



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

ESTUDIO HISTÓRICO Y TECNOLÓGICO DE MÁQUINAS, SISTEMAS, PROCESOS O INGENIOS MECÁNICOS

Alumno: Antonio José Cañabate López

Tutor: Prof. D. Rafael López García

Dpto: Mecánica

Julio 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Don Rafael López García , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:Estudi histórico y tecnológico de máquinas, sistemas,procesos o ingenios mecánicos, que presenta Antonio José Cañabate López, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2015

El alumno:

Los tutores:

Antonio José Cañabate López

Don Rafael López García

Índice

1. Introducción.....	4
2. Objetivos	5
3. El diferencial mecánico	5
3.1 Historia de los engranajes.....	6
3.2 Tipos de engranajes	7
4. Historia.....	15
4.1 Leyendas sobre su origen.....	16
4.1.1 Huang Di	16
4.2 Origen.....	17
4.3 Indicios históricos.....	18
5. Reconstrucción histórica del mecanismo.....	19
6. Modelado geométrico del mecanismo	23
6.1 Modelado de las piezas	23
6.1.1 Modelado de los engranajes.....	23
6.1.2 Modelado del eje central.....	29
6.1.3 Modelado del chasis	34
6.2.1 Ensamblaje del diferencial	37
6.2.2 Ensamblaje del carro	39
7. Planos	42
8. Análisis del mecanismo	51
8.1 Estudio del diferencial	52
9. Animación en 3D	53
9.1 Descripción del software utilizado	53
9.2 Creación del entorno.....	55
9.3 Animación.....	59
9.2.1 Animación trayectoria recta	61
9.2.2 Animación giro 90°	62
9.2.3 Animación giro 360°	64
10. Conclusiones	66
11. Bibliografía.....	66

1. Introducción

El carro que apunta siempre al sur, es un carro de dos ruedas que solía usarse tirado por caballos. Consta de un mecanismo en su interior formado por una serie de engranajes que transmiten el movimiento desde las ruedas hasta una figura con el brazo extendido situada en su parte superior, de forma que ésta contraresta el movimiento de rotación del carro, con esto se consigue que la figura apunte siempre en la misma dirección.



Figura 1.1 Carro que apunta al Sur.

El mecanismo utilizado en su interior se trata de un diferencial mecánico, este dispositivo es usado en los coches para transmitir el movimiento a las ruedas de forma que permita a estas girar a diferente velocidad. El diferencial utilizado en los coches tiene una entrada por la que recibe el movimiento desde el motor y se transmite a las ruedas, en el caso del carro que apunta al sur es al contrario, las ruedas no son la salida del movimiento si no que son la entrada y la salida de éste se produce por un eje en el que se encuentra situada la figura.

El carro que apunta al sur fue creado y utilizado por la cultura China, quienes utilizaron el carro como brújula mecánica para orientarse. Para la cultura China el Sur era su dirección de referencia, como para nosotros el Norte, por ello orientaban siempre la figura en esta dirección. Para ellos en el punto donde el sol se ponía más alto estaba el centro que da vida.

2. Objetivos

El objetivo del proyecto es el estudio del mecanismo de engranajes “carro que apunta al sur”, estudiar su origen y evolución histórica, reconstruirlo gráficamente mediante un programa de modelado geométrico en 3D, reconstruir el mecanismo físicamente mediante impresión en 3D, realizar el análisis cinemático del mecanismo y finalmente obtener conclusiones, resultados y posibles desarrollos futuros.

3. El diferencial mecánico

El diferencial mecánico es un conjunto de transmisiones mecánicas formado por engranajes cuyo objetivo es permitir que las ruedas de un vehículo giren a revoluciones diferentes, según éste se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro.

Está demostrado que las ruedas de un automóvil, ante una trayectoria curva, realizan diferentes trazados, lo cual implica que la rueda interior hace un recorrido menor que la rueda exterior, provocando (si estuvieran unidas directamente a la corona del par cónico) el arrastre o patinado de una de las ruedas. Debido a esto, es necesario montar un mecanismo que permita el giro de las dos ruedas motrices a distintas velocidades, al mismo tiempo que transmite a las mismas el esfuerzo motriz. Esto se consigue con la implantación de un mecanismo diferencial, que en las curvas permite dar un mayor número de vueltas a la rueda exterior y disminuye las de la interior.

Como se puede apreciar en la figura 3.1 el diferencial mecánico está formado por dos engranajes satélites, dos engranajes planetarios y la caja del diferencial.

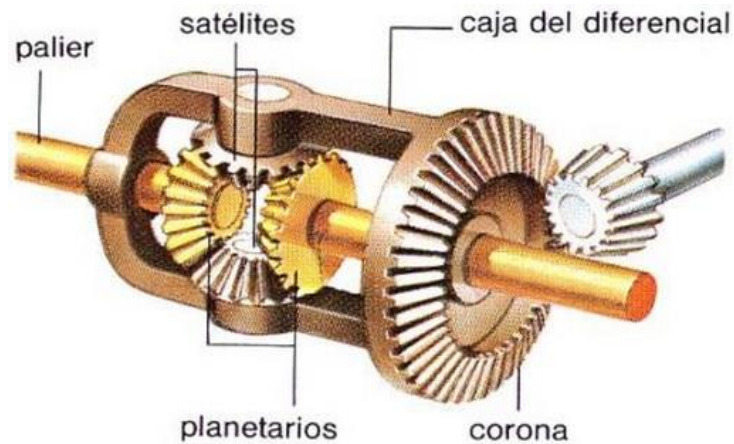


Figura 3.1 Diferencial mecánico.

Para los diferenciales mecánicos usados en los coches se incorpora una corona a la caja del diferencial y un piñón para transmitir el movimiento generado por el motor.

El diferencial usado en el carro que apunta al sur carece de esta corona y del piñón ya que no tiene motor y en este caso son las ruedas las que proporcionan el movimiento para mover la caja del diferencial, al contrario que en los diferenciales de los coches.

3.1 Historia de los engranajes

Entre los mecanismos de transmisión de movimiento, uno de los más exitosos es el basado en engranes, ya que se consiguen movimientos de manera continua, semicontinua o alternada y provee una amplia gama de posibilidades de transmisión gracias a los diferentes tipos de diseños posibles.

Los registros más antiguos de posibles diseños de engranajes provienen de la literatura de la antigua China, Grecia y Turquía, en específico de la ciudad de Antioquía y de Siria, en especial de Damasco su capital.

El registro más antiguo de la posible descripción de un mecanismo de engranaje proviene de la escuela de Aristóteles de un trabajo titulado “ Problemas de Mecánica”, alrededor del 300 A.C. En él se describe un mecanismo de ruedas entrelazadas, nuevamente no haciendo referencia específica a ruedas dentadas, por lo que pudieron ser ruedas de fricción con ondulación grande en su periferia. De ser así se estaría hablando del prototipo de rueda dentada, ya que se entrelazan las dos ruedas por bordes en alto y bajo relieve, dientes del engrane, que aunque aún no poseían una

dimensión determinada cumplen con el objetivo de transmitir movimiento entrelazando dos ruedas.

El mecanismo más antiguo del que se tiene conocimiento, y que aún sobrevive en nuestra era, es el mecanismo de Anticitera (Figura 3.2), denominado así por la zona donde fue encontrado. Es un dispositivo de precisión probablemente fabricado hacia el 80 A.C.



Figura 3.2 Mecanismo de Anticitera.

Durante mucho tiempo permaneció en duda su uso, actualmente se sabe que éste era un instrumento astronómico o carta celeste. Por su complejidad no fue sino hasta 1974 que se escribió el reporte definitivo de su uso y su diseño total. Este dispositivo contiene más de 30 engranajes arreglados en un complejo tren diferencial y fue utilizado para calcular la posición solar y lunar.

Si hacemos caso de las leyendas sobre el uso de un carro con el que viajeros y guerreros consiguieron encontrar el camino de vuelta a casa y atravesar zonas de niebla en las que no tenían ninguna referencia visual, estaríamos hablando del uso del primer mecanismo diferencial en la historia. Si nos atenemos a lo que la historia puede verificar hubiera sido el segundo, entre 200 o 300 años posterior.

3.2 Tipos de engranajes

Los engranajes pueden clasificarse de diferentes maneras según la distribución espacial de los ejes de rotación, según la forma de dentado y según la curva generatriz del diente.

Atendiendo a la posición relativa entre el eje de entrada y de salida podemos encontrar:

1) Ejes paralelos

a) Rectos (engranajes cilíndricos): Estos engranajes son de contorno cilíndrico y tienen sus dientes paralelos al eje de rotación, son engranajes simples y con bajos costes de fabricación y mantenimiento. Son engranajes ruidosos y no recomendados para muy alta transmisión de potencias.

i) Externos (figura 3.3)

ii) Internos (figura 3.4)



Figura 3.3 Engranajes rectos externos.



Figura 3.4 Engranajes rectos internos.

- b) Helicoidales (engranajes oblíquos): Estos engranajes son de contorno cilíndrico y tienen los dientes inclinados. Son más silenciosos que los engranajes rectos debido a que el engrane se produce de forma progresiva y además transmiten más carga que los engranajes rectos de las mismas dimensiones debido a la forma más gruesa del diente en un plano perpendicular a de rotación. Son engranajes más caros y al estar inclinados producen cargas axiales y momentos flectores por lo que necesitan cojinetes de empuje axial.
- i) Simples (figura 3.5)
 - ii) Dobles (figura 3.6)
 - iii) De esqueleto de pescado (Herringbone) (figura 3.7)



Figura 3.5 Engranajes helicoidales simples.



Figura 3.6 Engranajes helicoidales dobles.



Figura 3.7 Engranajes helicoidales de esqueleto de pescado.

- 2) Ejes que se cortan (engranajes cónicos): Los engranajes cónicos se emplean para transmitir el movimiento de giro entre ejes que se cortan. Así como los engranajes cilíndricos están basados en el movimiento de dos cilindros cuyo movimiento relativo es de rodadura, los engranajes cónicos se basan en el de dos conos en contacto rodante.
 - a) Cónicos rectos (figura 3.8): Los dientes tienen borde rectilíneo y apuntan hacia el vértice del cono.
 - b) Cónicos helicoidales (figura 3.9): Los dientes son curvos y forman una espiral en la superficie cónica.

- c) Zerol (figura 3.10): Son similares a los helicoidales pero los dientes están dispuestos de forma que la carga axial es equivalente a la que existiría si fueran rectos.
- d) De corona y piñón cilíndrico (figura 3.11): Corona cónica y piñón cilíndrico, su capacidad de transmisión es pequeña.

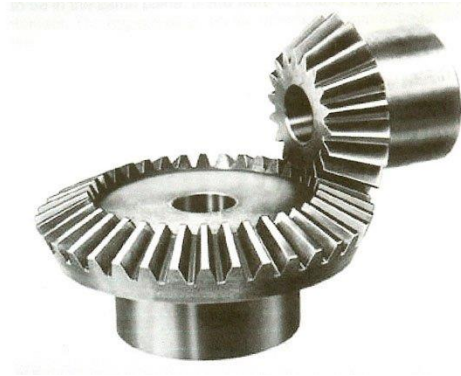


Figura 3.8 Engranajes cónicos rectos.



Figura 3.9 Engranajes cónicos helicoidales.

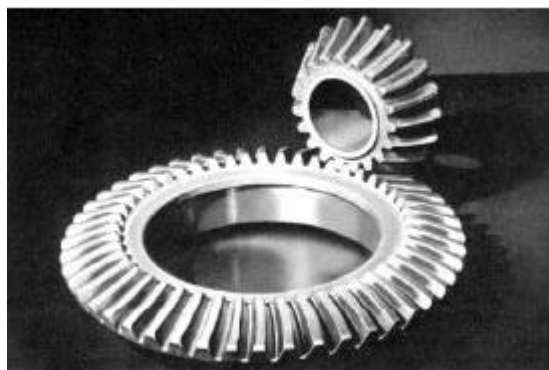


Figura 3.10 Engranajes Zerol.



Figura 3.11 Engranajes cónicos de corona y piñón cilíndrico.

- 3) Ejes que se cruzan en el espacio (engranajes hiperbólicos) : Los engranajes hiperbólicos transmiten el movimiento entre ejes que se cruzan en el espacio. Están basados en hiperboloides de revolución en cuya superficie pueden colocarse dientes del mismo modo que se colocan en los cilindros rodantes en los que están basados los engranajes cilíndricos.
- a) Helicoidales cruzados (figura 3.12): similares a los helicoidales normales, tienen poca capacidad de carga por tener una superficie de contacto reducida.
 - b) De sinfín corona (figura 3.13): El sinfín es un engranaje helicoidal recto en el que el ángulo de la hélice se aumenta tanto que solo existe un diente dispuesto de forma continua con varias vueltas como sucede en un tornillo. El sinfín se conecta a un elemento especial llamado corona de sinfín, cuyo eje es perpendicular al anterior. Ofrece un gran área de contacto por lo que puede transmitir grandes cargas.
 - c) De sinfín cavex (figura 3.14): consta de un sinfín cóncavo que engrana en una rueda convexa.
 - d) De sinfín envolvente (figura 3.15): Sinfín con forma similar a un reloj de arena.
 - e) Hipoidales (figura 3.16): similar al cónico helicoidal pero los ejes se cruzan.
 - f) Espiroide (figura 3.17): piñón cónico y corona.
 - g) Helicon (figura 3.18)
 - h) Beveloid (figura 3.19)



Figura 3.12 Engranajes Helicoidales cruzados.



Figura 3.13 Engranajes de sinfín corona.



Figura 3.14 Engranajes sinfín Cavex.



Figura 3.15 Engranajes de sinfín envolvente.



Figura 3.16 Hipoidales.



Figura 3.17 Espiroide.

4. Historia

Existe una figura fundamental en el estudio de este mecanismo, George Lanchester (1874-1970), ingeniero inglés que jugó un papel destacado en el temprano desarrollo de la industria automotriz del Reino Unido.

Escribió el libro “The Yellow Emperor’s south-pointing chariot” Londres 1947. En el narra su estudio sobre el carro que apunta siempre al Sur. El estudio de Lanchester por este mecanismo vino de la discusión sobre el descubrimiento del magnetismo por la cultura china, esta creencia se debía a carros chinos que eran usados como brújulas para indicar el Sur, a los que se pensaba que habían introducido una aguja imantada para indicar el Sur.

En su investigación tuvo oportunidad de visitar el museo británico donde tuvo acceso a la obra del Dr. Herbert A. Giles, Adversaria Sínica (Libro No. 1 1853 S.), en este libro el Dr. Giles narra leyendas sobre el origen de este dispositivo y cual era su fin.

Más tarde en su búsqueda sobre el Dr. Giles encontró una especificación del mecanismo, que aunque inteligible, confirmaba que el invento chino se trataba de un dispositivo mecánico y no magnético.

Lanchester siguió con su estudio del mecanismo y encontró que otros ingenieros habían seguido esta especificación del Dr. Giles pero sin conseguir una solución. Supuso que esta descripción podía no ser exacta a la original debido a que el traductor no tuviese los suficientes conceptos de ingeniería como para realizar una correcta traducción o bien porque no quiso traducirlo correctamente para quedarse con el secreto de su funcionamiento, por lo que Lanchester se planteó resolver el problema basandose en los principios elementales de su funcionamiento.

Llegó a la conclusión de que el mecanismo implicaba el uso de lo que los ingenieros conocen como engranaje diferencial. El uso del diferencial se introdujo en Reino Unido entorno a unos sesenta años antes al estudio de Lanchester sobre el “carro que apunta al Sur”. Tras un estudio que detallaremos más adelante consiguió realizar una reconstrucción del mecanismo.

4.1 Leyendas sobre su origen

Cuenta la leyenda que el Emperador Huang Di o Huang-ti, un personaje mezcla de realidad y tradición que habría reinado en China entre el 2698 y 2598 a.C, estaba en guerra con otro líder rival, llamado Chi You. Una batalla decisiva se libró en Zhuolu en el noroeste de la actual provincia de Hebei. En esta batalla, Chi You mediante un conjuro hizo caer una espesa niebla sobre los hombres de Huang Di para confundirlos, sin embargo, estos contaban con un arma secreta, un carro que tenía la el poder de apuntar al Sur, siguiendo su rumbo no sólo fueron capaces de escapar de la niebla, sino que además consiguieron la victoria.

Otra leyenda cuenta que cuando los embajadores de la nación de Yüeh-Shang fueron a Cochín-China (zona meridional de Vietnam al sur de Camboya) en los días de Chêng de la dinastía Chou (1122-255 a.C.), el Ministro Chino del estado, Chou Kung, les dio a los enviados un carro que apuntaba siempre al Sur (llamado Chih-Nan) debido a que temían no poder encontrar el camino de vuelta a través de aquel país que era una inmensa llanura en el cual no tenían ningún punto de referencia para seguir una dirección y no perderse.

Estas leyendas aparecen en el libro “Ku Chin Chu” escrito por Tshui Pao en el año 300, en este libro es en el primero que relacionan estas leyendas con el carro que apunta al sur, sin embargo en libros anteriores a este como son “Shih Chi” o posteriormente en “Shang Shu Ta Chuan” no existe ninguna mención sobre él.

4.1.1 Huang Di

También conocido como el Emperador Amarillo (por su color imperial, elegido por los tonos de la tierra amarilla.), se conoce como el "Creador de la cultura china", y todas las personas de la raza china consideran a sí mismos como descendientes de Yan Di y su hermano Huang Di. El Emperador Amarillo fue conocido como "Hijo del Cielo". La leyenda dice que él fue el inventor de muchas cosas, como la confección de ropa, barcos y vehículos de fabricación, la construcción de casas y palacios, etc. Se le atribuye a las leyes de la astronomía y la elaboración del primer calendario usado por el pueblo chino. Sus supuestas conversaciones sobre el diagnóstico y el

tratamiento con el médico Qi Bo están contenidas en el primer libro médico de China, Nei Jing (Canon de la medicina del Emperador Amarillo).



Figura 4.1 Huang Di.

4.2 Origen

El primer y más importante indicio sobre el origen del carro que apunta al sur data del primer milenio antes de Cristo. Este pasaje es recogido en el libro Sung Shu escrito en el año 500. En el cuenta que el carro que apunta al sur fue construido por el Duque de Zhou con el fin de conducir a enviados que habían viajado muy lejos, más allá de las fronteras, de vuelta a casa. El país que tenían que atravesar era una llanura sin límites, en el que la gente perdía su rumbo en cuanto a este y al oeste, por lo que el Duque de Zhou construyó este vehículo con el fin de que los embajadores pudieran ser capaces de distinguir el Norte y el Sur.

