

PROYECTO FIN DE CARRERA:

**Diseño y análisis
del automóvil automático de
Leonardo da Vinci**

Eduardo Sanz Regaño

Tutor del proyecto: M. Herráez Sánchez

Universidad de Valladolid

Escuelas de Ingenierías Industriales

Dpto. Ciencias de los materiales e ingeniería metalúrgica, expresión gráfica en la ingeniería, ingeniería cartográfica, geodesia y fotogrametría, ingeniería mecánica e ingeniería de los procesos de fabricación.

June 2012

Diplomarbeit DIPL-186

**Diseño y análisis
del automóvil automático de
Leonardo da Vinci**

Von

Eduardo Sanz Regaño

Betreuer: Prof. Dr.- Ing. Prof. E.h. P. Eberhard

Universität Stuttgart

Institut für Technische und Numerische Mechanik

Prof. Dr.- Ing. Prof. E.h. P. Eberhard

June 2012

Capítulo 1

Introducción

El proyecto consiste en el modelado, simulación y análisis cinemático del mecanismo de el primer automóvil diseñado por Leonardo da Vinci. El diseño del mecanismo se realizó basándose en la documentación obtenida en [1] [2], figura 1.1.



Figura 1.1: Automóvil Leonardo da Vinci [2].

El primer paso fue comprender el funcionamiento del mecanismo a analizar, y el dimensionado del mismo. Se realizó el diseño de las diferentes partes, el ensamblaje del mecanismo. Y finalmente se hizo el análisis cinemático del mismo.

El mecanismo completo lo podemos separar en dos aislados propulsados por un mismo motor, estos serían un mecanismo de transmisión y un mecanismo de dirección. El movimiento del automóvil es un movimiento autónomo propulsado por un único motor.

Capítulo 2

Mecanismo

En este capítulo se describe el automóvil, cada uno de sus mecanismos por separado y en conjunto para su posterior diseño y análisis.

2.1 Mecanismo de propulsión

Este mecanismo consiste en dos motores dinámica y cinemáticamente equivalentes, cada motor esta en una de las ruedas, figura 2.1. En este proyecto solo analizaremos uno de los motores, el otro será simétrico.

Para transmitir el movimiento entre el motor y la rueda tendremos un grupo de engranajes con una relación de transmisión uno a uno. Este tren de engranajes consiste en dos engranajes planos con una relación de transmisión uno a cuatro, y dos engranajes cónicos con la relación de transmisión cuatro a uno. En total tendremos la relación uno a uno definida.

2.2 Mecanismo de dirección

Este mecanismo recibe el movimiento de uno de los motores, figura 2.2. Este movimiento es transmitido a la rueda de dirección por un disco de levas y un seguidor, el disco de levas se encuentra en el eje del motor mientras que el seguidor transmite el movimiento al eje de la rueda de dirección. Este movimiento es de vaivén, mediante un trinquete transformamos ese movimiento en una rotación discontinua. Con el trinquete la rueda de dirección rota progresivamente.

