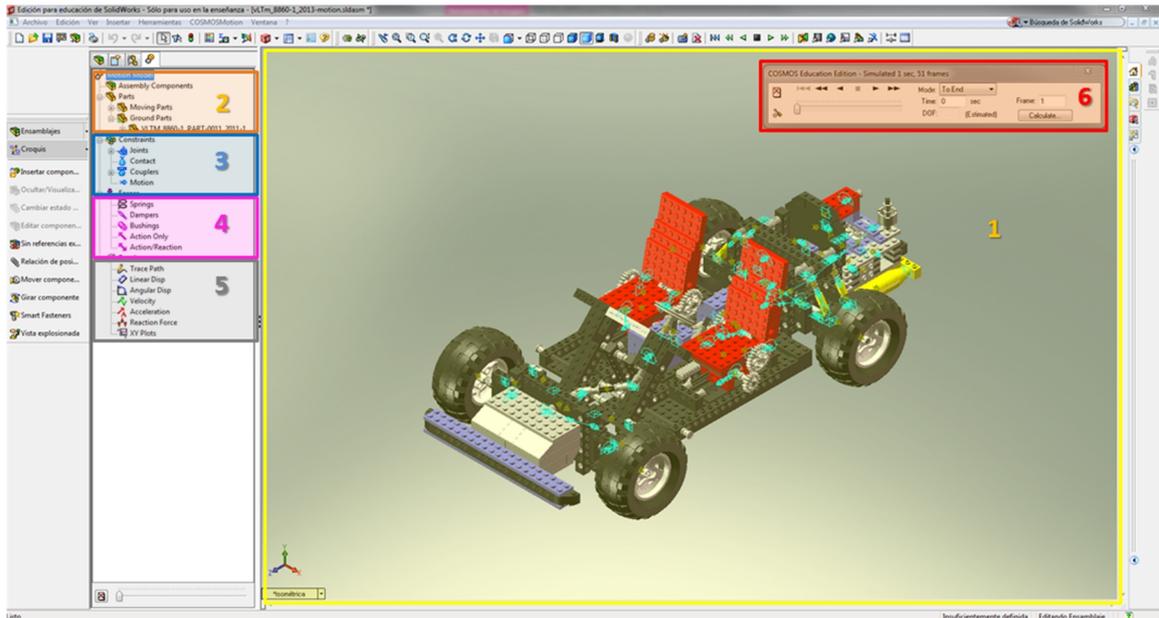


Fig. 33. Entorno de trabajo de COSMOS Motion

5.8.2. Piezas

Es necesario, al igual que era conveniente en la construcción del modelo virtual, fijar una pieza como fija, pues un mecanismo precisa de que una de sus piezas sea fija respecto a la cual el resto de ellas poseen movimiento relativo. Así, tras definir una pieza como fija, el resto se definirán como piezas libres, con lo que tendrán 6 GDL al ser así definidas. Al definir una pieza del mecanismo como libre, éste gana 6 GDL con cada nueva pieza así definida y no hemos de perder de vista que el objetivo es conseguir un modelo cinemático autoalineador, esto es, con 0 GDL.

Para lograr este objetivo será necesario definir los pares cinemáticos adecuadamente, con lo que conseguiremos ir restando GDL al mecanismo.

5.8.3. Pares cinemáticos

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

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

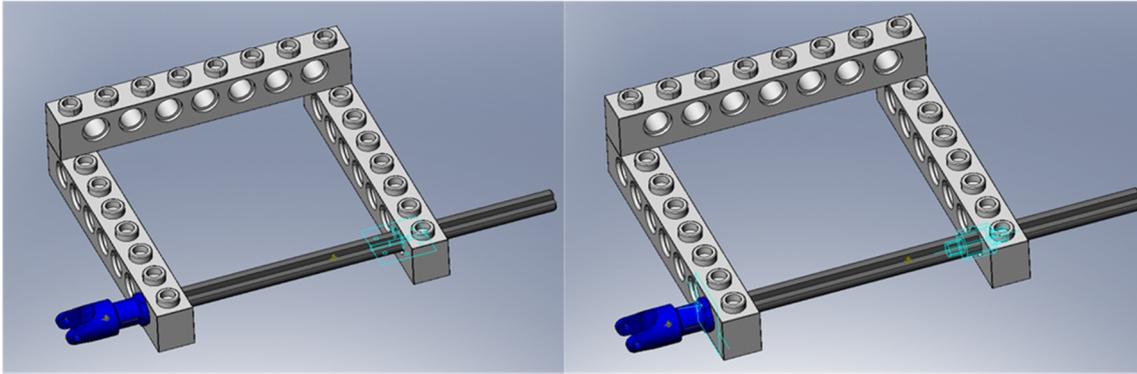


Fig. 34. Formas equivalentes de definir un par de revolución con uno (izda.) o dos (dcha.) puntos de apoyo

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

5.8.3.1. Revolución

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

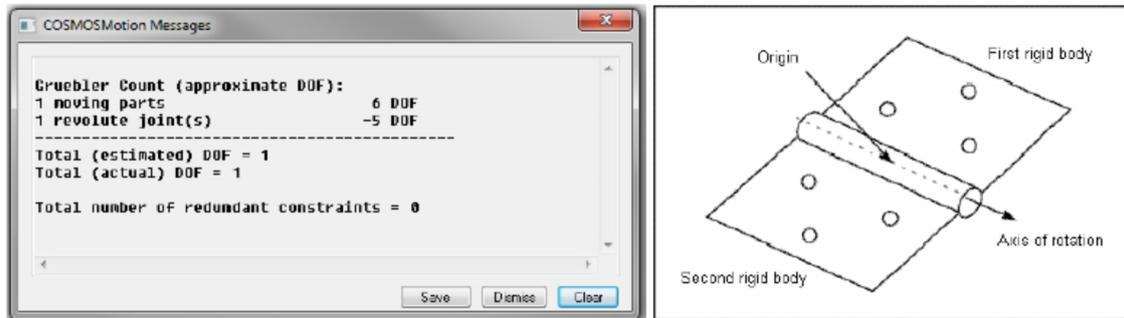


Fig. 35. Análisis de la movilidad del par de revolución y esquema del mismo

Para definir un par de revolución se ha de seleccionar una arista cuyo centro de curvatura vaya a estar contenido en el eje de revolución, pues con dicho punto y la dirección perpendicular al plano que contiene dicha arista se define el eje de revolución. De esta forma se tendrá el primer cuerpo y el eje de revolución; queda pues seleccionar el segundo cuerpo.

En los pares que permitan el giro es conveniente revisar en qué punto se ha creado el origen, ya que si no es el correcto, el movimiento diferirá significativamente del ideado y siempre se puede volver a definir la posición desde la misma ventana de edición del par.

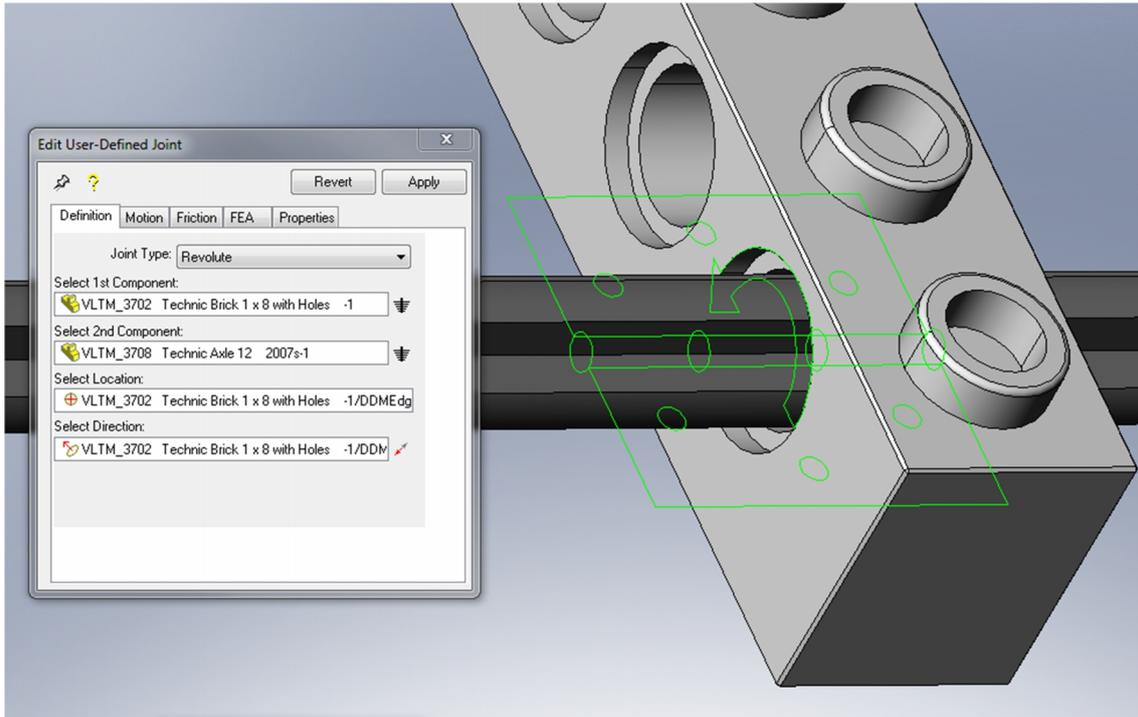


Fig. 36. Ventana de edición del par de revolución y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.3.2. Traslacional

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

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

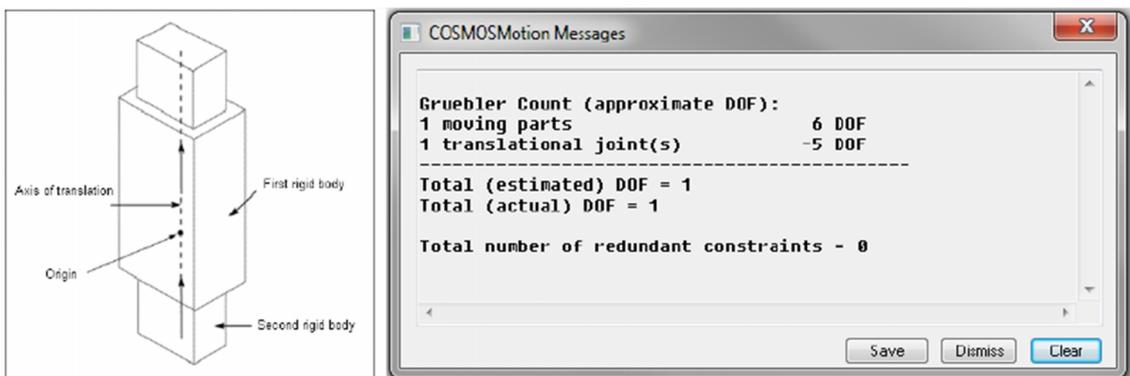


Fig. 37. Análisis de la movilidad del par traslacional y esquema del mismo

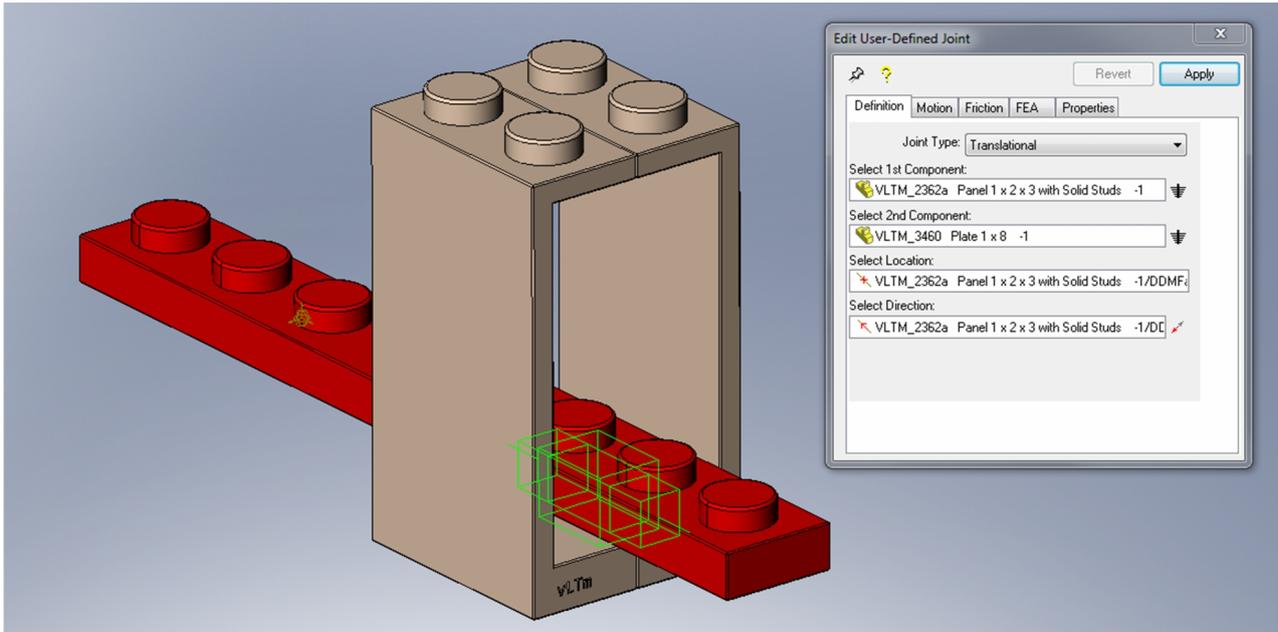


Fig. 38. Ventana de edición del par traslacional y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.3.3. Cilíndrico

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

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

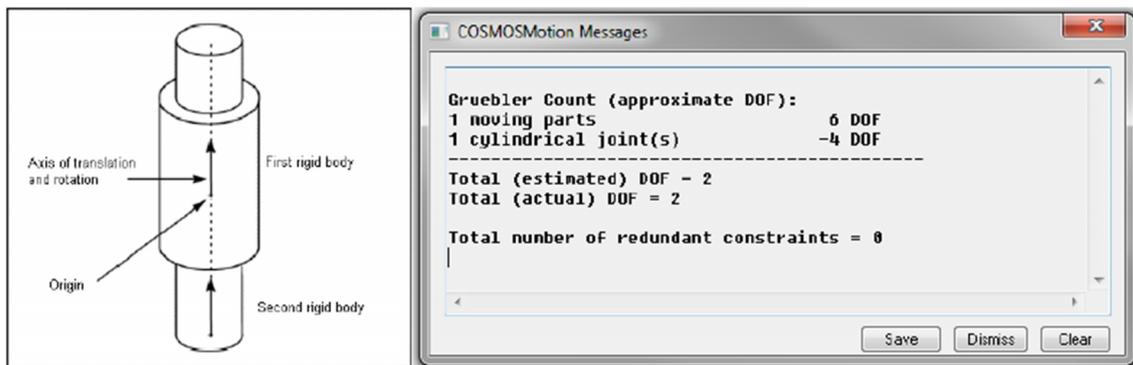


Fig. 39. Análisis de la movilidad del par cilíndrico y esquema del mismo

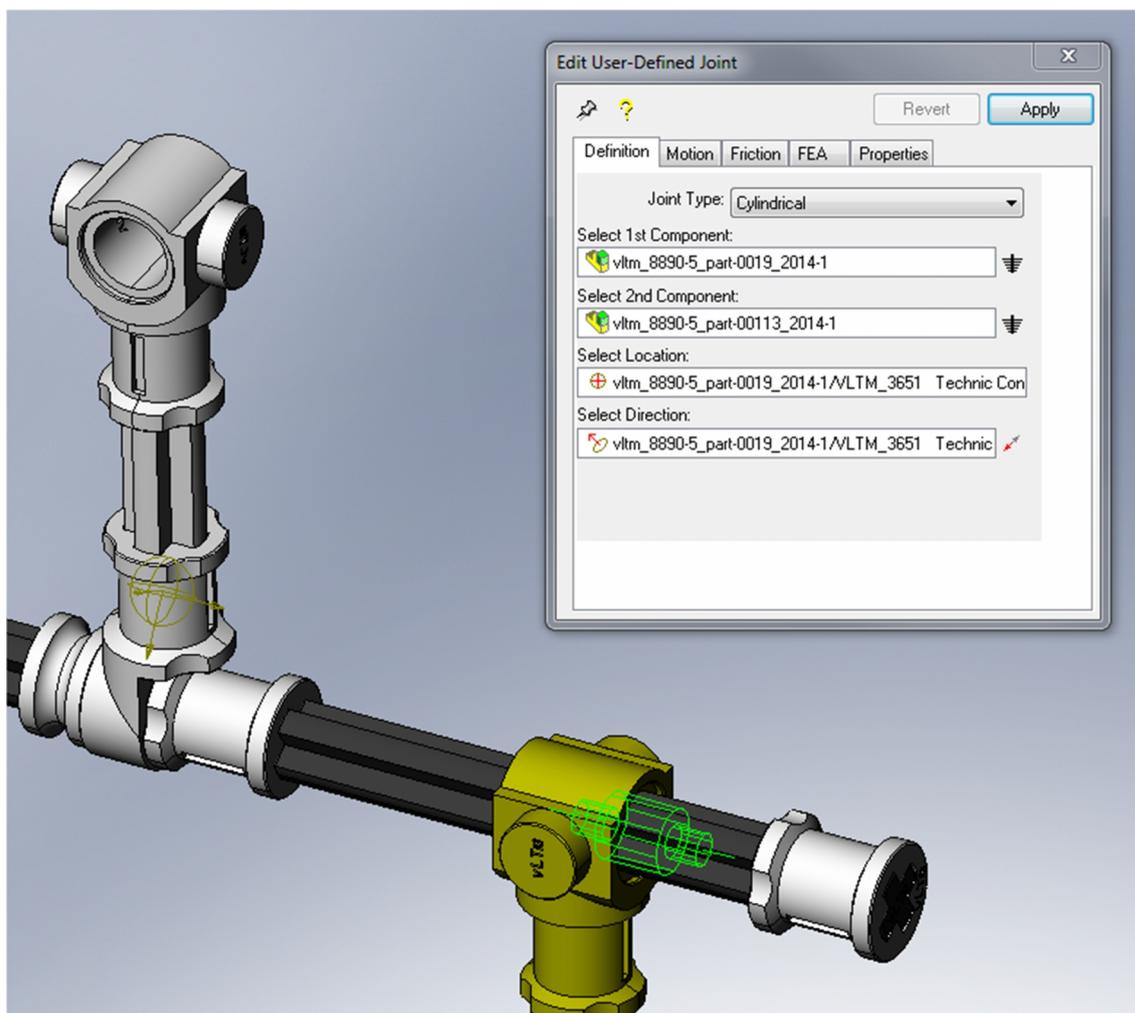


Fig. 40. Ventana de edición del par cilíndrico y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.3.4. Esférico

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

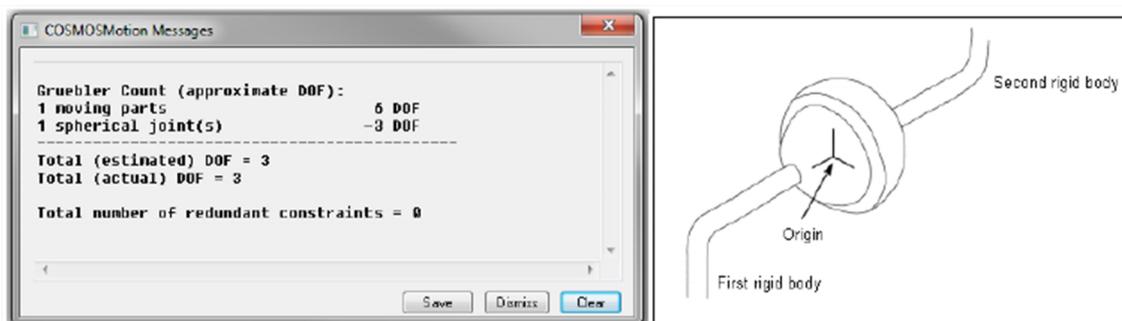


Fig. 41. Análisis de la movilidad del par esférico y esquema del mismo

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

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

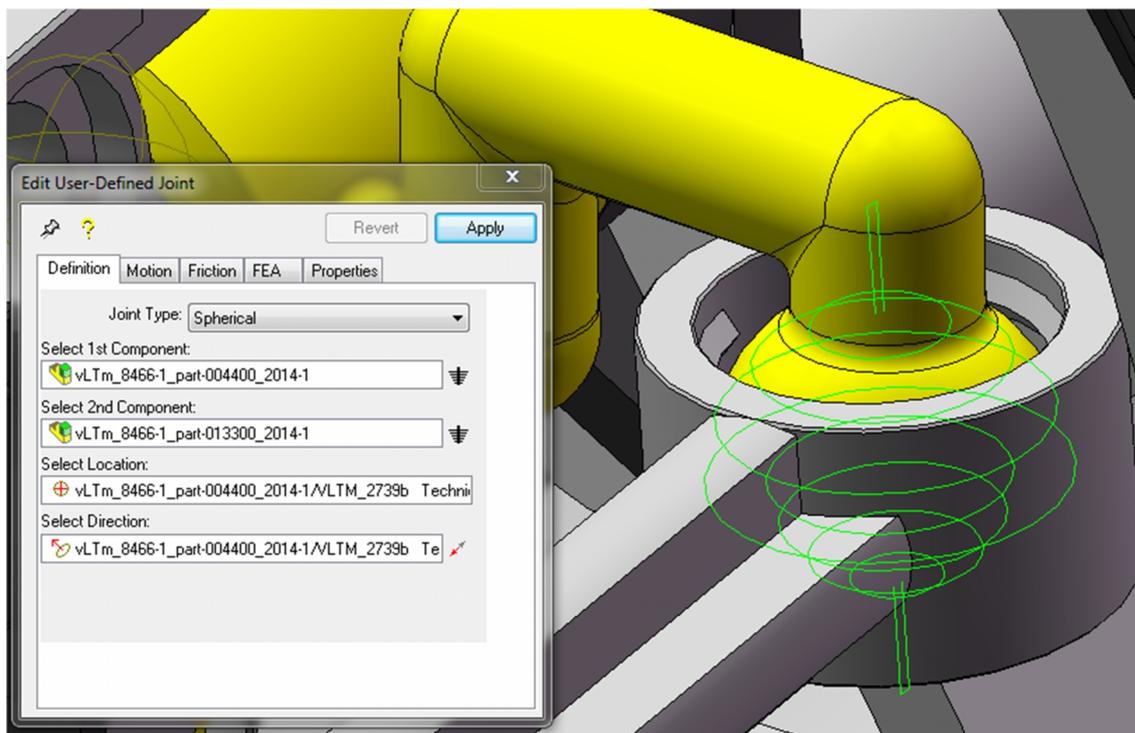


Fig. 42. Ventana de edición del par esférico y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.3.5. Universal

La unión universal representa a la junta Hooke o cardan. Esta junta se utiliza para la transmisión de rotación entre cuerpos, de aplicación en situaciones en los que un eje consta de varios tramos entre los que puede existir un ángulo fijo o variable.

Este par se puede sustituir físicamente por una junta Hooke, debiendo definir entonces los pares necesarios entre esta nueva pieza y los dos ejes que conecta.

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

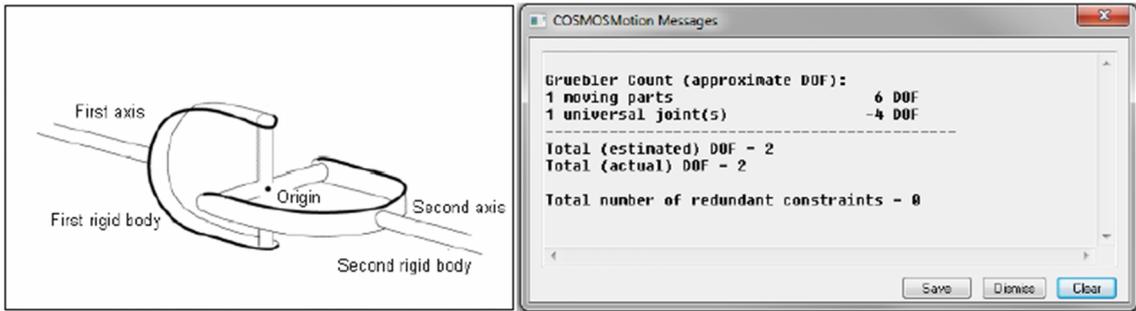


Fig. 43. Análisis de la movilidad del par universal y esquema del mismo

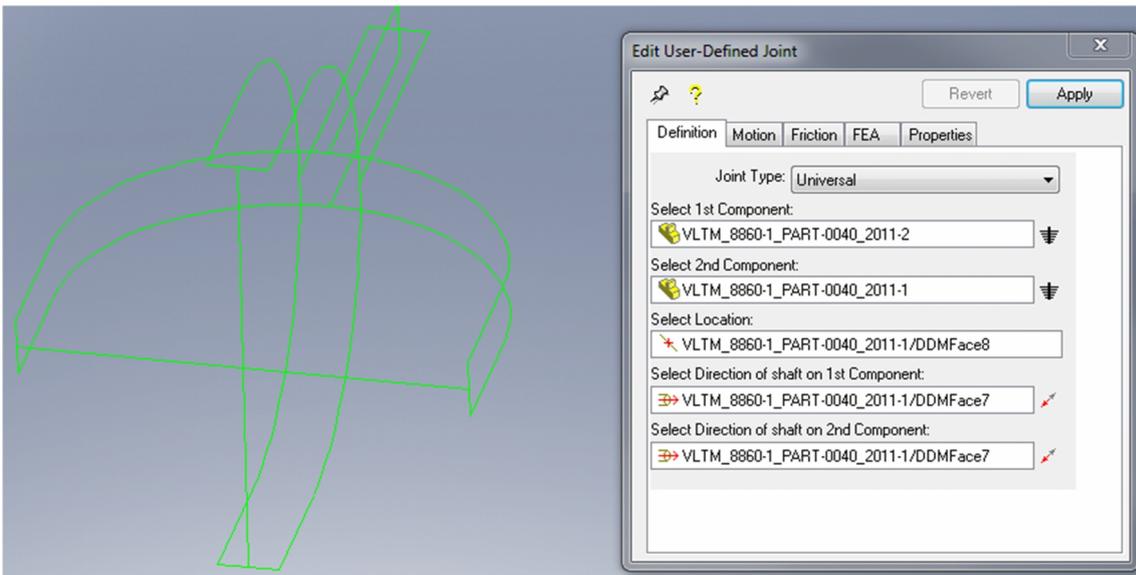


Fig. 44. Ventana de edición del par universal y aspecto del mismo dentro de la aplicación

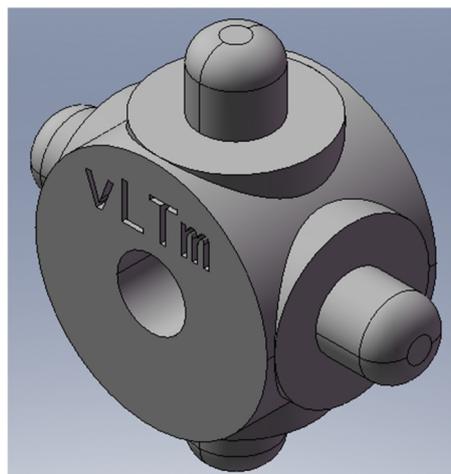


Fig. 45. Componente VLTm "junta Hooke"

5.8.3.6. Tornillo

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

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

5.8.3.7. Planar

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

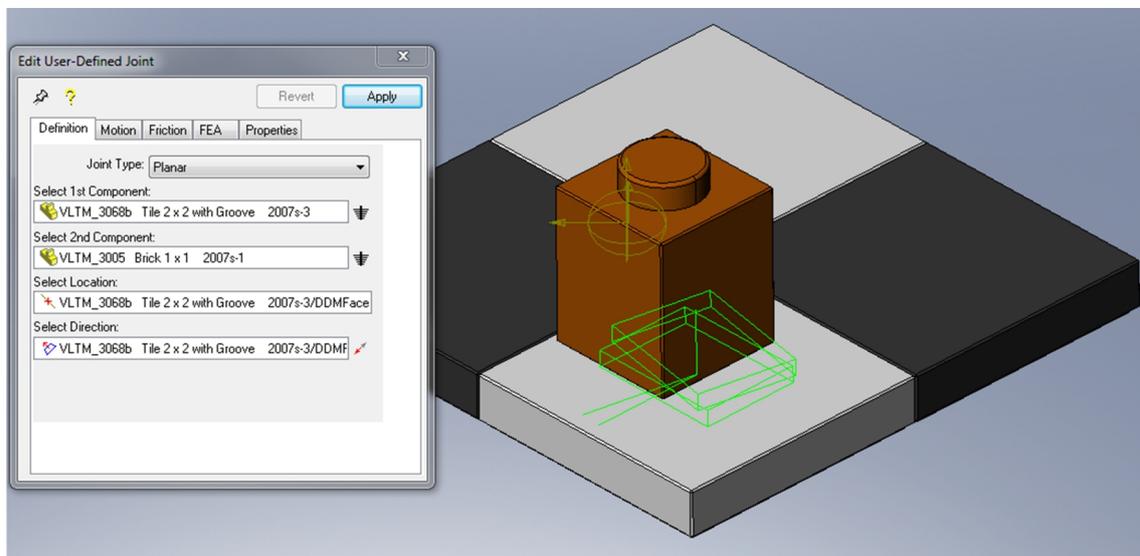


Fig. 46. Ventana de edición del par planar y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.3.8. Fijo