Este pasaje sobre el origen del carro que apunta al Sur se encuentra recogido en la obra destacada de Joseph Needham "Ciencia y civilización en China". Esta gran obra, compuesta por 15 volúmenes, se plantea como una historia de la ciencia, la tecnología y la medicina en China, visto en su contexto social e intelectual más completo, e iluminado por una comprensión profunda y comprensiva de las culturas de Oriente y Occidente. A través de sus escritos, ha cambiado radicalmente la forma en que los estudiosos y científicos evalúan tanto la historia de la cultura china, y la historia de la medicina la ciencia y la tecnología entendida como parte del patrimonio cultural común de la raza humana. Es probablemente el historiador británico más conocido a nivel mundial, conocido como "el Erasmus del siglo XX". En el volumen 4 parte 2, de la página 286 a la 303, recoge la historia de este mecanismo.

4.3 Indicios históricos

El libro *Kuei Ku Tzu* cuenta que el pueblo del estado de Chen, cuarta y última dinastía del sur de China, en su recojida de jade llevaba siempre un indicador del sur para nunca dudar de su posición. El jade es una roca ornamental usada desde hace más de 5000 años para crear utensilios y adornos, en sus inicios era utilizado por ser duro y resistente, era usado para la fabricación de armas y herramientas, pero a lo largo de la historia se fue creando un culto hacia el. Los amuletos de jade tenían la fama de atraer la buena suerte.

Durante las dinastías Chhin y Former Han no hay ningún indicio del vehículo, hasta el último periodo de la dinastía Han en el cual Chang Hêng lo reinventó, pero debido a la confusión y agitación que existió en el cierre de la dinastía no fue conservado.

En el estado de Wei (en el período de San Kuo) Kaothang Lung y Chhin Lang, ambos famosos eruditos, discutían sobre el carro que señala al sur ante el tribunal, defendiendo que tal vehículo no podía haber existido y que la historia era una tontería. Pero durante el reinado de Chhing-Lung (233-237) el emperador Ming Ti le encargó al erudito Ma Chün construir uno y lo consiguió, pero una vez más se perdió durante los disturbios que asistieron al establecimiento de la dinastía Chin.

Más tarde hubo varios emperadores que tuvieron en posesión este vehículo, como fueron Shih Hu (emperador de la dinastía de los Hunos), que tuvo uno hecho por Hsieh Fei, Yao Hsing (emperador de la dinastía Chiang) cuyo constructor fue Linghu Sheng. Este último carro lo obtuvo el emperador An Ti de la dinastía Chin en el año 417 y finalmente pasó a manos del emperador Wu Ti de la dinastía Sung, cuando se hizo cargo de la administración de Chhang-an, pero este último solo obtuvo la carcasa del carro sin ninguna maquinaria en su interior por lo que debía llevar un hombre dentro para mover la figura. En las procesiones de estado el carro que apunta al sur abría la marcha, acompañado por el guardaespaldas imperial.

Estos carros fueron contruidos por los trabajadores bárbaros y no funcionaban muy bien, muchas veces no apuntaban realmente hacia el sur y tenían que ser reajustados.

Un ingeniero y matemático de Fangyang, Tsu Chhung-Chih, decía frecuentemente que se debía construir un nuevo carro que apunta al sur automatizado correctamente, asique hacia el cierre del reinado de Shêng-Ming (del 477 al 479) el emperador Shun Ti , durante el cargo de primer ministro del Principe Chhi, encargó construir uno. Cuando este estuvo terminado fue probado por Wang Sêng-Chhien, gobernador militar de Tanyang, y por Liu Hsiu , presidente del consejo de censores. La mano de obra fue excelente y aunque el carro se retorció en un centenar de direcciones nunca dejó de apuntar al sur.

La biografía de Tsu Chhung-Chih cuenta que al menos un carro, de los que capturaron la gente de Sung fabricados por las dinastías barbaras del norte, había sido vaciado interiormente de maquinaria y en su interior debía de llevar una persona para hacerlo funcionar.

Existió otra persona que tuvo éxito en la construcción del carro, Ma Yo , pero cuando lo acabó fue envenenado por Kuo Shan-Ming.

En el siglo VII, el invento llegó a Japón

5. Reconstrucción histórica del mecanismo

Debido a los disturbios y agitaciones que existían tras el fin de las dinastías hicieron imposible la conservación de escritos sobre el carro que apunta al sur, y los que no fueron destruidos no han resistido al paso del tiempo, además estos carros eran considerados como objetos mágicos y la pertenencia de alguno de ellos a un emperador le daba atribuciones divinas, por ello al cese de cada dinastía se destruía todo lo relacionado con estos carros para que nadie conociese su secreto.

Pero una descripción es recogida en el libro de George Lanchester, que este a su vez encontró estudiando la búsqueda del Dr. Giles, pero esta descripción no era específica, Lanchester supone que el traductor no tenía los conocimientos suficientes sobre ingeniería o, hacia la razón que más se inclina él, que no quiso traducirlo correctamente para quedarse con el secreto. La descripción es la siguiente:

"Por encima de la Carroza, que se montó con un solo polo para dos caballos, se equipó un doble techo, y por encima de que una figura de madera de un Inmortal o Ángel estirando un brazo que señaló Sur".

El mecanismo de la carroza fue construida para la siguiente especificación:

Hay 9 grandes y pequeñas ruedas, 120 dientes.

Dos Ruedas 6 pies de alto, 18 pies de circunferencia.

Dos niños verticales (pequeñas) o ruedas subordinadas unidas a la de arriba, 2 pies y 4 pulgadas de diámetro, $7 \cdot 4$ pies de circunferencia, 24 dientes a cada rueda, 3 pulgadas de distancia.

Dos ruedas verticales pequeñas al final del poste debajo de la madera transversal de 3 pulgadas de diámetro con una barra de hierro perforándolas.

Una rueda horizontal pequeña a la izquierda, 1 pie 2 pulgadas de diámetro, 12 dientes.

Una rueda horizontal pequeña a la derecha y una rueda grande horizontal en el medio, $4 \cdot 8$ pies de diámetro, que es de $14 \cdot 4$ pies en circunferencia, 48 dientes, 3 pulgadas de distancia.

Una barra por el centro, 8 pies de alto, 3 pulgadas de diámetro, en la parte superior de las cuales se lleva a una figura de madera tallada, que cuando el carro está en movimiento, apunta hacia el Sur.

"Si da vuelta hacia el este (cuando se va al sur), la rueda subordinada fijada a la rueda de pie a la derecha del poste girará 12 dientes y la rueda pequeña horizontal unida a la derecha girará una vez, y hará girar a la gran rueda horizontal de enmedio un cuarto, o doce dientes, de modo que si el coche va al este la figura de madera engranará y apuntará hacia el Sur. Lo mismo pasaría hacia el Norte, Este u Oeste".

Esta descripción no indica como construir el carro que apunta al Sur pero sí que para su construcción no se había empleado el magnetismo si no ruedas dentadas y

como posteriormente afirma George Lanchester la única solución posible que existe es el uso del diferencial mecánico.

George Lanchester dedujo que se trataba del diferencial mecánico basándose en los principios fundamentales de su funcionamiento:

- Si el carro se desviaba un número dado de grados e una dirección de su trayectoria recta, la figura debía desviarse el mismo número de grados pero en la dirección opuesta.
- Que la función debe ser reversible, es decir, operar con igual exactitud, si la desviación es a la derecha o a la izquierda de la línea recta, y también debe funcionar con precisión con cualquier número de grados de desviación.

Una vez establecido que era necesario el uso de un engranaje diferencial Lanchester afirma que la barra donde va montada la figura debe ir adjunta a la pequeña rueda dentada que va alojada entre las dos grandes ruedas que pueden girar sin obstaculizar esta barra, y cuando el carro se mueve en línea recta una de ellas se debe mover en una dirección, por ejemplo la de las agujas del reloj, y la otra en contra de las agujas del reloj a la misma velocidad. Si esto no fuera así la figura se desviaría de su dirección predeterminada.

Otra especificación para la construcción del carro es que las ruedas deben de estar separadas una distancia igual a su diámetro, de esta manera si una rueda se mantiene fija y la otra da una vuelta completa el carro habrá girado 180°. De esta manera si los dos trenes de engranajes son exactamente iguales y no aumentan o reducen la cantidad de giro a las dos ruedas que controlan el movimiento de la figura, ésta girará también 180°.

También es necesario disponer los engranajes que transmiten el movimiento de forma que la figura se mueva en la dirección contraria a la que lo hace el carro.

Con estas especificaciones construyó George Lanchester su modelo.

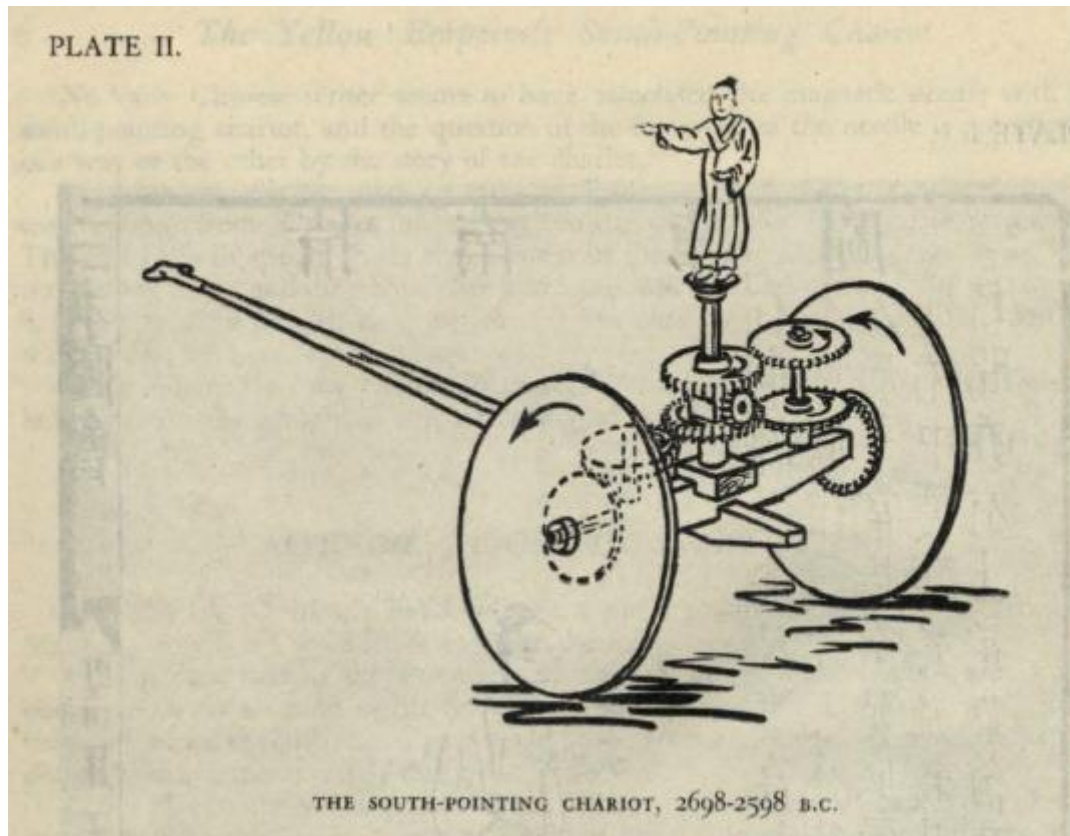


Figura 5.1 Carro que apunta al sur modelo Lanchester.

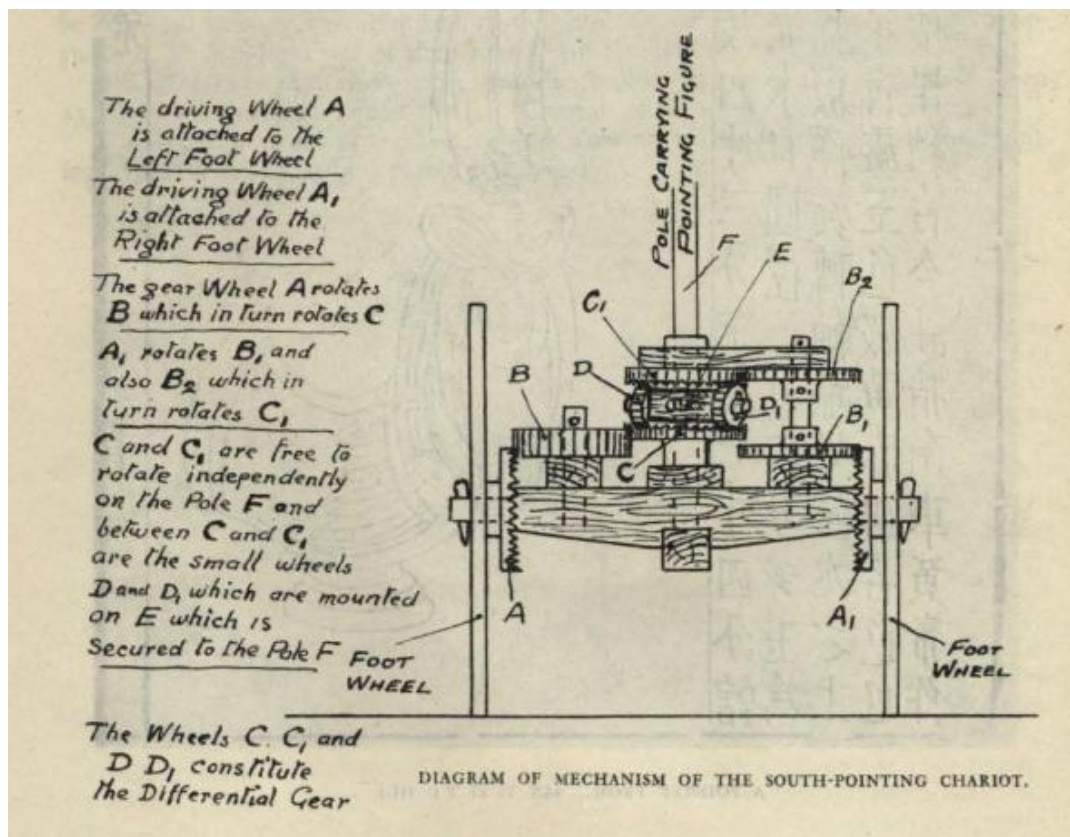


Figura 5.2 Diagrama del mecanismo del carro que apunta al Sur por Lanchester.

6. Modelado geométrico del mecanismo

En este punto se aborda una de las partes más importantes del proyecto, el modelado de cada pieza y la generación del conjunto del mecanismo con el programa Autodesk Inventor Professional 2015. La importancia de este programa se debe a que es capaz de asistir en el diseño, facilitar la creación de planos y generar simulaciones de piezas y conjuntos sin necesidad de fabricar un prototipo real.

6.1 Modelado de las piezas

Para el modelado de las piezas primero realizamos un boceto en 2D, una vez concluido el boceto aplicamos diferentes operaciones 3D como extrusión, agujero, chaflán y revolución, estas son principalmente las que hemos utilizado en el modelado de las piezas. También aplicaremos materiales a las piezas para darles mayor realismo, siendo el material elegido la madera.

6.1.1 Modelado de los engranajes

Tenemos tres tipos diferentes de engranajes a los que hemos llamado A2, A3 y A4. Para el modelado de los engranajes tenemos que realizar dos piezas diferentes, estas son la base y los dientes.

El engranaje A2 tiene un chaflán en la base y los dientes solo sobresalen por una cara de la misma. Este engranaje sera usado para los satélites del diferencial.

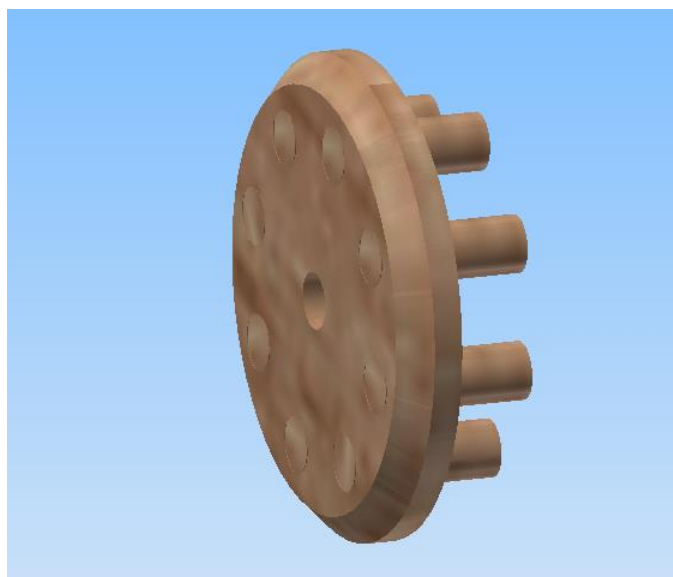


Figura 6.1 Engranaje A2.

El engranaje A3 y A4 están formados por la misma base, que hemos llamado P8, y por los dientes que en el caso del A3 solo sobresalen por una cara de la base del engranaje pero para el A4 sobresalen por las dos caras.

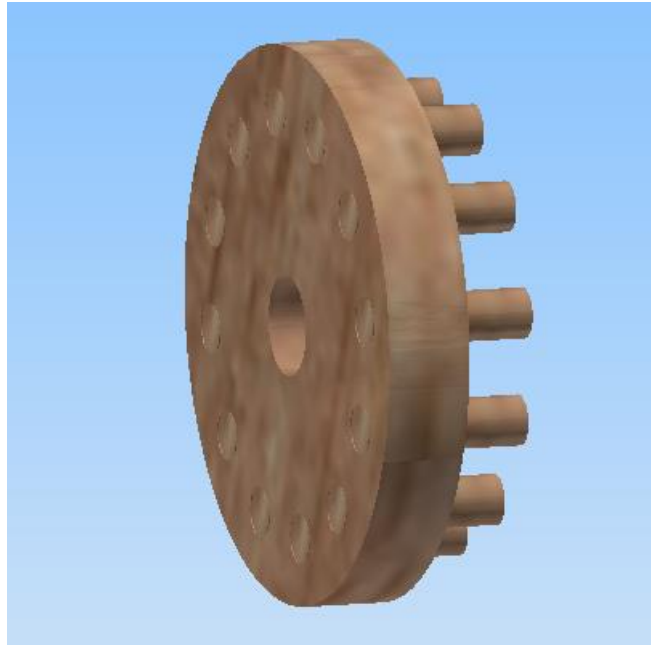


Figura 6.2 Engranaje A3.