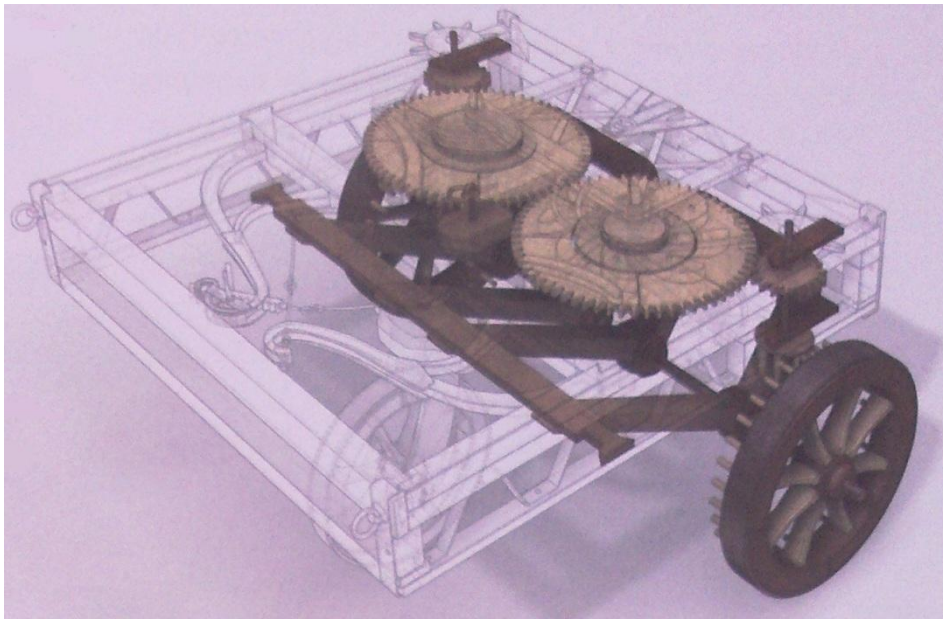


Figura 2.1: Mecanismo de propulsión [1].

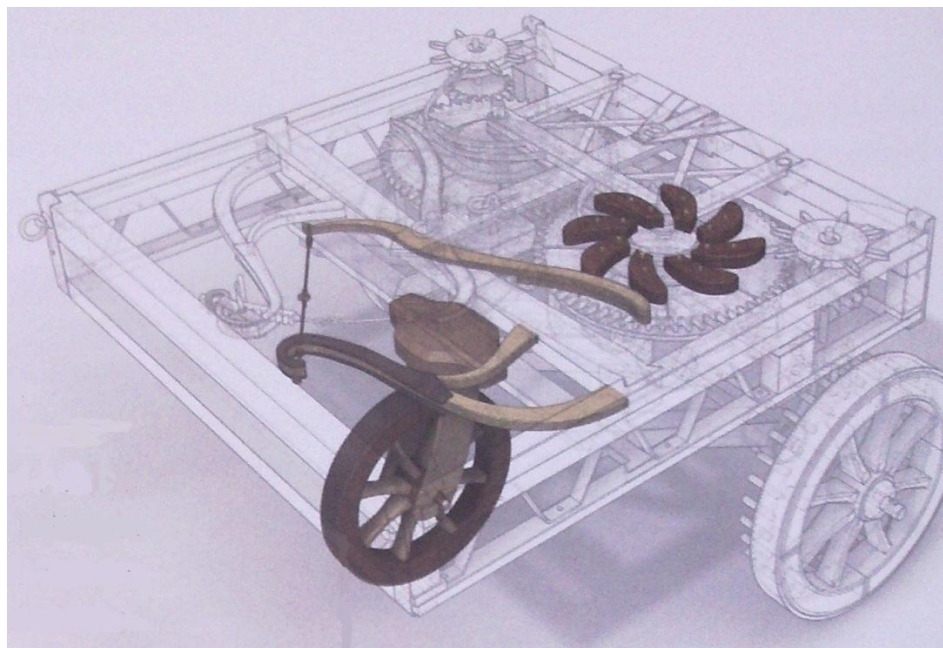


Figura 2.2: Mecanismo de dirección [2].

2.3 Conjunto

Cuando los dos mecanismos trabajan simultáneamente el movimiento descrito es una espiral. La trayectoria puede ser cambiada si el disco le levas tiene diferente numero de levas.

Capítulo 3

Modelado del mecanismo

3.1 Introducción

Para el diseño y modelado del mecanismo utilizaremos el software CATIA, este es un software de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador CAD, permite la elaboración de formas y piezas complejas en tres dimensiones. Este programa está orientado a la producción siendo un programa de tipo CAM, que permite la creación y el diseño de objetos. CATIA entra dentro de las aplicaciones CAE ya que está preparado para el análisis de productos. En este proyecto se usa 4 módulos diferentes: *Part design*, *Assembly Design*, *Generative shape design* y por ultimo *DMU Kinematics*.

En este capítulo se va a describir el modelado y diseño de las diferentes partes del mecanismo, así como el montaje del mismo.

La escala utilizada ha sido la considerada mas adecuada para nuestro modelo, y la medidas estimadas se han tomado teniendo en cuenta el mejor funcionamiento del mecanismo, ya que los documentos consultados de Leonardo da Vinci no consideran medidas, fue un modelo que nunca llegó a construir.