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

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

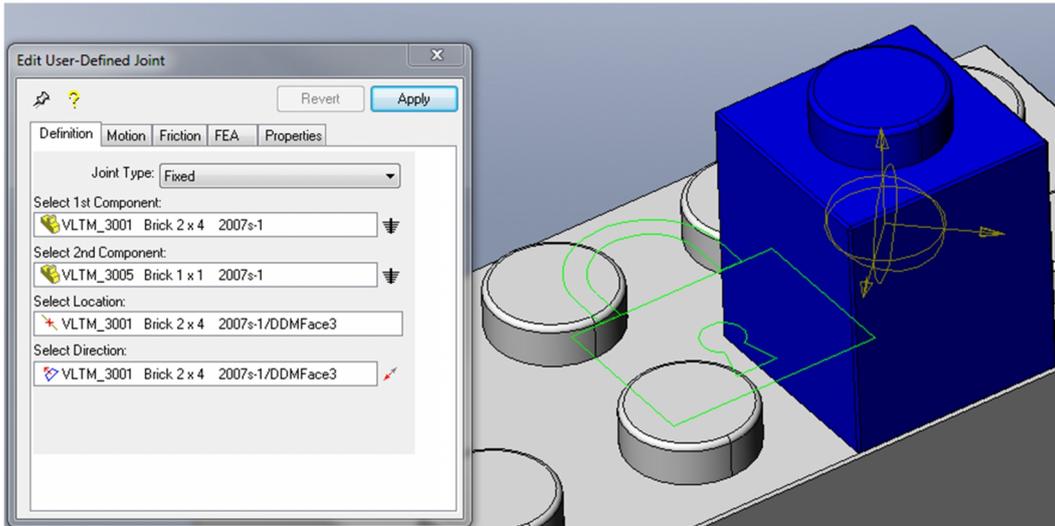


Fig. 47. Ventana de edición del par fijo y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.4. Pares primitivos

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

5.8.4.1. En la línea

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

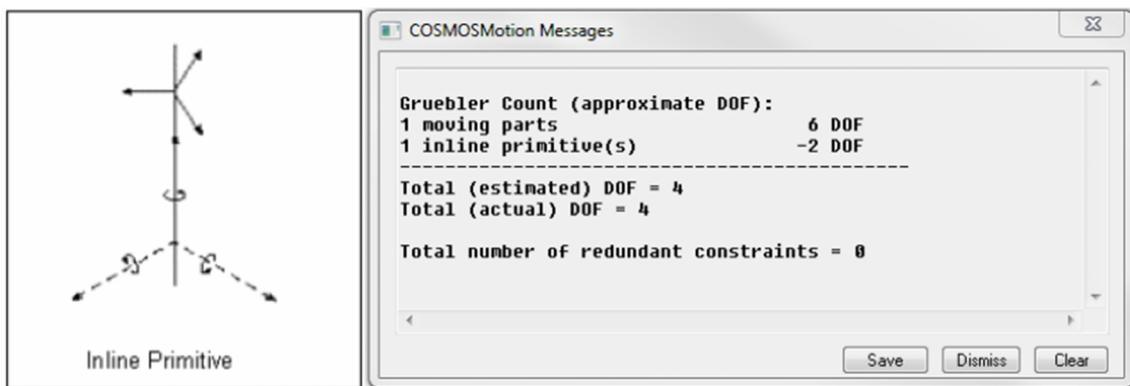


Fig. 48. Análisis de la movilidad del par “en línea” y esquema del mismo

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

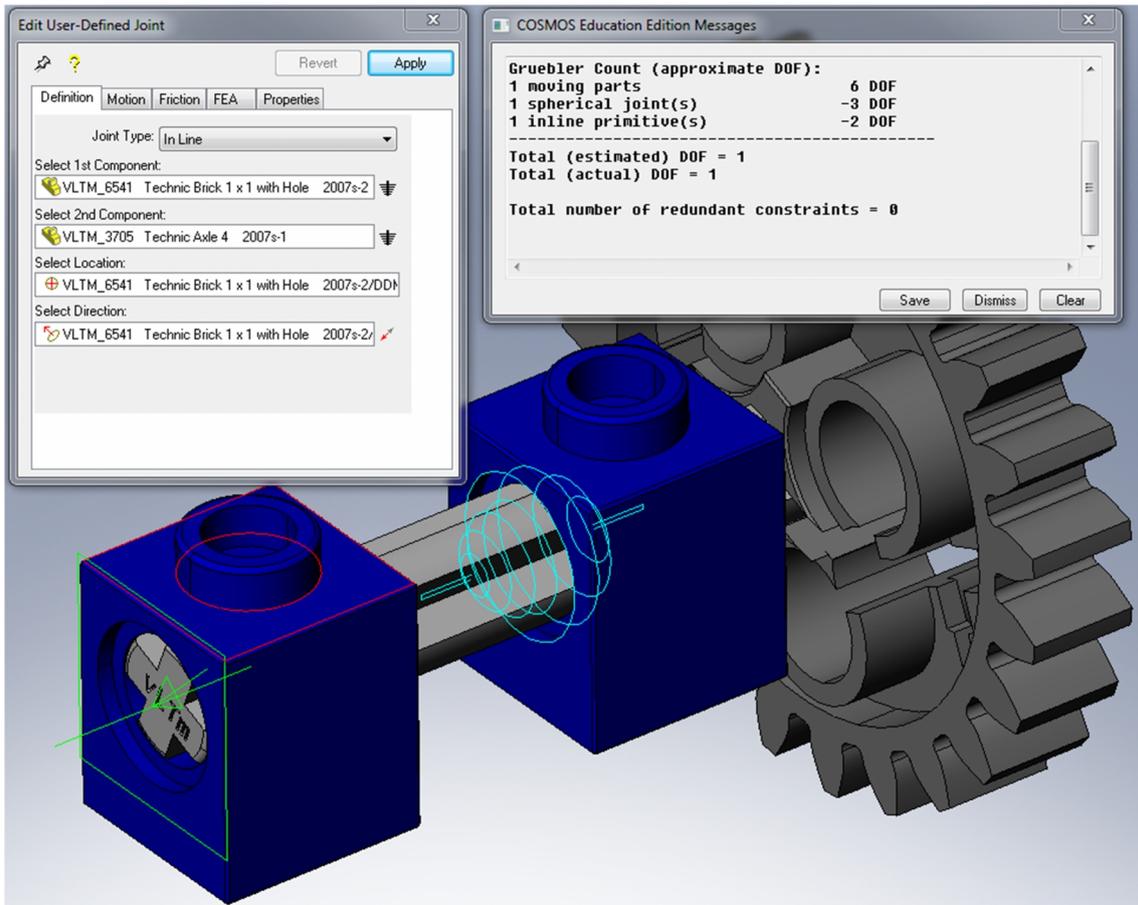


Fig. 49. Ventana de edición del par “en línea” y aspecto del mismo dentro de la aplicación, en combinación con un par esférico

5.8.4.2. En el plano

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

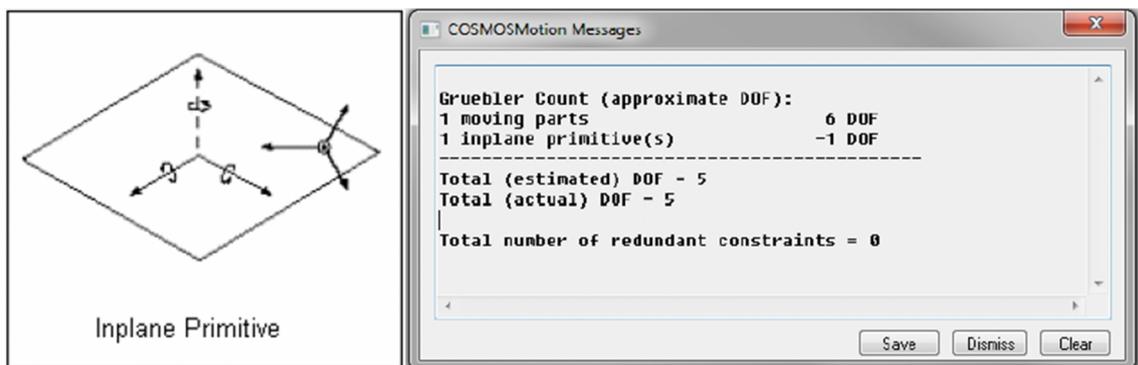


Fig. 50. Análisis de la movilidad del par “en plano” y esquema del mismo

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

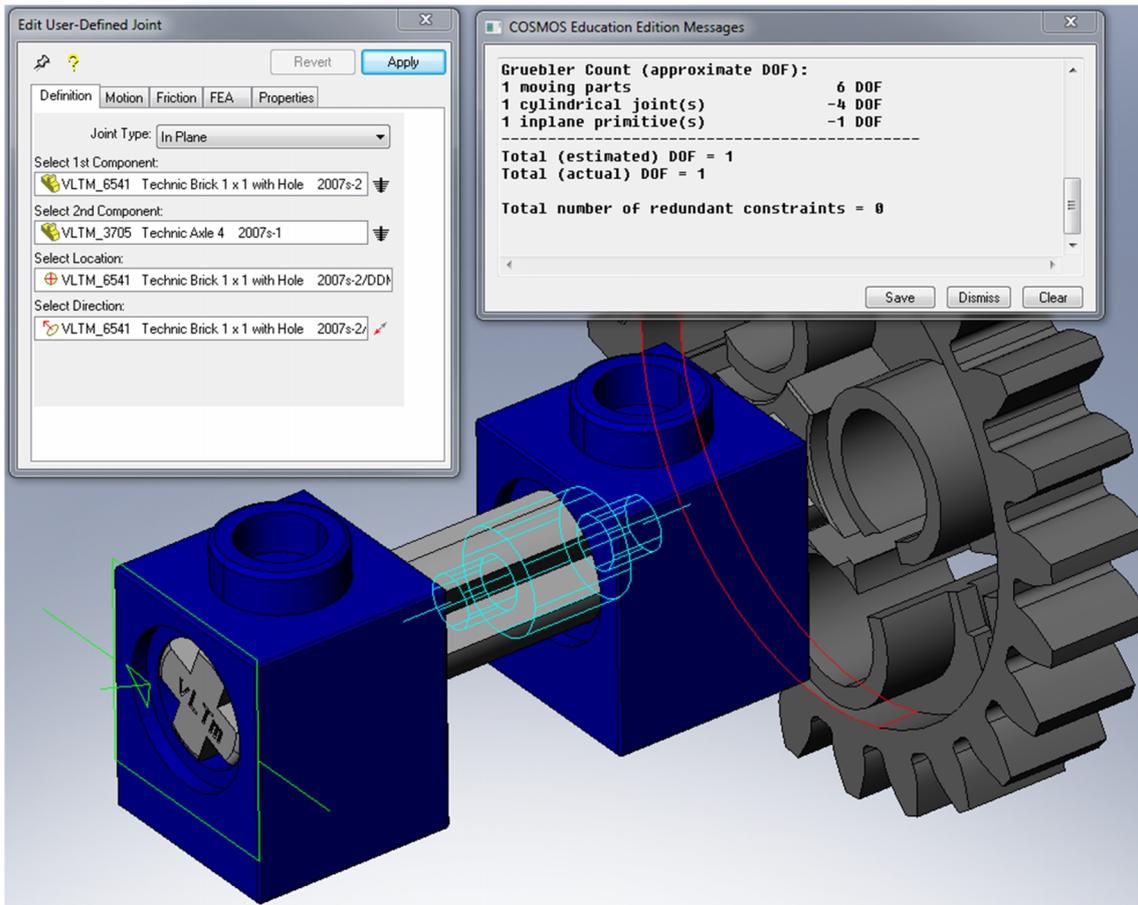


Fig. 51. Ventana de edición del par “en plano” y aspecto del mismo dentro de la aplicación, en combinación con un par cilíndrico

5.8.4.3. Orientación

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

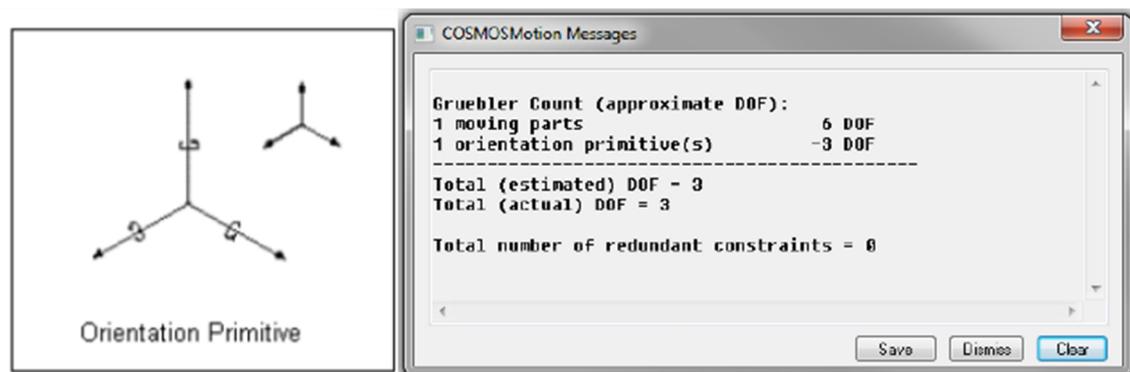


Fig. 52. Análisis de la movilidad del par “orientación” y esquema del mismo

5.8.4.4. Paralelismo

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

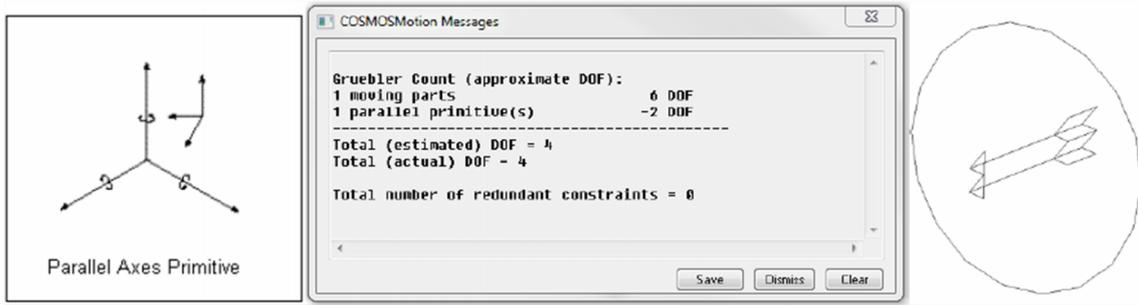


Fig. 53. Análisis de la movilidad del par “paralelismo”, esquema y simbología del mismo

5.8.4.5. Perpendicularidad

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

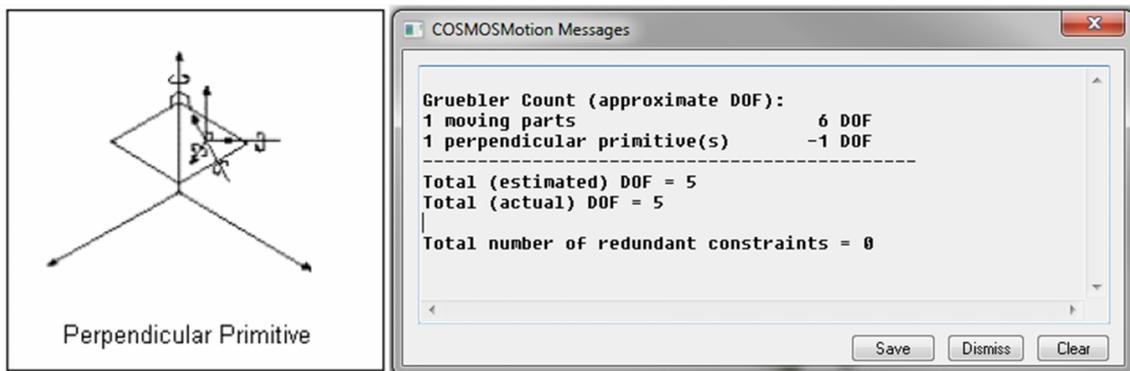


Fig. 54. Análisis de la movilidad del par “perpendicularidad” y esquema del mismo

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

Par	restricciones traslacionales	restricciones rotacionales	GDL restringidos
Revolución	3	2	5
Traslacional	2	3	5
Cilíndrico	2	2	4
Esférico	3	0	3
Universal	3	1	4
Tornillo	2.5	2.5	5
Planar	1	2	3
Fijo	3	3	6
En la línea	2	0	2
En el plano	1	0	1
Orientación	0	3	3
Paralelo	0	2	2
Perpendicular	0	1	1

Tabla 1. GDL restringidos y permitidos según par

5.8.5. Acoplamientos

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

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

5.8.5.1. Engranaje y poleas

Al definir este acoplamiento entre dos pares que permitan la rotación a lo largo de un eje (revolución y/o cilíndrico), se consigue que el par del engranaje (o rueda) conducido gire alrededor de su eje un cierto ángulo por cada unidad de ángulo girado en el par del eje conductor, según la relación de transmisión. Para ello seleccionaremos ambos pares y, utilizando la relación entre el número de dientes o diámetros, crearemos la relación de transmisión.

Se ha de definir bien los sentidos de giro, pues según cómo estén orientados cada uno de los pares será necesario cambiar el sentido de giro mediante el cambio de signo en la relación de transmisión.

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

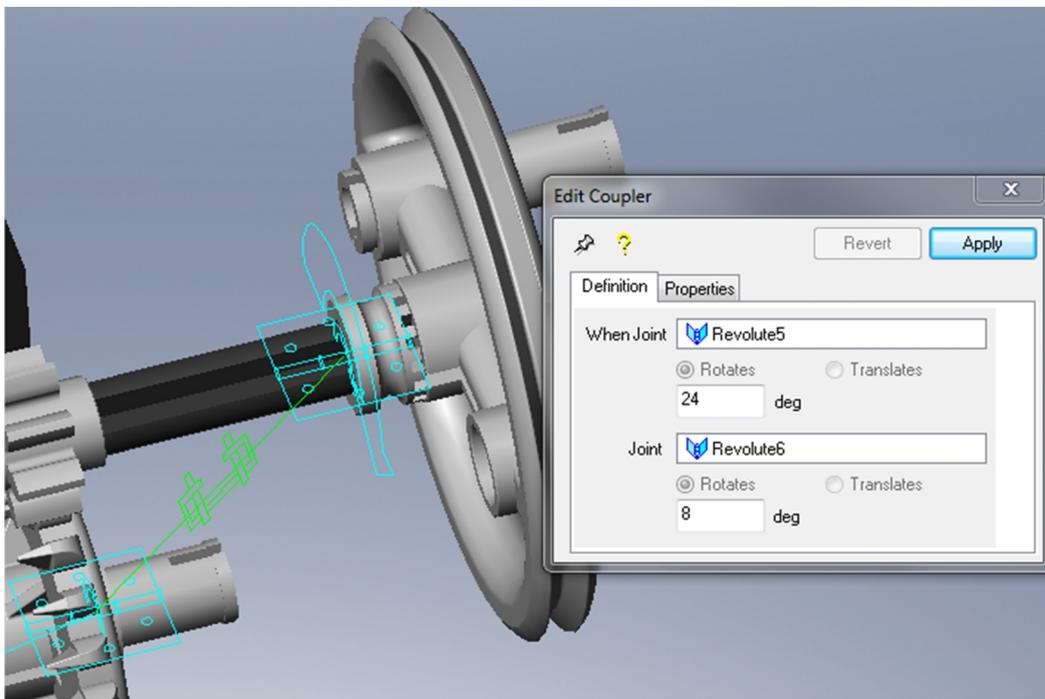


Fig. 55. Ventana de edición de un acoplamiento entre pares de revolución para simular la transmisión entre engranajes y aspecto del mismo dentro de la aplicación

5.8.5.2. Piñón - cremallera

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

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

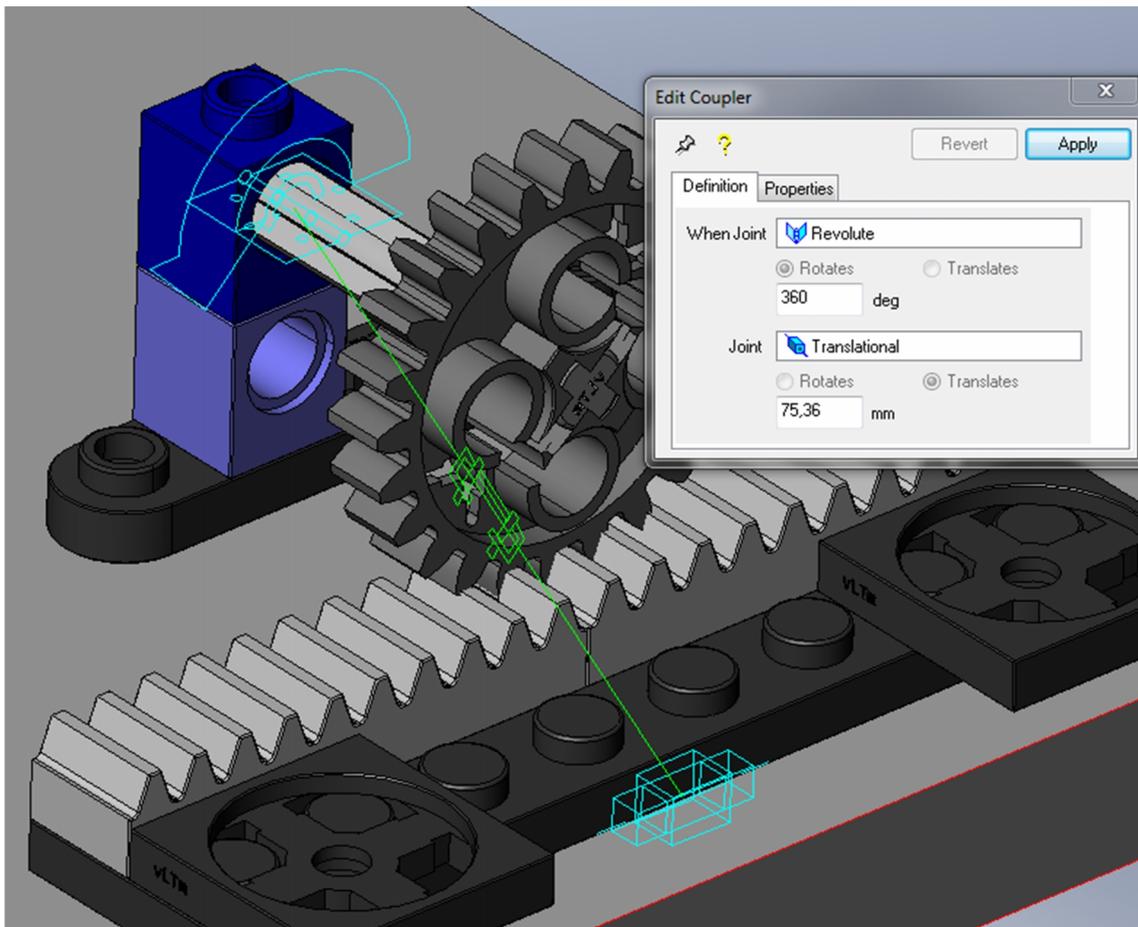


Fig. 56. Ventana de edición de un acoplamiento para simular la transmisión piñón - cremallera

5.8.5.3. Tornillo sin fin

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

En la Fig. 57 se ha definido la relación de transmisión para que por una revolución de la rueda dentada, el tornillo deba completar 24, que es el número de dientes de la rueda.

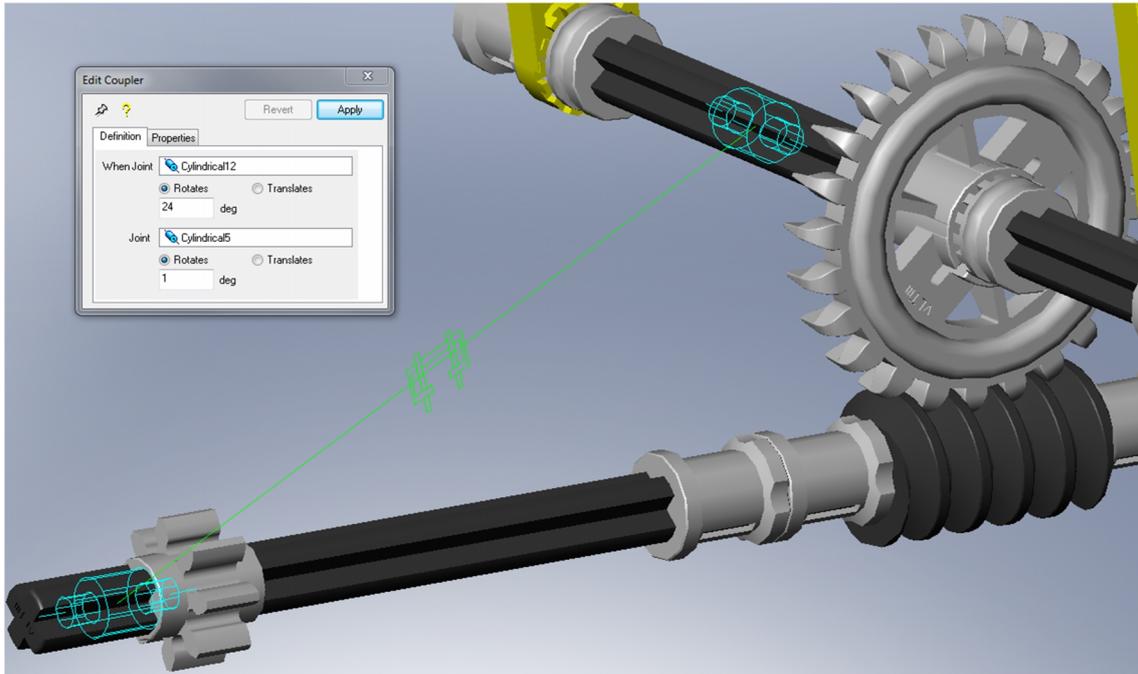


Fig. 57. Ventana de edición de un acoplamiento para simular la transmisión tornillo sin fin

5.8.6. GDL del mecanismo

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

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

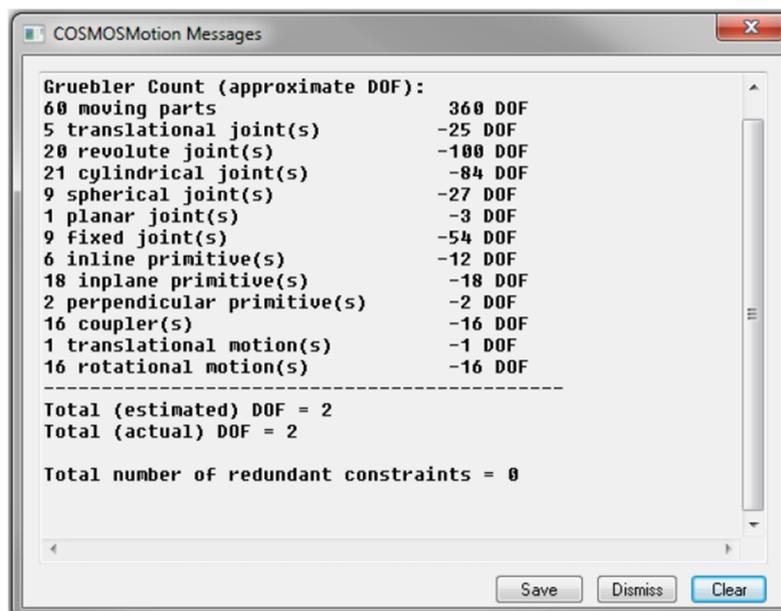


Fig. 58. Ejemplo de análisis de movilidad de un mecanismo en COSMOS sin restricciones en exceso

6. SIMULACIÓN DEL MODELO VIRTUAL

6.1. Introducción

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

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

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

6.2. Simulación del movimiento en COSMOS

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

6.2.1. Definición del movimiento

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

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

6.2.1.1. Constante

De esta manera, el valor de desplazamiento, velocidad o aceleración definidas, mantendrán su valor a lo largo de toda la simulación.