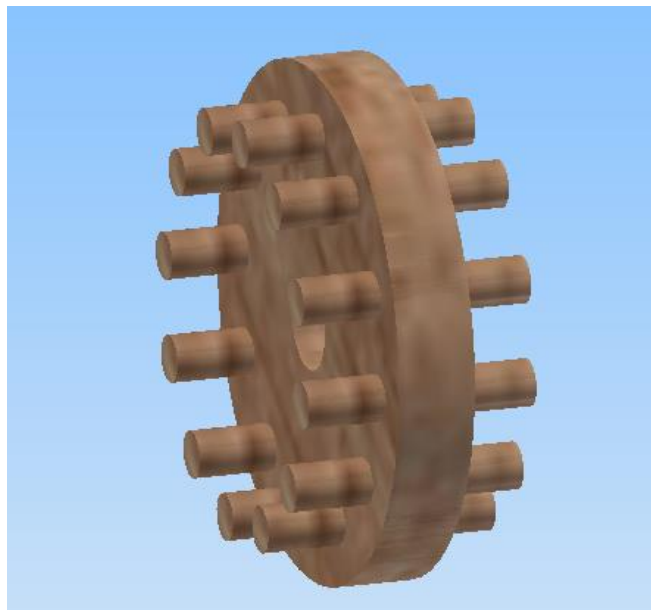


Figura 6.3 Engranaje A4.

El engranaje A4 se usará para los engranajes planetarios del diferencial.

El modelado de la base de los engranajes se hace de la misma forma para los tres tipos de engranajes, cada uno con sus medidas correspondientes. El engranaje A3 y A4 tienen la misma base, por lo que solo tendremos que realizar dos bases diferentes.

Comenzamos realizando un boceto en 2D, se ha optado por dibujar los agujeros donde van los dientes para que al realizar la extrusión no haya que hacer después los agujeros, esto conllevaría otro boceto en la parte superior de la base para situar los puntos donde deben ir los agujeros y después seleccionar la operación agujero para realizarlos introduciendo el diámetro y tipo de agujero. Para nuestra opción se ha usado la operación patrón circular que duplica la geometría de boceto seleccionada formando un arco o un patrón circular.

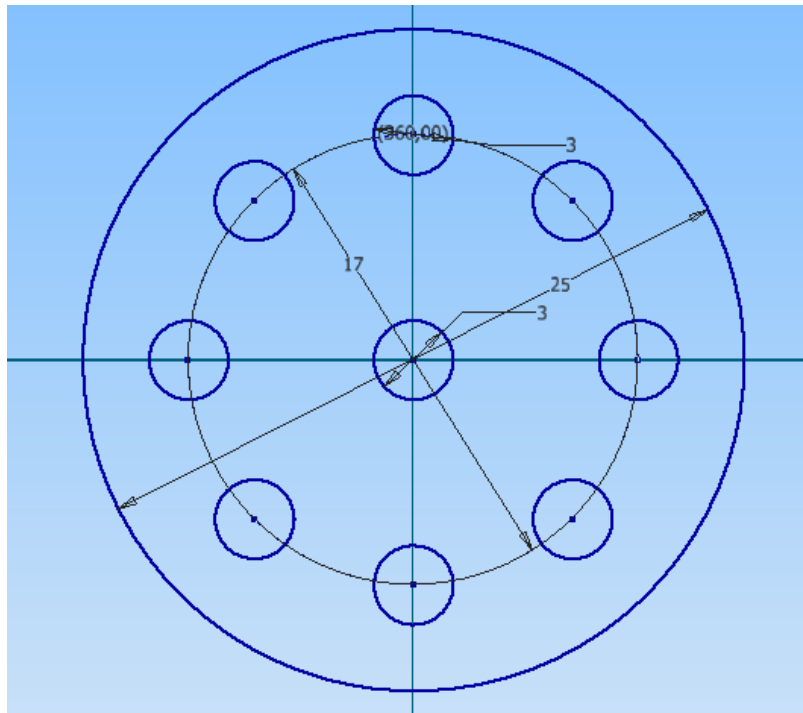


Figura 6.4 Boceto base engranaje A2.

Una vez realizado esto terminamos el boceto y realizamos la extrusión seleccionando el área deseada y dándole el espesor deseado para cada base.

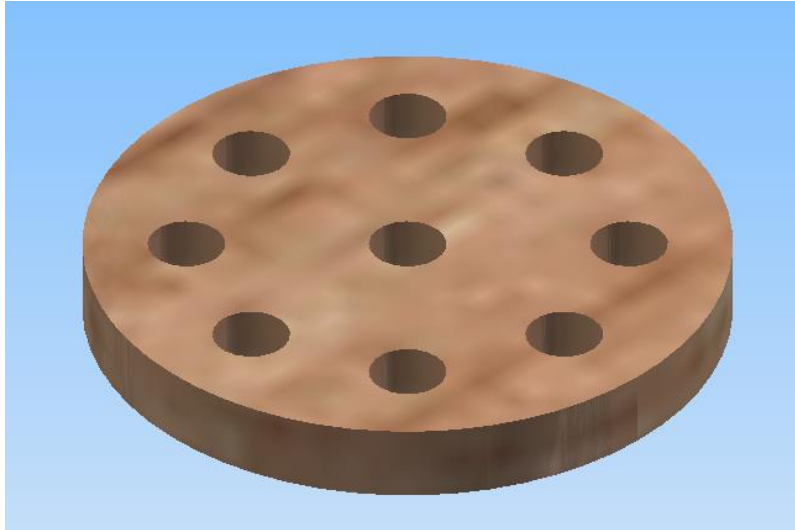


Figura 6.5 Extrusión base engranaje A2.

Para el caso de la base de los engranajes A3 y A4 ya estaría finalizada pero para el caso de la base del engranaje A2 tenemos que realizar un chaflán.

Para esta operación seleccionamos la arista deseada y la distancia del chaflán.

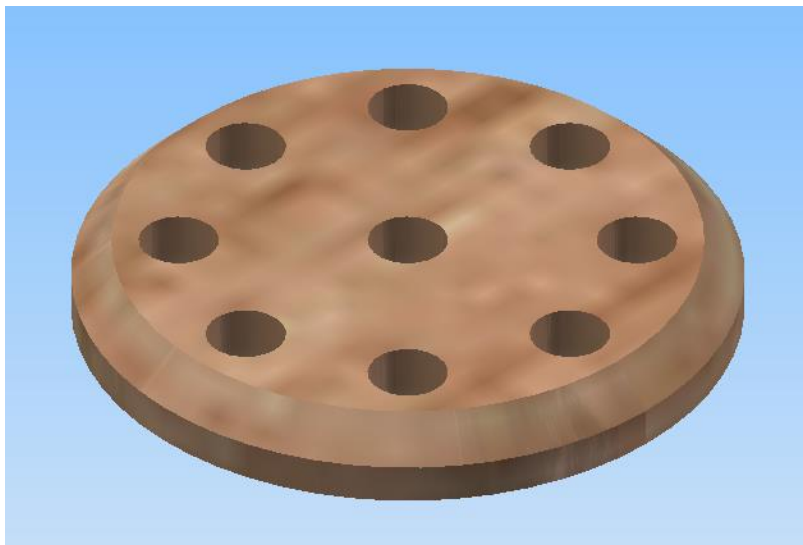


Figura 6.6 Chaflán base engranaje A2.

Con esto quedará también finalizada la base del engranaje A2.

Para el modelado de los dientes de los engranajes dibujamos una circunferencia del diámetro deseado para los distintos dientes que tenemos y realizamos una extrusión con la longitud de cada tipo de diente.

Para finalizar el engranaje creamos archivo de ensamblaje normal y introducimos la base del engranaje y los dientes, aplicando restricciones situaremos los dientes en

su posición. Las restricciones utilizadas serán la de coincidencia y la de nivelación. Con la restricción de coincidencia haremos coincidir el eje de cada diente con el eje de su agujero.

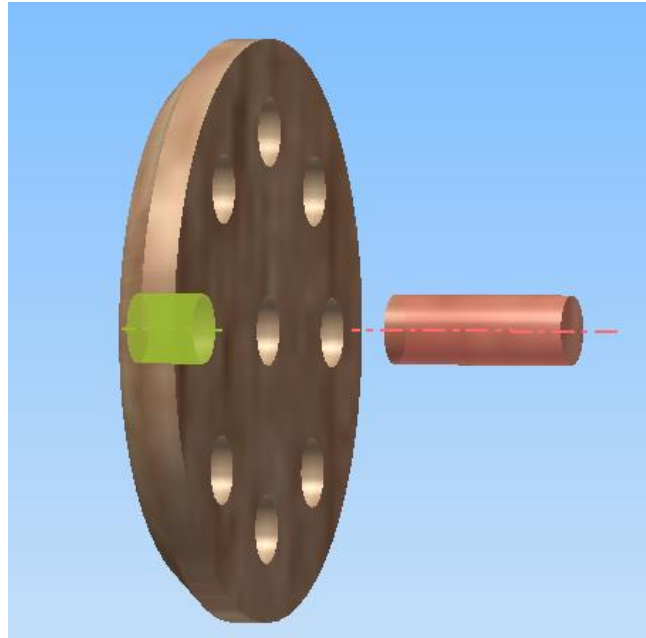


Figura 6.7 Restricción de coincidencia entre ejes.

Y con la restricción de nivelación haremos coincidir la cara del diente con la cara de la base.

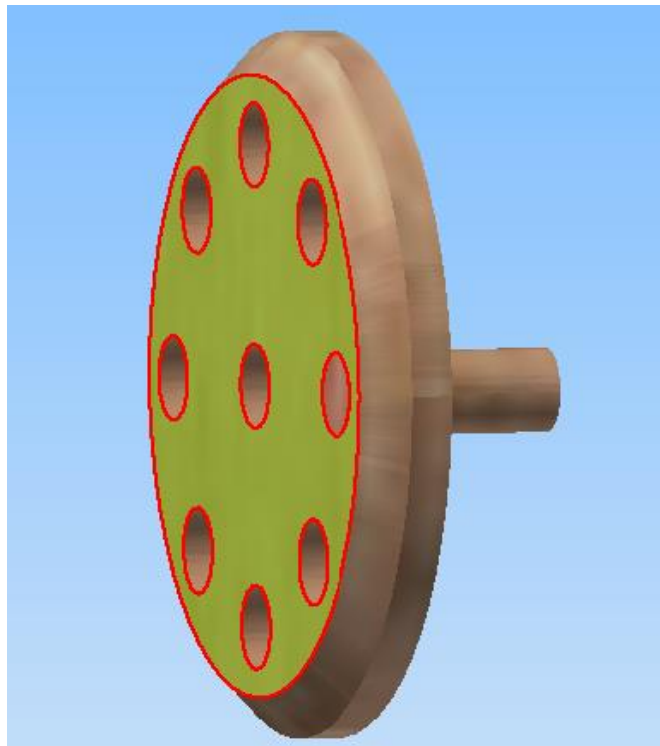


Figura 6.8 Restricción de coincidencia entre caras.

De esta forma tenemos ya restringido el movimiento de los dientes respecto a la base y nos falta restringir la rotación, establecemos una restricción de movimiento, tipo rotación y con una relación de cero.

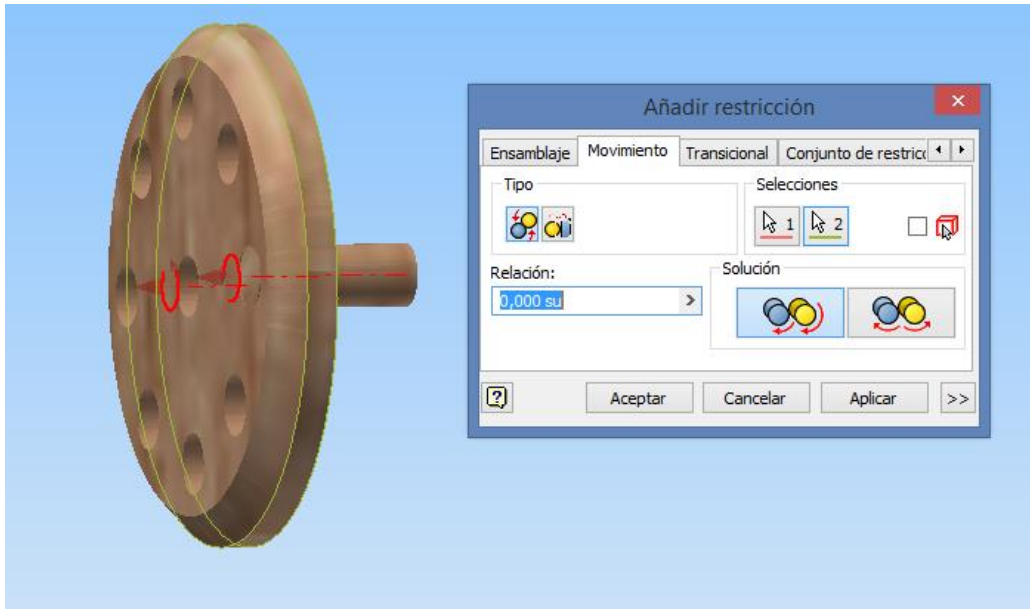


Figura 6.9 Restricción de la rotación.

Ya tenemos restringido tanto el movimiento como la rotación respecto a la base, realizamos esto con cada diente para finalizar el engranaje.

Para el engranaje A4 la nivelación entre caras se realiza con un desfase de 5 mm.

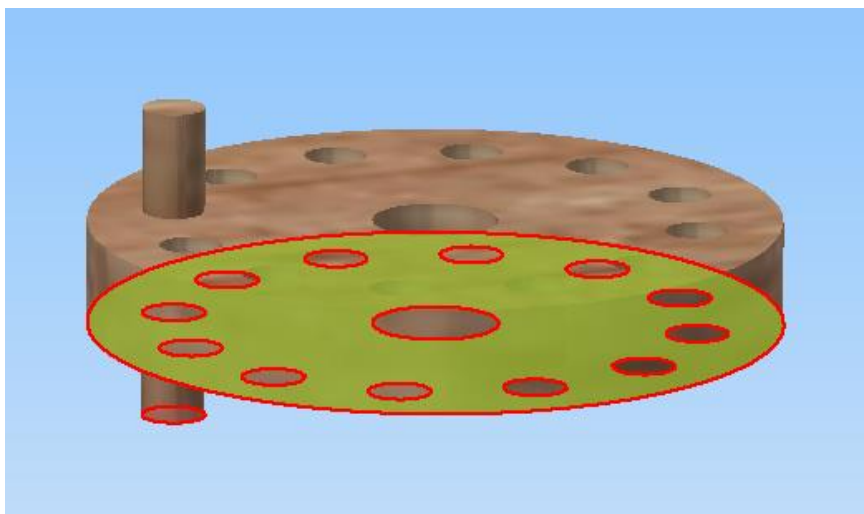


Figura 6.10 Restricción de coincidencia con desfase.

6.1.2 Modelado del eje central

El eje central, que hemos llamado A5, hace la función de la caja de satélite, une los satélites permitiéndoles girar sobre sí mismos, la figura del carro va fija a este eje y gira solidaria a él. También van montados los engranajes planetarios cuya rotación es libre respecto al eje.



Figura 6.11 Eje central del diferencial

Está compuesto por 4 piezas. La pieza central del eje, a la que hemos llamado P1, es un cilindro con un agujero en cada base y un agujero transversal al cilindro. Para realizar el cilindro utilizaremos un procedimiento diferente al usado anteriormente para realizar los dientes debido al agujero que atraviesa el cilindro. Realizaremos un boceto de un rectángulo con la longitud correspondiente a la pieza y el ancho correspondiente al diámetro. Dividiremos el rectángulo en dos por un eje que usaremos para hacer la revolución de la pieza y obtener el cilindro. Se ha optado por este procedimiento para compartir el boceto, que quedará en el plano central, y dibujar

un círculo en el centro del rectángulo que nos servirá para realizar el agujero que atraviesa la pieza usando la operación de extrusión pero en este caso la variante de corte y repitiendo la operación en ambas direcciones.

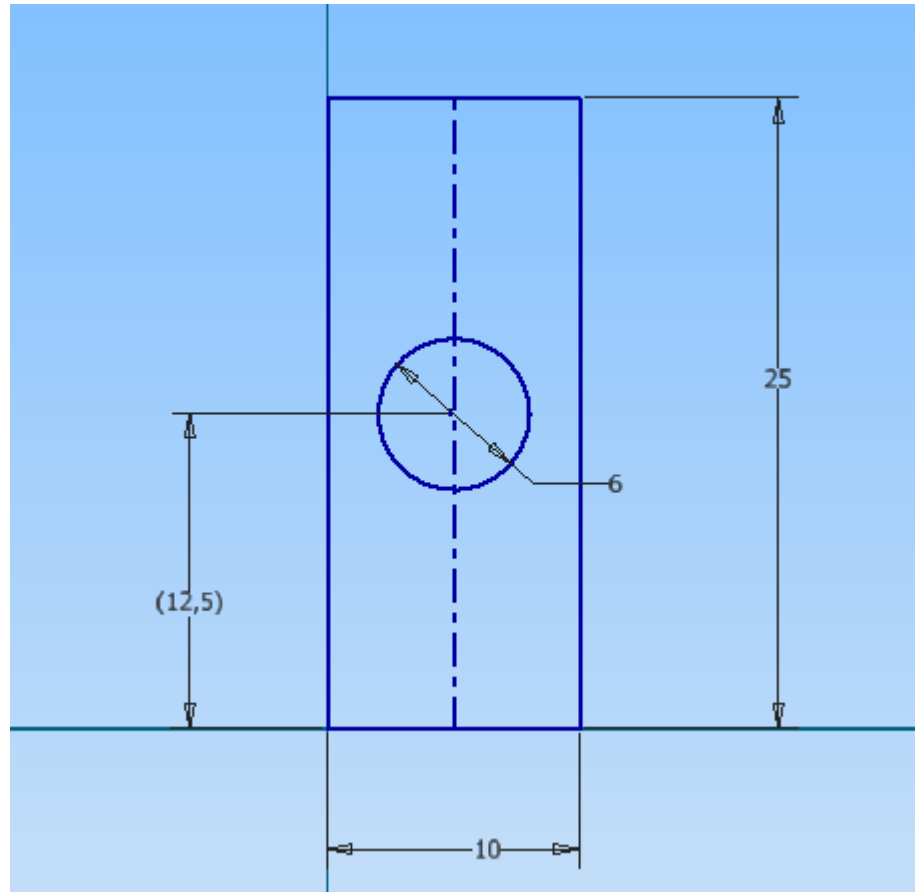


Figura 6.12 Boceto pieza central del eje.

Después tenemos que realizar dos nuevos bocetos, uno en la cara superior y otro en la cara inferior para los agujeros, dibujaremos una circunferencia en cada boceto con su diámetro correspondiente y realizaremos la extrusión con corte y quedará terminada la pieza.