3.2 Modelado del mecanismo

3.2.1 Parte fija, chasis.

Esta es la parte que podríamos considerar como base, será la parte fija del mecanismo sobre la que van referenciadas y apoyadas el resto de partes de nuestro mecanismo.

Para el diseño de esta parte solamente se utiliza el módulo *part design*, en el cual podemos crear piezas de forma precisa y sencilla. Este módulo permite adaptarse a los requisitos de diseño por medio de dibujo en un plano definido.

La primera parte diseñada fue en la que se encuentra el primer par de engranajes, los engranajes planos. La distancia entre ejes queda definida por la geometría de estos, figura 3.1.

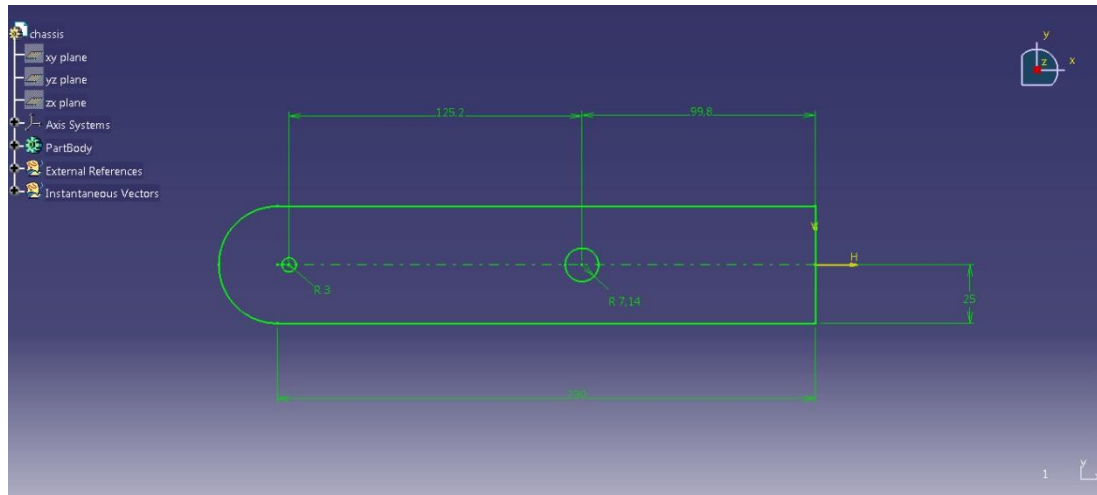


Figura 3.1: Posición de los ejes de los engranajes planos.

El siguiente paso fue la creación de la parte en la que se encuentran los engranajes cónicos. El engranaje pequeño irá ensamblado al eje del engranaje plano pequeño, y ensamblado al eje del grande irá la rueda motriz, figura 3.2.

Por ultimo se sitúa el eje del seguidor y rueda directriz, figura 3.3.

3.2.2 Engranajes planos

Los engranajes planos forman el primer eslabón del tren de engranajes, el engranaje grande es el engranaje conductor, y el pequeño el conducido.

Ambos engranajes serán diseñados de igual manera, con ayuda tanto del modulo *Generative shape design* y del *part design*. El módulo *Generative shape design* permite modelar superficies en tres dimensiones, en estos engranajes solo lo utilizaremos para definir la geometría del diente no siendo suficiente la capacidad del módulo *part design*, una vez tengamos esta curva se terminará el diseño del diente en el módulo *part design*.

Para hacer el diseño de los engranajes se necesita conocer ciertos parámetros comunes a ambos que garantice en correcto funcionamiento de engrane.

Los engranajes deben cumplir que la relación de transmisión sea constante en todo momento, ecuación 3.1.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.1)$$

Esta relación la cumple la curva evolvente de la circunferencia primitiva.