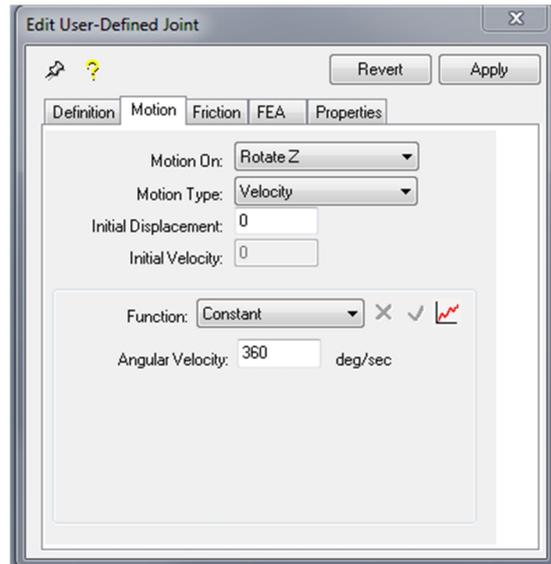


Fig. 59. Definición de velocidad de rotación constante en un par cilíndrico

6.2.1.2. Armónica

Con este tipo de expresión se puede crear una variación senoidal del movimiento a definir, mediante los siguientes parámetros:

- Amplitud (Amplitude): diferencia entre el valor máximo y mínimo de la magnitud.
- Frecuencia (Frequency): recorrido en la función senoidal en una unidad de tiempo.
- Desfase temporal (Time Offset): valor que adopta el instante de inicio dentro de la función senoidal.
- Desplazamiento de la fase (Phase Shift): desplazamiento de la función senoidal en la dirección del eje de abscisas.
- Valor medio (Average): valor respecto al cual varía la magnitud.

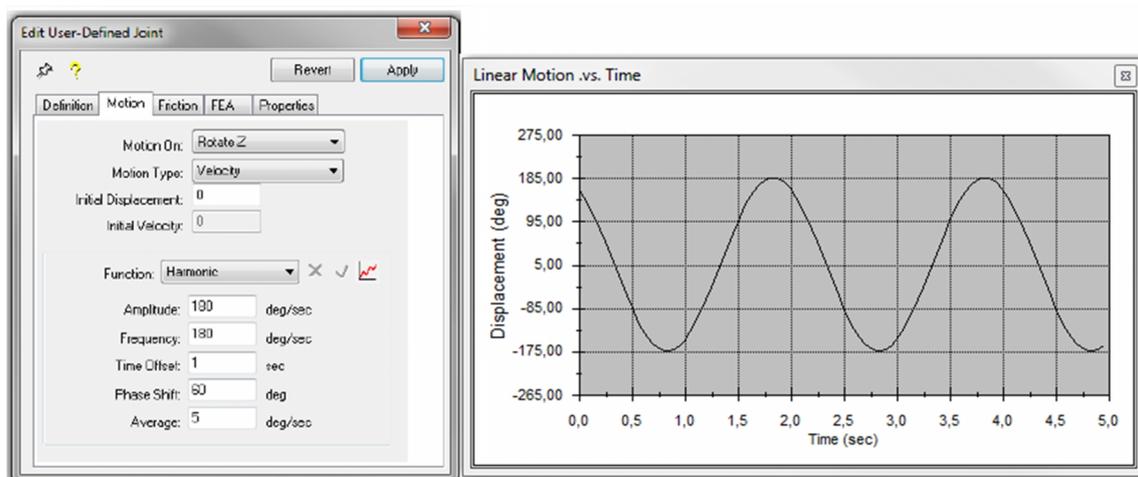


Fig. 60. Definición de la velocidad angular de un par cilíndrico mediante una expresión armónica

6.2.1.3. Spline

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

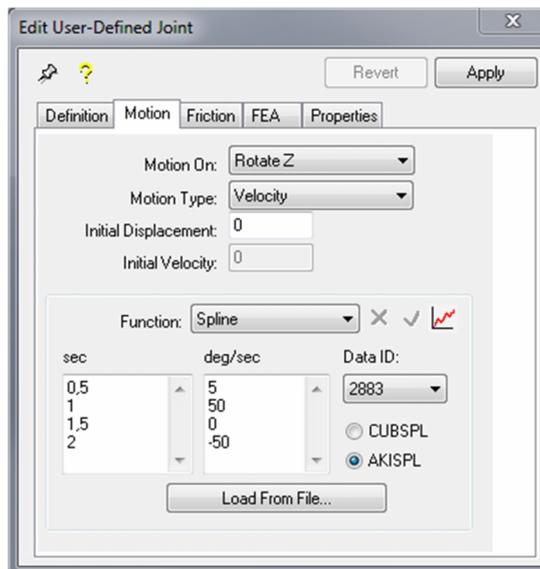


Fig. 61. Definición de la velocidad angular en un par de revolución mediante un spline

6.2.1.4. Escalón

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

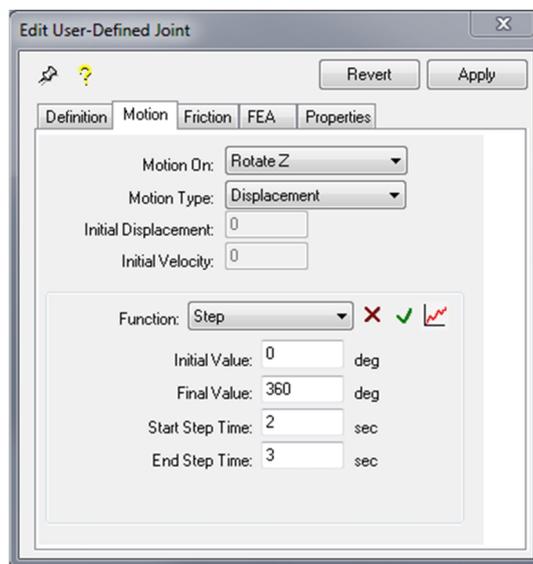


Fig. 62. Definición del desplazamiento angular en un par de revolución mediante una expresión tipo escalón

6.2.2. Entorno y parámetros de la simulación

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

6.2.2.1. Entorno: creación de la base

Ya que se pretende que los vehículos se desplacen sobre una superficie, será necesario una pieza fija que haga las veces de superficie por la cual se desplace el vehículo.

Para ello se creará un nuevo archivo tipo “part” en SolidWorks.

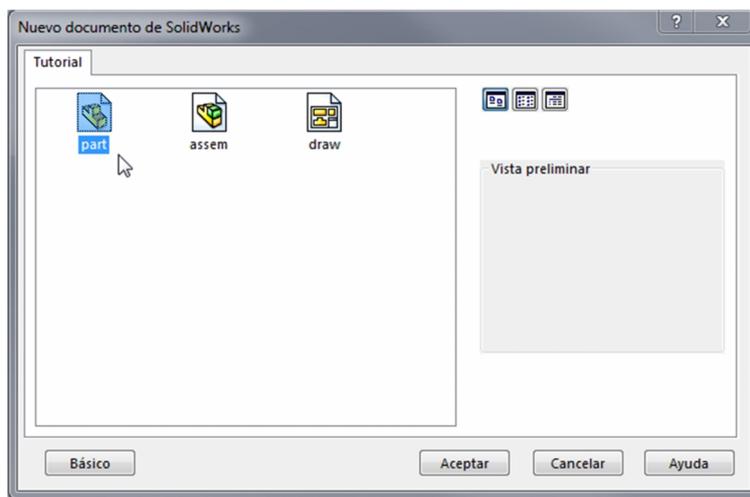


Fig. 63. Crear nuevo archivo tipo part

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

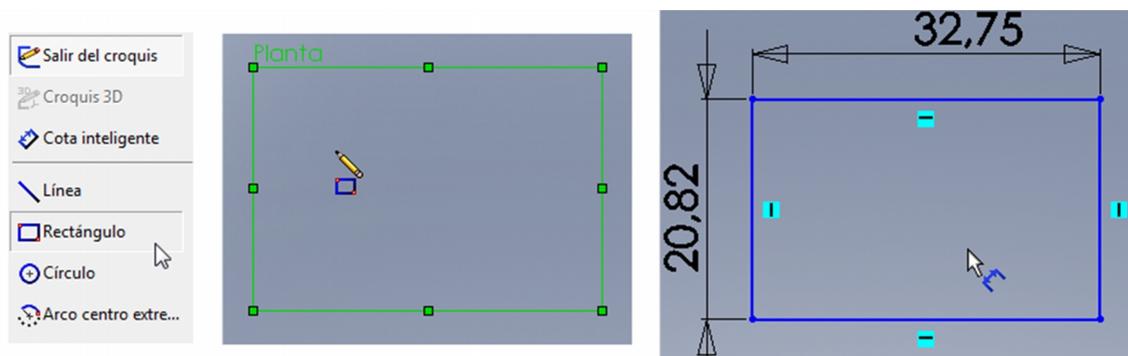


Fig. 64. Creación del croquis rectángulo

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

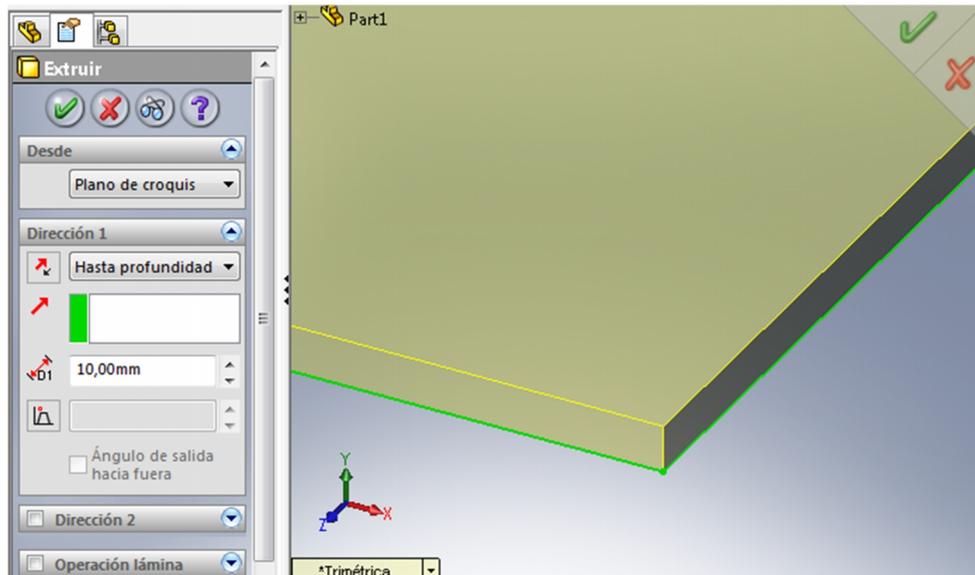


Fig. 65. Extrusión sobre el croquis rectángulo

Una vez creado, lo guardaremos en un ensamblaje para crear una pieza que va a ser la base. Se guardará con la numeración 0, reservada exclusivamente para la base.

vltm_xxxx-x_part-0000_2014.sldasm

6.2.2.2. Entorno: creación del contacto rueda - base

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

La modificación consistirá en crear una extrusión envolvente al neumático, consiguiendo una superficie completamente lisa alrededor del mismo.

Para ello se creará un anillo mediante don círculos en el mismo croquis, sobre un plano perteneciente al lateral del neumático. Después, se creará la extrusión hasta el lateral contrario, desactivando la función "Fusionar resultado".

Más adelante esta extrusión se modificará para hacerla transparente y así conservar el aspecto de los neumáticos originales.

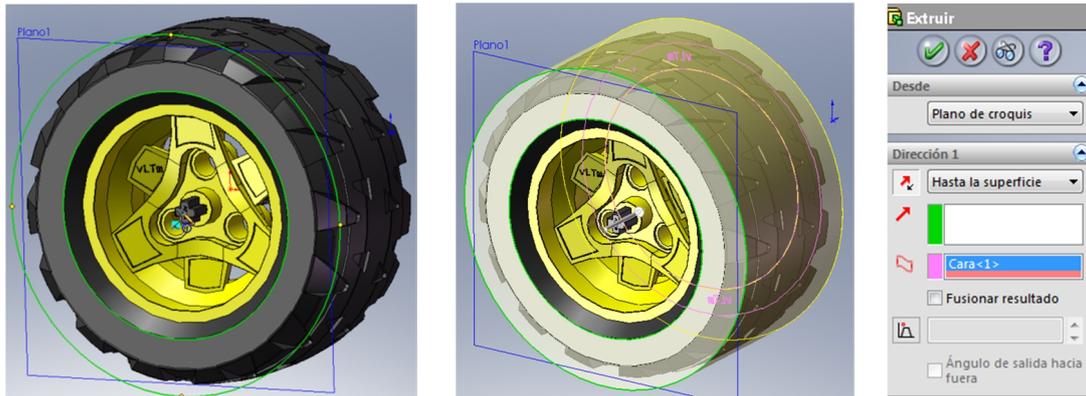


Fig. 66. Creación del anillo y extrusión

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

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

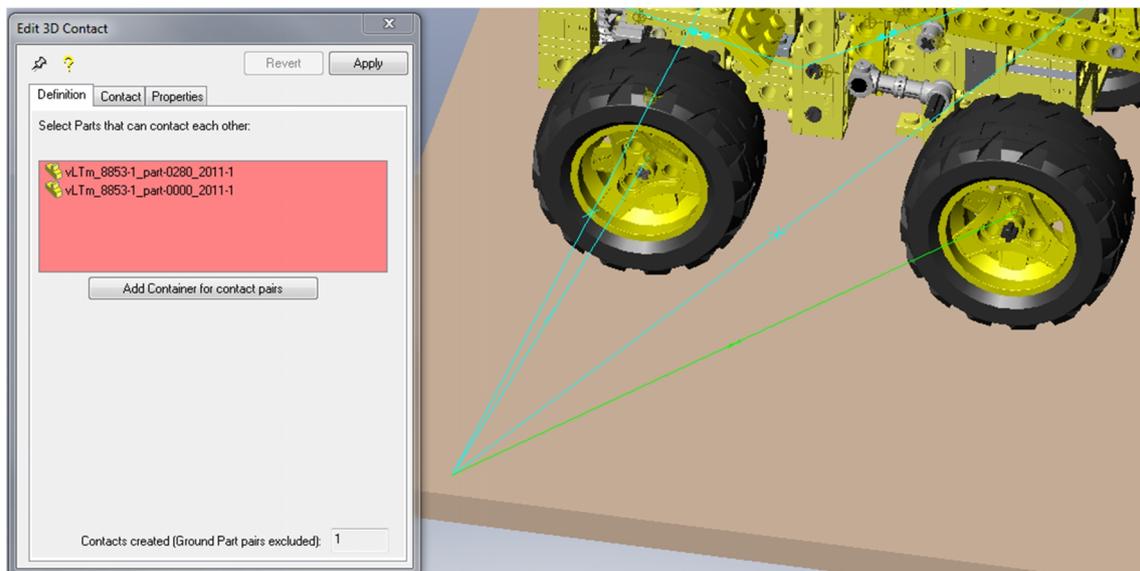


Fig. 67. Edición de contacto 3D rueda – base

6.2.2.3. Parámetros de la simulación

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

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

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

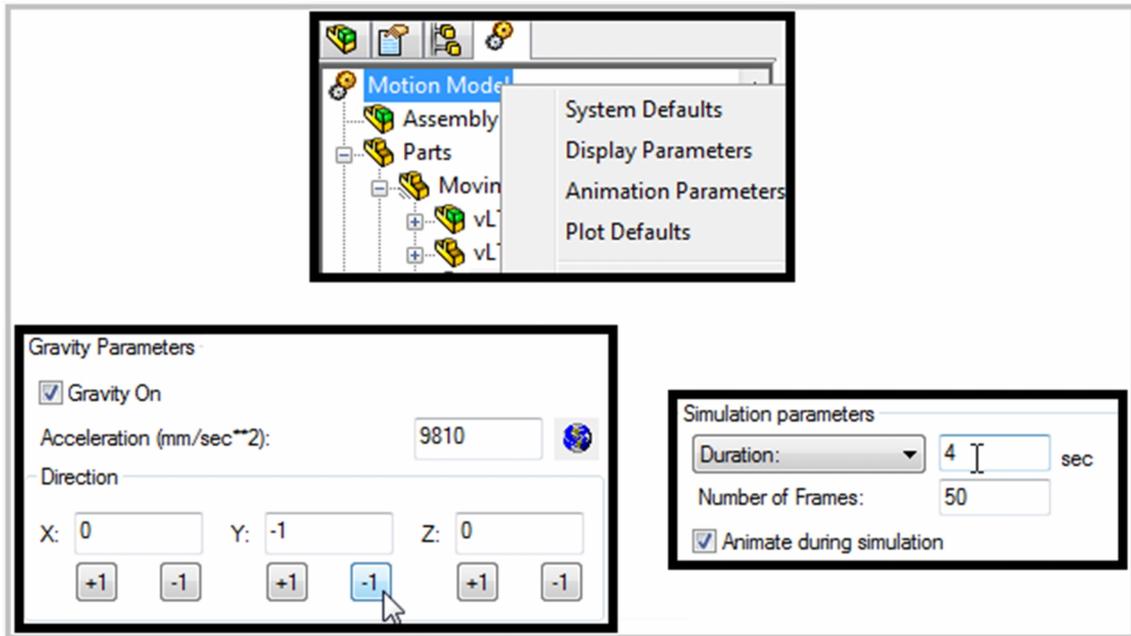


Fig. 68. Edición de los parámetros de la simulación

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

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

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

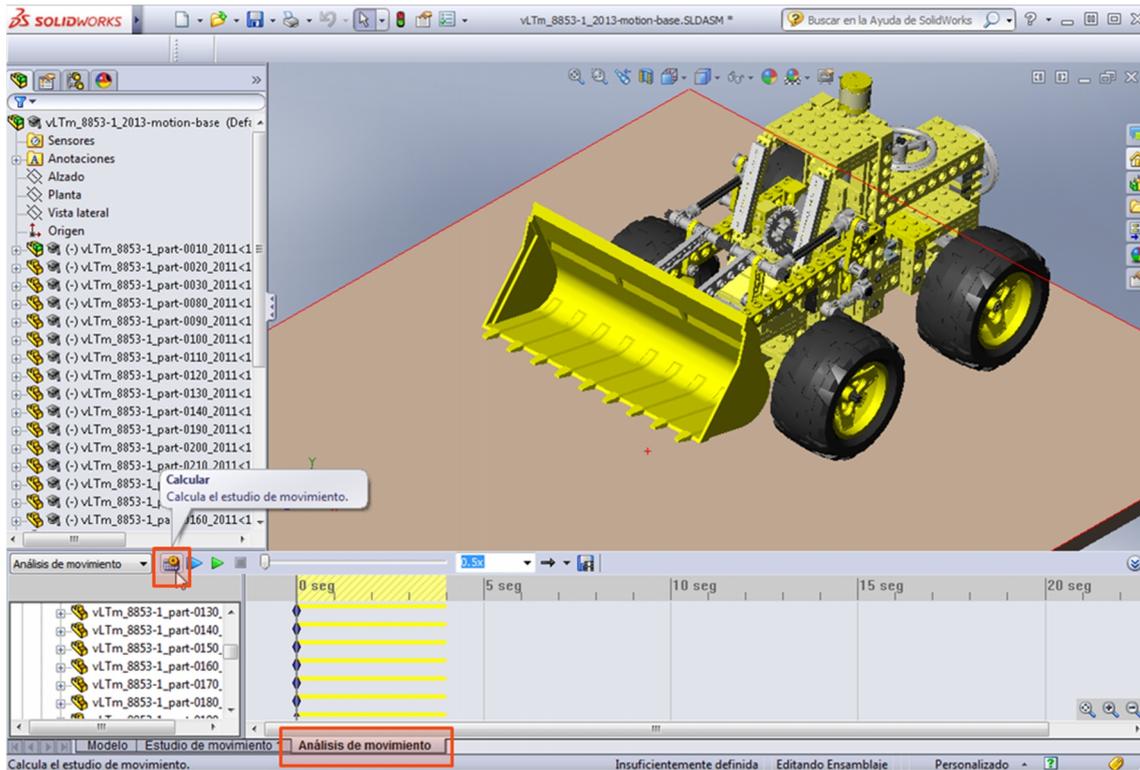


Fig. 69. Creación de la simulación en SolidWorks 2013

Si se desea, se puede exportar la simulación en un archivo de vídeo, de esta manera se tiene un documento final que muestra el modelo virtual de un modelo LEGO Technic simulando el movimiento que el mecanismo real posee.

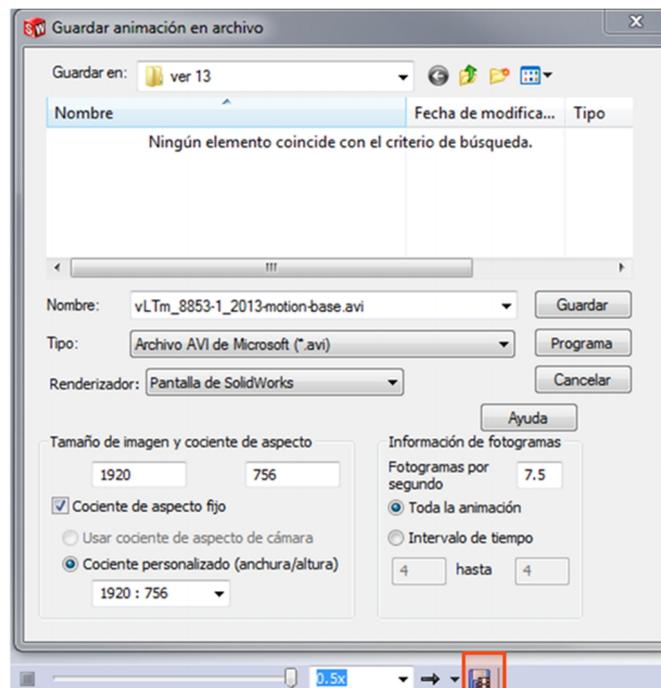


Fig. 70. Exportación de la simulación en formato .avi

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

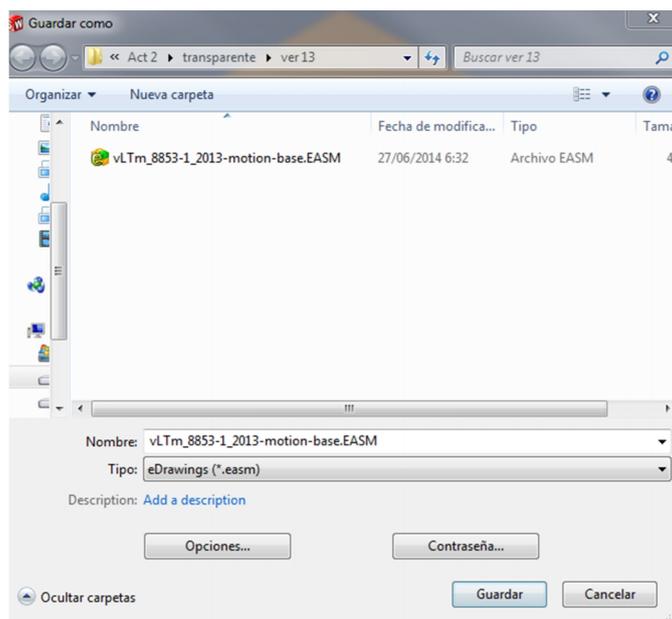


Fig. 71. Exportación en formato .easm



7. CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES

En este capítulo se expondrán todos los modelos con los que se ha trabajado durante este TFG. Según el modelo, se ha trabajado en la construcción virtual de sus piezas a partir de sus componentes y posterior ensamblado, en su montaje a partir de piezas compactadas y simulados o la simulación del modelo recorriendo todo el proceso desde la creación de piezas.