Figura 6.13 Pieza central del eje.

El resto de piezas del eje son cilindros y los realizaremos haciendo un boceto de una circunferencia con el diametro correspondiente a la base de cada cilindro y extruyendo con la longitud deseada y realizando los agujeros correspondientes con los métodos anteriormente utilizados

Para el ensamblaje del eje usaremos las restricciones de coincidencia, nivelación y rotación. Con las restricciones de coincidencia situaremos las piezas en sus ejes correspondientes.

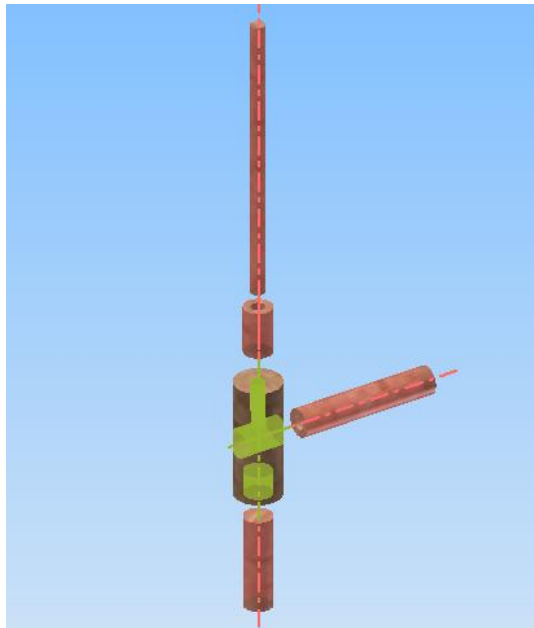


Figura 6.14 Restricciones de coincidencia entre eje.

Utilizaremos estas mismas restricciones para hacer coincidir las caras de los cilindros con sus superficies correspondientes para situarlas en su posición.

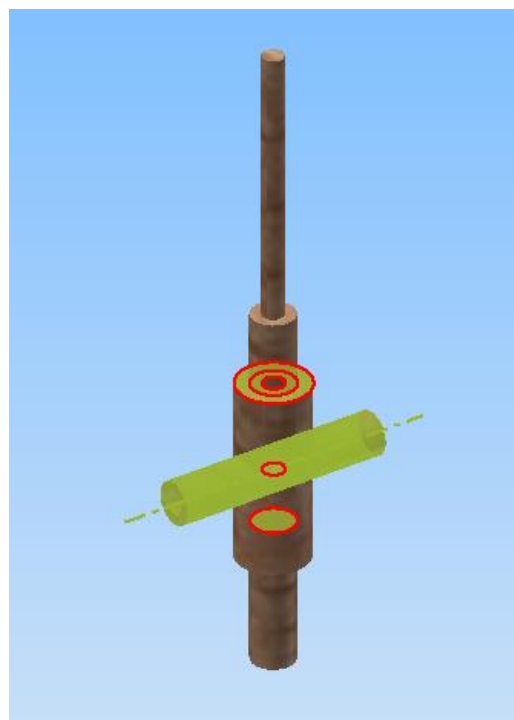


Figura 6.15 Restricciones de coincidencia entre caras.

Para la pieza transversal al eje es necesario aplicar un desfase para hacerlo coincidir con su posición.

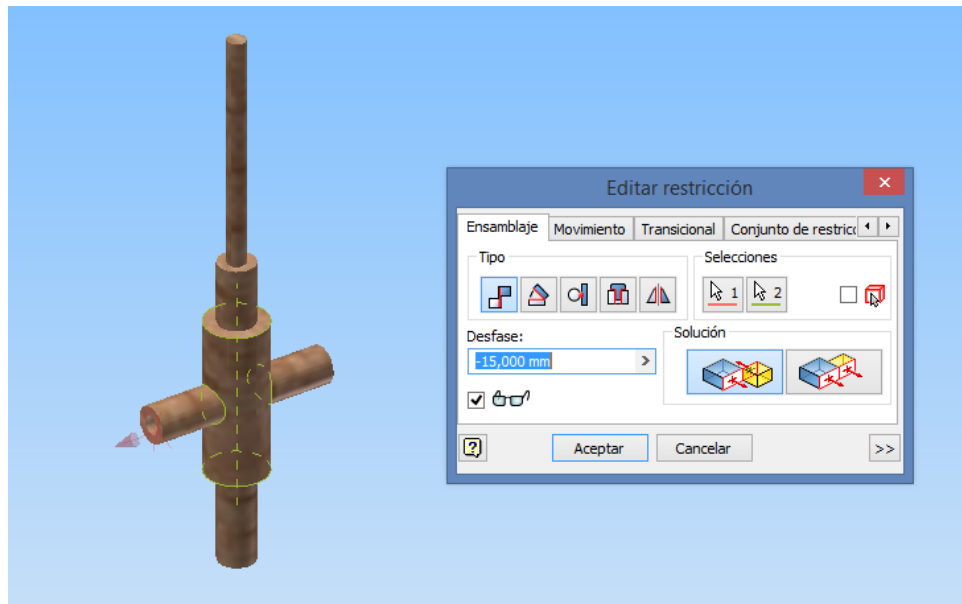


Figura 6.16 Restricción coincidencia con desfase.

Para finalizar restringiremos la rotación de todos los elementos con respecto al eje de la pieza central con excepción de la pieza transversal que la restringiremos respecto al eje del agujero.

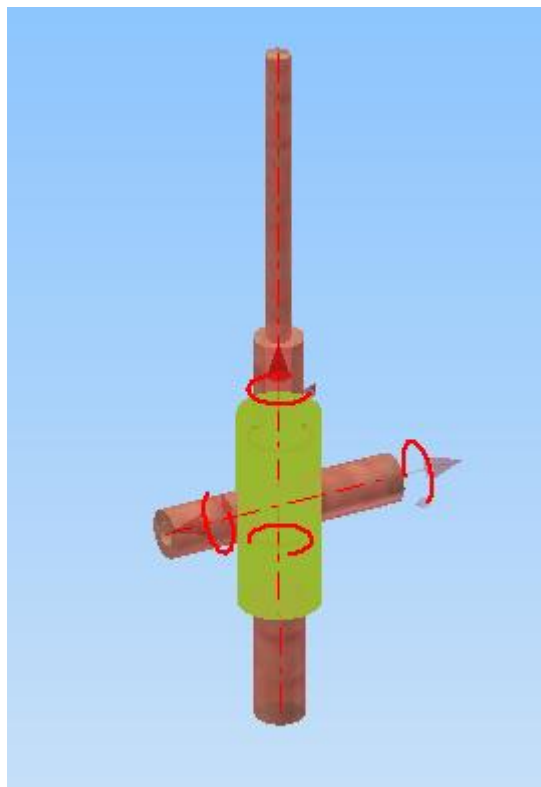


Figura 6.17 Restricciones de rotación.

6.1.3 Modelado del chasis

El chasis consta de tres piezas sencillas de modelar, realizaremos el boceto de cada pieza y extruiremos con el espesor o altura deseada y realizaremos los agujeros, donde ensamblarán los ejes de las ruedas y de los engranajes, por medio de bocetos en las caras correspondientes y usaremos la operación extrusión con corte. También usaremos la operación de empalme seleccionando las aristas correspondientes y especificando el radio de empalme.

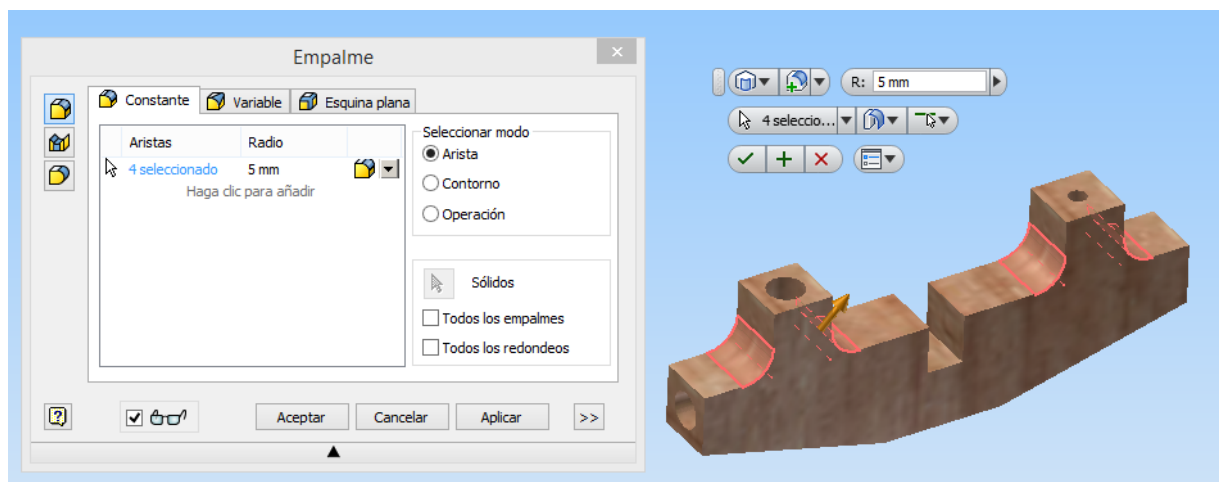


Figura 6.18 Empalme.

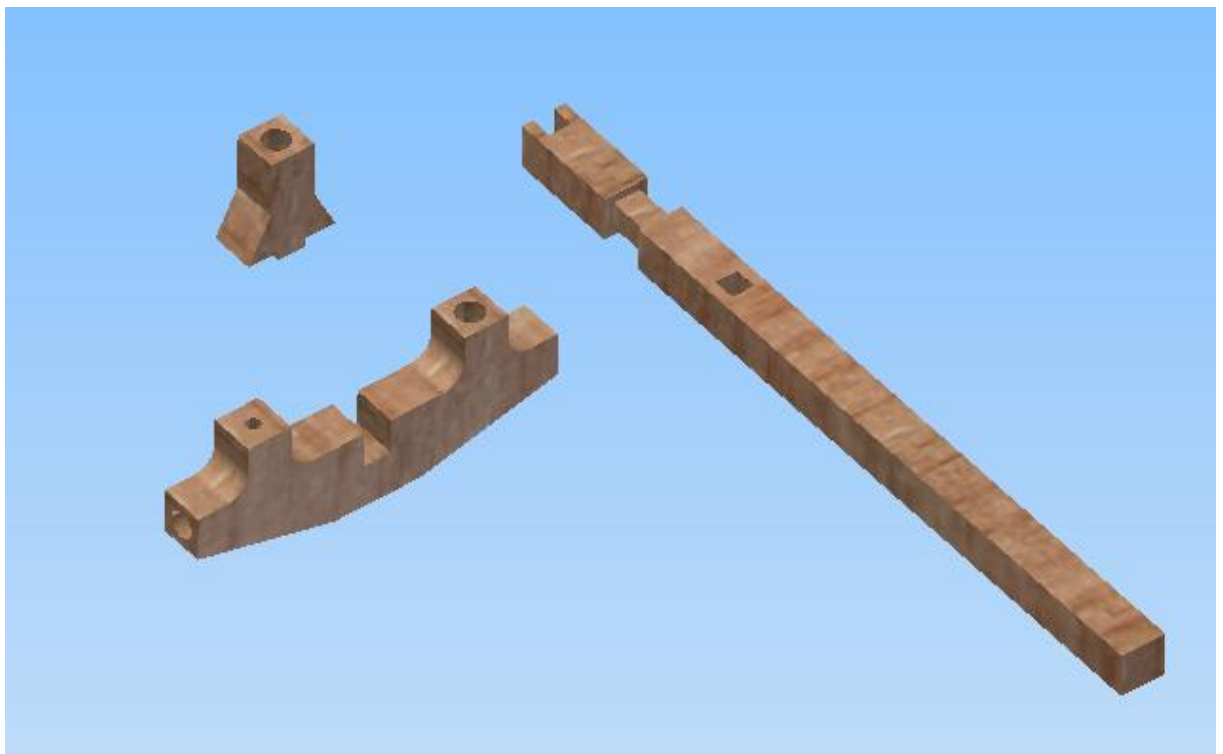


Figura 6.19 Piezas del chasis.

Para el ensamblaje del chasis usaremos solamente restricciones de coincidencia entre las caras correspondientes de las piezas, con las que quedará restringida la posición y el movimiento.

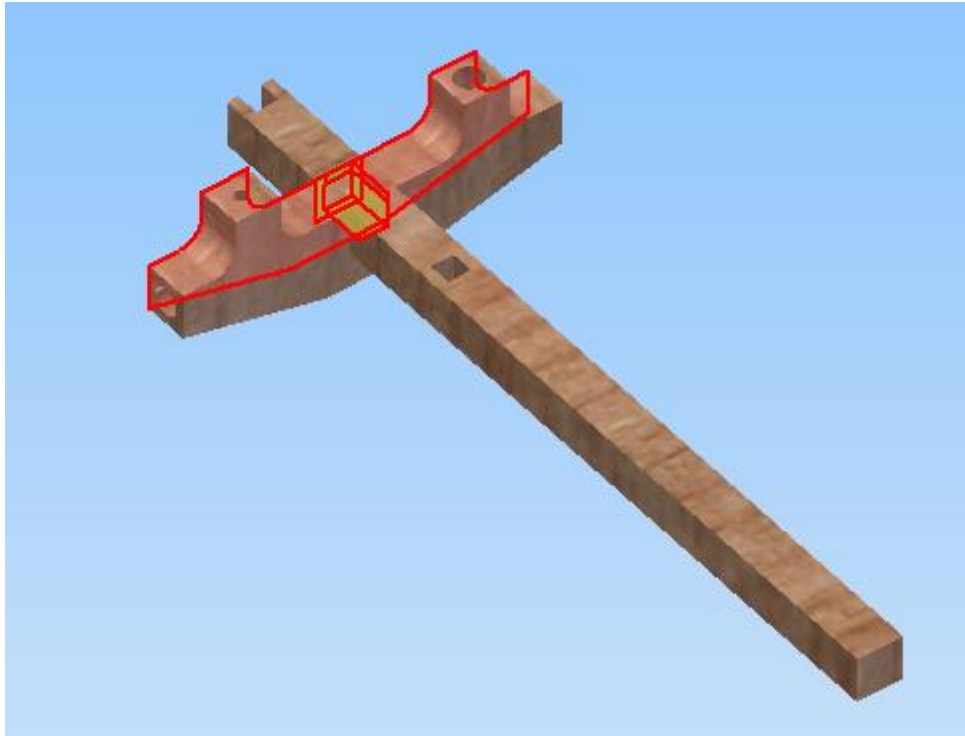


Figura 6.20 Restricciones de coincidencia entre caras.

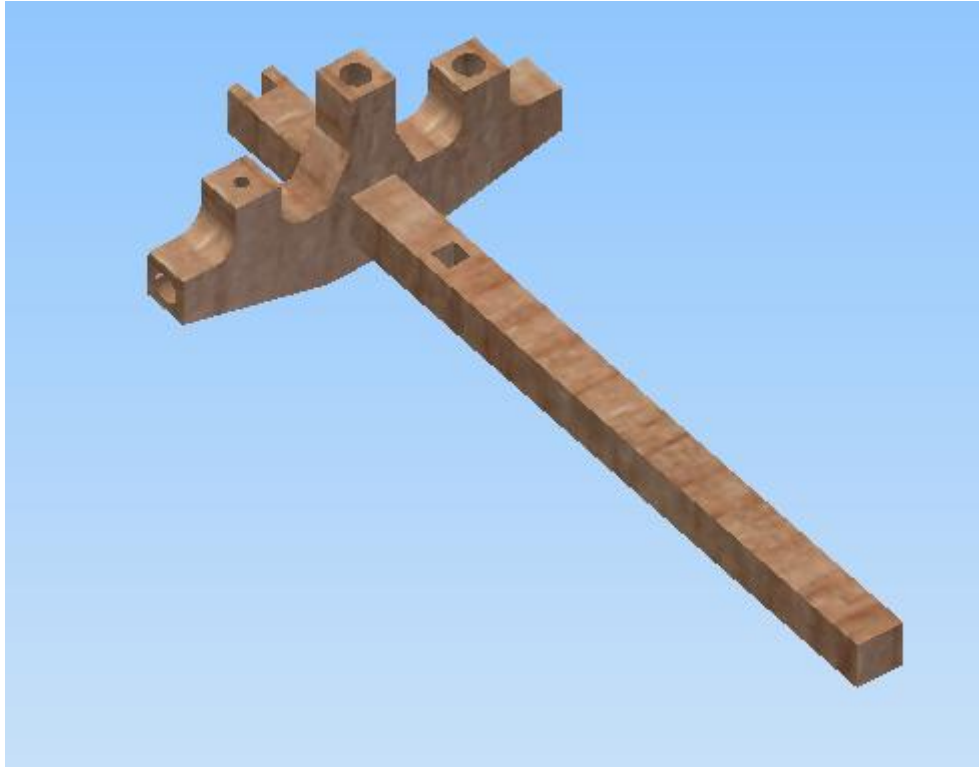


Figura 6.21 Chasis

El chasis lleva también una estructura que servirá de sujección para la columna de engranajes. Esta estructura consta de 5 piezas sencillas de modelar en las que solo usaremos la operación de extrusión una vez tengamos hecho el boceto y cuyo ensamblaje se realizará con restricciones de coincidencia entre las caras correspondientes de las piezas.



Figura 6.22 Estructura superior del chasis

6.2.1 Ensamblaje del diferencial

Para realizar el ensamblaje del diferencial abriremos un archivo nuevo de ensamblaje normal en el que introduciremos todas las piezas a ensamblar. El diferencial esta formado por el eje central que es la corona , dos engranajes A4 que son los engranajes planetarios, dos engranajes A2 que son los engranajes satélites, 4 arandelas y dos pasadores.