Para normalizar la geometría de los engranajes, tenemos un parámetro denominado módulo o paso diametral, el cual tomaremos como la ecuación 3.2.

$$m = \frac{2r}{Z} \quad (3.2)$$

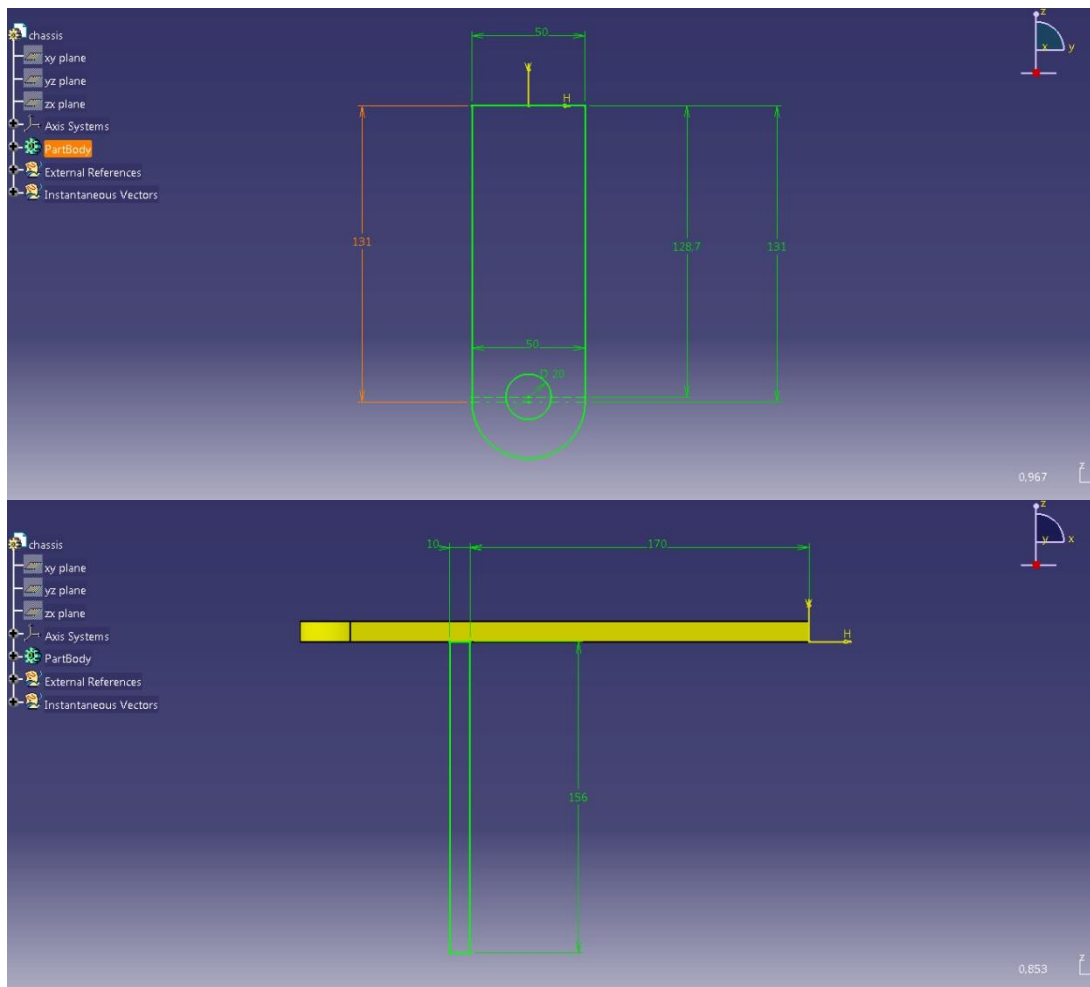


Figura 3.2: Posición del eje del engranaje cónico grande.