7.1. Mecanismos Isogawa Yoshihito

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

7.1.1. Creación modelo virtual TORA – 002

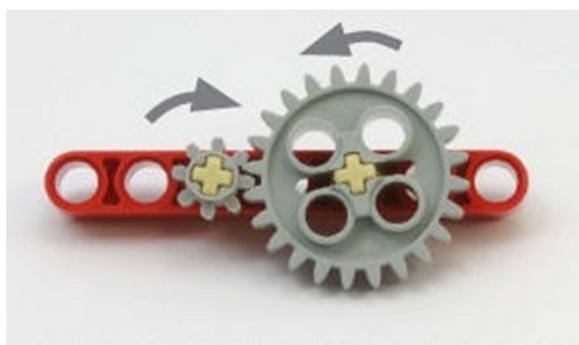


Fig. 72. Modelo TORA-002, Isogawa Yoshihito

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

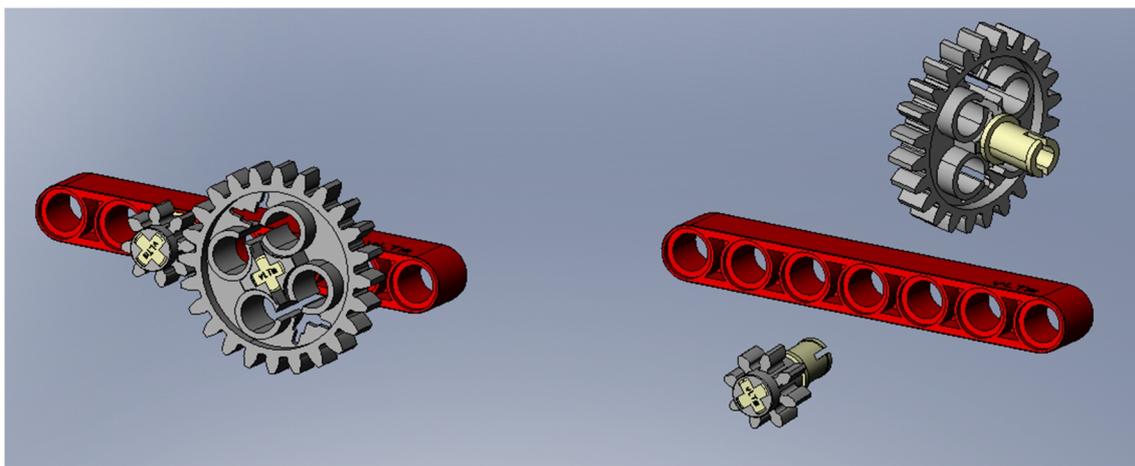


Fig. 73. Modelo virtual TORA-002 junto con las piezas que lo componen

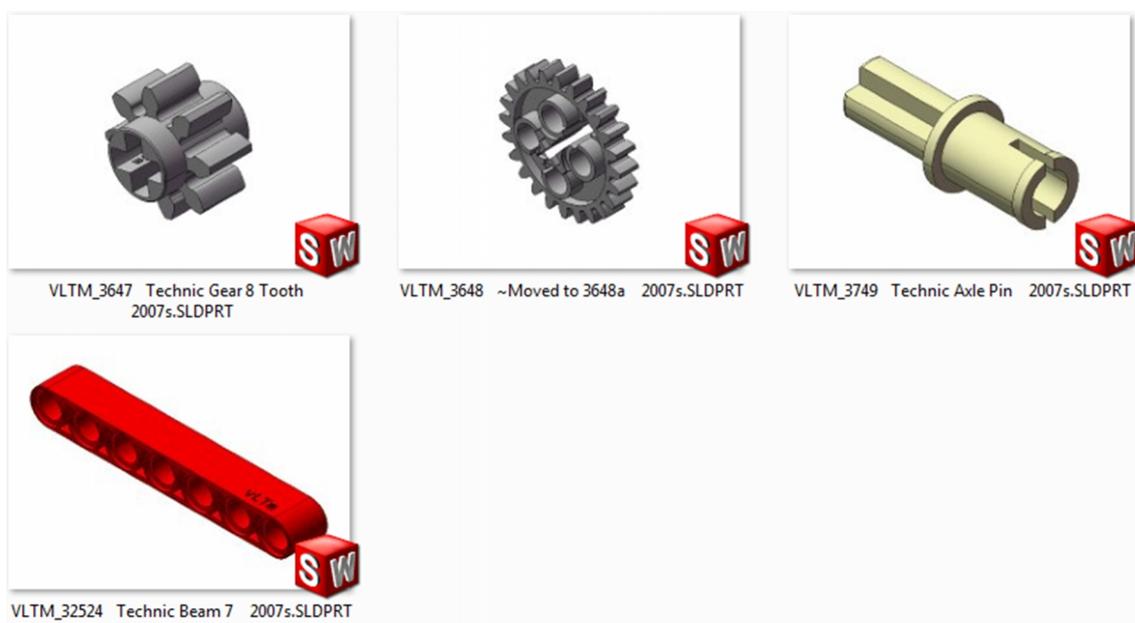


Fig. 74. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-002

7.1.2. Creación modelo virtual TORA – 008

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

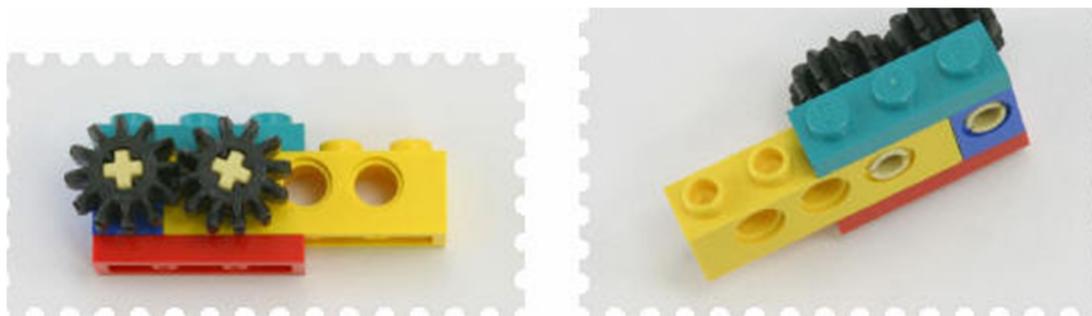


Fig. 75. Modelo TORA-008, Isogawa Yoshihito

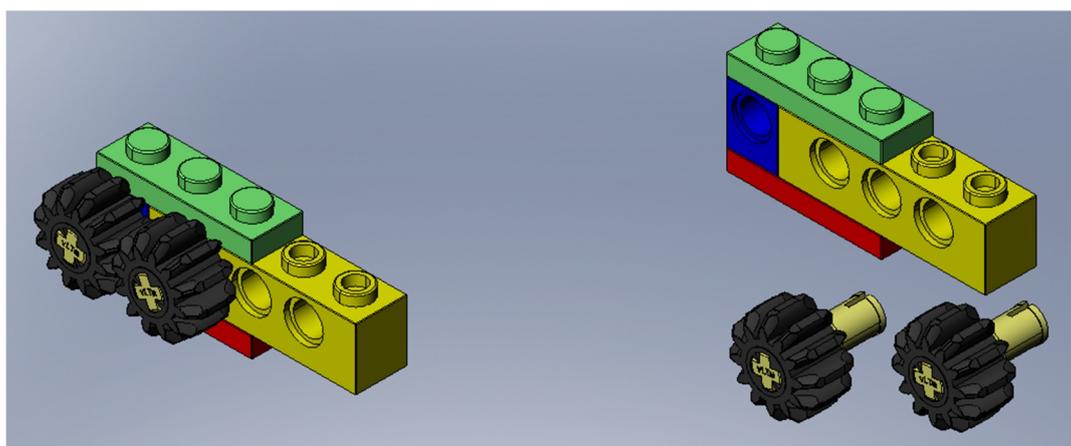


Fig. 76. Modelo virtual TORA-008 junto con las piezas que lo componen

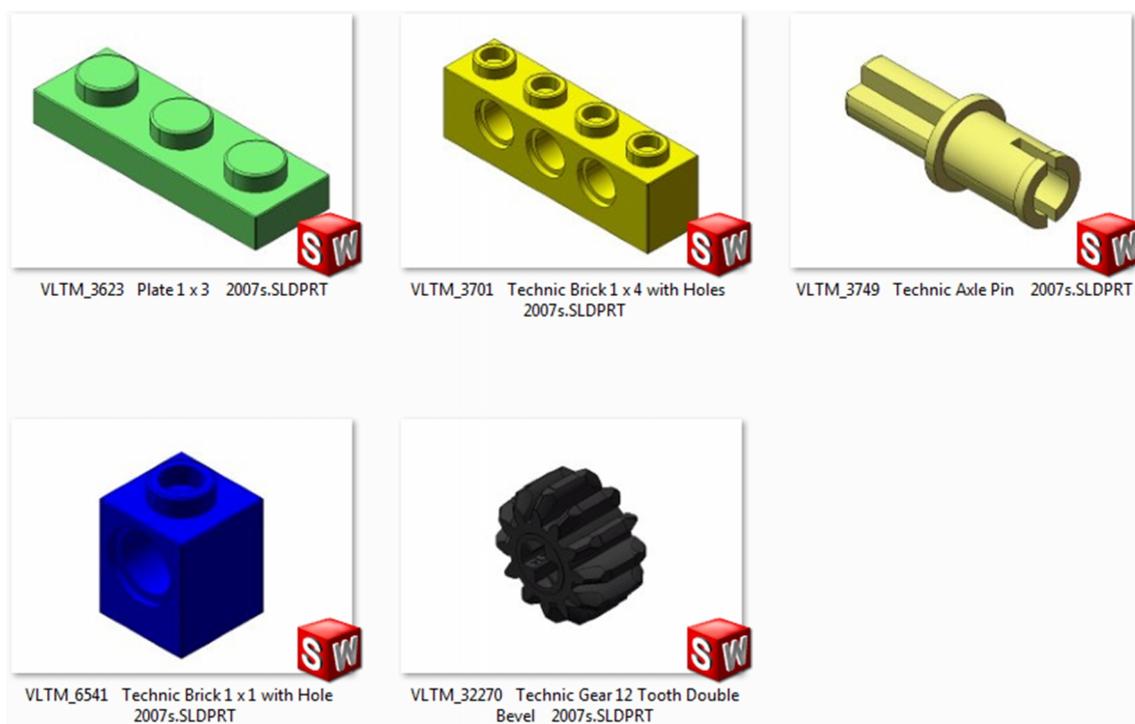


Fig. 77. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-008

7.1.3. Creación modelo virtual TORA – 009

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

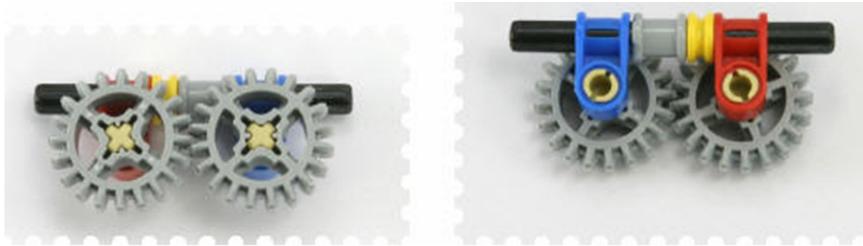


Fig. 78. Modelo TORA-009, Isogawa Yoshihito

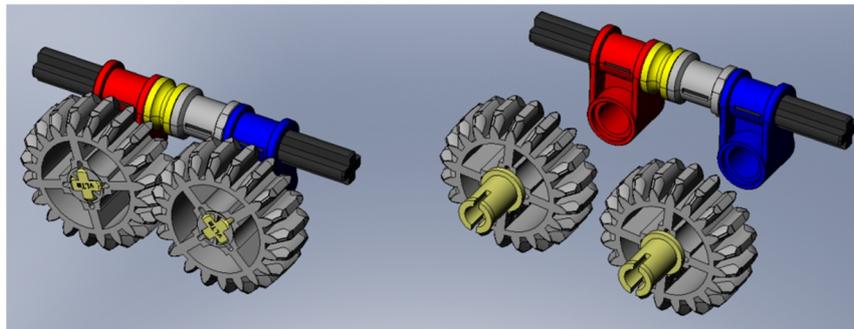


Fig. 79. Modelo virtual TORA-002 junto con las piezas que lo componen

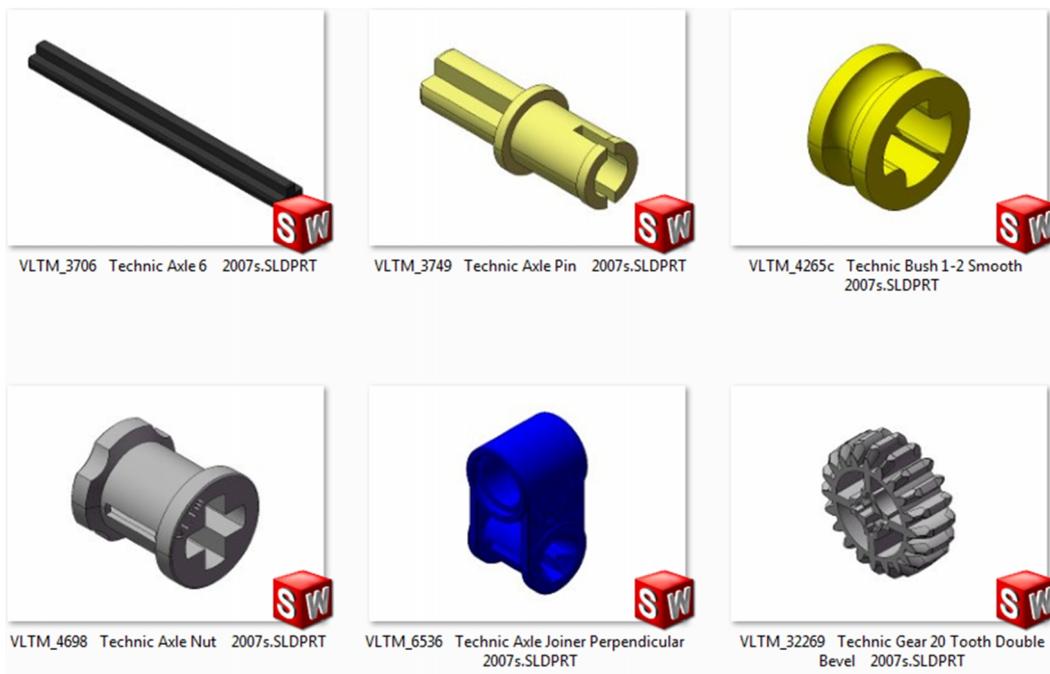


Fig. 80. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-009

7.1.4. Creación modelo virtual TORA – 013

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



Fig. 81. Modelo TORA-013, Isogawa Yoshihito

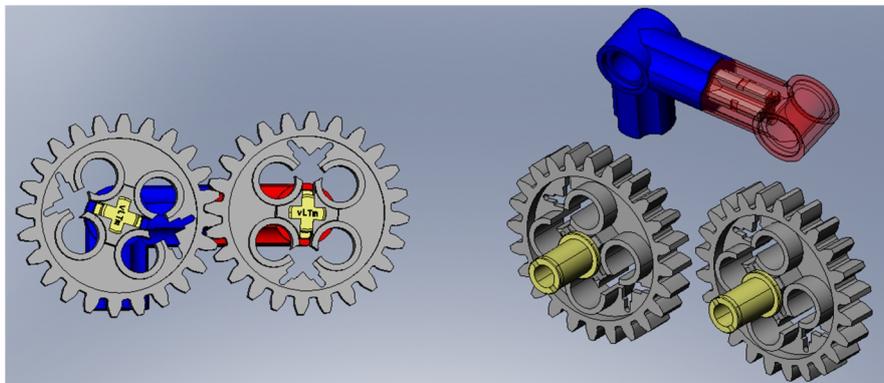


Fig. 82. Modelo virtual TORA-013 junto con las piezas que lo componen

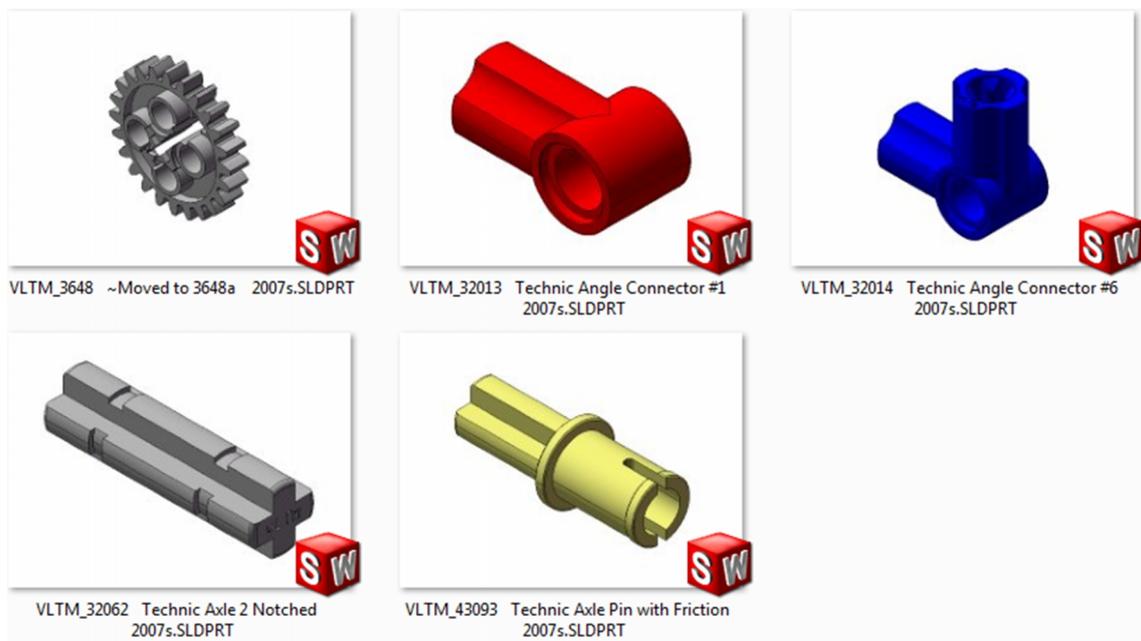


Fig. 83. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-013

7.1.5. Creación modelo virtual TORA – 026

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



Fig. 84. Modelo TORA-026, Isogawa Yoshihito

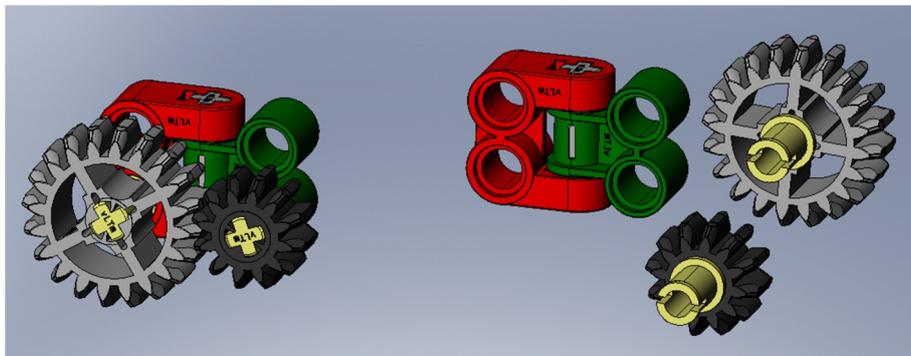


Fig. 85. Modelo virtual TORA-026 junto con las piezas que lo componen

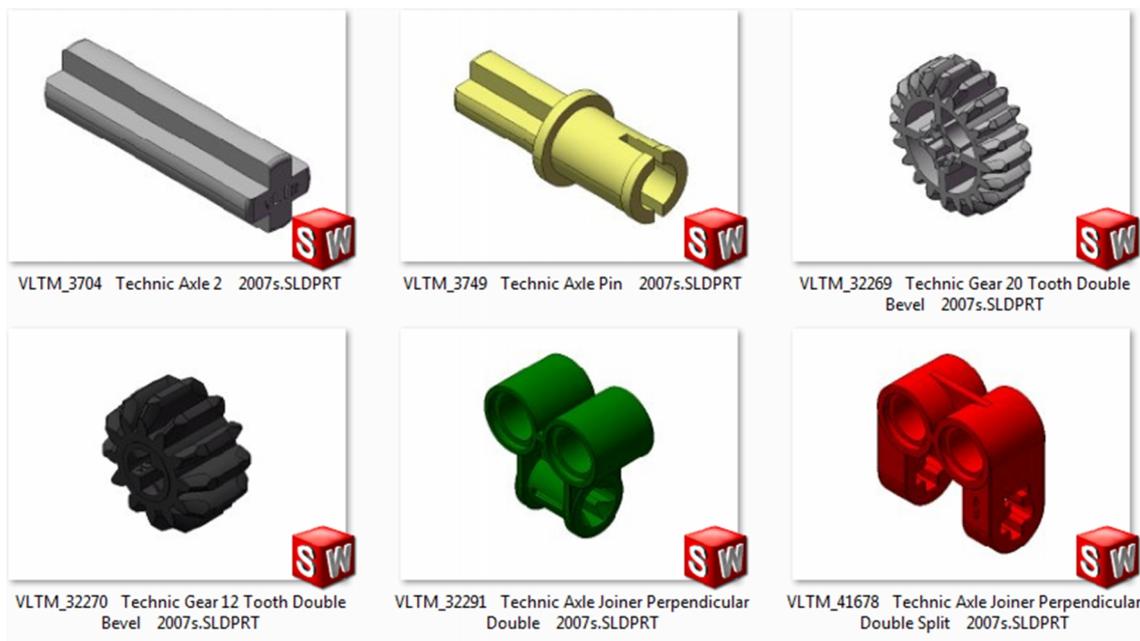


Fig. 86. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-026

7.1.6. Creación modelo virtual TORA – 037

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



Fig. 87. Modelo TORA-037, Isogawa Yoshihito

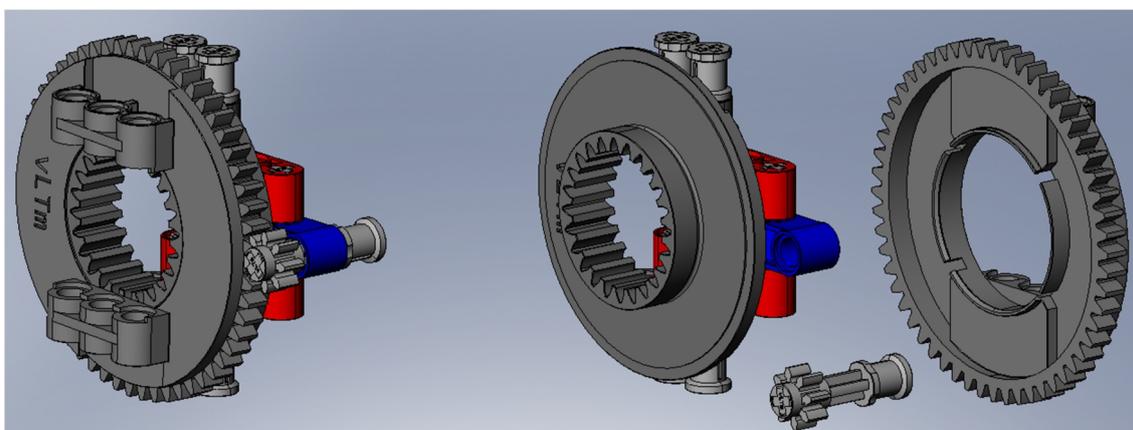


Fig. 88. Modelo virtual TORA-037 junto con las piezas que lo componen



Fig. 89. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-037

7.1.7. Creación modelo virtual TORA – 040

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

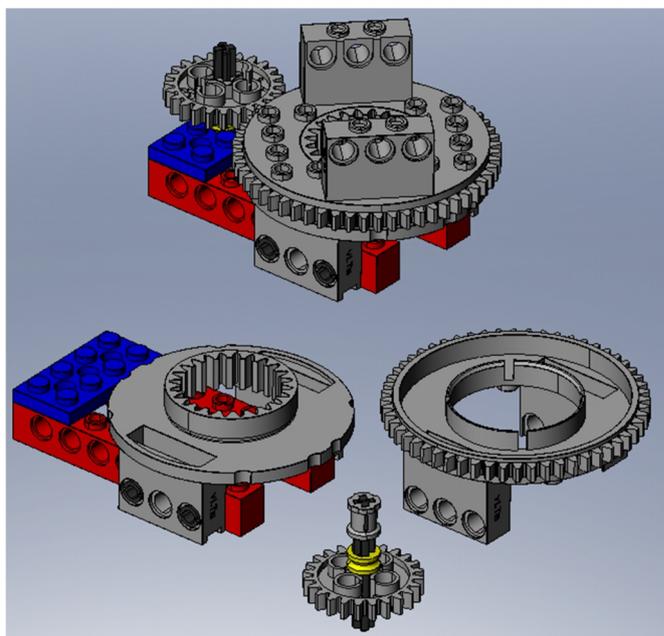


Fig. 90. Modelo virtual TORA-040 junto con las piezas que lo componen

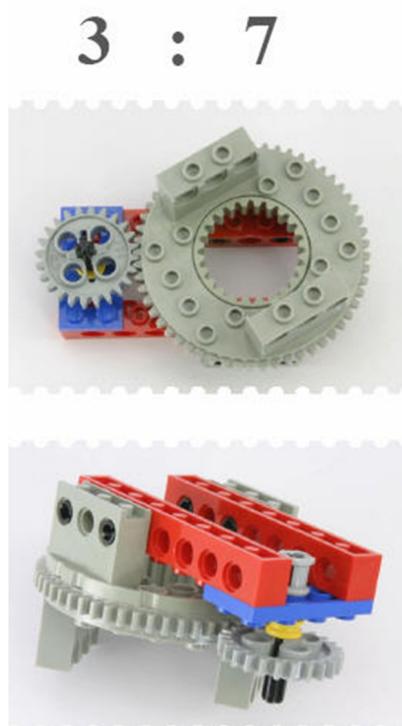


Fig. 91. Modelo TORA-040, Isogawa Yoshihito

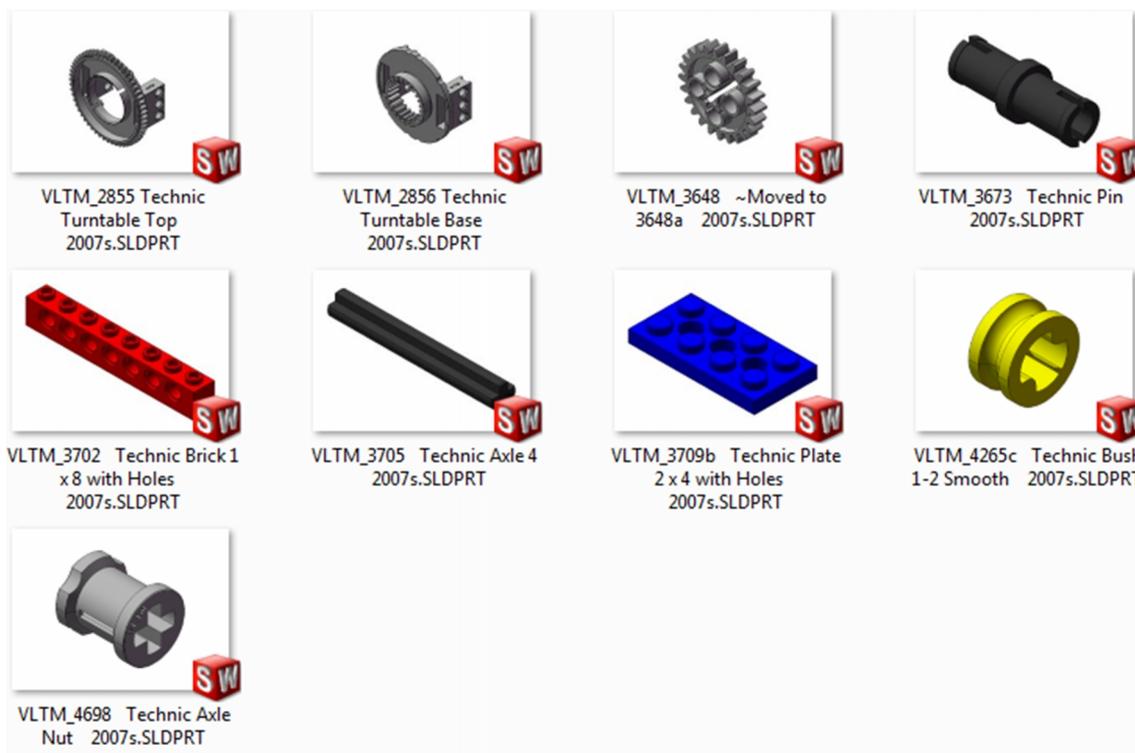


Fig. 92. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-040

7.1.8. Creación modelo virtual TORA – 051

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes con ejes perpendiculares.

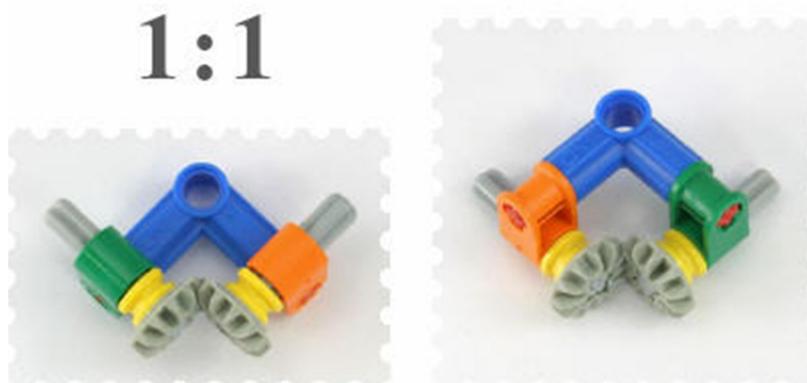


Fig. 93. Modelo TORA-051, Isogawa Yoshihito

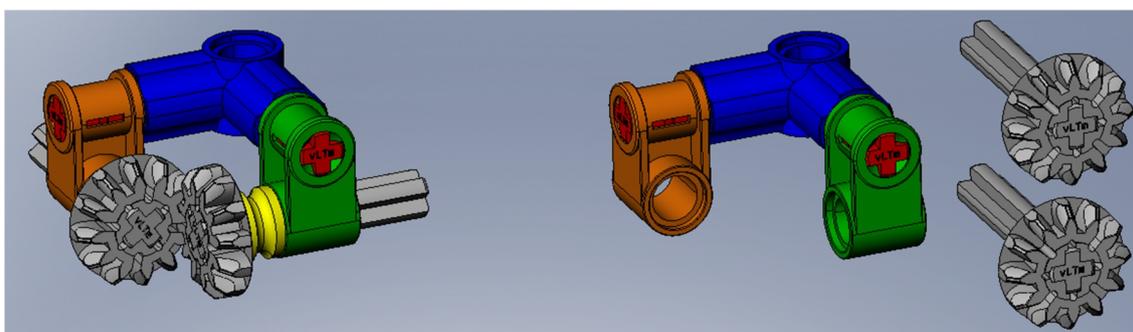


Fig. 94. Modelo virtual TORA-051 junto con las piezas que lo componen

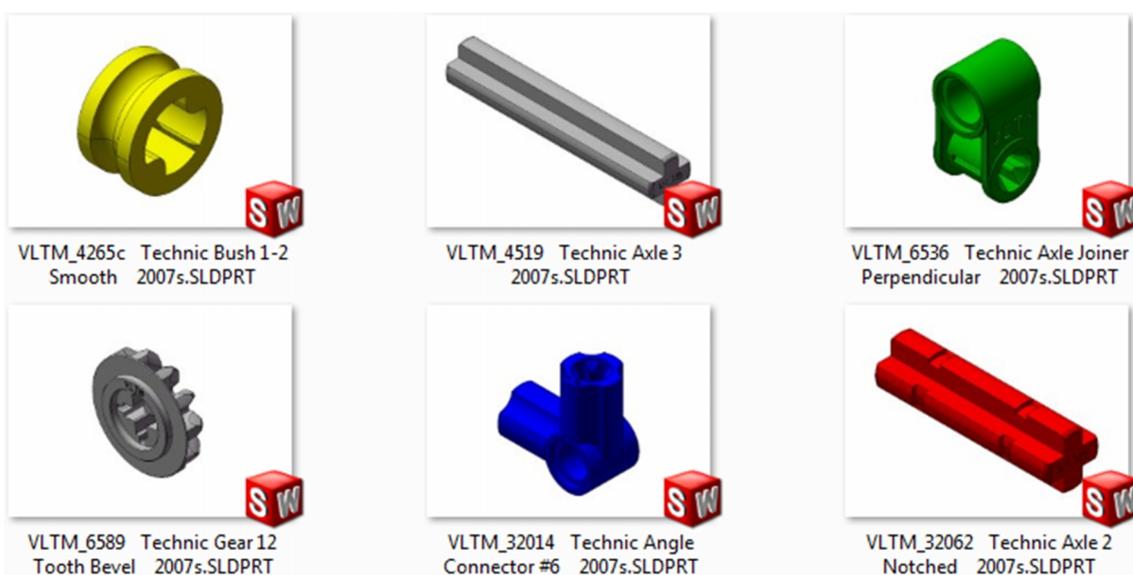


Fig. 95. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-051

7.1.9. Creación modelo virtual TORA – 059

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes con ejes perpendiculares.