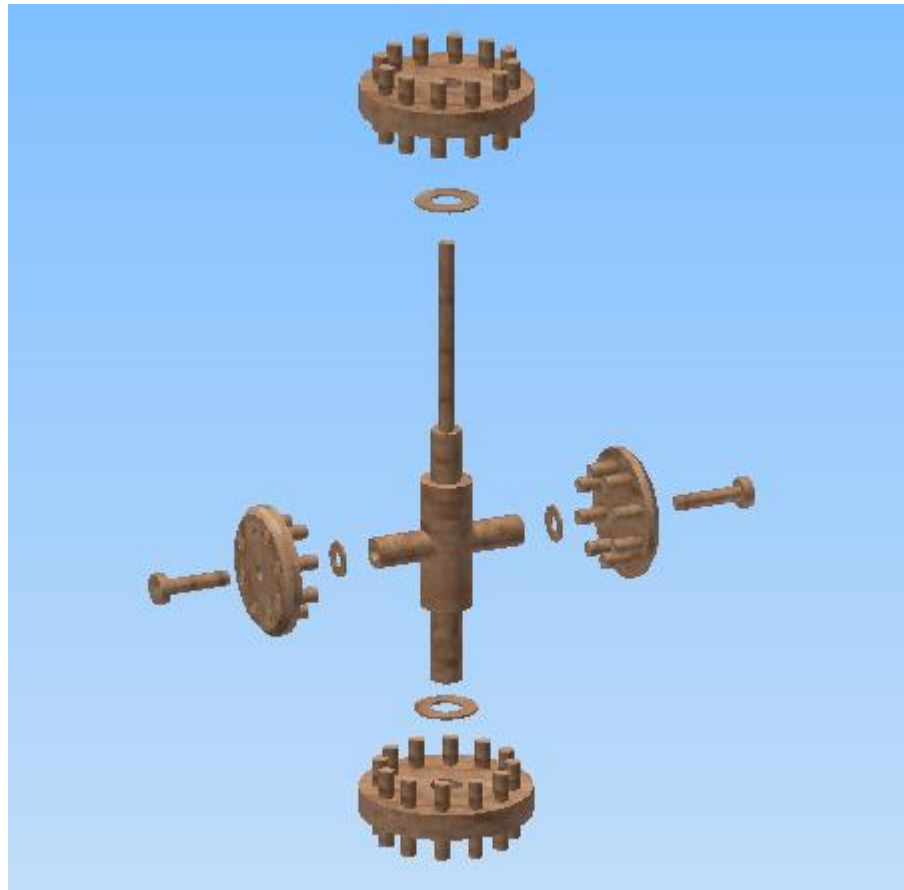


Figura 6.23 Vista explosionada del diferencial.

Utilizaremos restricciones de coincidencia para situar las piezas en sus ejes y posteriormente colocarlas en su posición estableciendo estas restricciones entre las caras de las piezas.

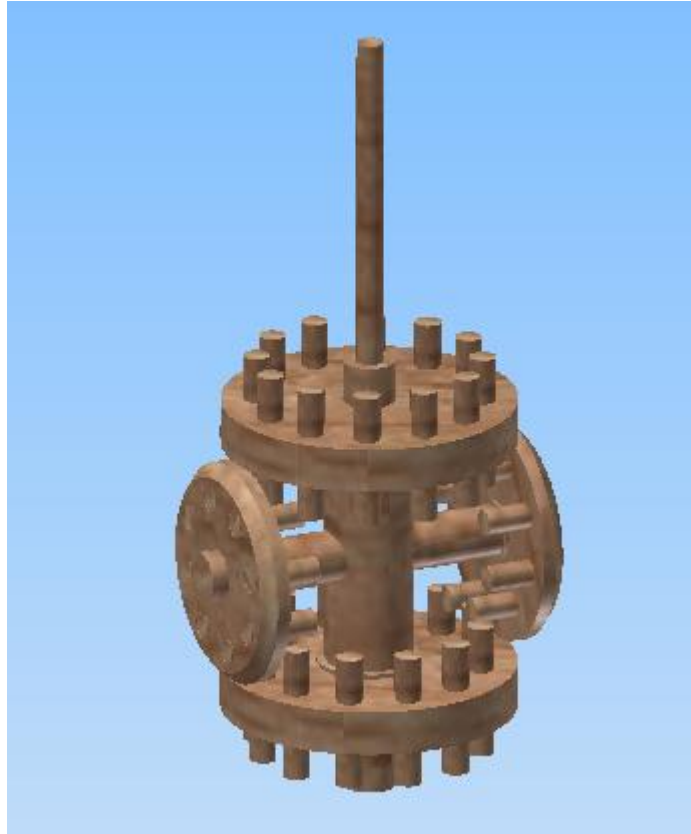


Figura 6.24 Diferencial mecánico

6.2.2 Ensamblaje del carro

Primero ensamblaremos el diferencial y los engranajes que transmiten el movimiento desde las ruedas hasta este. Estableceremos primero restricciones de coincidencia para situar las piezas en sus ejes correspondientes. Para transmitir el movimiento desde la rueda izquierda al engranaje planetario superior del diferencial usaremos un engranaje A3 que va fijo a la rueda y una columna de engranajes formada por dos engranajes A3 que van fijos a un eje que modelaremos con dos agujeros en sus extremos en los que irán alojados dos cilindros que servirán para fijar este al chasis y a la estructura superior. Para transmitir el movimiento de la rueda derecha al engranaje planetario inferior del diferencial usaremos un engranaje A3 que va fijo a la rueda y un engranaje A4 que va montado sobre un eje fijo al chasis y al que realizaremos un agujero transversal en el que introduciremos un pasador para evitar que el engranaje se mueva a lo largo del eje.



Figura 6.25 Vista explosionada mecanismo.

Las ruedas irán montadas sobre dos ejes que van fijos al chasis, sobre estos irán también los engranajes A3 y una arandela en cada eje para evitar el roce entre el chasis y los engranajes. Igual que hemos hecho con las demás piezas crearemos restricciones entre ejes y haremos coincidir las caras correspondientes para situar las piezas en su posición.

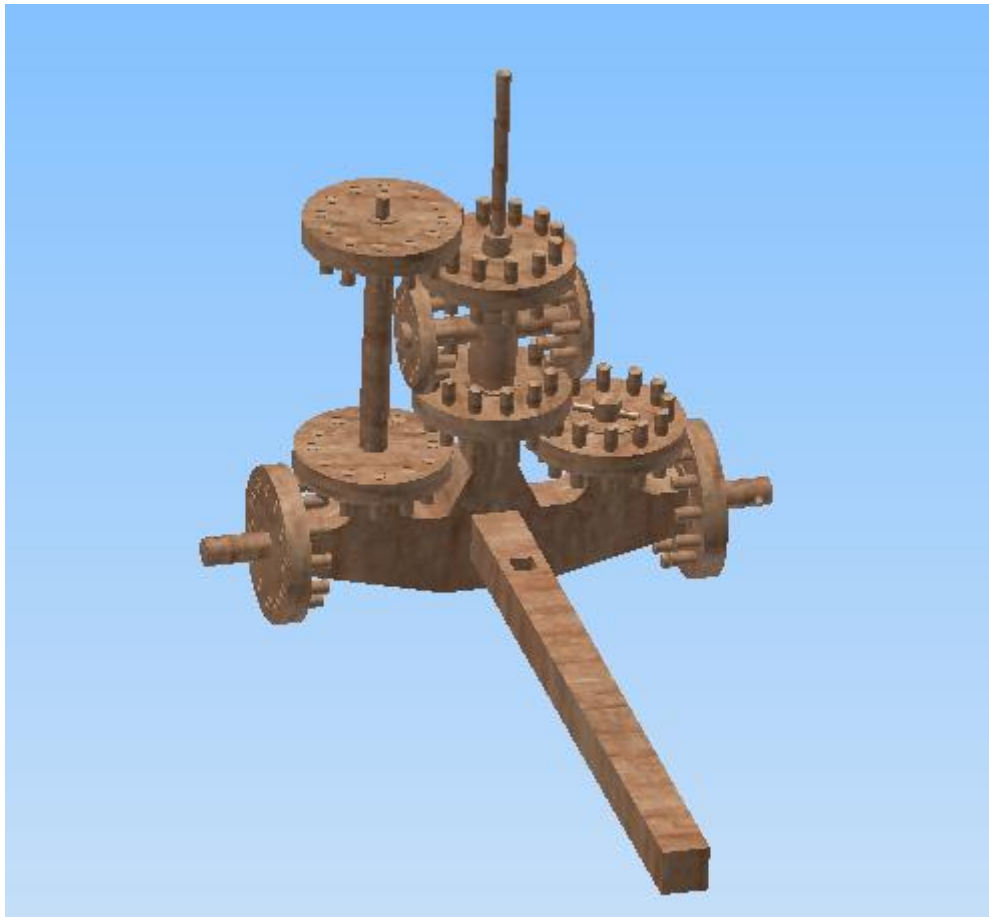


Figura 6.26 Mecanismo.

Finalmente ensamblaremos las ruedas, la estructura superior y la figura de la misma forma que hemos hecho con las piezas anteriores.

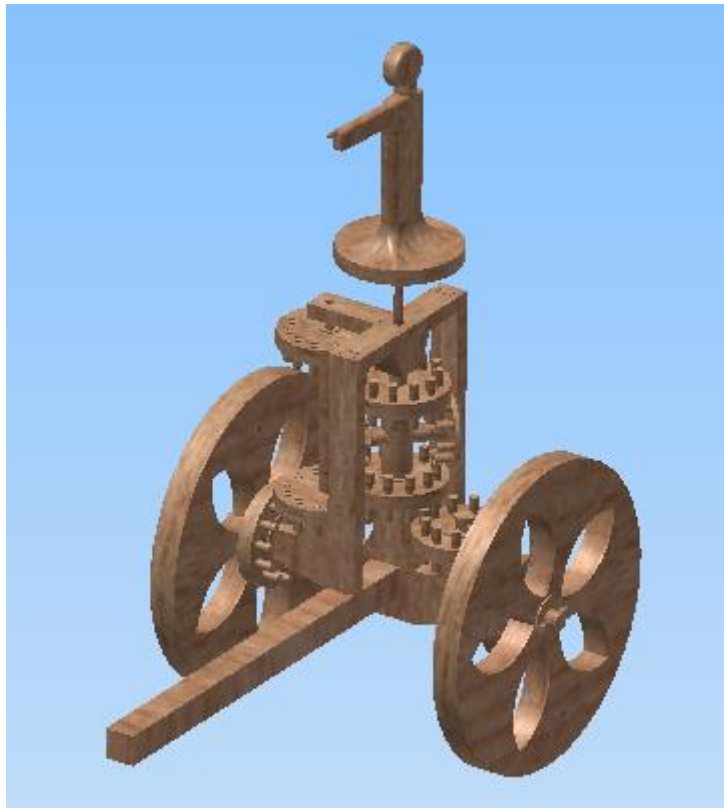


Figura 6.27 Modelado del carro que apunta al Sur.

7. Planos

Para la creación de los planos utilizaremos el programa Autodesk Inventor Professional 2015. Este software nos proporciona una herramienta sencilla e intuitiva para la creación de los planos una vez que tenemos las piezas modeladas geométricamente. Para ello abrimos un nuevo archivo, en este caso en el entorno de dibujo.

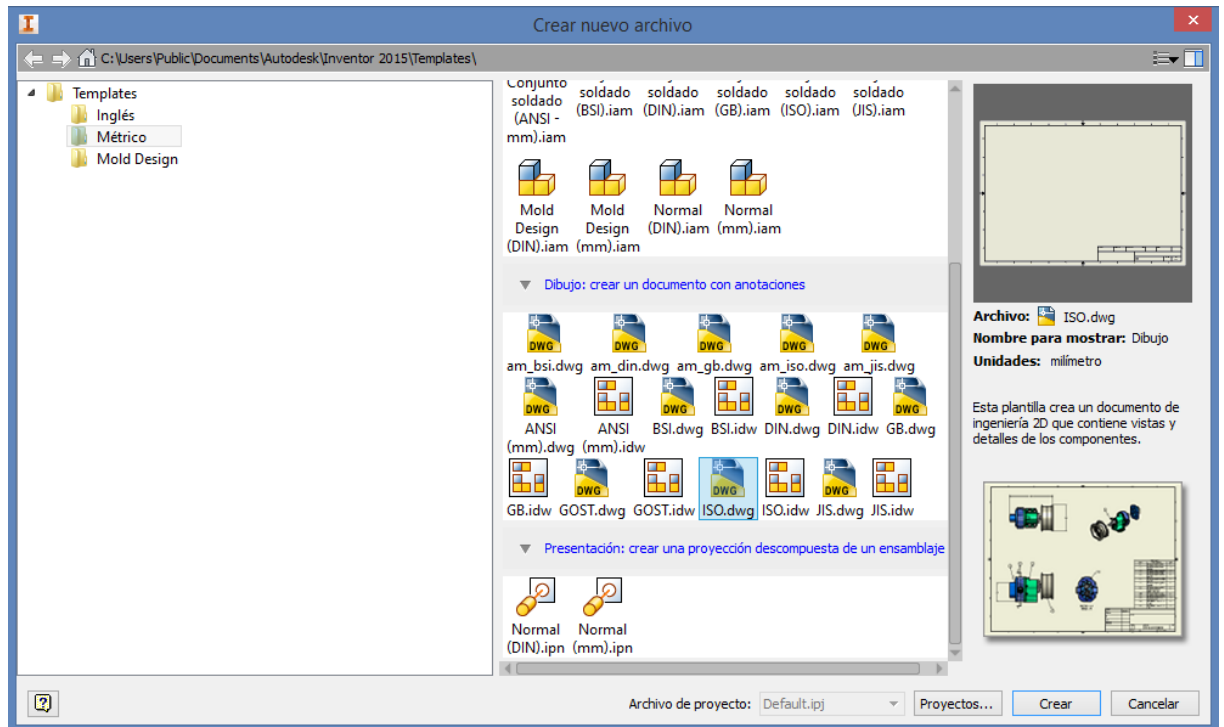


Figura 7.1 Archivo dibujo nuevo.

Seleccionaremos dentro de las opciones que nos ofrece el programa el archivo iso.dwg.

Lo primero que se ha realizado es la personalización del cajetín, para ello nos vamos al navegador situado a la izquierda de la pantalla y desplegamos en el árbol recursos para dibujos y a continuación cajetines, donde nos apareciera un cajetín llamado ISO.

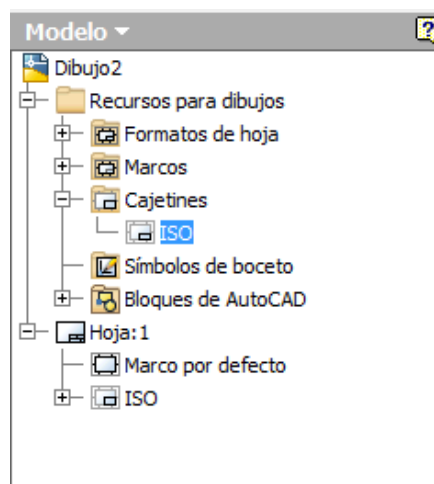


Figura 7.2 Navegador.

Haremos click con el botón derecho y se nos desplegará una lista de operaciones entre las cuales elegiremos la de editar, lo que nos llevará al entorno boceto para poder modificar el cajetín. A la hora de guardar nuestro cajetín usaremos la opción de guardar como para no perder el cajetín ISO. De este modo ya disponemos de nuestro cajetín personalizado y solo tendremos que copiarlo en el navegador de un plano a otro.

Para introducir una vista de la pieza que queramos realizar el plano seleccionaremos el panel de insertar vista en la parte superior izquierda de la pantalla y dentro de él seleccionamos la opción “base” que nos permite realizar la primera vista en un dibujo nuevo.

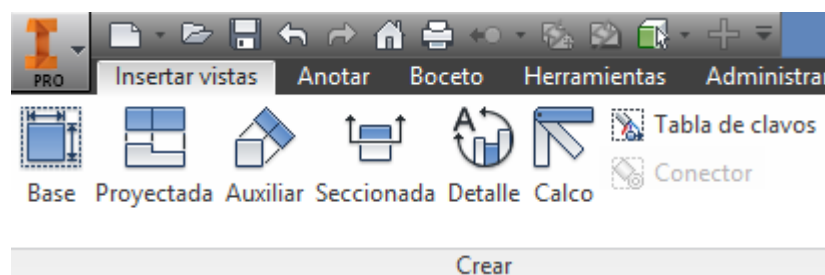


Figura 7.3 Panel de herramientas.

Se desplegará una pantalla llamada vista de dibujo en la cual tenemos la opción de buscar la pieza deseada, así como la vista que queremos introducir, la escala y el estilo.

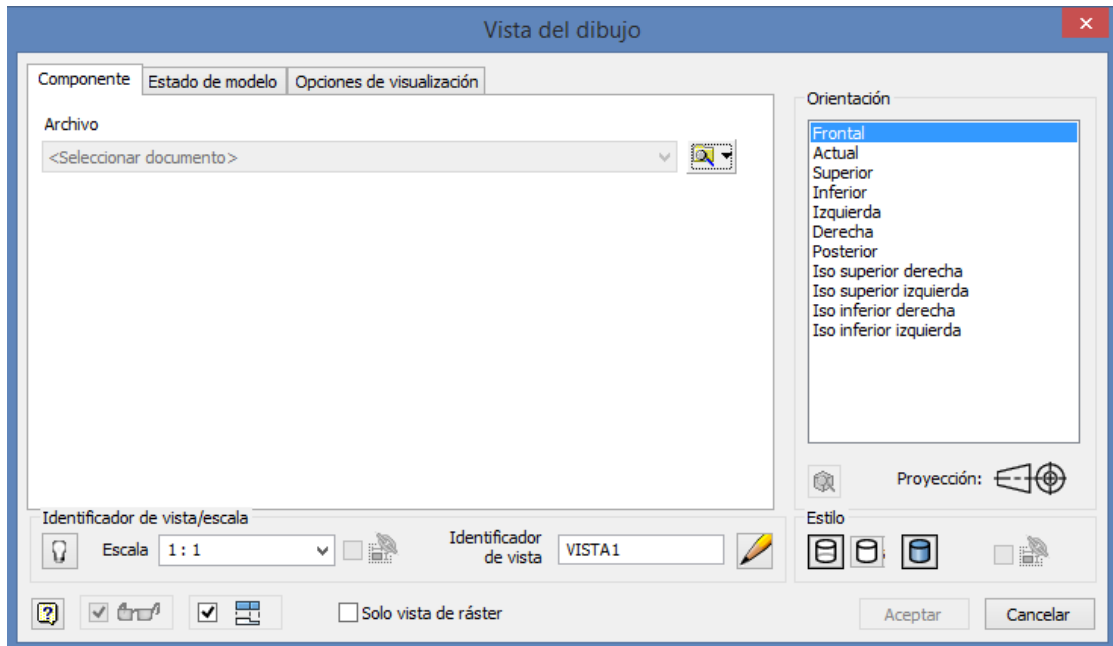


Figura 7.4 Ventana vista del dibujo.