Fig. 96. Modelo TORA-059, Isogawa Yoshihito

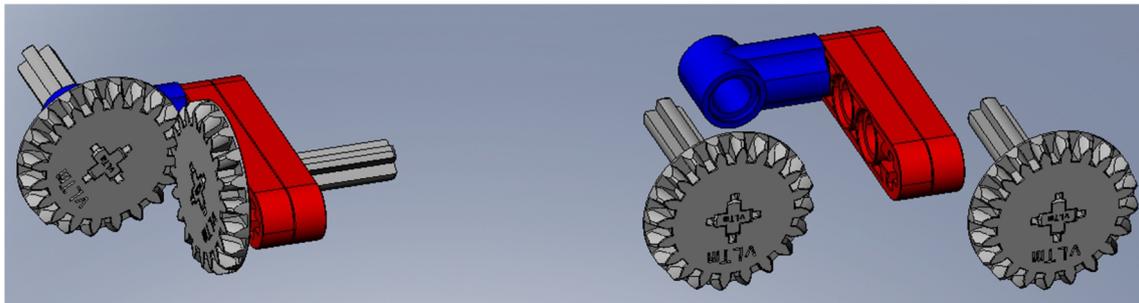


Fig. 97. Modelo virtual TORA-059 junto con las piezas que lo componen

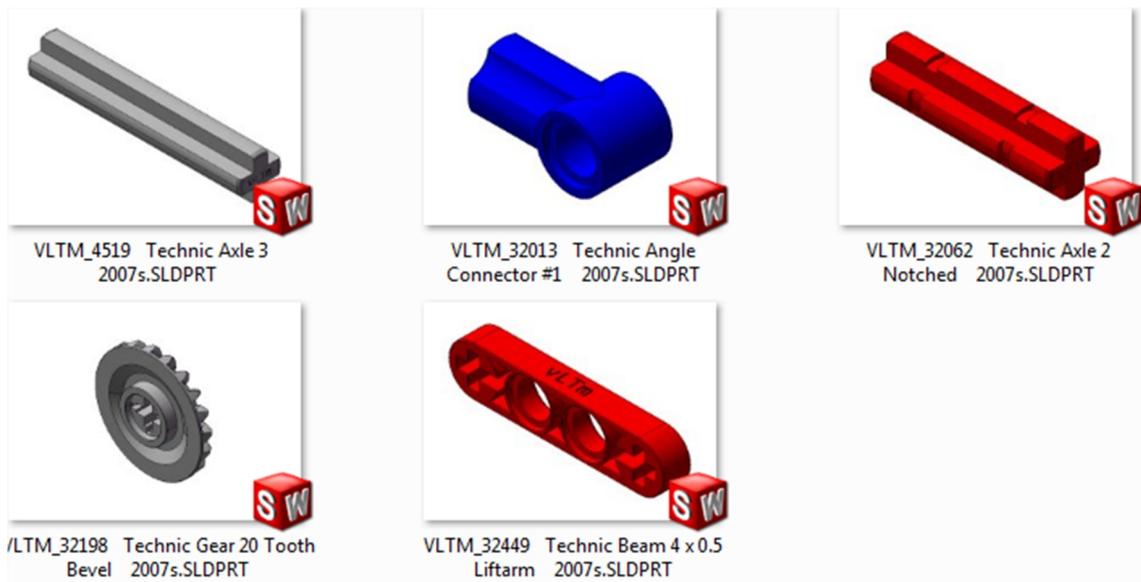


Fig. 98. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-059

7.1.10. Creación modelo virtual TORA – 062

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes de tipo bola.

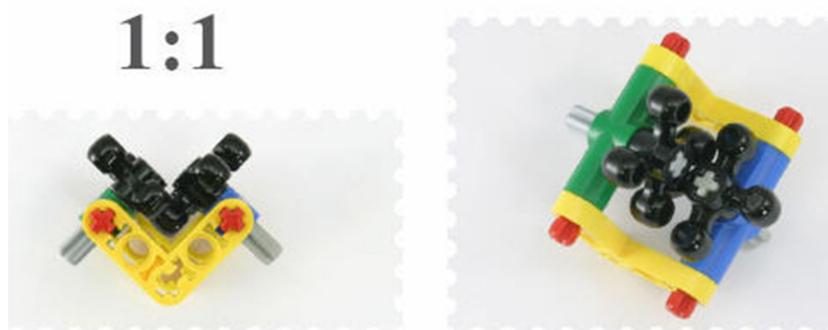


Fig. 99. Modelo TORA-062, Isogawa Yoshihito

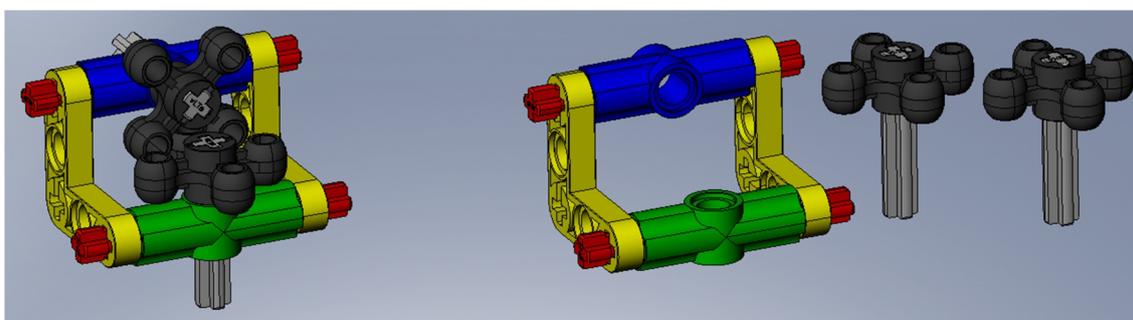


Fig. 100. Modelo virtual TORA-062 junto con las piezas que lo componen



Fig. 101. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-062

7.1.11. Creación modelo virtual TORA – 075

Mecanismo consistente en transmisión mediante engranajes con ejes perpendiculares.



Fig. 102. Modelo TORA-075, Isogawa Yoshihito

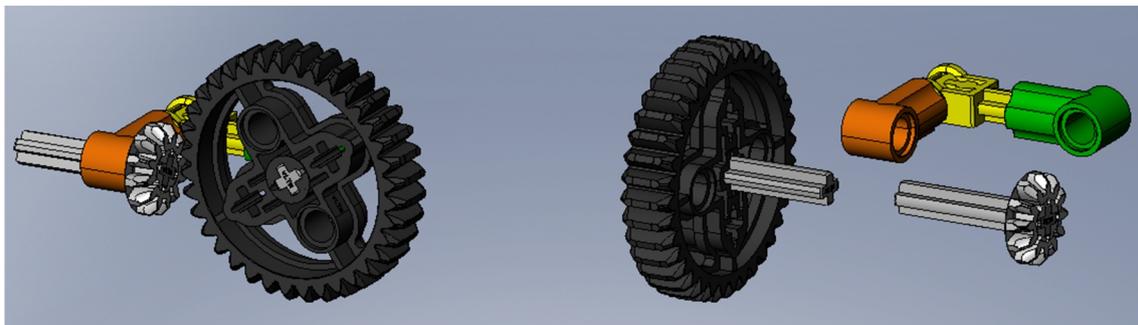


Fig. 103. Modelo virtual TORA-075 junto con las piezas que lo componen



Fig. 104. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-075

7.1.12. Creación modelo virtual TORA – 079

Mecanismo de transmisión tornillo sin fin.

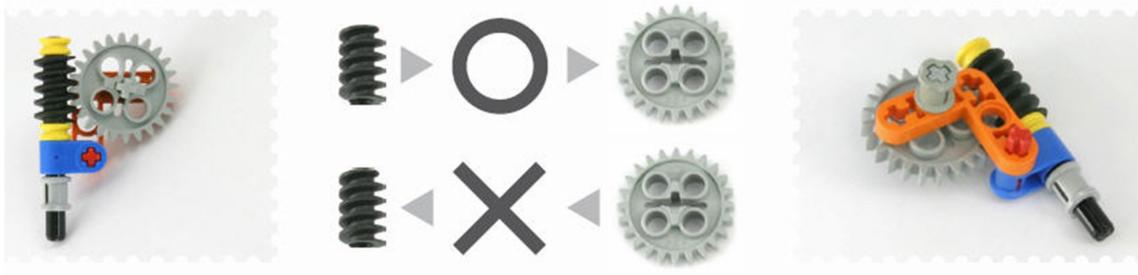


Fig. 105. Modelo TORA-079, Isogawa Yoshihito

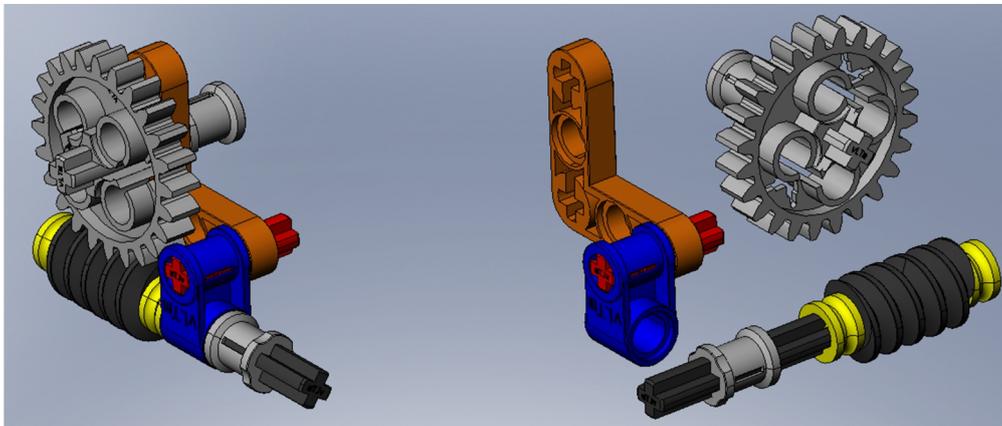


Fig. 106. Modelo virtual TORA-079 junto con las piezas que lo componen

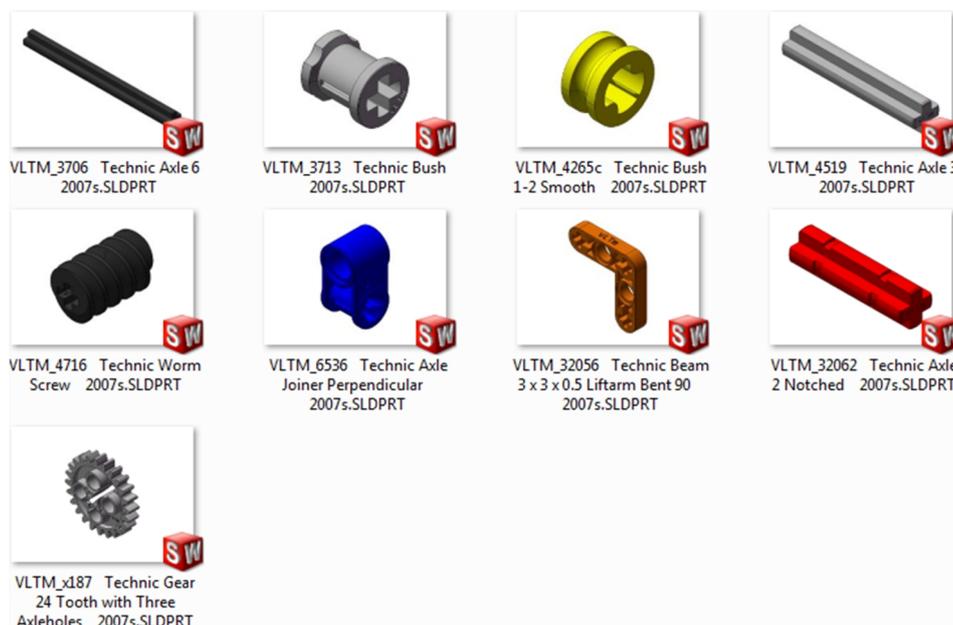


Fig. 107. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-079

7.1.13. Creación modelo virtual TORA – 093

Mecanismo de conversión de movimiento rotacional a oscilatorio.



Fig. 108. Modelo TORA-093, Isogawa Yoshihito

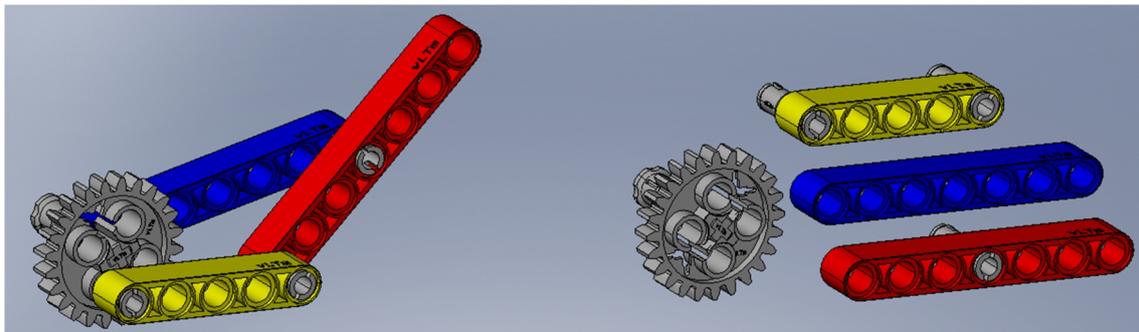


Fig. 109. Modelo virtual TORA-093 junto con las piezas que lo componen



Fig. 110. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-093

7.1.14. Creación modelo virtual TORA – 098

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



Fig. 111. Modelo TORA-098, Isogawa Yoshihito

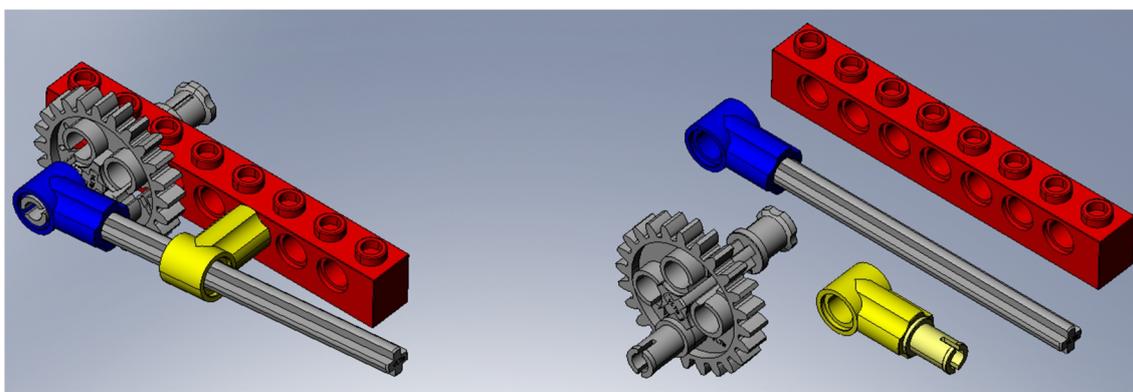


Fig. 112. Modelo virtual TORA-098 junto con las piezas que lo componen

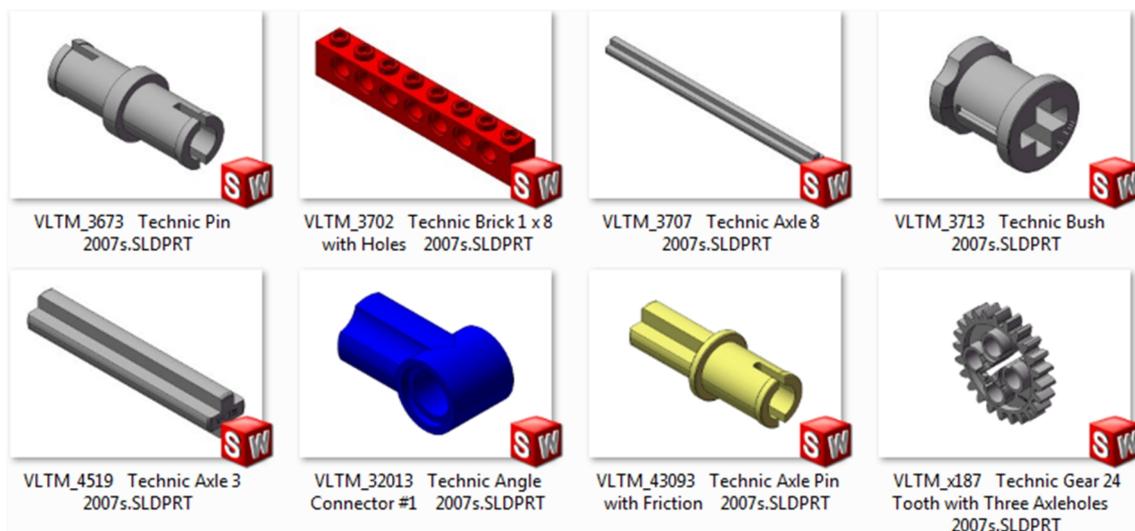


Fig. 113. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-098

7.1.15. Creación modelo virtual TORA – 102

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

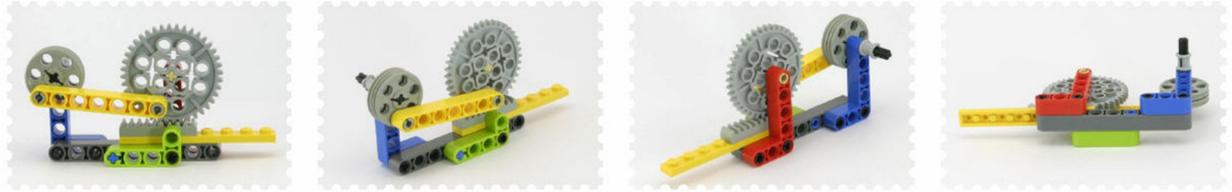


Fig. 114. Modelo TORA-102, Isogawa Yoshihito

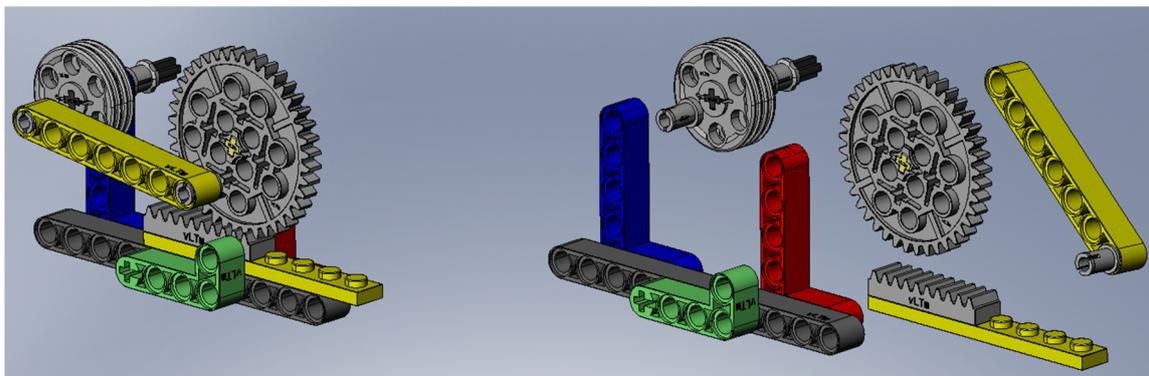


Fig. 115. Modelo virtual TORA-102 junto con las piezas que lo componen



Fig. 116. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-102

7.1.16. Creación modelo virtual TORA – 107

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

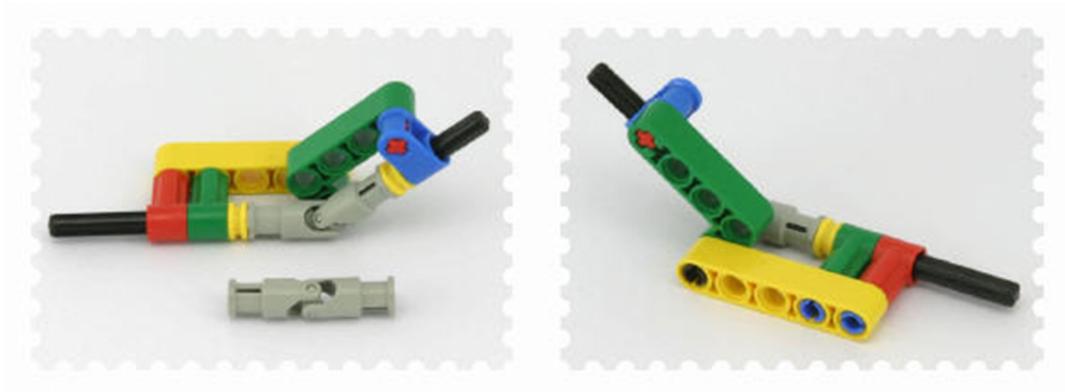


Fig. 117. Modelo TORA-107, Isogawa Yoshihito

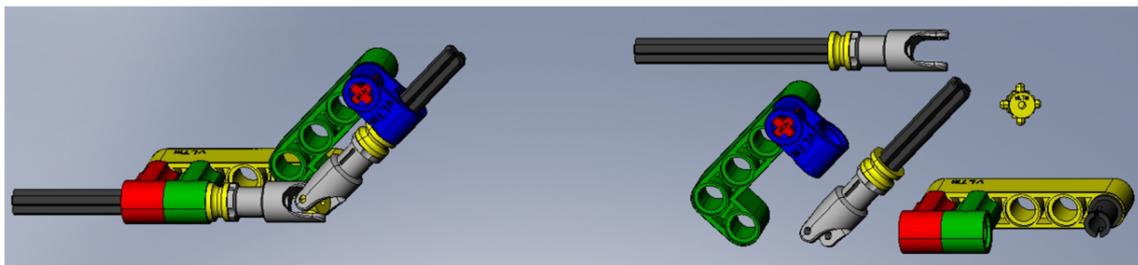


Fig. 118. Modelo virtual TORA-107 junto con las piezas que lo componen



Fig. 119. Componentes utilizados en la creación del modelo virtual TORA-107



7.1.17. Creación modelo virtual T-1610

Modelo de un vehículo motorizado de Isogawa Yoshihito.

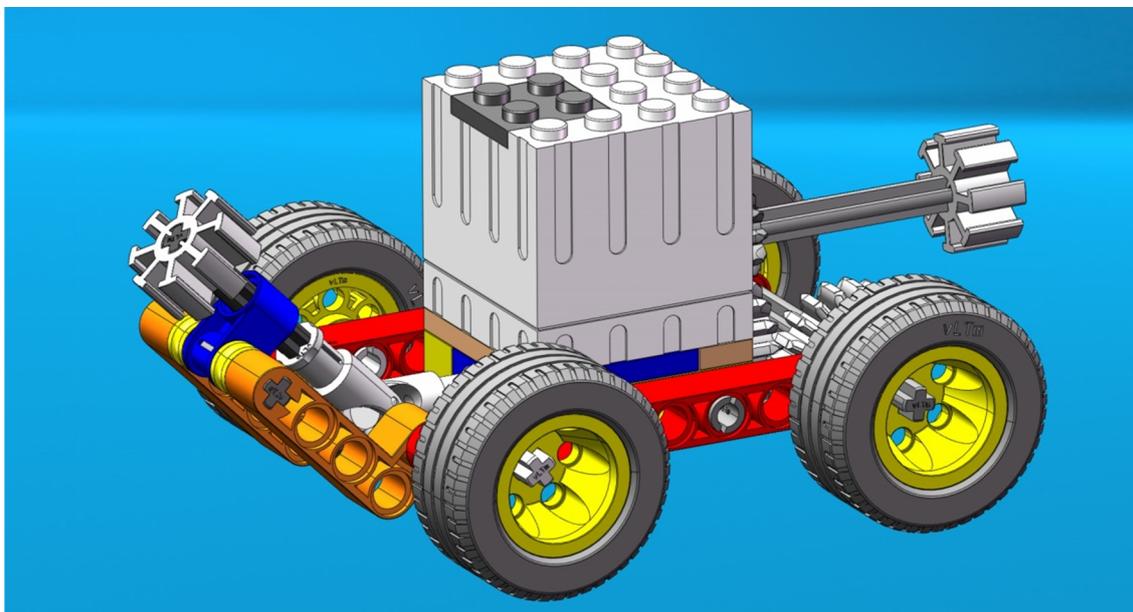


Fig. 120. Modelo virtual T-1610

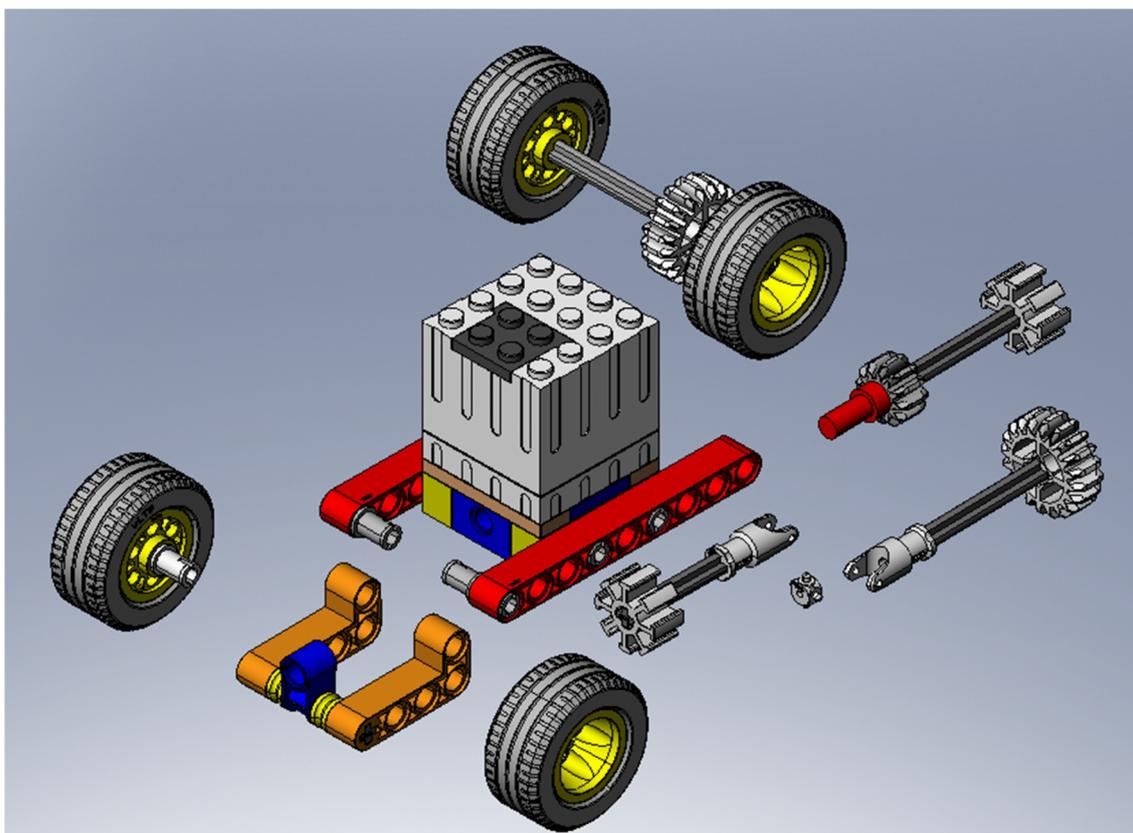


Fig. 121. Piezas del modelo virtual T-1610

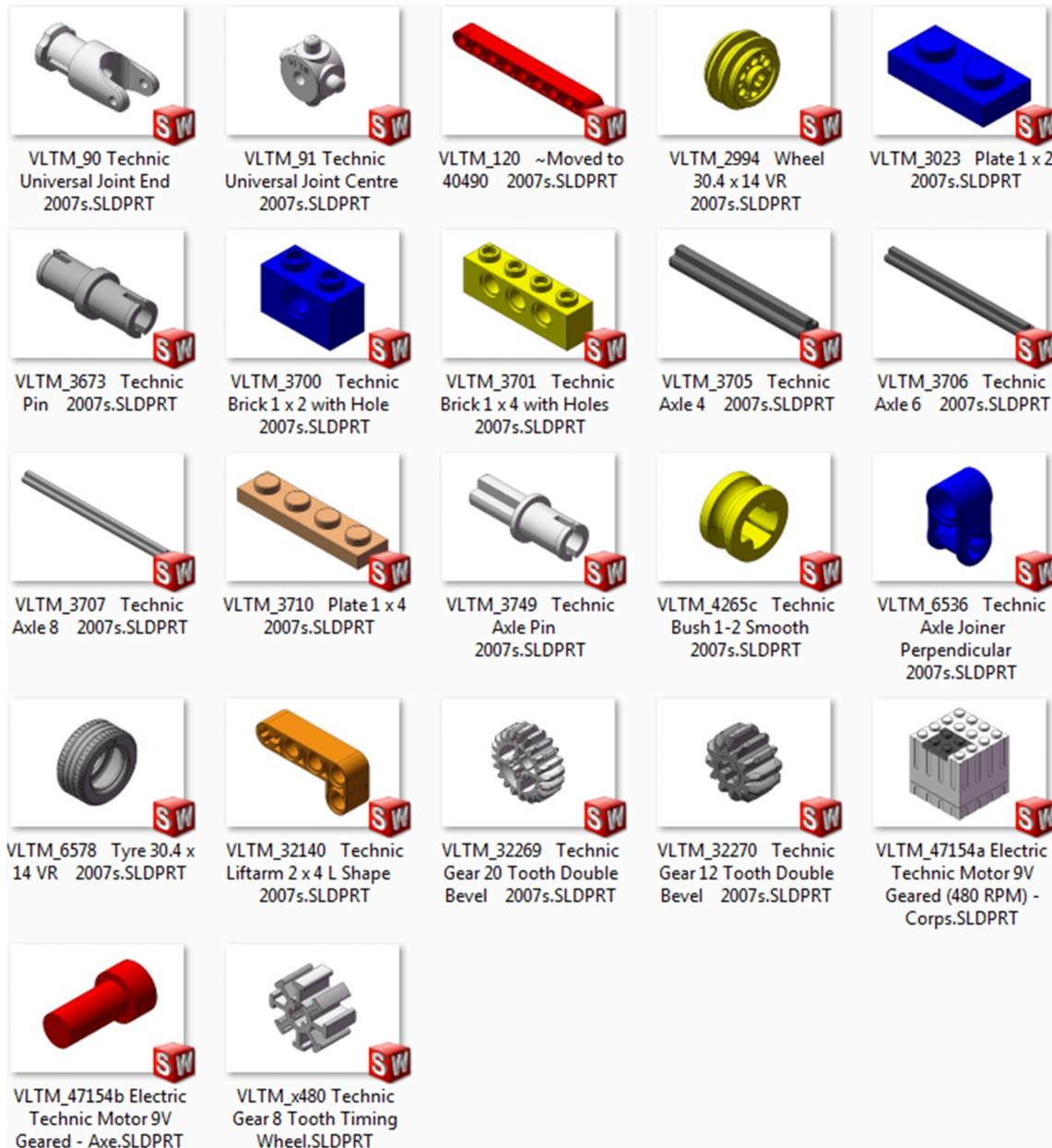


Fig. 122. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual T-1610

7.2. Creación modelo virtual 8890-5

Primer modelo virtual de un modelo LEGO Technic: vehículo de tracción trasera accionada manualmente con dirección mediante piñón-cremallera.