Una vez seleccionada la pieza y la vista seleccionamos la escala que deseemos y colocaremos la vista en el plano en el lugar que deseemos. Con la vista colocada en su posición el programa nos da la opción de desplazando el ratón alrededor de la pieza introducir una vista proyectada, estas vistas pueden introducirse desde aquí o posteriormente seleccionando en el panel de insertar vista la opción proyectada. Cuando tengamos introducidas las vistas necesarias haremos click derecho y seleccionaremos la opción de “crear”.

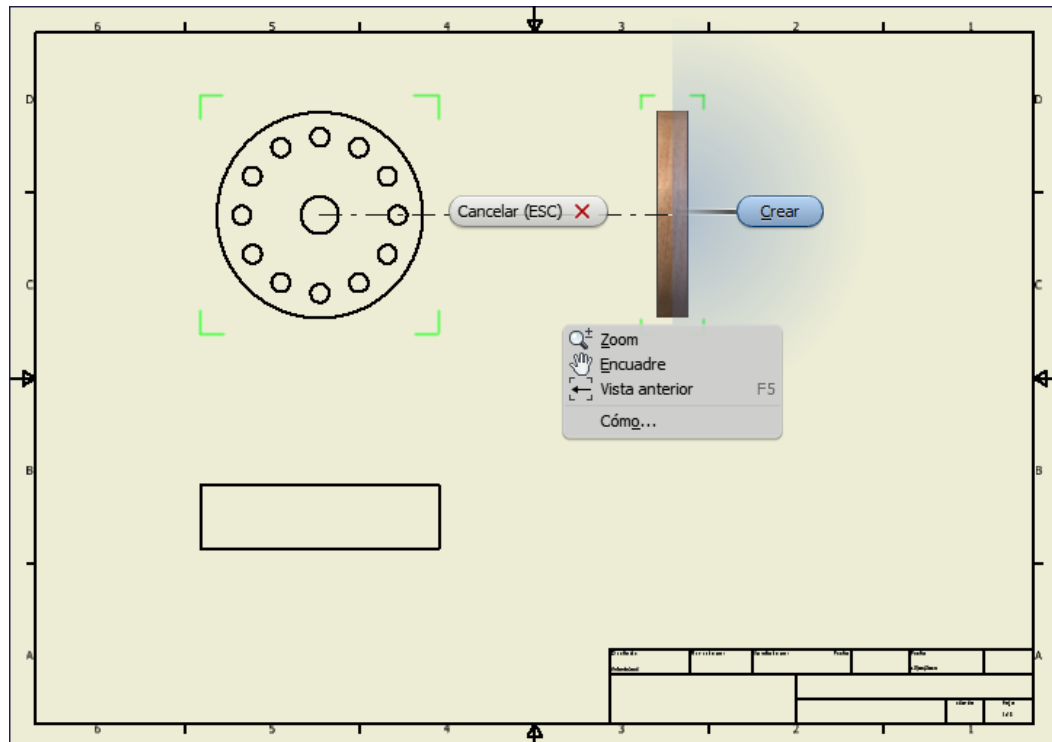


Figura 7.5 Introducción de vistas en el plano.

Antes de introducir las cotas debemos especificar los centros y los ejes, para ello en el panel de anotar, en la sección de símbolos encontramos la marca de centro y la línea de eje. Para la marca de centro basta con seleccionar la circunferencia y para la línea de eje debemos trazarlo en el dibujo.

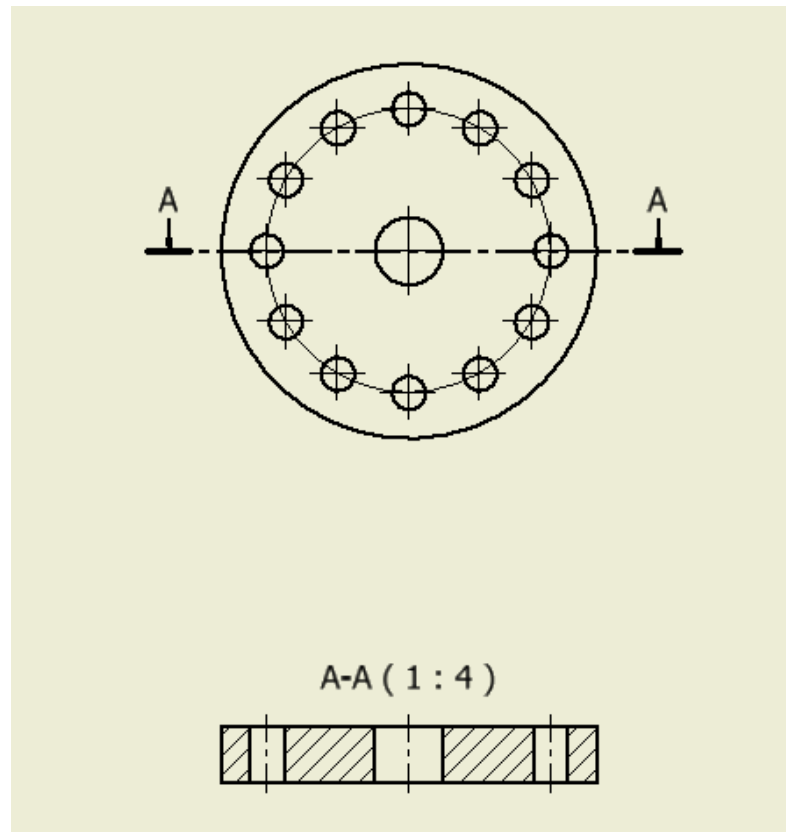


Figura 7.6 Ejes.

Y a continuación para introducir las cotas nos vamos al panel de “anotar” y seleccionamos la opción “cota” y elegimos la geometría a acotar.

Para el plano de la pieza P3 (rueda) se ha introducido una vista de detalle para acotar el dibujo de la rueda. Para ello seleccionaremos la opción detalle dentro del panel de insertar vista. Nos aparecerá una ventana en la que seleccionaremos la escala del detalle, la forma del borde y la forma del corte. A continuación seleccionaremos en la vista la zona de donde crearemos la vista de detalle.

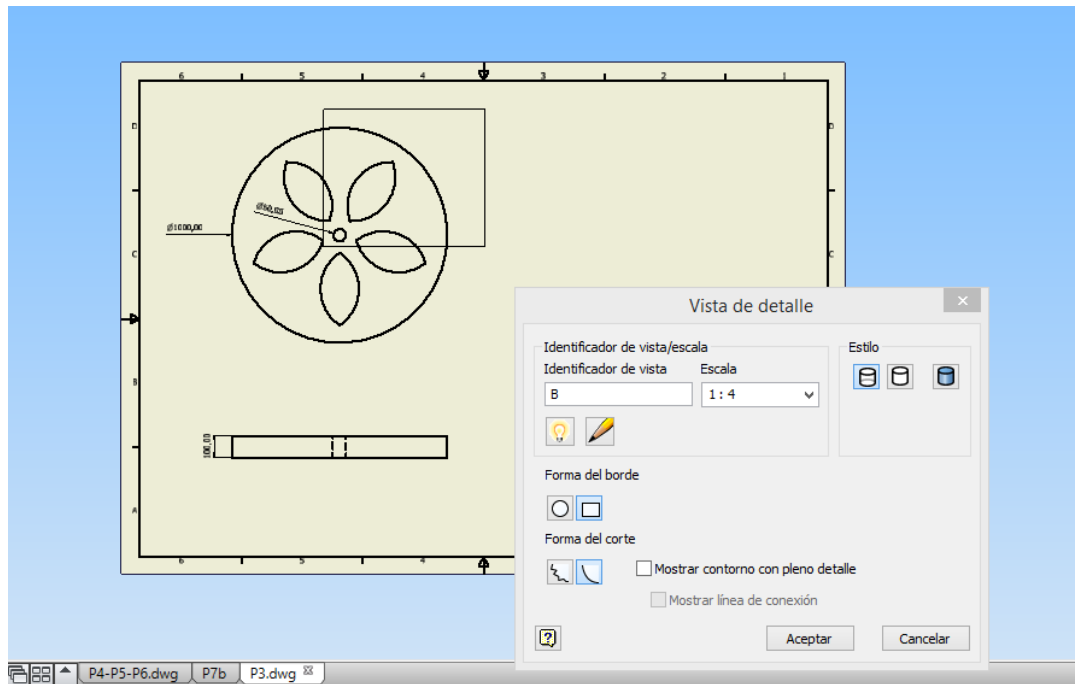


Figura 7.7 Vista de detalle.

Para acotar esta vista en detalle se ha creado un boceto teniendo seleccionada esta vista debido a que se necesitaba introducir dos líneas para acotar adecuadamente la posición de la circunferencia.

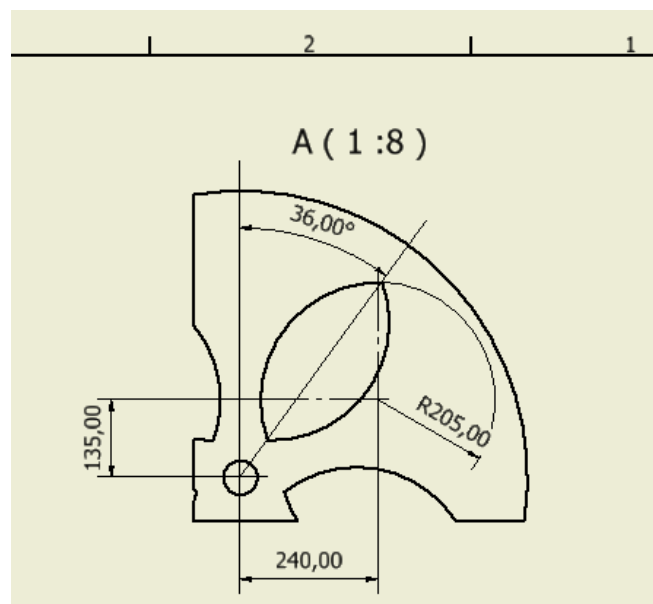


Figura 7.8 Vista detalle rueda

Una vez introducidas las líneas pinchamos en terminar boceto y acotamos la pieza de manera normal.

Para el plano de la base de los engranajes se ha realizado un corte para especificar el espesor en esta vista ya que si escogemos vista proyectada vamos a tener todas las líneas ocultas de los agujeros de los dientes del engranaje, de esta forma evitamos esas líneas haciendo el dibujo más sencillo y más fácil de entender.

Para la realización del corte seleccionamos la opción “seccionada” en el panel de insertar vista y atravesamos la pieza por donde queramos realizar el corte. Nos aparece una ventana donde podemos cambiar la escala, el estilo y la profundidad de la sección.

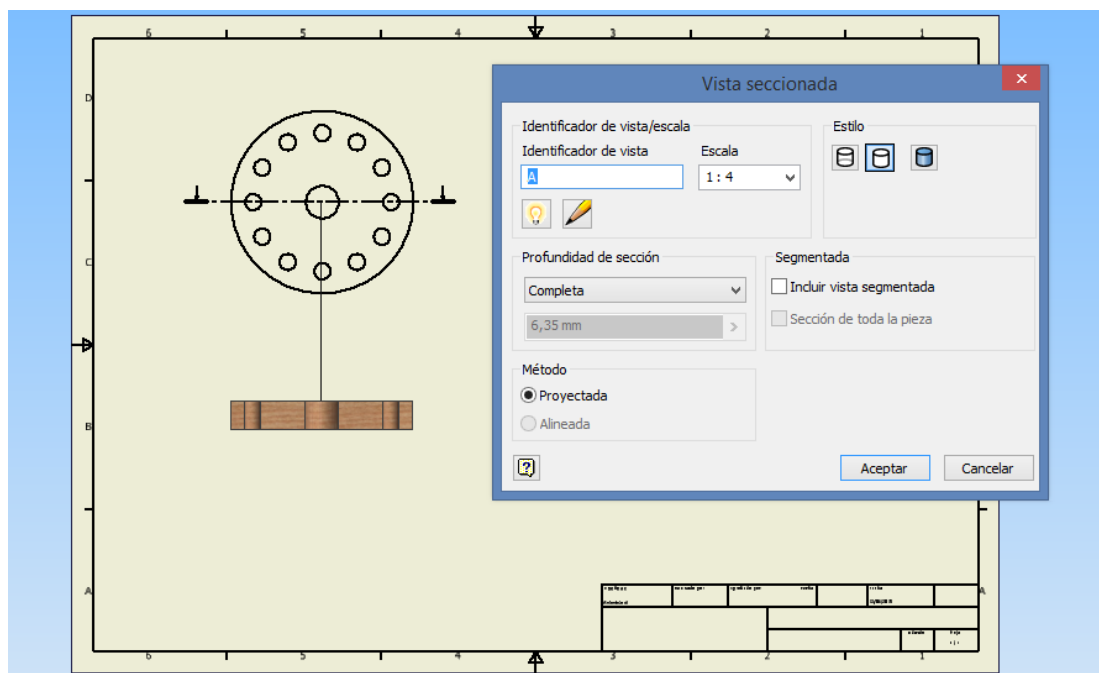


Figura 7.9 Vista seccionada.

Situando la vista en el plano completamos el corte.

Para los planos de los ensamblajes primero debemos de crear una vista explosionada del ensamblaje, para ello abrimos un archivo nuevo en el etorno de presentación y escojemos el archivo normal (mm).ipn.

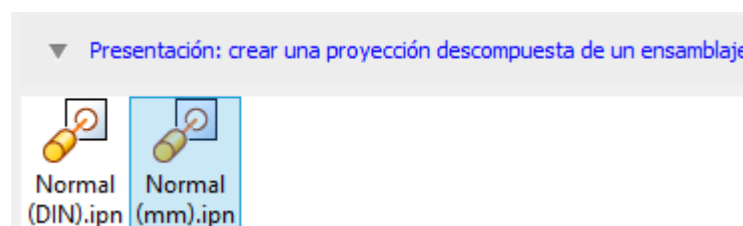


Figura 7.10 Archivo vista explosionada.

Se abrirá el etorno de presentación y seleccionaremos crear vista para introducir el ensamblaje. Una vez tenemos el ensamblaje introducido se activará el botón de mover componentes, pinchamos sobre él y nos aparecerá una ventana que nos permite seleccionar el componente a mover y la dirección.

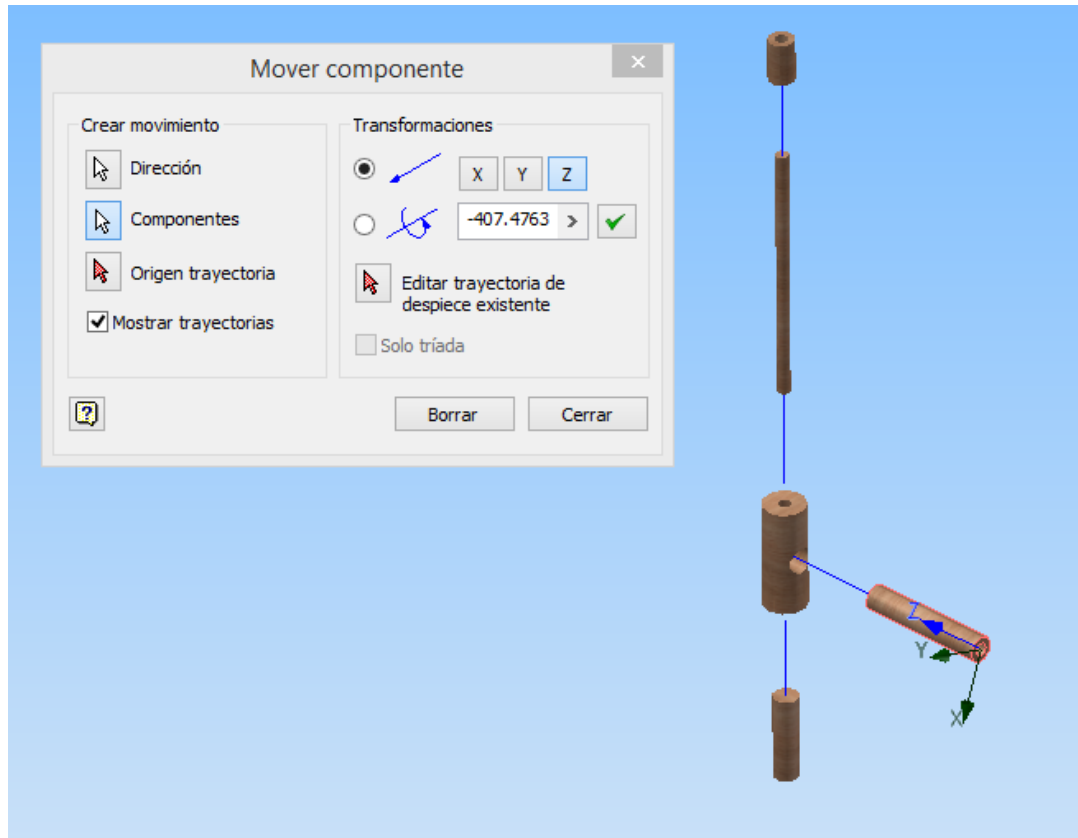


Figura 7.11 Vista explosionada eje central

Una vez seleccionado el componente a mover y la dirección pinchamos sobre dicho componente y lo movemos a la posición que deseemos. Realizando esto con cada componente del ensamblaje finalizaremos la vista explosionada que introduciremos en un archivo de dibujo para crear el plano del ensamblaje.

Cuando tengamos la pieza introducida en el plano seleccionaremos, dentro del panel de anotar, la opción de referencia numérica para especificar cada componente. El programa asigna números automáticamente pero tenemos la opción de pinchar dos veces sobre la referencia numérica y cambiar este número por el identificador de nuestra pieza.

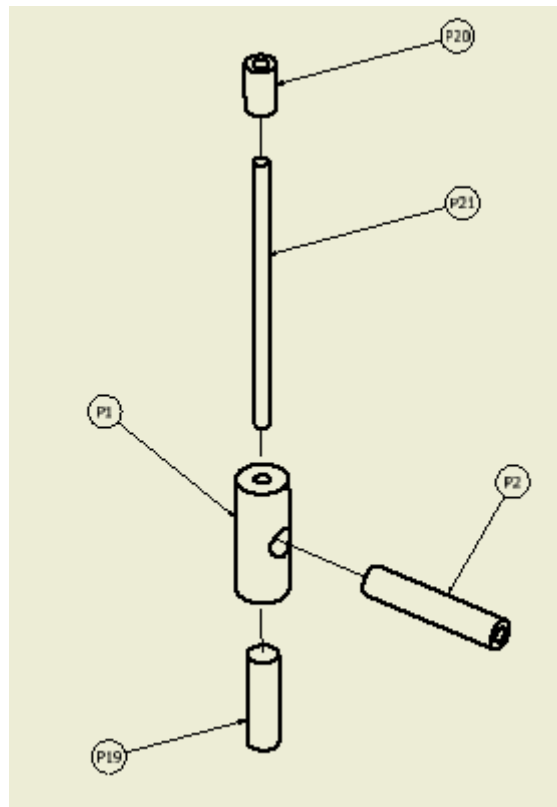


Figura 7.12 Vista explosionada del eje central en el plano

Finalizaremos los planos de ensamblajes introduciendo una vista del ensamblaje completo.

8. Análisis del mecanismo

Se ha analizado el mecanismo para posteriormente poder realizar su animación en un software de animación 3D.

Vamos a analizar el movimiento en el diferencial y el giro producido en su eje ya que las ruedas transmiten su movimiento por medio de un tren de engranajes hasta el engranaje planetario del diferencial sin variar la cantidad de movimiento transmitida, la velocidad angular de la rueda será la velocidad angular del engranaje planetario a la que va conectada. Hay que tener en cuenta que los engranajes están colocados de forma que cuando las dos ruedas giren en el mismo sentido los engranajes planetarios giren en sentidos diferentes.

Para el análisis del diferencial y de la posterior animación en 3D vamos a tener en cuenta que la relación de transmisión es igual a :

$$\tau_{1-2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

Siendo Z = número de dientes del engranaje y R = radio del engranaje.

8.1 Estudio del diferencial.

Se ha asignado números a las piezas del diferencial para identificarlas mejor según la siguiente tabla.

Pieza	Nº pieza
Engranaje planetario inferior	1
Engranaje planetario superior	2
Engranaje satélite	3
Engranaje satélite	4
Eje	5

Tabla 1

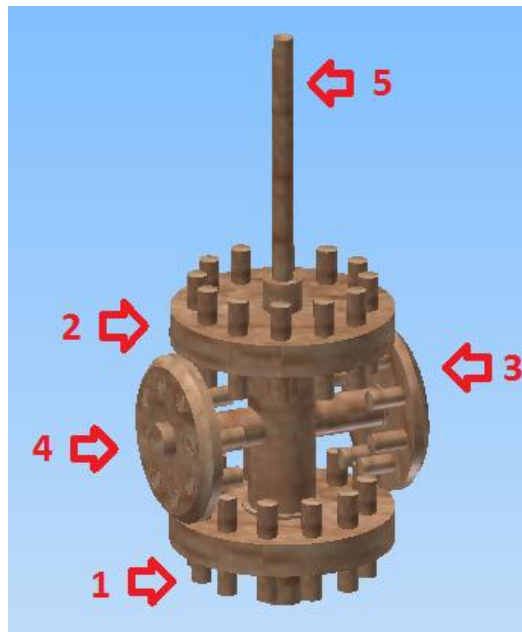


Figura 8.1 Componentes diferencial mecánico.

El giro de los engranajes planetarios genera que:

$$\omega_2 \cdot r_2 = \omega_5 \cdot r_2 - \omega_4 \cdot r_4 \quad (2)$$

$$(\omega_5 - \omega_2) \cdot r_2 = \omega_4 \cdot r_4 \quad (3)$$

También tenemos que

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_5 \cdot r_1 + \omega_4 \cdot r_4 \quad (4)$$

$$(\omega_5 - \omega_1) \cdot r_1 = -\omega_4 \cdot r_4 \quad (5)$$

Dividiendo (1) por (2)

$$\frac{(\omega_5 - \omega_1)}{(\omega_5 - \omega_2)} = -1 \quad (6)$$

Operando se obtiene que

$$\omega_5 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (7)$$

9. Animación en 3D

Para la animación del mecanismo se ha utilizado el software 3DS Max 2015, un software de modelado, animación y renderización en 3D. Actualmente este software es uno de los más reconocidos y galardonados a nivel mundial tanto en la industria del cine como en la industria de los videojuegos y es uno de los estándares de trabajo en los mercados de visualización arquitectónica, animación 3D y desarrollo de efectos especiales.

9.1 Descripción del software utilizado

Este software se basa en el uso de fotogramas para crear una animación, esta se realizará especificando la posición en el fotograma de inicio de un objeto y la posición en el fotograma final, el programa se encargará de calcular los fotogramas

intermedios para realizar la animación. Para especificar la posición en el fotograma de inicio primero debemos de tener activado el botón “Set Key” que se encuentra en la parte inferior de la pantalla, cuando esté activado estará de color rojo y siempre que presionemos el botón “Set Keys”, que se encuentra a su izquierda con la forma de una llave, el programa guardará en ese fotograma la posición de los objetos seleccionados. Para movernos por los diferentes fotogramas usaremos el deslizador de tiempo que se encuentra debajo de las 4 ventanas principales, en estas ventanas aparecerán nuestros objetos introducidos desde diferentes vistas.

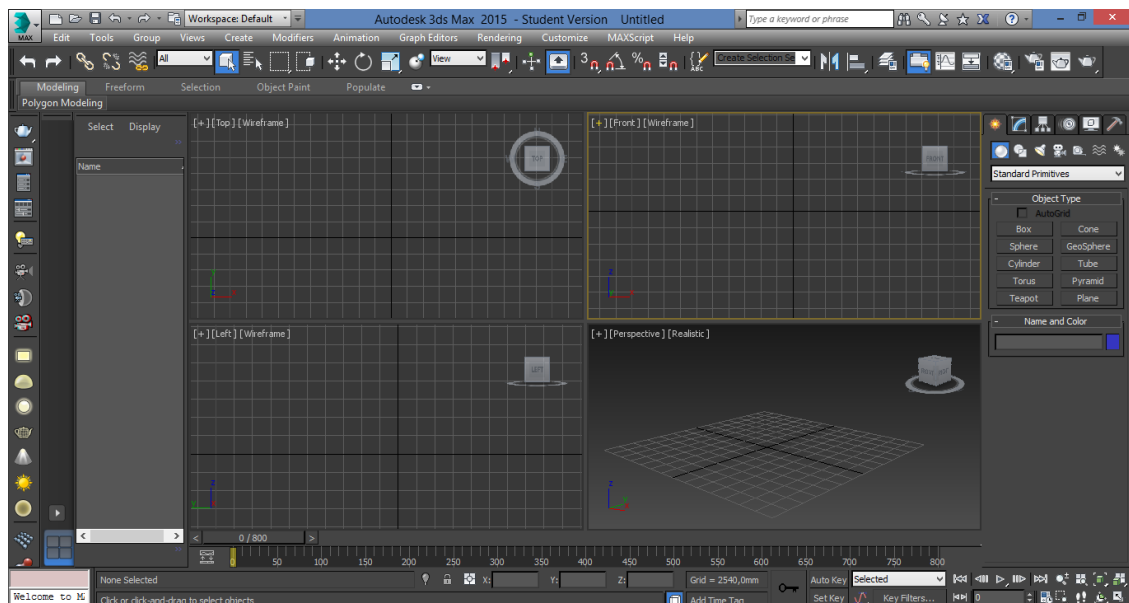


Figura 9.1 Vista inicial 3DS Max 2015

Para mover los objetos usaremos el botón de desplazar y el de rotar que se encuentran en la parte superior de la pantalla.

En la parte de la derecha encontramos el panel de comandos que usaremos para crear objetos y modificarlos, en nuestro caso lo usaremos para crear los planos del terreno y del cielo, las luces y la cámara.

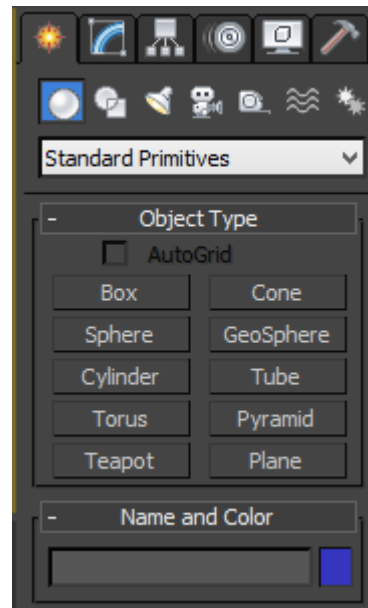


Figura 9.2 Panel de comandos

Y en la parte izquierda se encuentra el explorador de la escena donde aparecerá un desglose de todos los objetos que se encuentren en la escena.

9.2 Creación del entorno

Para la creación del terreno se han usado tres planos para crear relieves con diferentes texturas para poder ver con mayor claridad el movimiento entre el carro y el terreno. Al plano principal sobre el que se desplaza el carro se le ha aplicado un material de hierba, a los dos planos restantes se les ha aplicado un material de piedra y uno de hierba mas oscura con claros de tierra para que se asemeje a pequeñas montañas.

El plano 1 se ha creado en el panel derecho, en la pestaña de crear, seleccionando la opción de plano y pinchando en la ventana de perspectiva dándole las dimensiones deseadas. Se han creado otros dos planos sobre el primero con las mismas dimensiones, para trabajar con mayor comodidad se desactivan en el explorador los otros dos planos y el carro quedándose solo un plano que será el que trabajaremos para darle relieve.

Para trabajar el relieve se selecciona la opción de “Poly Edit” que se encuentra en el panel de la derecha dentro de la pestaña “Modify”. Se elige la opción de “vertex” que permite modificar el plano seleccionando los vértices que coloca el programa automáticamente.

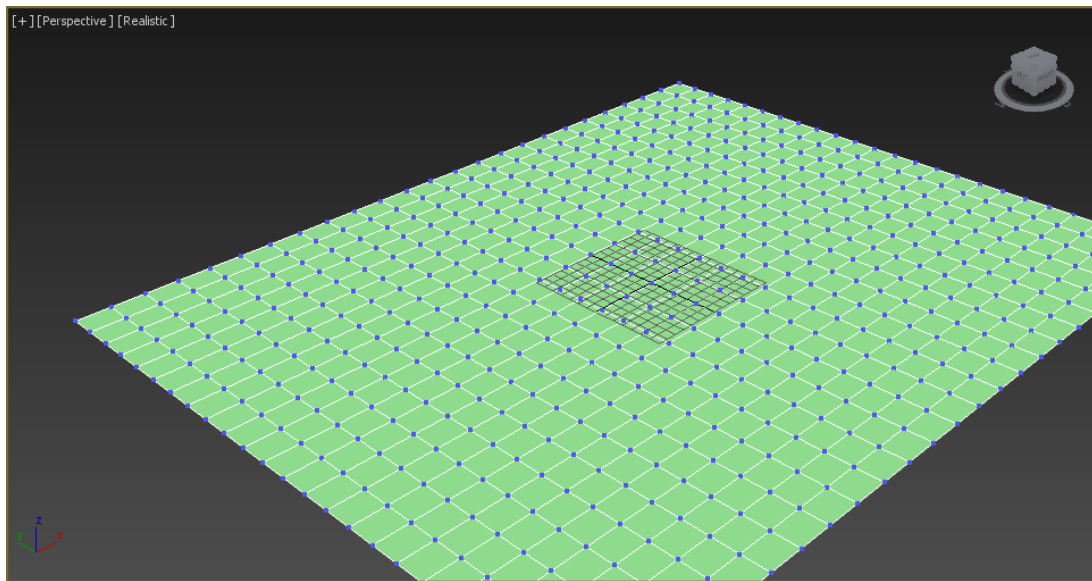
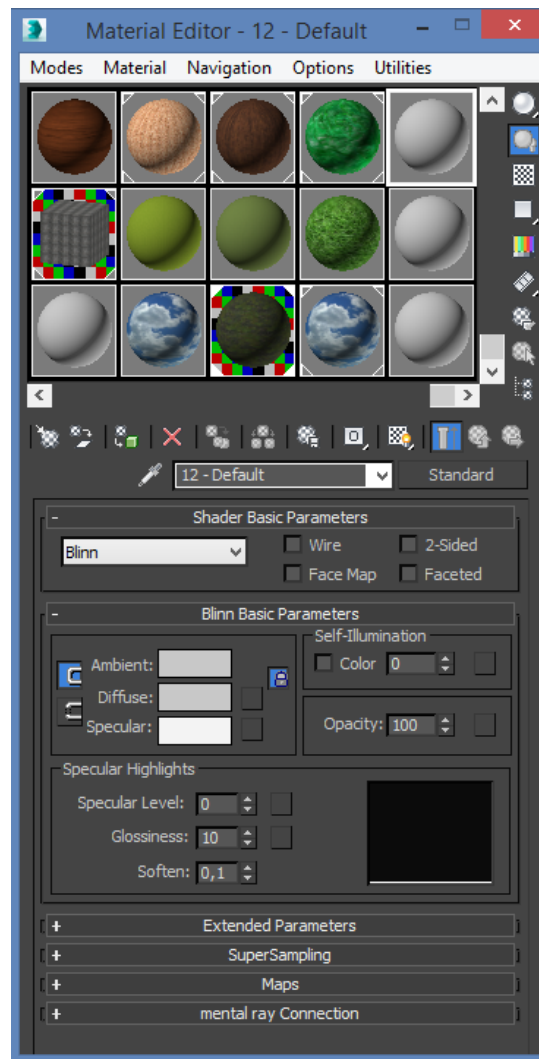


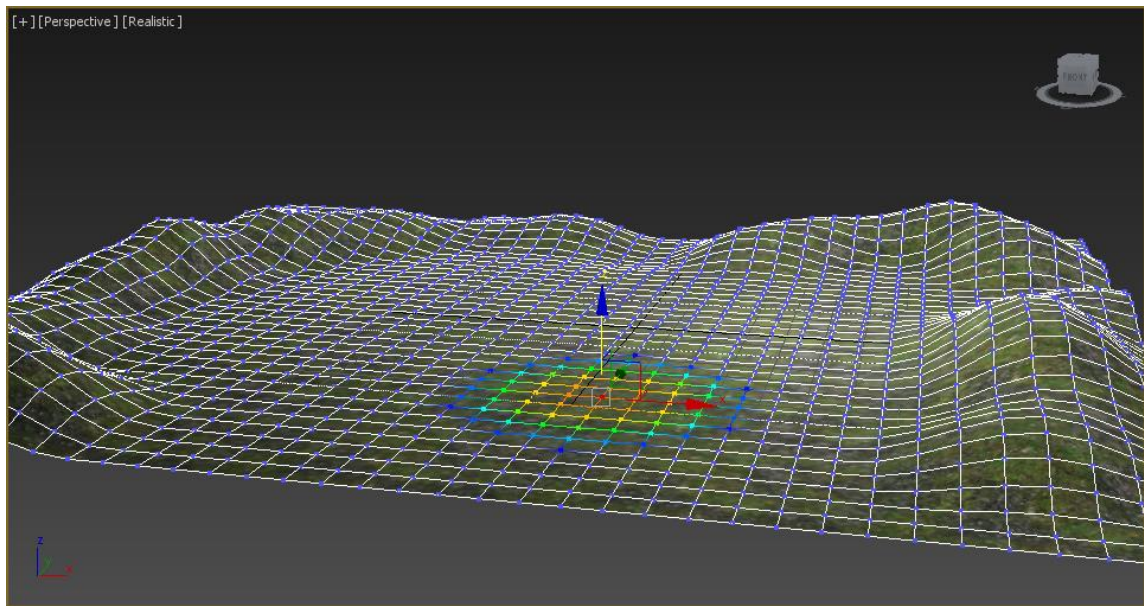
Figura 9.3 Plano del terreno.

Utilizando el editor de materiales se asigna un material al plano, en este caso será una imagen de un suelo que hemos seleccionado. Para ello se abre el editor de materiales que se encuentra en la barra de herramientas superior y se selecciona un espacio donde no se tenga guardado ningún material.

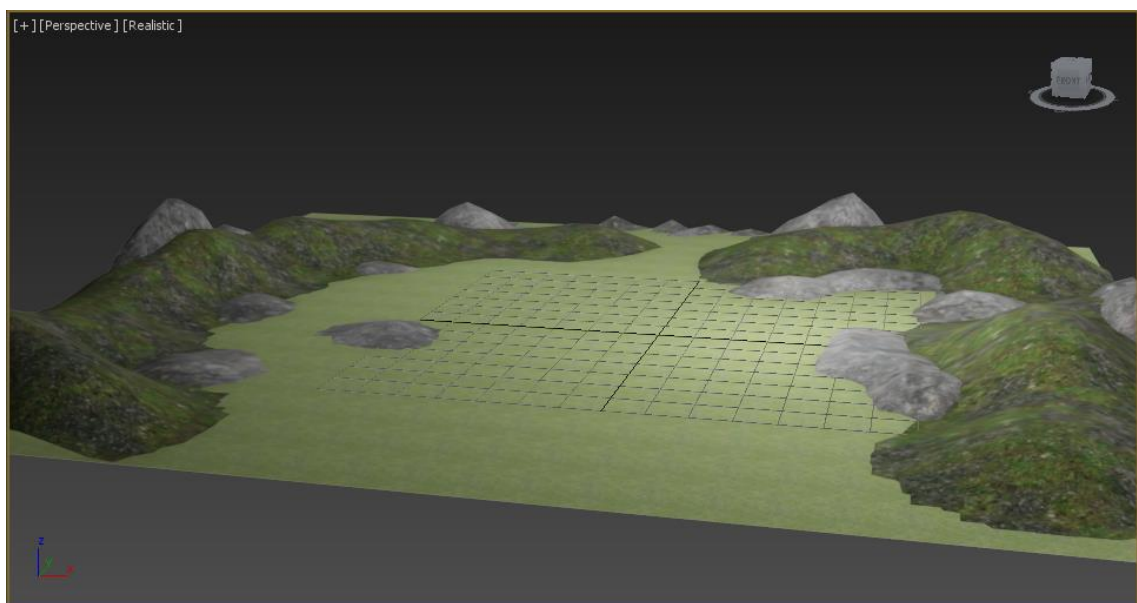
**Figura 9.4 Editor de materiales**

Se despliega la pestaña “Maps” y dentro de ella en “Difuse Color” escogemos nuestra imagen siguiendo la ruta Maps → Standard → Bitmap, se abrirá una ventana y seleccionamos nuestro archivo de imagen. Para aplicar el material se arrastra este sobre el plano.

A continuación se selecciona la opción “Soft selection” para desplazar un conjunto de vértices en un área circular al mismo tiempo con diferente grado de elevación, mayor en el centro y menor en los extremos.

**Figura 9.5 Relieve del terreno**

Realizamos la misma operación con otro plano dándole elevaciones diferentes y en este caso un material de piedra. El primer plano que se creó no se ha deformado ya que va a ser la superficie sobre la que apoya el carro, a este plano se le ha aplicado un material de hierba. Finalmente los dos planos con relieve los desplazamos un poco por debajo del primero para que solo sobresalga el relieve deseado.