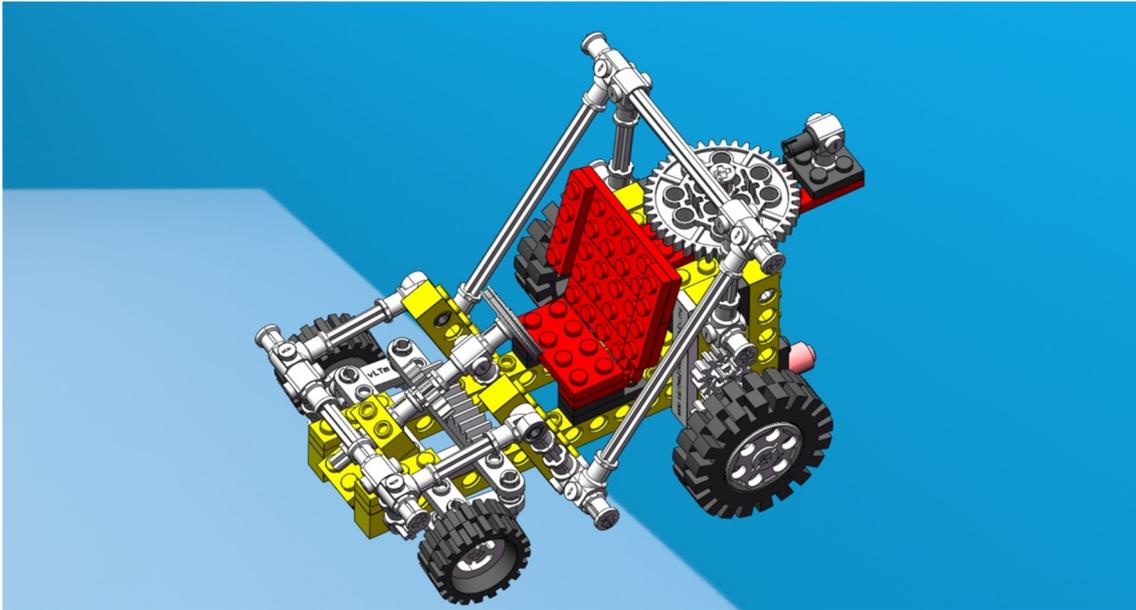


Fig. 123. Modelo virtual vLTm 8890-5

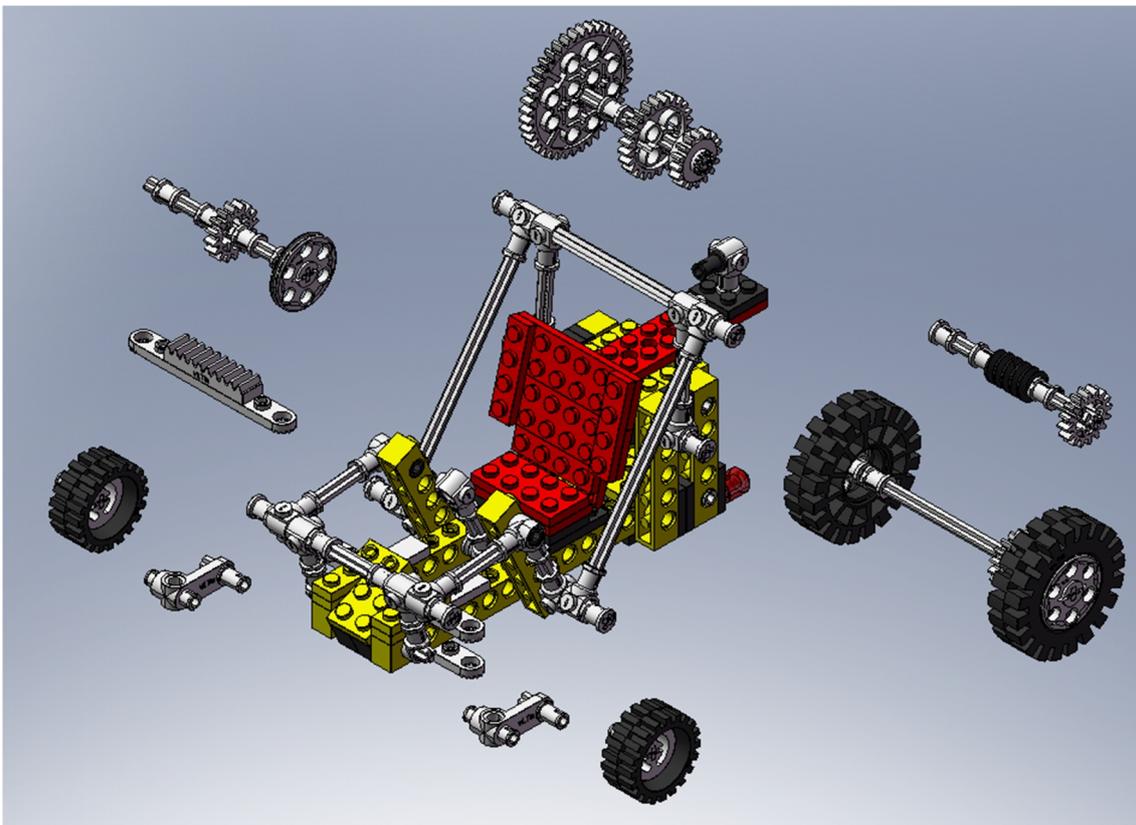


Fig. 124. Piezas del modelo virtual vLTm 8890-5

Fig. 125. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual T-1610

7.3. Creación modelo virtual TnMm-2020

Modelo motorizado con movimiento sobre patas, de Isogawa Yoshihito.



Fig. 126. T-2020

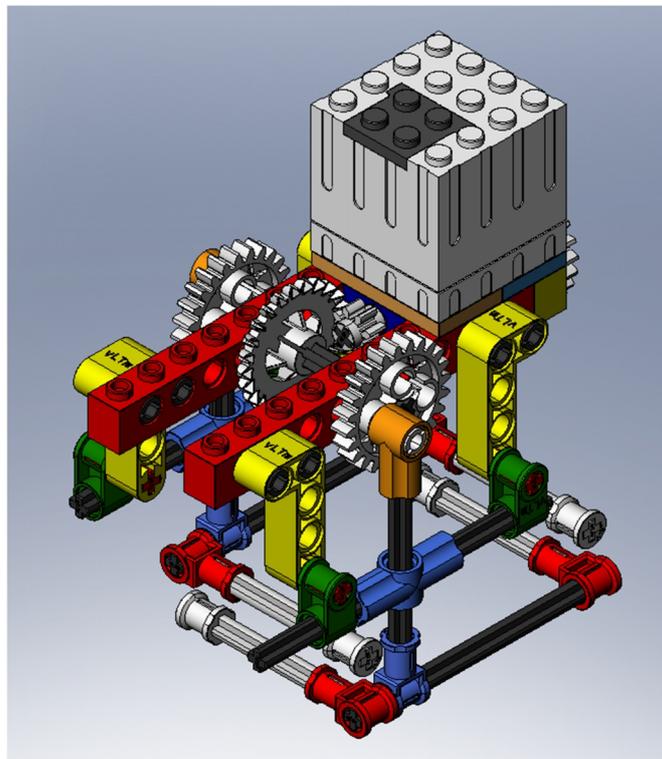


Fig. 127. Modelo virtual TnMm-2020

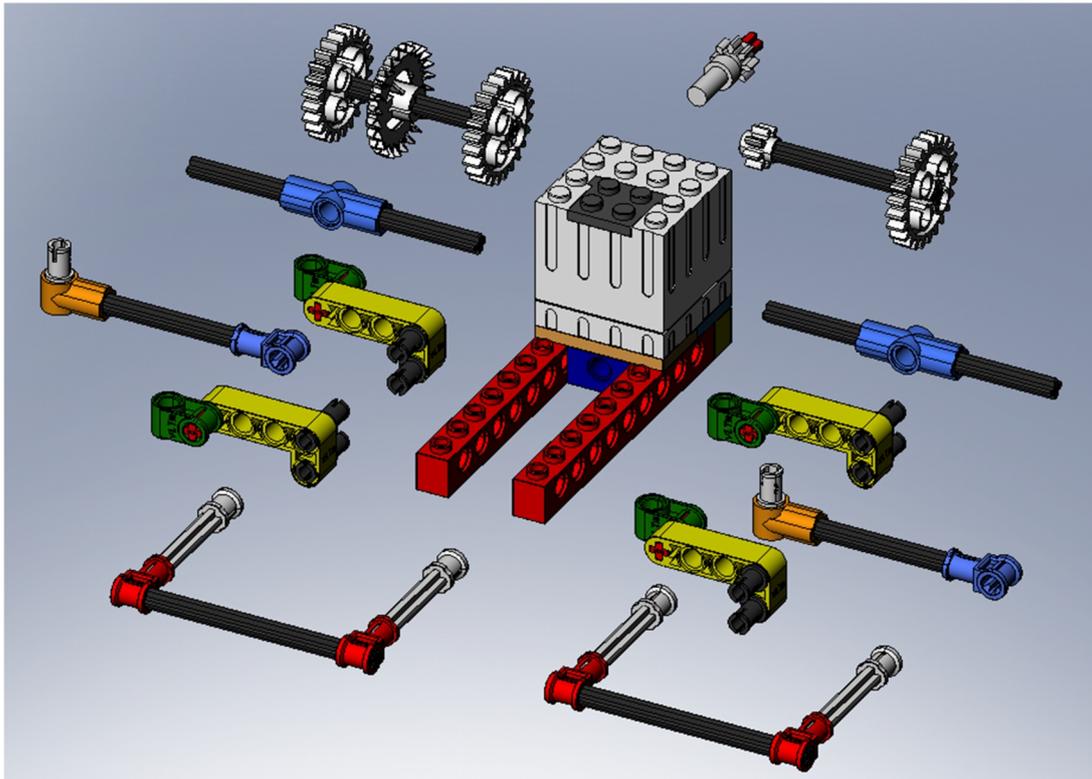


Fig. 128. Piezas del modelo virtual TnMm-2020

VLTM_2730 Technic Brick 1 x 10 with Holes 2007s.SLDPRT	VLTM_3647 Technic Gear 8 Tooth 2007s.SLDPRT	VLTM_3650a Technic Gear 24 Tooth Crown Type I (short teeth) 2007s.SLDPRT	VLTM_3673 Technic Pin 2007s.SLDPRT	VLTM_3700 Technic Brick 1 x 2 with Hole 2007s.SLDPRT	VLTM_3701 Technic Brick 1 x 4 with Holes 2007s.SLDPRT
VLTM_3704 Technic Axle 2 2007s.SLDPRT	VLTM_3705 Technic Axle 4 2007s.SLDPRT	VLTM_3706 Technic Axle 6 2007s.SLDPRT	VLTM_3707 Technic Axle 8 2007s.SLDPRT	VLTM_3709b Technic Plate 2 x 4 with Holes 2007s.SLDPRT	VLTM_3713 Technic Bush 2007s.SLDPRT
VLTM_6536 Technic Axle Joiner Perpendicular 2007s.SLDPRT	VLTM_32013 Technic Angle Connector #1 2007s.SLDPRT	VLTM_32034 Technic Angle Connector #2 2007s.SLDPRT	VLTM_32039 Technic Connector with Axlehole 2007s.SLDPRT	VLTM_32073 Technic Axle 5 2007s.SLDPRT	VLTM_32140 Technic Liftarm 2 x 4 L Shape 2007s.SLDPRT
VLTM_47154a Electric Technic Motor 9V Geared (480 RPM) - Corps.SLDPRT	VLTM_47154b Electric Technic Motor 9V Geared - Axle.SLDPRT	VLTM_x187 Technic Gear 24 Tooth with Three Axleholes 2007s.SLDPRT			

Fig. 129. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual TnMm-2020

7.4. Creación modelo virtual vLTm-8868-1

Creación de la parte trasera de un camión, incluyendo una grúa sobre base giratoria accionada neumáticamente y dos diferenciales.

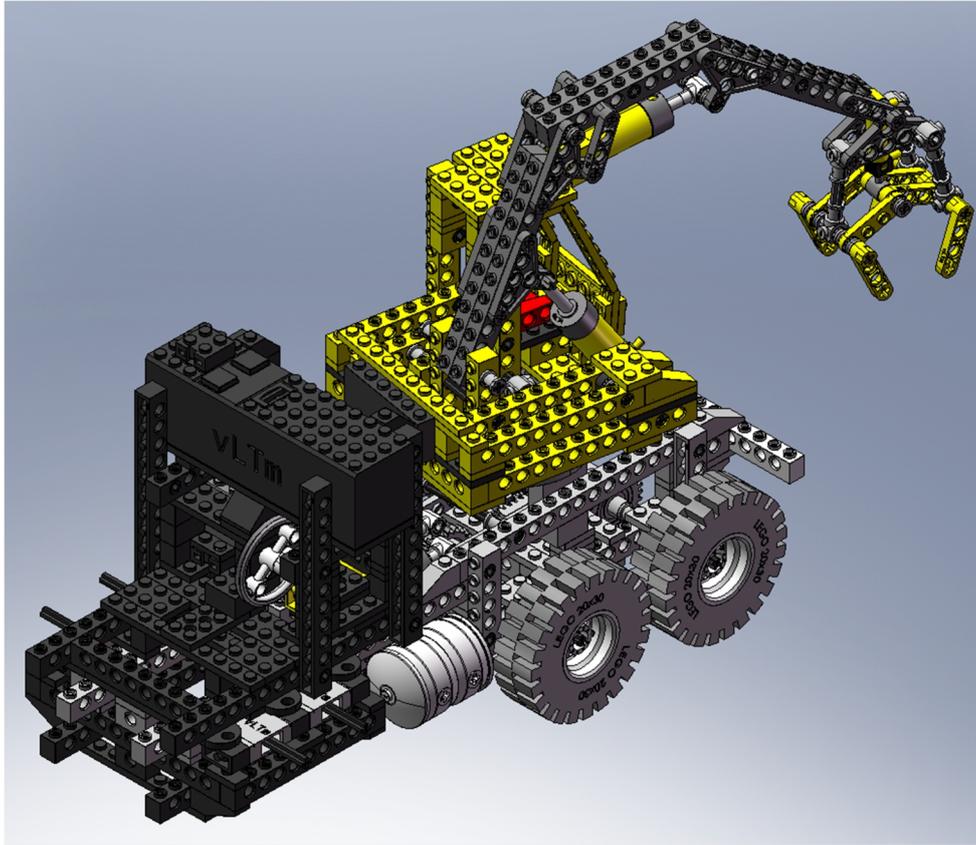


Fig. 130. Modelo virtual vLTm-8868-1

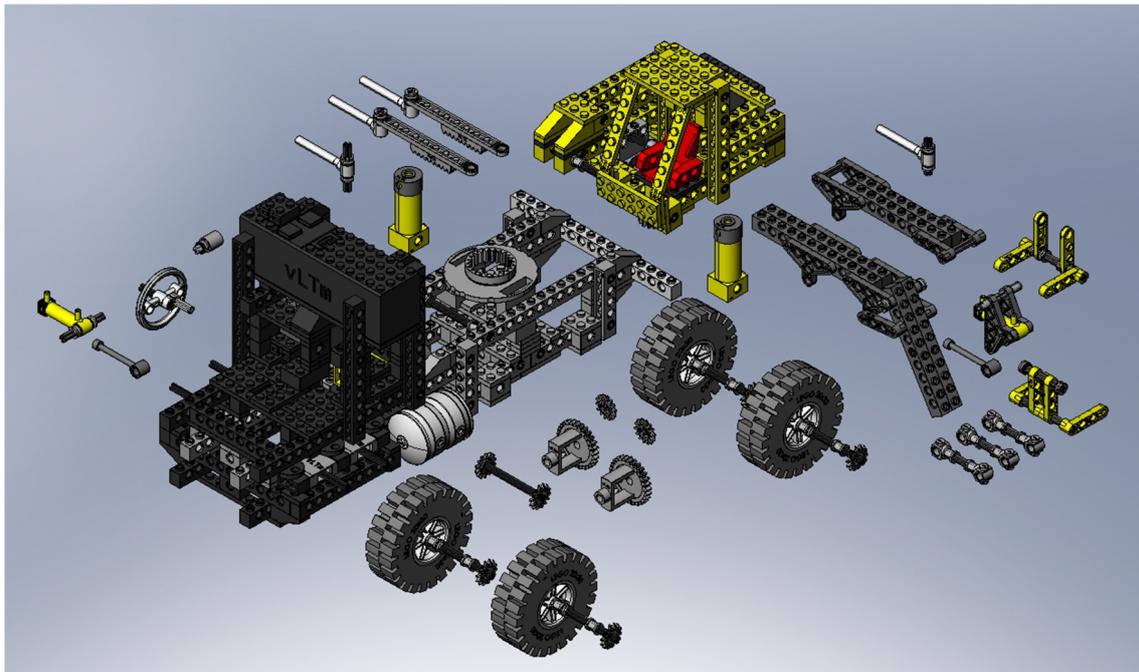


Fig. 131. Piezas del modelo virtual vLTm-8868-1

CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC

Fig. 132. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8868-1 (1)

CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC

Fig. 133. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8868-1 (2)



7.5. Creación modelo virtual vLTm – 8466-1

Modelo completo del set comercial LEGO Technic 8466-1. Se trata de un vehículo 4x4, con suspensión delantera y trasera con transmisión diferencial. Dispone de lo que sería un motor de 8 cilindros en V con pistones visibles, puertas de ala de gaviota accionadas manualmente con escalón accionado neumáticamente y una grúa neumática en la parte trasera.

Para la construcción de este modelo se ha utilizado un documento eDrawings del mismo modelo virtual construido anteriormente. Con la reconstrucción de este modelo se ha conseguido que cumpla con las condiciones de este trabajo, con lo que se consigue un mayor rendimiento computacional para proceder con la simulación.



Fig. 134. Modelo virtual vLTm-8466-1

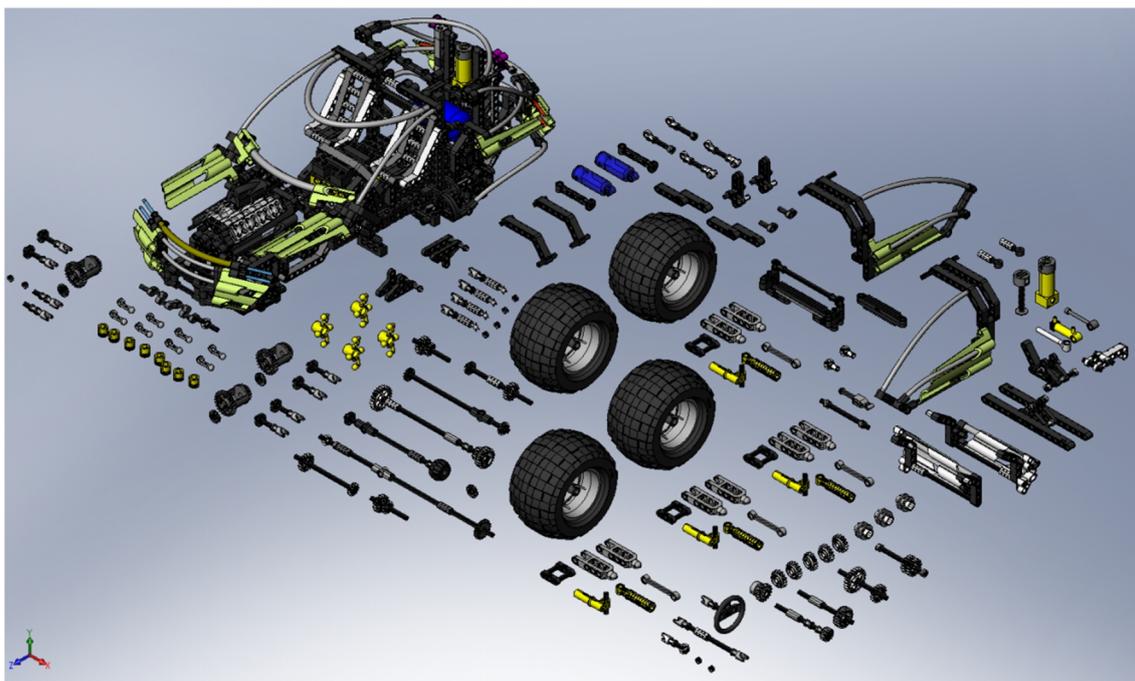


Fig. 135. Piezas que componen el modelo virtual vLTm-8466-1

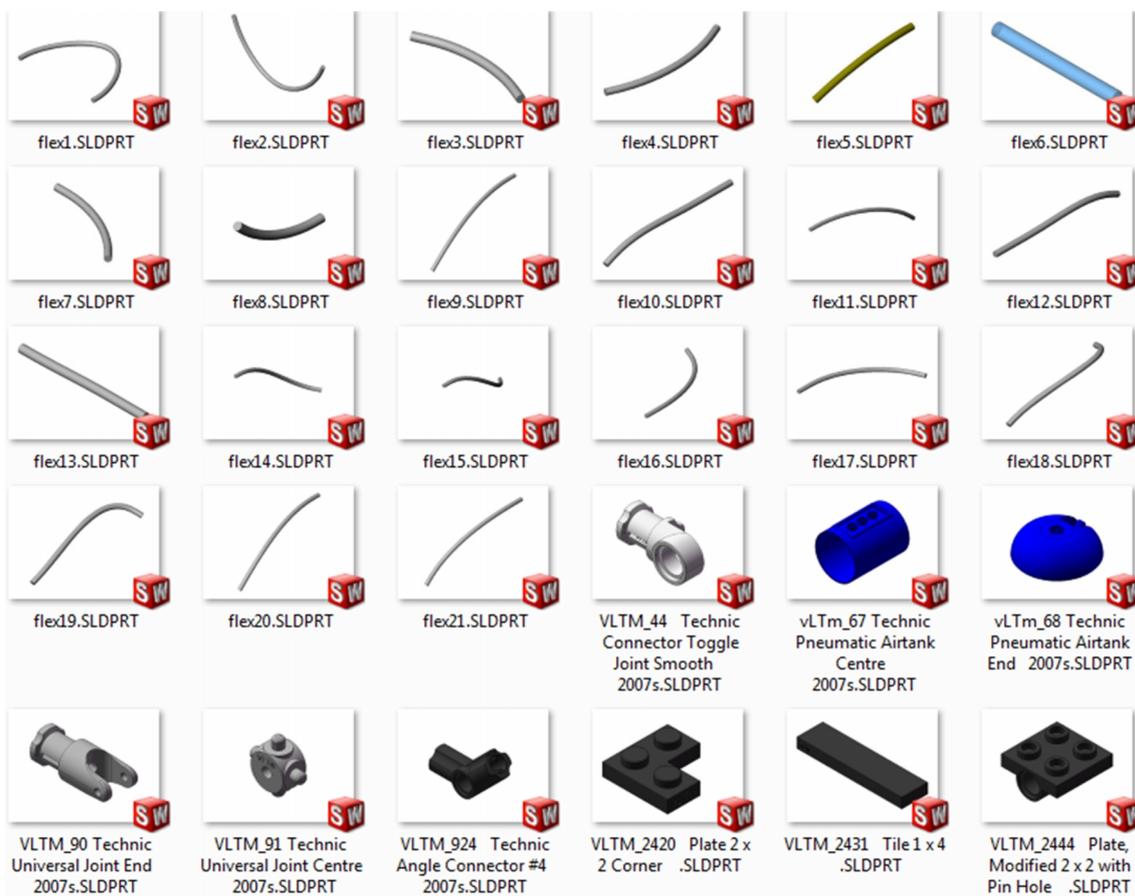


Fig. 136. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8466-1 (1)

CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC

Fig. 137. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8466-1 (2)

CREACIÓN Y SIMULACIÓN DE MODELOS VIRTUALES LEGO TECHNIC

Fig. 138. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8466-1 (3)

Fig. 139. Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8466-1 (4)



Fig. 140. . Componentes utilizados en la construcción del modelo virtual vLTm-8466-1 (5)

A continuación se muestran dos diagramas cinemáticos: el correspondiente a la dirección y el correspondiente a la grúa.

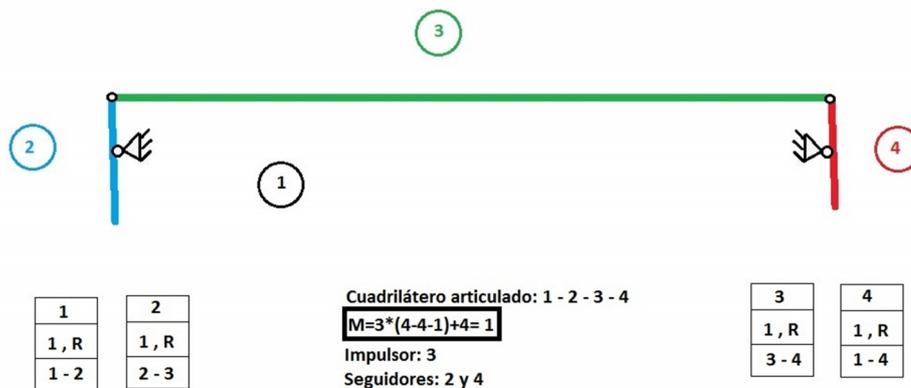
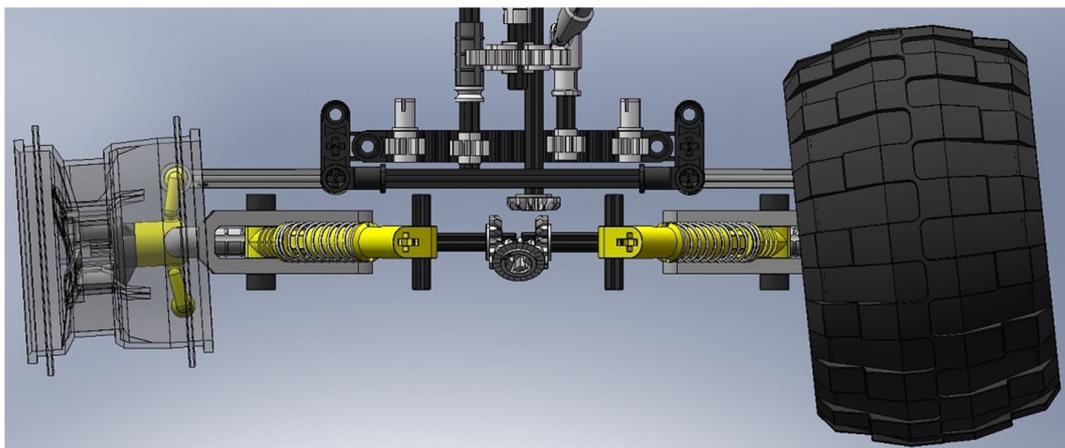


Fig. 141. Diagrama cinemático de la dirección del modelo virtual vLTm-8466-1

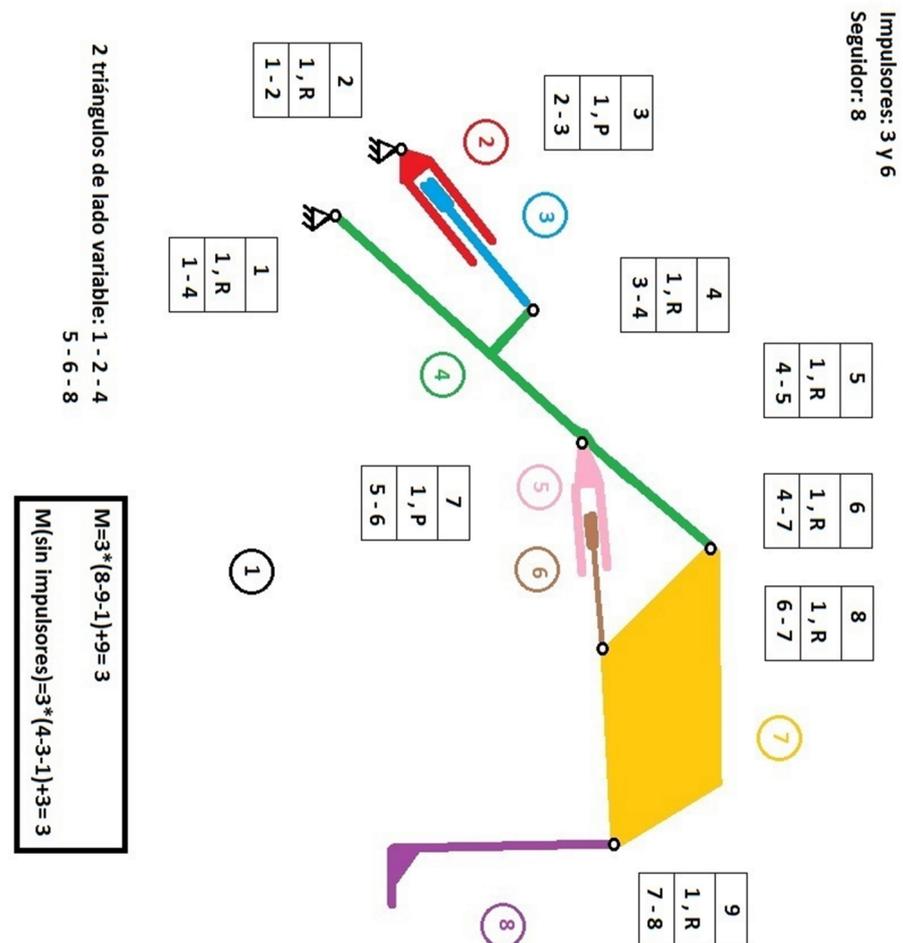
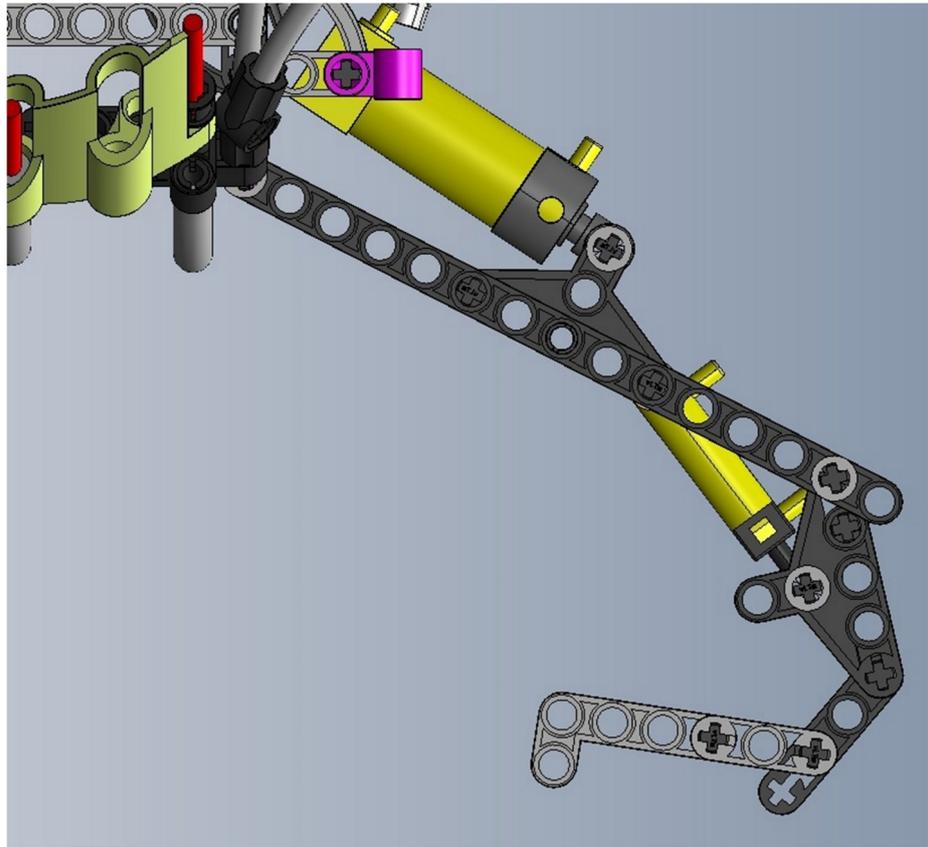


Fig. 142. Diagrama cinemático de la grúa del modelo virtual vLTm-8466-1



7.6. Creación modelo virtual vLTm – 8480-2

Como en el anterior modelo, se ha procedido a montar virtualmente este modelo con la ayuda de un documento eDrawings, consiguiendo un modelo actualizado para proceder con las técnicas actuales.

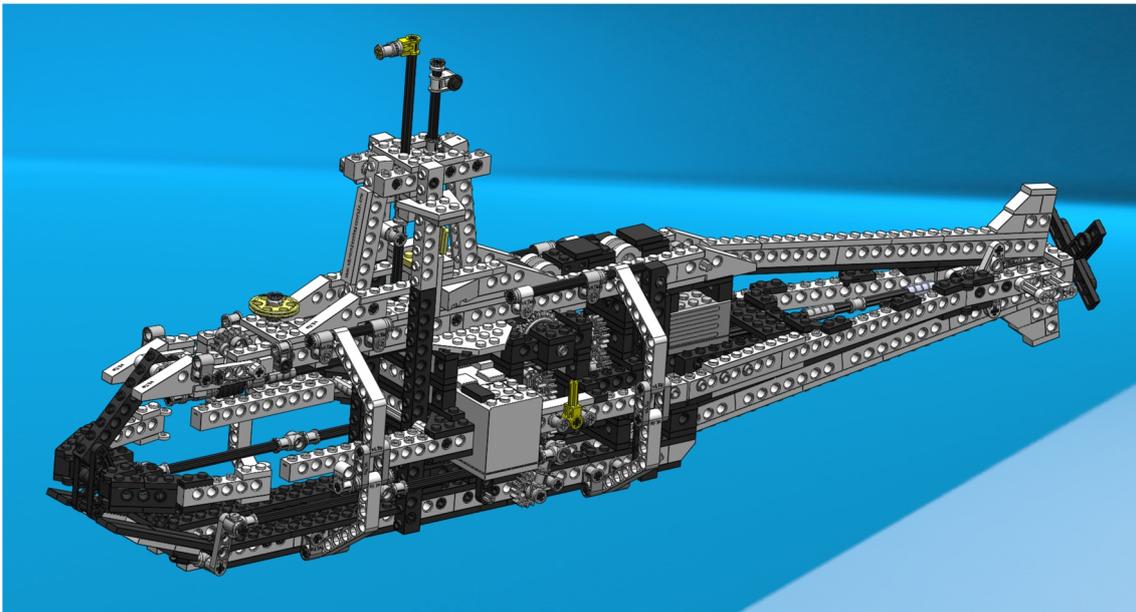


Fig. 143. Modelo virtual vLTm-8480-2



7.7. Creación modelo virtual vLTm – 42000 - 2

En esta ocasión se aborda la construcción del modelo 42000-2 a partir de la construcción del modelo real siguiendo las instrucciones del modelo LEGO Technic. Para ello se trabaja simultáneamente en la construcción real y virtual. Durante este proceso se ha de distinguir qué componentes formarán cada pieza identificando chasis y el resto de piezas móviles.



Fig. 144. Modelo LEGO Technic 42000-2

Es de este modo cómo se aprecia la gran diferencia a la hora de abordar la construcción real frente a la virtual: durante la construcción real se deben seguir las instrucciones marcadas por LEGO, ya que si no se sigue este orden no será posible colocar los componentes para formar la máquina. En cambio, durante la construcción virtual, es posible distinguir en un primer momento las piezas que forman el modelo y construirlas independientemente, pues la gran ventaja frente a la construcción real es que durante la definición de las relaciones de posición las piezas virtuales pueden atravesar unas a otras, consiguiendo ocupar su espacio a través de otras piezas, algo físicamente imposible.

Para ilustrar esta situación, en la siguiente imagen se aprecia cómo se ha dividido la creación en trozos de una pieza virtual para que no supere el ensamblaje de la pieza la cantidad de 10 componentes, siendo imposible el montaje físico de tal manera.



Fig. 145. Montaje real y virtual de una misma pieza

Este proceso se caracteriza por no ser lineal, ya que es difícil distinguir durante la construcción real del modelo qué piezas acabarán teniendo movimiento relativo respecto al resto o si quedarán fijas con otras. Es por eso que durante el proceso es conveniente adelantarse a los pasos estrictos de montaje y así ver en qué condiciones queda un cierto componente respecto al resto. Cuanto más pormenorizado sea esta búsqueda, mejor será la composición de las piezas y mejor rendimiento se obtendrá a la hora de trabajar con el modelo virtual.

7.8. Simulación del modelo virtual TnMm-0326 desde su creación mediante piezas compactadas

Como primer modelo para abordar la simulación se vuelve a recurrir a los modelos de Isogawa Yoshihito, en este caso el 0326. Se trata de un vehículo motorizado sobre seis ruedas, con el soporte de las ruedas traseras basculante.

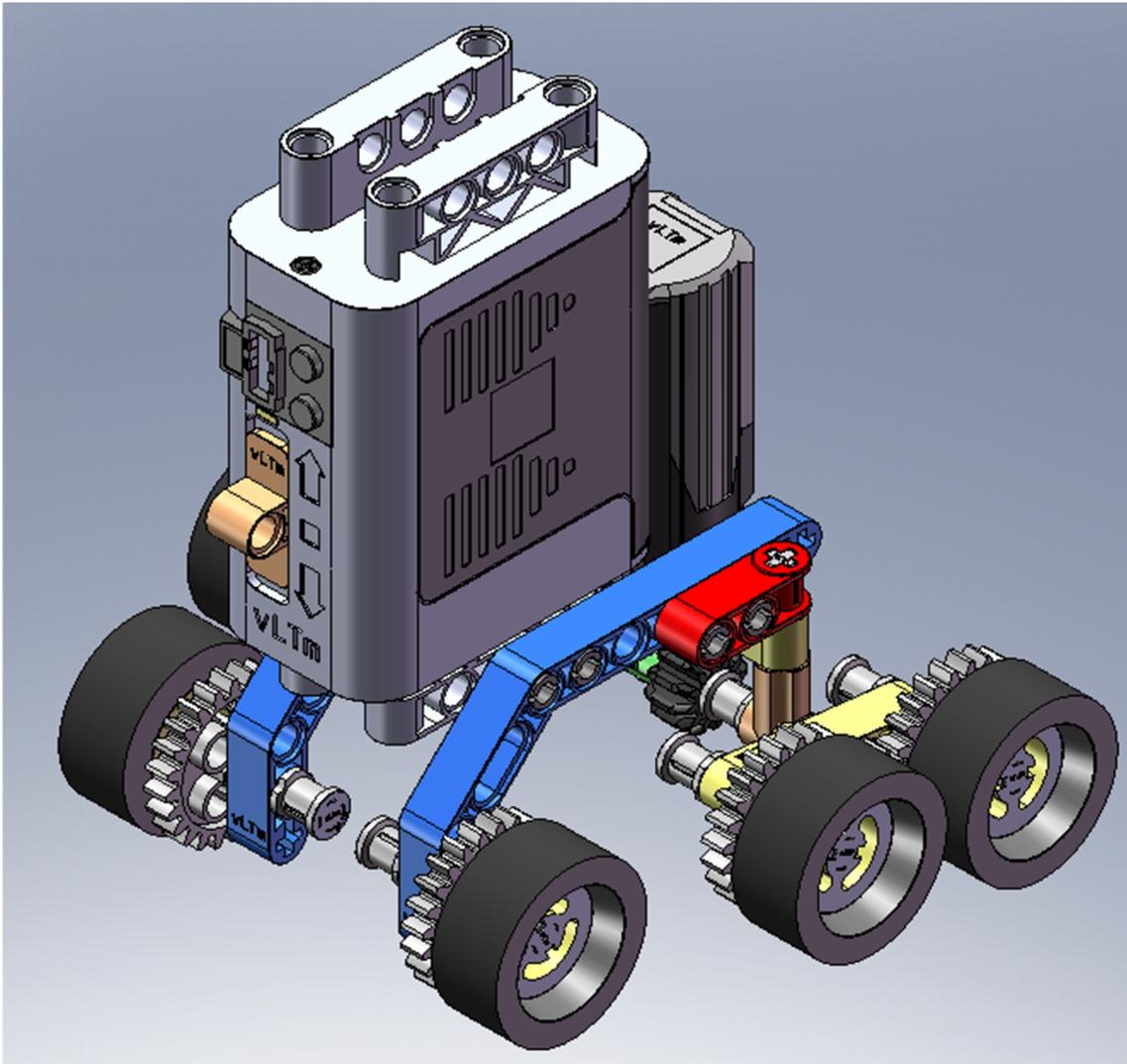


Fig. 146. Modelo virtual TnMm-0326

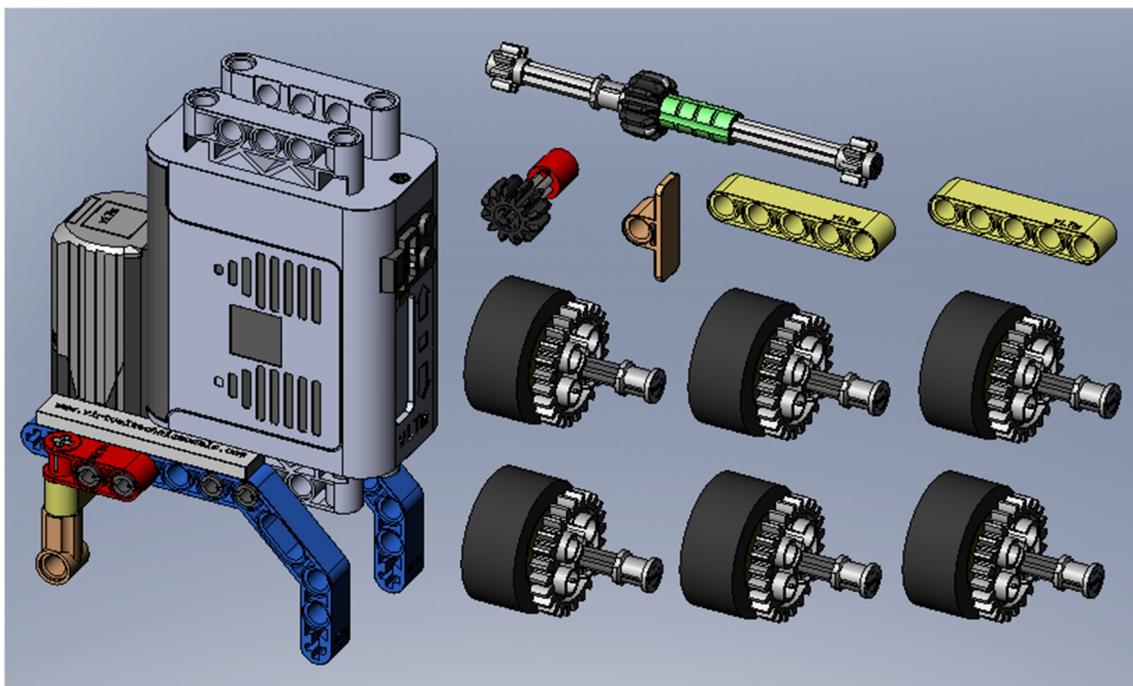


Fig. 147. Piezas compactadas que forman el modelo virtual TnMm-0326

En la siguiente figura se muestra el modelo cinemático autoalineador, apreciándose los pares cinemático sobre la estructura, en el que se simula el movimiento respecto al chasis como parte fija

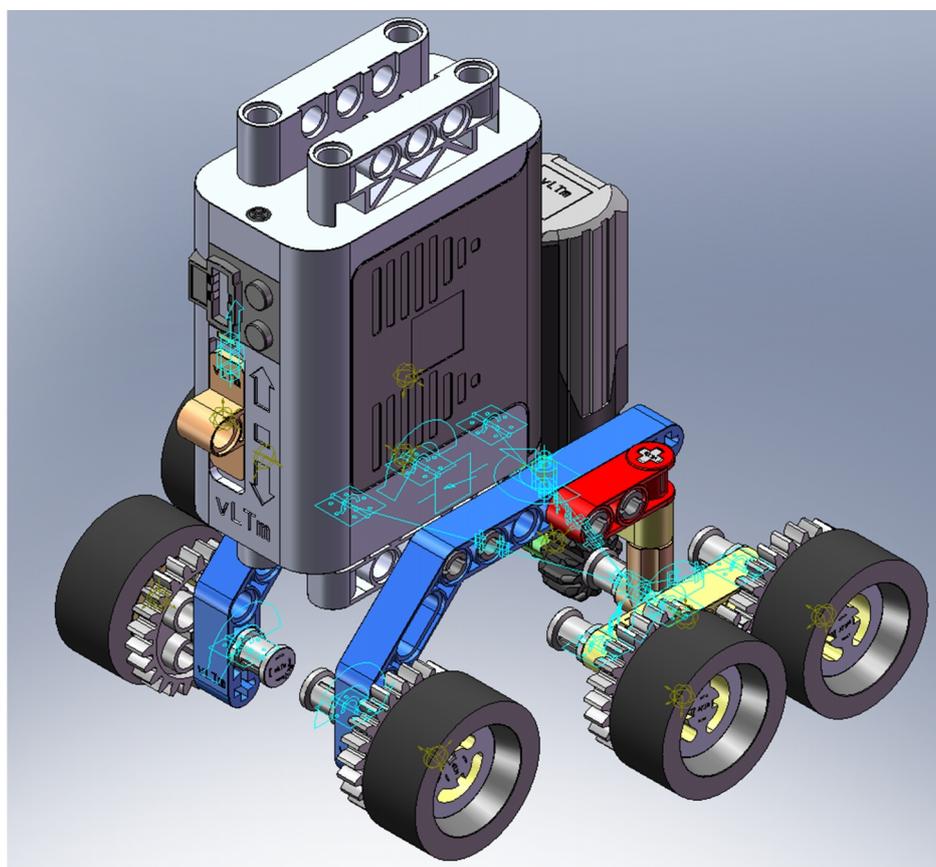


Fig. 148. Modelo cinemático autoalineador del modelo TnMm-0326

A continuación se muestra el modelo cinemático autoalineador sobre la base en la que se desplaza gracias a los contactos 3D definidos, coloreados en rojo.

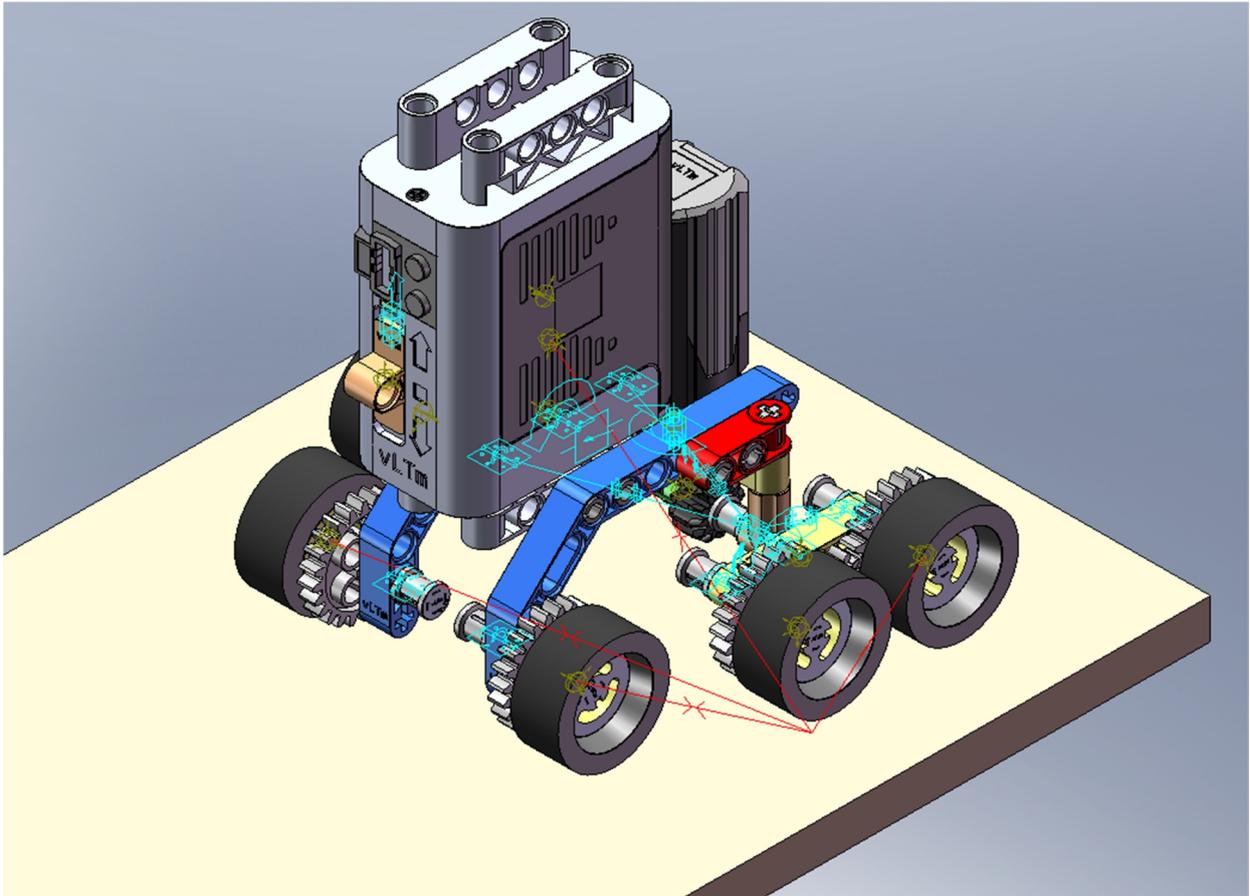


Fig. 149. Modelo cinemático autoalineador TnMm-0326 sobre la base en la que se simula su desplazamiento



7.9. Simulación del modelo virtual vLTm-8853-1 desde su creación mediante piezas compactadas

El siguiente modelo simulado corresponde al set LEGO Technic 8853-1. Se trata de una pala cargadora, cuyo accionamiento tanto de los dos movimientos de la pala como de la dirección son manuales.