**Figura 9.6 Terreno**

Para finalizar el entorno crearemos el cielo, este se ha realizado con una superficie curva. Se ha creado un plano como anteriormente y en la lista de modificadores se ha utilizado la opción “bend”, esta opción nos permite doblar el plano

en el eje que se necesite. Para terminar aplicamos el material correspondiente. Se ha optado por este método para simular el cielo para crear un mayor efecto de 3D en la animación, rotando este plano a velocidad más lenta que el terreno.

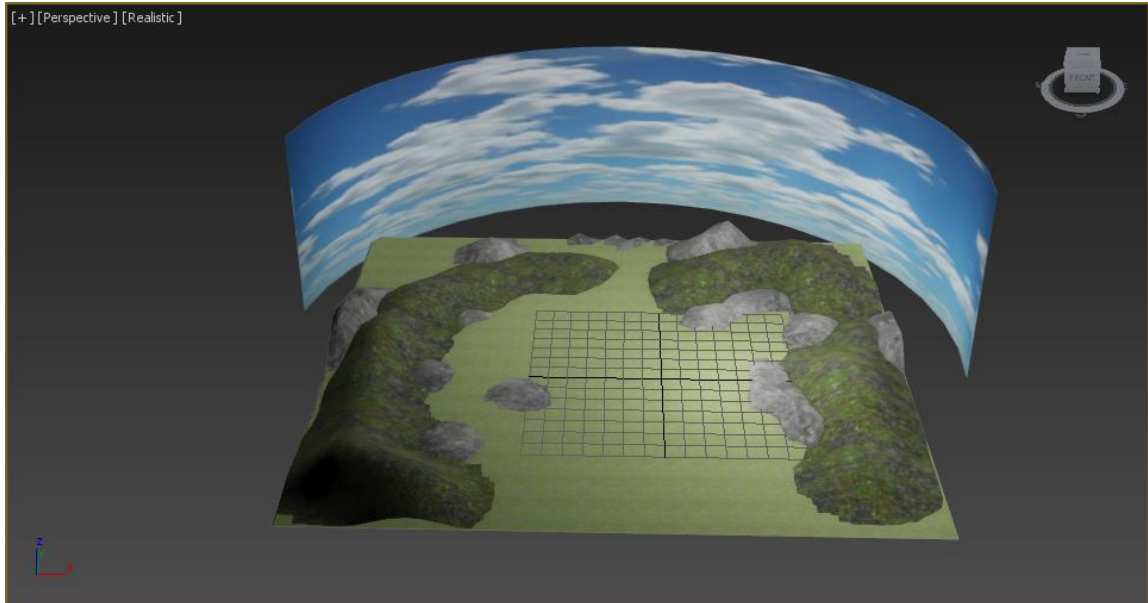


Figura 9.7 Entorno

9.3 Animación

Para comenzar debemos abrir con el programa Autodesk Inventor Professional 2015 nuestro archivo del ensamblaje completo y alinearlos con los ejes principales del programa, para ello creamos una pieza que sea una caja y desde nuestro ensamblaje lo introducimos seleccionando insertar pieza. Para alinear nuestro ensamblaje a la caja vamos a utilizar la pieza alargada del chasis que consta de 3 caras planas las cuales vamos a alinear con 3 de las caras del cubo estableciendo restricciones de coincidencia como anteriormente hemos realizado para ensamblar todos los conjuntos de piezas.

A continuación en el panel izquierdo buscaremos la caja creada y le quitaremos la visibilidad haciendo click derecho sobre ella y desactivando la visibilidad.

También puede realizarse la alineación de manera manual dentro del programa 3DS Max 2015 pero no será tan precisa y luego nos dará problemas a la hora de

realizar rotaciones de piezas ya que sus ejes no estarán bien alineados con los principales.

Una vez terminada la alineación abrimos el archivo en el programa 3DS Max 2015, al abrir el archivo nos aparece una ventana en la que nos da la opción de elegir cual es el eje vertical en el programa Inventor, en este caso tenemos que seleccionar el eje z. Desplazaremos el carro para que quede alineado con el plano central, para ello pincharemos sobre la opción “Select and Move” situada en la barra superior de herramientas. Seleccionando en la vista de perspectiva el eje z del carro desplazamos fijándonos en las vistas frontal y de perfil para alinearlo con la cota 0 del eje z que identificaremos por ser más oscura que las demás líneas de la rejilla.

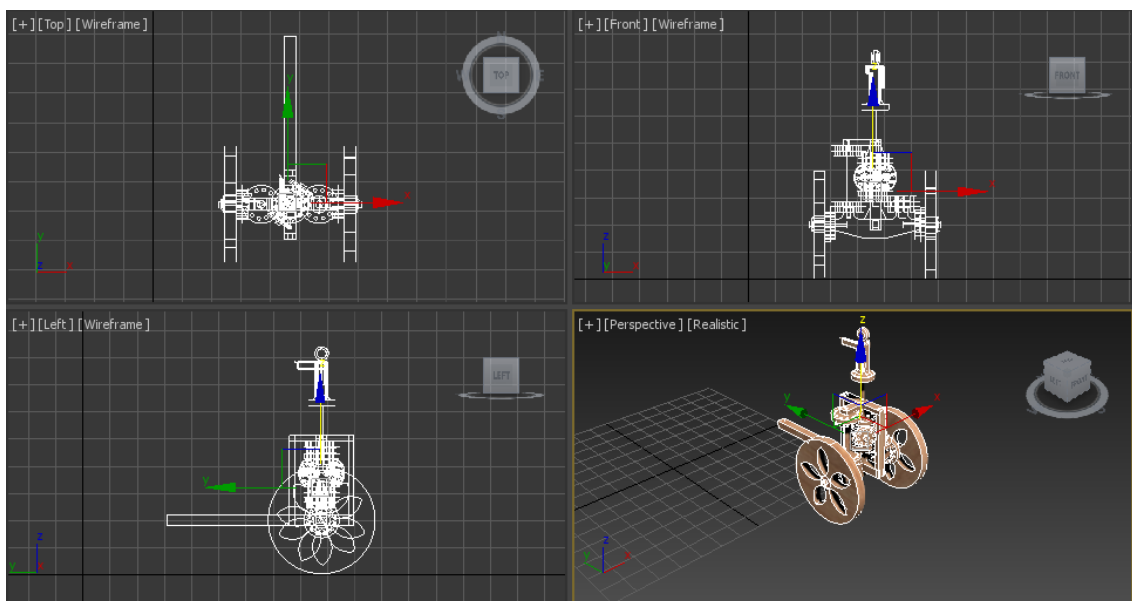


Figura 9.8 Vistas del mecanismo

Se han realizado dos animaciones, una del carro moviéndose en línea recta y girando 90° sobre si mismo y otra animación del carro describiendo una trayectoria curva. Para realizar la primera animación se ha dejado fijo el carro desplazando el terreno y se han desagrupado los componentes que integran el carro para poder animarlos por separado. También ha sido necesario agrupar los tres planos que forman el terreno para poder realizar el desplazamiento de este. Para la segunda animación también tenemos que desagrupar los elementos del carro para animarlos

por separado pero después de establecer el movimiento de cada elemento se ha vuelto a agrupar para poder realizar el giro del carro sobre una trayectoria curva.

9.2.1 Animación trayectoria recta

En la trayectoria recta el carro se desplaza una distancia tal que las ruedas den una vuelta completa, se ha calculado la longitud de la circunferencia de las ruedas y se ha desplazado el terreno dicha distancia en sentido contrario al supuesto avance del carro.

Para desagrupar los componentes del carro se selecciona este y a continuación se pincha en la barra de menú la opción “Group” desplegará un panel de opciones y se elige la opción “Assembly” y a continuación “Disassembly”. En el explorador de la escena aparece un desglose de las piezas que forman el carro.

Como las ruedas dan una vuelta completa los engranajes que forman los dos trenes de engranajes que transmiten el movimiento al diferencial darán también una vuelta completa ya que tienen el mismo número de dientes, su relación de transmisión será igual a uno y por lo tanto sus velocidades angulares iguales.

Para calcular el ángulo girado por los engranajes planetarios usamos la ecuación que genera el giro de los engranajes planetarios, ecuación (2) y (4):

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_5 \cdot r_1 + \omega_4 \cdot r_4 \quad (4)$$

Operando tenemos que:

$$\omega_4 = (\omega_1 - \omega_5) \cdot \frac{r_1}{r_4} \quad (8)$$

Siendo:

$$\frac{r_4}{r_1} = \tau_{1-4} = \text{Relación de transmisión}$$

Como en la trayectoria recta $\omega_5 = 0$ tenemos que:

$$\omega_4 = \omega_1 \cdot \tau_{1-4} \quad (9)$$

Para los engranajes satélites del diferencial sabemos que su relación de transmisión con los engranajes planetarios es igual al número de dientes del engranaje conducido entre el número de dientes del engranaje que transmite el movimiento.

$$\tau = \frac{8}{12} = 0,6667$$

Como tenemos que la relación de transmisión también es igual a la velocidad angular del engranaje transmisor del movimiento entre la velocidad angular del engranaje conducido se puede afirmar que la relación de transmisión es igual al ángulo girado del engranaje transmisor del movimiento entre el ángulo girado del engranaje conducido. Usando la ecuación (1) tenemos que:

$$\tau = \frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{\theta_1}{\theta_4} \quad (1)$$

Por lo tanto, el ángulo girado por el engranaje satélite será:

$$\theta_4 = \frac{\theta_1}{\tau} = \frac{360}{0,6667} = 540^\circ$$

Usando la ecuación (7) hallada en el análisis del mecanismo tenemos que:

$$\omega_5 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (7)$$

Como $\omega_1 = -\omega_2$ entonces $\omega_5 = 0$

Por lo tanto la figura no tendrá ninguna rotación.

9.2.2 Animación giro 90°

Como este giro se ha realizado a continuación de la trayectoria recta se ha modificado el eje del terreno antes de comenzar con la animación de manera que cuando el carro termina la trayectoria recta quede el eje entre las dos ruedas ya que el giro de 90° es sin desplazamiento, solo rotación del carro sobre sí mismo.

Para mover el eje del plano se selecciona en el panel de comandos, dentro de la tercera pestaña “Hierarchy”, la opción de afectar solo al pivote y alineamos este con el eje que une los dos engranajes satélites del diferencial ya que este se encuentra a igual distancia de ambas ruedas. Una vez alineado lo desplazaremos hacia delante una distancia correspondiente al desplazamiento hacia delante que realiza el carro en su trayectoria recta. Situado el eje en su posición avanzaremos la escena hasta el final y comenzamos a grabar las posiciones de las piezas y el terreno.

El terreno girará sobre su eje 90° . Las ruedas girarán 90° , cada una en un sentido, ya que la circunferencia que describe el carro en su giro sobre sí mismo tiene el mismo radio que la rueda, por lo tanto el ángulo girado por el carro sobre sí mismo será el ángulo girado por la rueda. Todos los engranajes que transmiten el movimiento hasta los planetarios girarán 90° también ya que tienen entre ellos una relación de transmisión de 1.

Para calcular el giro del eje central del diferencial y de la figura usaremos la ecuación (7):

$$\omega_5 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (7)$$

Como $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ entonces $\omega_5 = \omega$

Por lo que la figura se moverá con la misma velocidad angular que las ruedas, el ángulo girado de las ruedas será el mismo que el girado por la figura y será 90° .

El giro de los engranajes satélites lo calcularemos por medio de la ecuación (8):

$$\omega_4 = (\omega_1 - \omega_5) \cdot \frac{r_1}{r_4} \quad (8)$$

Como $(\omega_1 - \omega_5) = 0$ entonces $\omega_4 = 0$

Los engranajes satélites no girarán sobre sí mismos pero si lo harán entorno al eje del diferencial. Este giro se realiza ensamblando los engranajes satélites con el eje, de esta forma el eje de giro estará situado en el eje del diferencial. Su giro es de 90° en el mismo sentido que el giro del terreno.

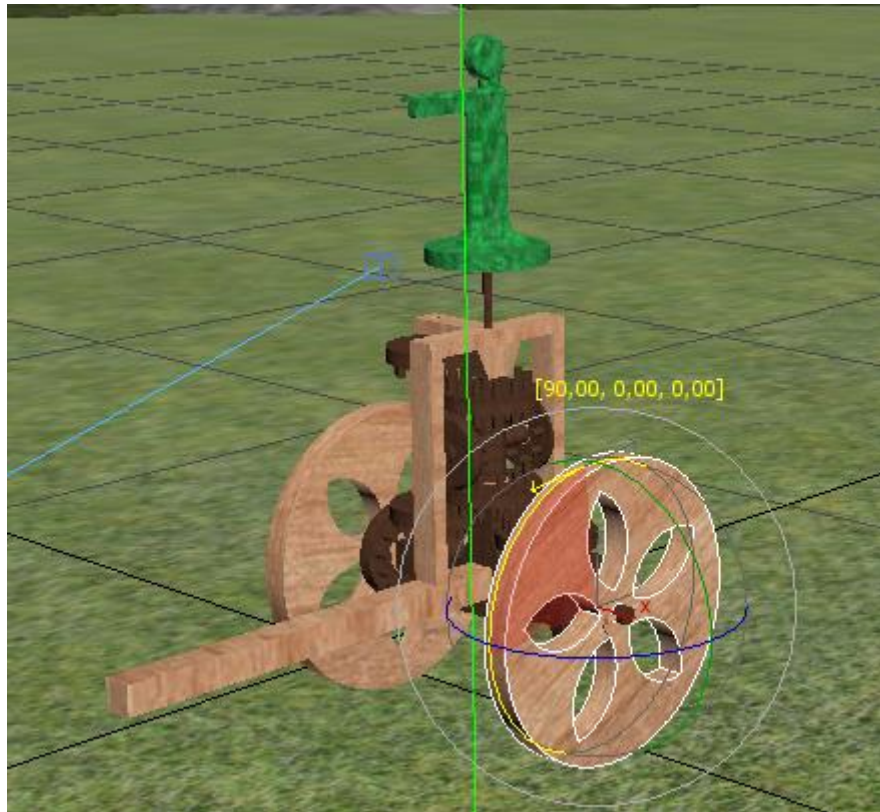


Figura 9.9 Rotación rueda

9.2.3 Animación giro 360°

Para realizar la última parte de la animación se ha creado un archivo nuevo debido a que necesitamos cambiar el eje del terreno y si se realiza en el mismo archivo no realiza correctamente las animaciones previas al cambio de eje.

Para esta animación ha realizado una rotación del carro sobre un punto del terreno forma que podamos ver también el funcionamiento del mecanismo cuando ambas ruedas giran en el mismo sentido pero a velocidades angulares diferentes.

Para calcular el ángulo de giro de las ruedas se calcula primero la longitud de la circunferencia recorrida por cada rueda.

$$L_{Rueda\ interior} = 2\pi R_i$$

$$L_{Rueda\ exterior} = 2\pi R_e$$

Calculamos la longitud que recorre cada rueda al dar una vuelta completa (L_R).

$$L_R = 2\pi R$$

Por lo tanto el número de vueltas girado por cada rueda será:

$$n_i = \frac{L_{Rueda\ interior}}{L_R}$$

$$n_e = \frac{L_{Rueda\ exterior}}{L_R}$$

Se calcula el ángulo de giro

$$\theta_i = n_i \cdot 360^\circ = \theta_2$$

$$\theta_e = n_e \cdot 360^\circ = \theta_1$$

Se aplica el giro a cada rueda y a su tren de engranajes correspondiente hasta llegar a los engranajes satélites.

Calculamos ahora el giro de la figura y del eje central del diferencial por medio de la ecuación (6):

$$\omega_5 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

$$\theta_5 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

Una vez calculado el ángulo girado del eje podremos calcular el ángulo girado por los engranajes planetarios por medio de la ecuación (4):

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_5 \cdot r_1 + \omega_4 \cdot r_4 \quad (4)$$

Operando:

$$(\omega_1 - \omega_5) \cdot r_1 = \omega_4 \cdot r_4$$

$$\omega_4 = \frac{(\omega_1 - \omega_5)}{\tau_{1-4}}$$

$$\theta_4 = \frac{(\theta_1 - \theta_5)}{\tau_{1-4}}$$

En este caso también giran entorno al eje central por lo que agrupamos el eje con los engranajes para tener el eje de giro en el eje central.

Con esto se finaliza el movimiento de las piezas del carro y realizamos la rotación del carro completo desplazando el eje de giro del carro una distancia igual al radio de giro de la rueda interior mas la distancia desde la rueda interior hasta el eje central que es donde se encuentra situado el eje de giro. Una vez desplazado el eje giramos realizamos la rotación de 360° para finalizar la animación.

10. Conclusiones

No podemos afirmar que las leyendas sobre el origen del carro que apunta al Sur sean ciertas ya que no se han encontrado textos en los que se pueda afirmar con rotundidad que se trate de este mecanismo. En el caso de que fuera así estaríamos hablando del primer mecanismo de engranajes del que tenemos constancia, anterior al mecanismo de Anticitera, también sería el primer mecanismo que usó el diferencial mecánico.

Aunque la historia retrase su origen entorno a unos 200 años después de Cristo no hay que quitarle importancia a su invención ya que es el segundo mecanismo del que se tiene constancia que usó engranajes y el diferencial mecánico, posteriormente el diferencial mecánico no fue reinventado hasta 1827.

11. Bibliografía

- Breve y parcial historia de los engranjes – Manuel G. Rodríguez R., Moisés Hinojosa R., Ubaldo Ortiz M. - Artículo de la revista Ingenierías de la facultad de ingeniería Mecánica y eléctrica de Nuevo León. Disponible [Internet]:
<http://ingenierias.uanl.mx/16/pdf/16ManuelRodriguez.pdf>
- <http://www.cabovolo.com/2008/05/el-carro-que-apunta-hacia-el-sur-el.html>
- Universidad Antonio de Nebrija :

http://www.nebrija.es/~alopezro/Engranajes_1.pdf

- Biografía de George Lanchester: Grace's Guide , página dedicada a la historia de la industria británica.

[http://www.gracesguide.co.uk/George Herbert Lanchester](http://www.gracesguide.co.uk/George_Herbert_Lanchester)

- <http://www.nri.org.uk/joseph.html> - Instituto de Investigación Needham
- Universidad de Castilla-La Mancha, Engranajes y análisis del diferencial mecánico. Disponible [internet]:

<https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema08.pdf>

- Relación de transmisión engranajes:

<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/17/mecanismos-de-engranajes-ii-relacion-de-transmision-estudio-cinematico-de-un-tren-de-engranajes/>

- Anexo I - "The Yellow Emperor's south-pointing chariot" George Lanchester
- Anexo II – "Science and Civilisation in China" Joseph Needham