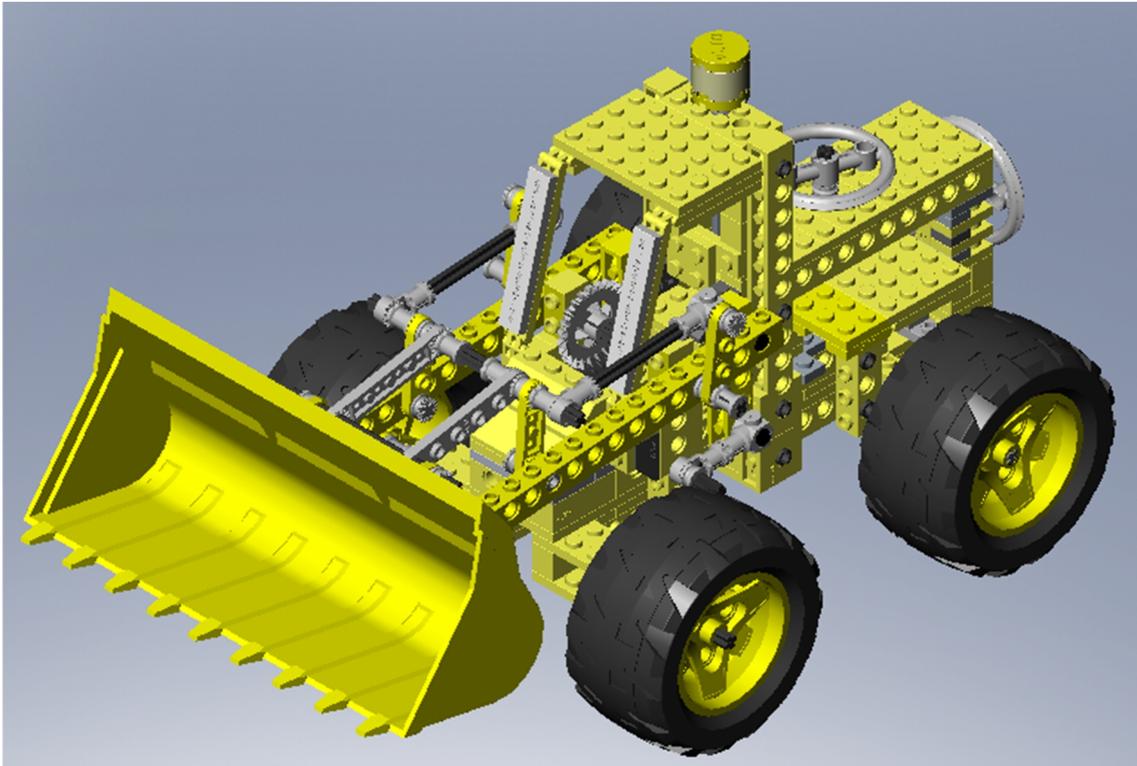


Fig. 150. Modelo virtual vLTm-8853-1

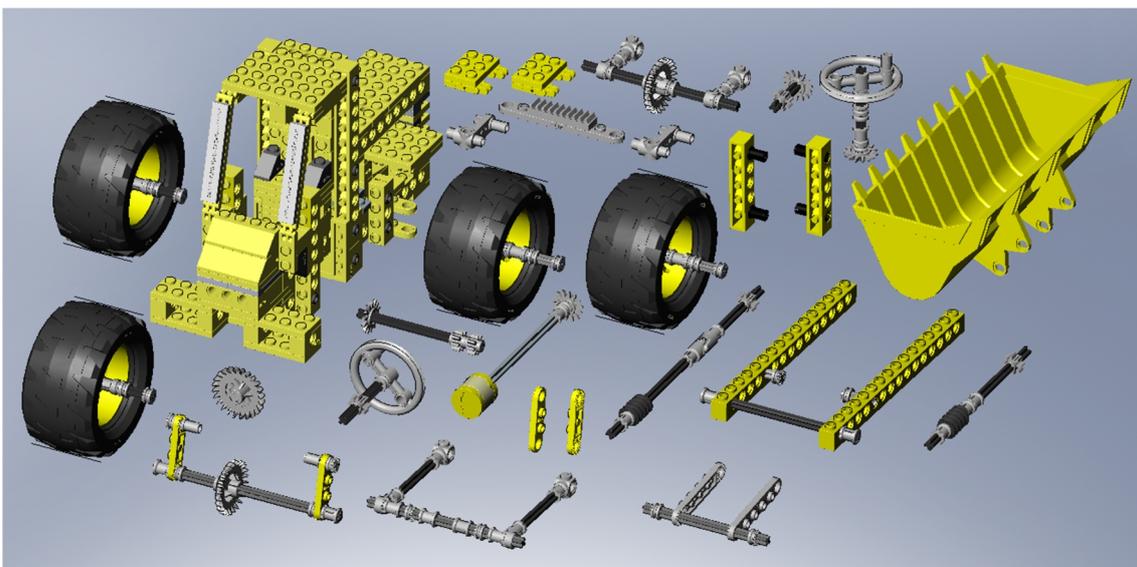


Fig. 151. Piezas compactadas que conforman el modelo virtual vLTm-8853-1

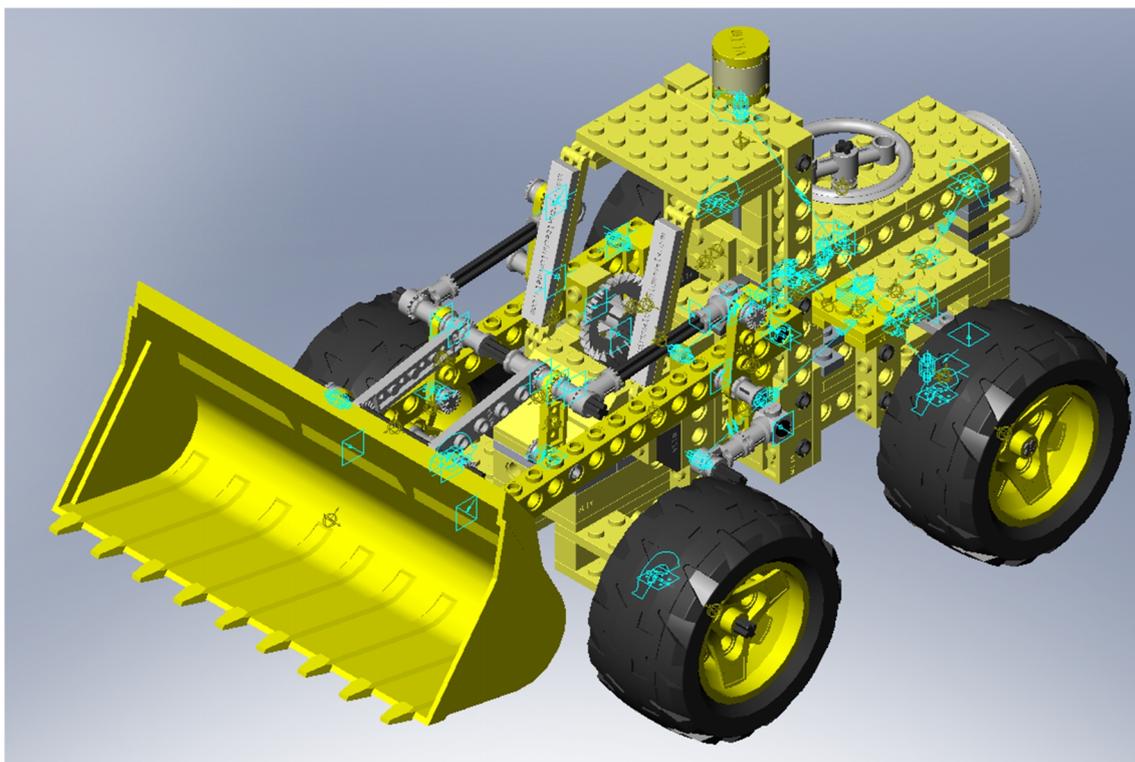


Fig. 152. Modelo cinemático autoalineador del modelo 8853-1

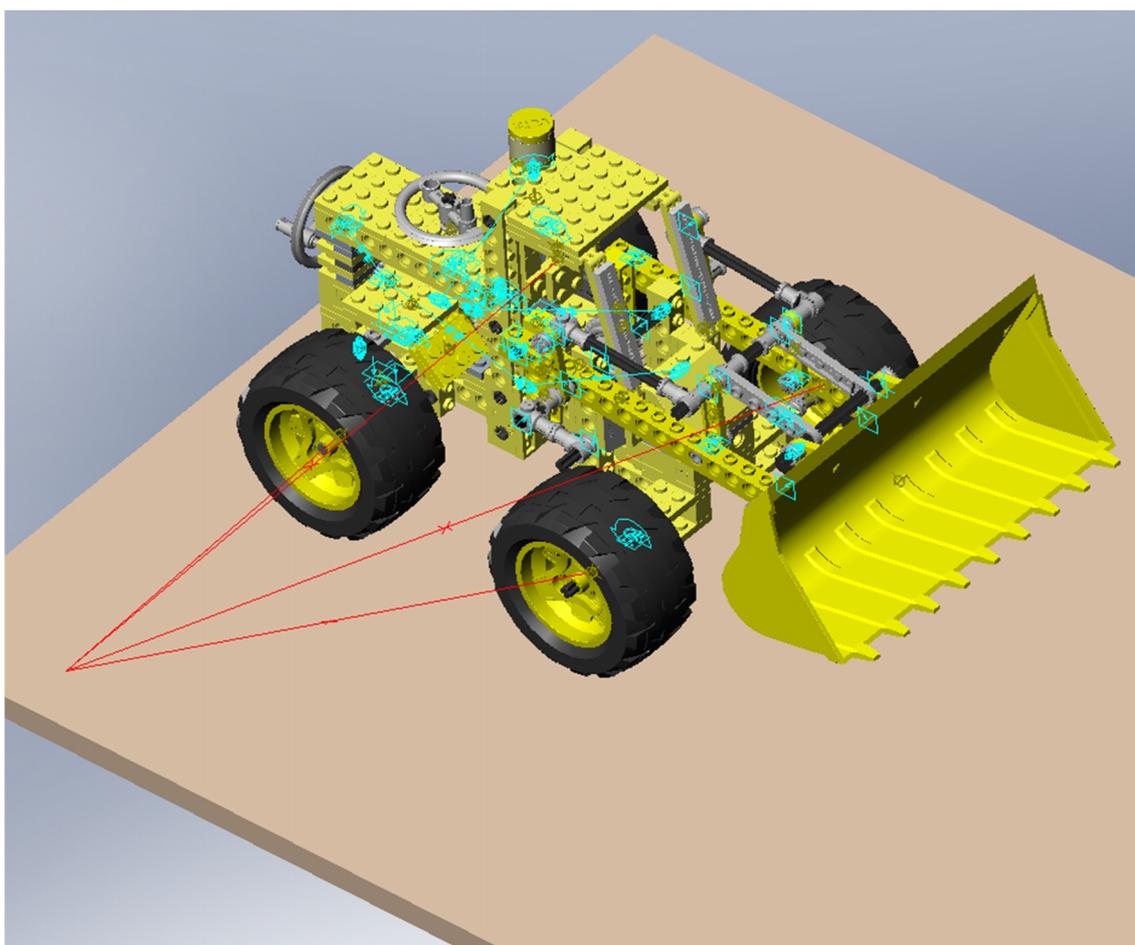


Fig. 153. Modelo cinemático autoalineador TnMm-0326 sobre la base en la que se simula su desplazamiento

7.10. Simulación del modelo virtual vLTm-8860-1 desde su creación mediante piezas compactadas

El siguiente modelo simulado corresponde al set LEGO Technic 8860-1. Se trata de un vehículo de tracción trasera, con suspensión en este eje, cuyo motor se acciona manualmente. Es característico el sistema de posicionamiento de los asientos mediante un sistema piñón-cremallera, accionado manualmente así como la reclinación de los mismos, y sistema de cambio de marchas.

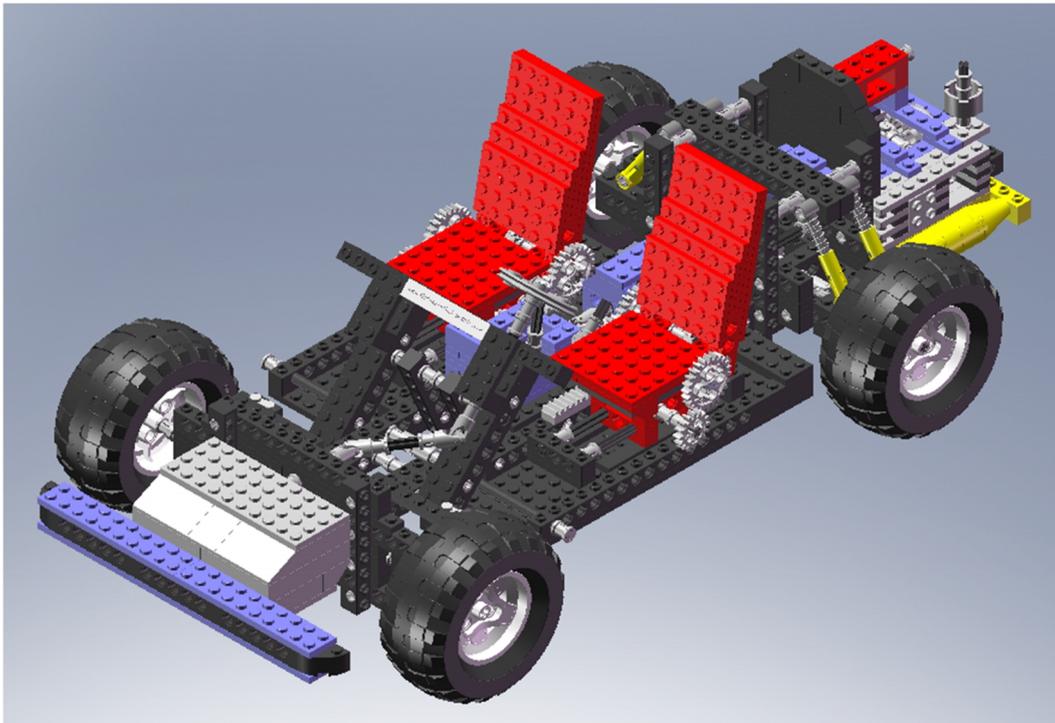


Fig. 154. Modelo virtual vLTm-8860-1

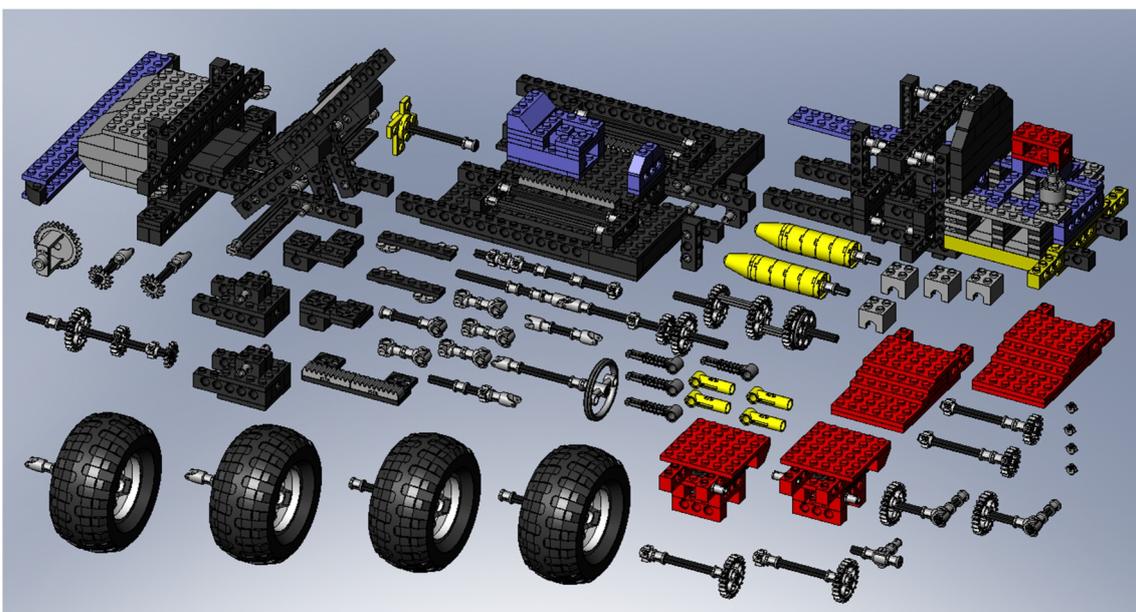


Fig. 155. Piezas compactadas que conforman el modelo virtual vLTm-8860-1

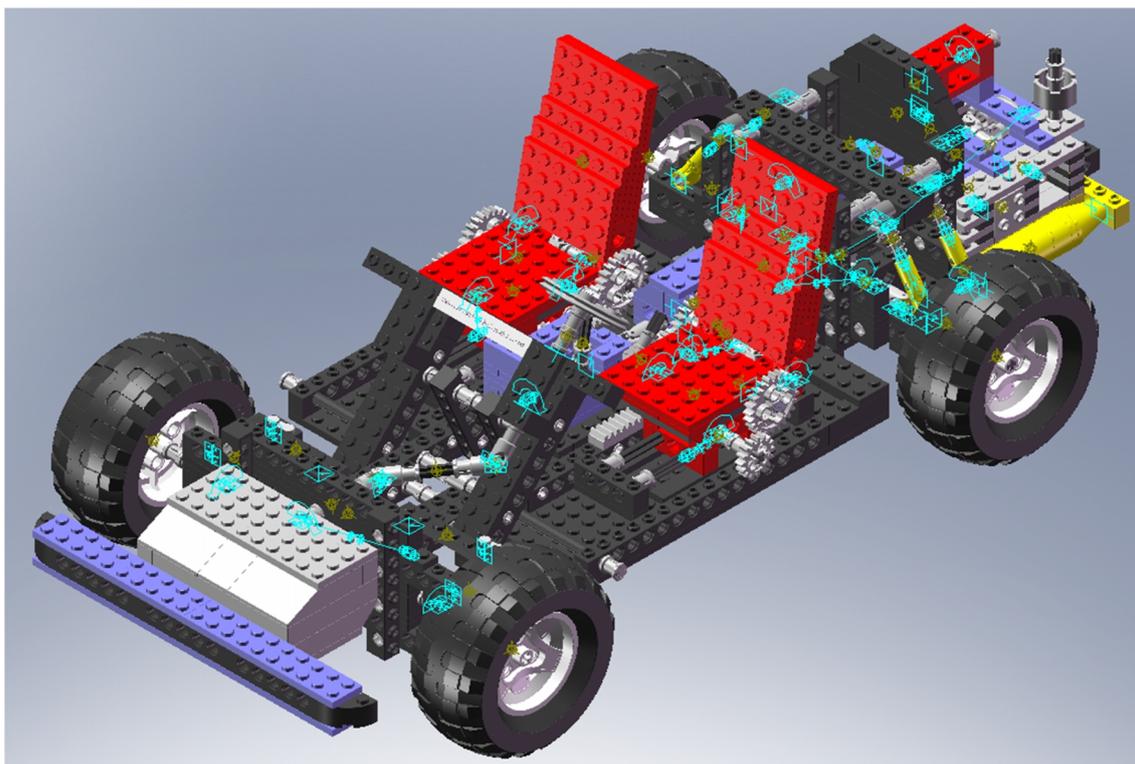


Fig. 156. Modelo cinemático autoalineador del modelo 8860-1

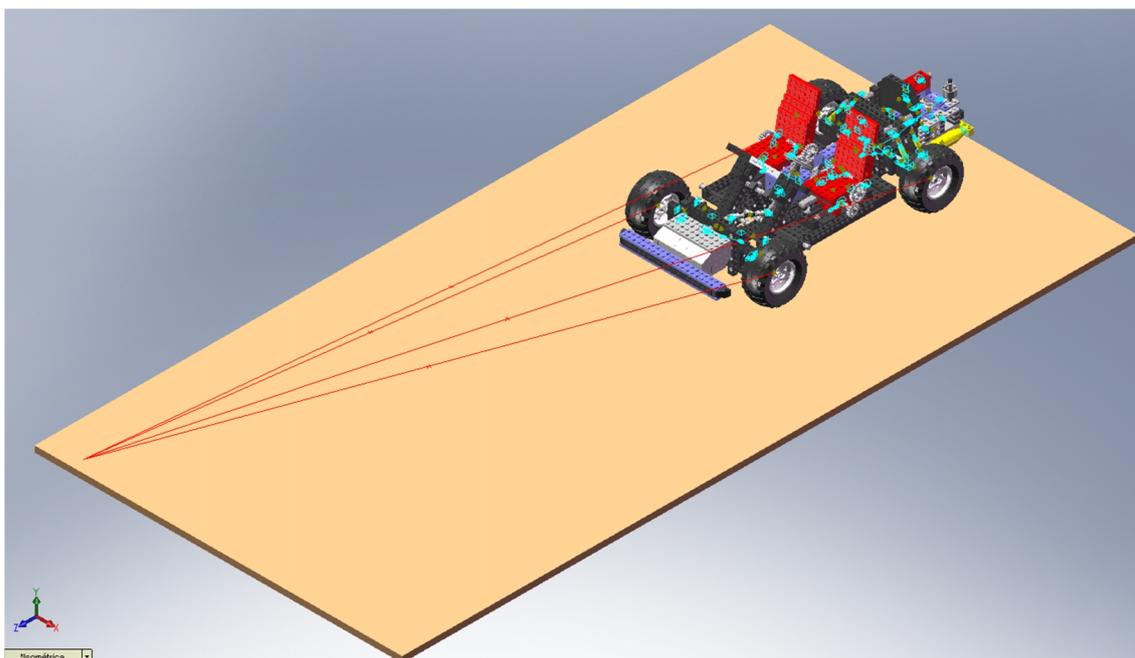


Fig. 157. Modelo cinemático autoalineador vLTm-8860 sobre la base en la que se simula su desplazamiento

7.11. Simulación del modelo virtual vLTm-8285-4 desde su creación mediante piezas compactadas

El modelo 8285-1 de LEGO Technic es un camión y remolque con grúa giratoria. La grúa puede rotar sobre la base del remolque y ajustar la inclinación de su brazo de forma manual. Respecto a la cabina, ésta puede abatirse, además de tener puertas y retrovisores móviles. La dirección del vehículo puede controlarse de forma manual y tiene conectado el movimiento del cigüeñal del motor al eje de transmisión que lo conecta con el eje trasero, con transmisión diferencial.



Fig. 158. Modelo virtual vLTm-8285-4



Fig. 159. Piezas compactadas que conforman el modelo virtual vLTm-8285-4 (1)

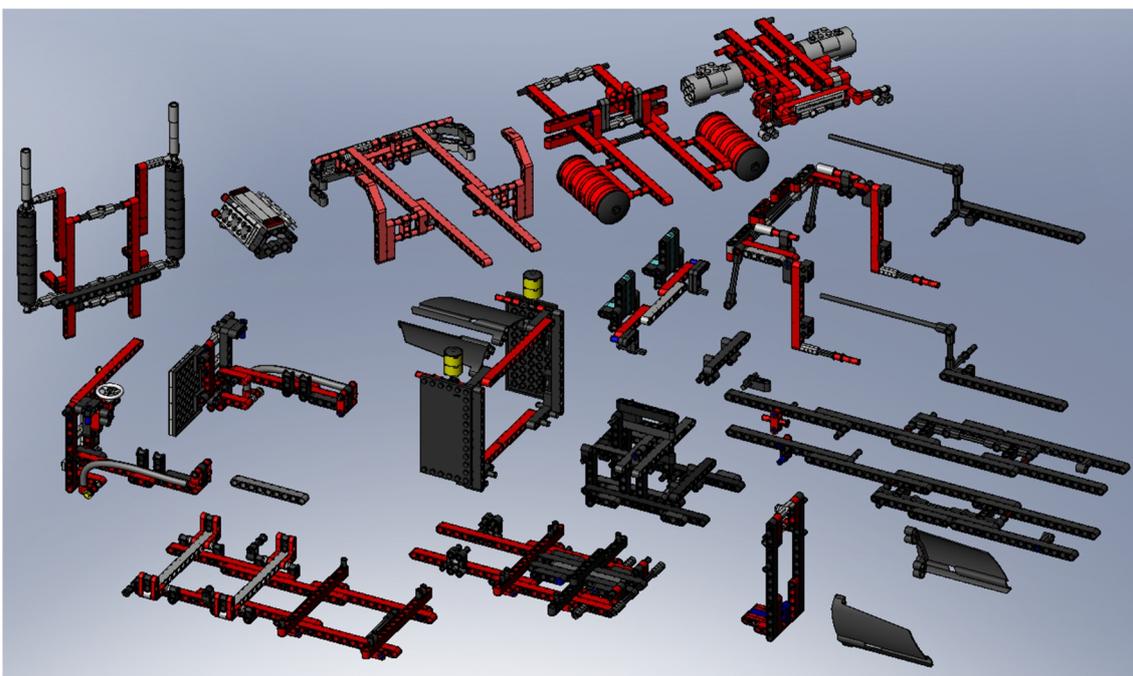


Fig. 160. Piezas compactadas que conforman el modelo virtual vLTm-8285-4 (2)

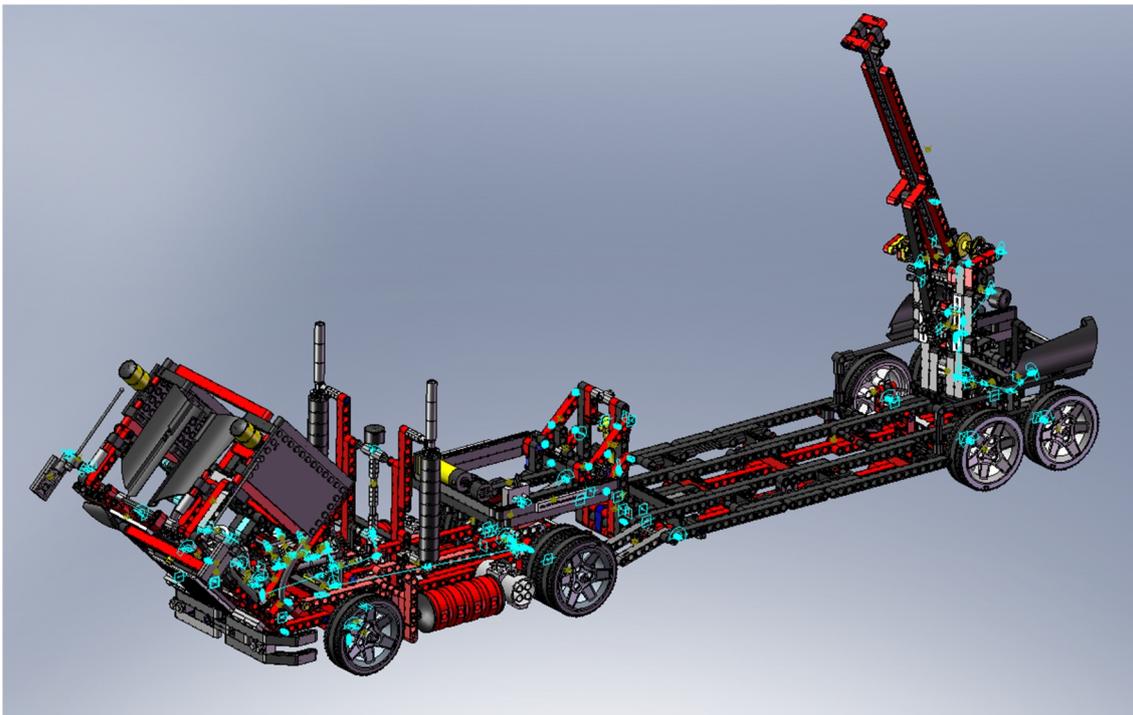


Fig. 161. Modelo cinemático autoalineador del modelo 8285-4

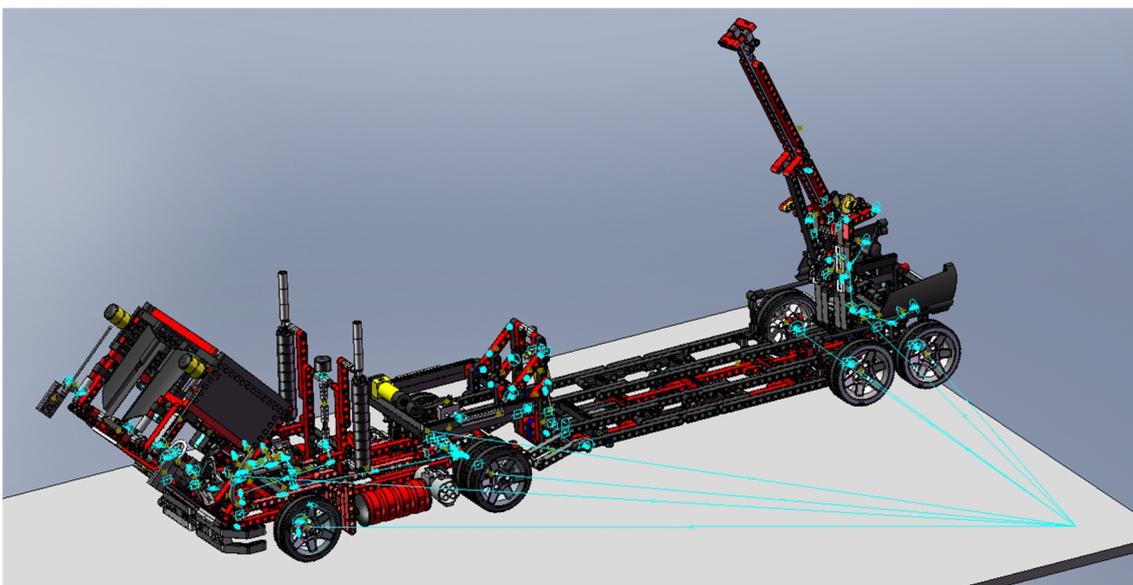


Fig. 162. Modelo cinemático autoalineador vLTm-8285-4 sobre la base en la que se simula su desplazamiento



7.12. Visualización de las simulaciones

En la edición digital de este TFG es posible consultar los archivos de vídeo con representaciones de las simulaciones realizadas. Con este tipo de documentos de vídeo se posibilita la comprensión del funcionamiento de los mecanismos de los modelos.

8. BIBLIOGRAFÍA

Libros

- *LEGO Technic Tora no Maki* – Isogawa Yoshihito

Páginas web

- www.virtualtechnicmodels.com
- www.lego.com





PRESUPUESTO

1. Introducción	125
I. Capítulo 1º: Software	125
II. Capítulo 2º: Equipo informático	126
III. Capítulo 3º: Modelos LEGO Technic	126
IV. Capítulo 4º: Modelos virtuales LEGO Technic	127
2. Resumen	128



1. INTRODUCCIÓN

Para reflejar el coste de este Trabajo se desglosa el presupuesto en 4 capítulos que comprenden los bloques independientes de recursos empleados durante su realización, para luego obtener el presupuesto global.

La manera en la que se enfoca este presupuesto es la de un solo cliente, esto es, una única parte demandante la cual solicita la realización del Trabajo, con lo que asume la totalidad de los gastos.

I. Capítulo 1º: Software

Para la construcción y simulación de modelos virtuales se ha utilizado el programa informático SolidWorks. Para el cálculo del coste se ha dividido el importe de la licencia de SolidWorks 2007 entre la cantidad de horas laborables, sumando al presupuesto las horas de trabajo en este TFG.

Programa informático	Unidades	Precio unitario (€)	Horas lab. / año	Horas TFG	Coste
SolidWorks 2007 + COSMOS Motion	1	5300	2008	300	791.83
				TOTAL	791.83

Tabla 2. Capítulo 1º: Software

II. Capítulo 2º: Equipo informático

Para la realización de este TFG se necesita de un ordenador que cumpla con los requisitos mínimos necesarios para manejar adecuadamente los modelos virtuales. Una propuesta es la siguiente:

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

Se considera un periodo de amortización de 4 años.

Objeto	Unidades	Precio unitario (€)	Horas lab. / año	Amortización	Horas TFG	Coste
SolidWorks 2007 + COSMOS Motion	1	1500	2008	25%	300	56.02
					TOTAL	56.02

Tabla 3. Capítulo 2º: Equipo informático

III. Capítulo 3º: Modelos LEGO Technic

Para poder realizar este TFG de ha necesitado disponer de los modelos reales LEGO Technic siguientes, colección cuyo coste se refleja en la Tabla 3.

Modelo LEGO Technic	Unidades	Precio unitario (€)	Coste
8480	1	115.34	115.34
42000	1	99.99	99.99
8466	1	87.6	87.6
8285	1	87.6	87.6
TOTAL			390.53

Tabla 4. Capítulo 3º: Modelos LEGO Technic

IV. Capítulo 4º: Modelos virtuales LEGO Technic

A continuación se detalla el coste de las tareas realizadas sobre cada modelo virtual LEGO Technic.

Modelo virtual LEGO Technic	Tarea	Horas	Precio (€/h)	Precio Tarea (€)	Coste del modelo (€)
8480-2	Montaje del modelo virtual	58	30	1740	1740
42000-2	Montaje del modelo virtual	70	30	2100	2100
8466-1	Montaje del modelo virtual	80	30	2400	2400
8285-4	Montaje del modelo virtual	6	30	1800	2700
	Creación modelo cinemático autoalineado	20	30	600	
	Simulación	10	30	300	
				TOTAL	8940

Tabla 5. Capítulo 4º: Modelos virtuales LEGO Technic

2. RESUMEN

A continuación se realiza el presupuesto global del Trabajo, aplicando un 21% de IVA y un 6% en concepto de beneficio industrial.

Capítulo	Coste (€)
1º: Software	791.83
2º: Equipo informático	56.02
3º: Modelos LEGO Technic	390.53
4º: Modelos virtuales LEGO Technic	8940
SUBTOTAL	10178.38

Tabla 6. Resumen presupuesto

Concepto	Coste (€)
Subtotal	10178.38
Beneficio Industrial (6%)	610.7
IVA (21%)	2137.46
TOTAL	12926.54

Tabla 7. Total del presupuesto

El presupuesto total del TFG resulta de: *Doce mil novecientos veintiséis euros con cincuentaicuatro céntimos.*