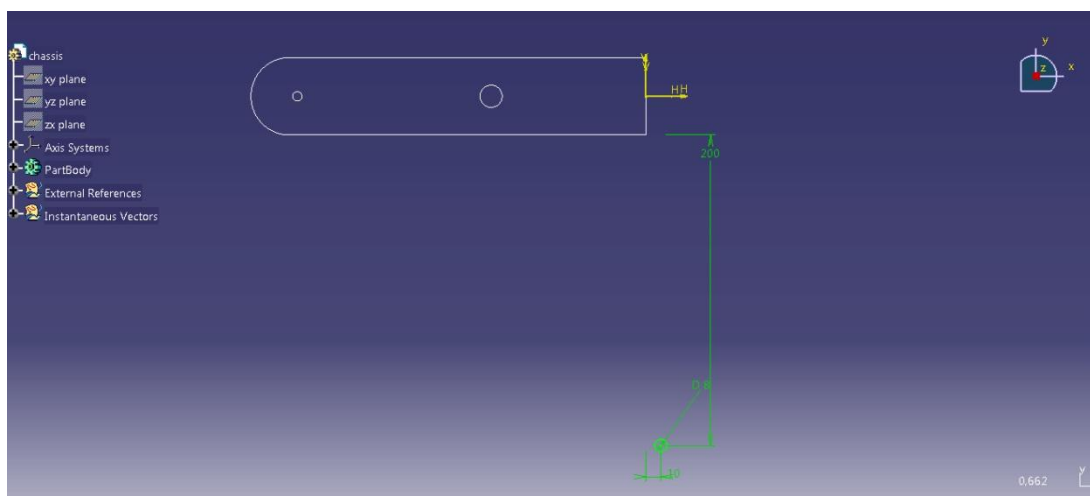


Figura 3.3: Posición del eje de la rueda directriz.

Como vemos en la ecuación 3.2 el radio depende de del modulo elegido y del número de dientes. La distancia entre ejes será entonces, ecuación 3.3 y ecuación 3.4

$$a = r_1 + r_2 \quad (3.3)$$

$$a = \frac{m}{2} (Z_1 + Z_2) \quad (3.4)$$

Si separo los ejes, como ocurre en esta tesis, la relación de transmisión seguirá siendo la misma y constante, la diferencia es que ahora los engranajes no coincidirán en la circunferencia primitiva.

Para el diseño del engranaje debemos definir ciertos parámetros, tabla 3.1:

Tabla 3.1: Parámetros para definir los engranajes planos

Parámetro	Nombre	Valor
Z	Número de dientes	--
a	Ángulo de presión	20°
m	Módulo	2
r_p	Radio del círculo primitivo	$r_p = m Z/2$
r_a	Radio del círculo exterior	$r_a = r_p + h_a$
r_b	Radio del círculo base	$r_b = r_p \cos a$
r_f	Radio del círculo raíz	$r_f = r_p + h_f$
r_c	Radio de unión	$r_c = m \mathbf{0.38}$
c	Ángulo del punto de intersección entre la involuta y el círculo primitivo	$c = \sqrt{1/\cos^2 a - 1}/\pi$
ϕ	Ángulo de rotación usado para la generación de los dientes	$\phi = -\tan y/z + 90^\circ/z$

El primer paso será dibujar la curva evolvente, para eso introducimos las ecuaciones de dicha curva, ecuaciones 3.5 y 3.6

$$y = r_b(\sin(t\pi) - t\pi \cos(t\pi)) \quad (3.5)$$

$$z = r_b(\cos(t\pi) + t\pi \sin(t\pi)) \quad (3.6)$$

Giramos esta geometría un ángulo ϕ , para poder hacer mas tarde la geometría del diente utilizando una simetría, figura 3.4. A continuación, insertamos una esquina redondeada entre el círculo base y la involuta de radio r_c . Una vez tengamos esto definido, lo último que nos queda será por medio de simetrías completar la geometría del diente, figura 3.5.

El perfil del engranaje es la repetición circular de los dientes. Una vez esta la curva que define la superficie del engranaje, cambiamos al módulo *part design* para terminar extruyendo la superficie definida.

Como tenemos el engranaje definido por parámetros podemos modificar cada uno de éstos, número de dientes, módulo, etc., teniendo así ambos engranajes definidos.

En este eslabón del tren de engranajes buscamos una relación de transmisión de uno a cuatro, por lo que según la ecuación 3.1 podemos definir el número de dientes de engranaje grande como 100, figura 3.7 y el del pequeño como 25, figura 3.6. Sabiendo entonces la distancia entre ejes ecuación 3.4 que debemos definir en el chasis del mecanismo.

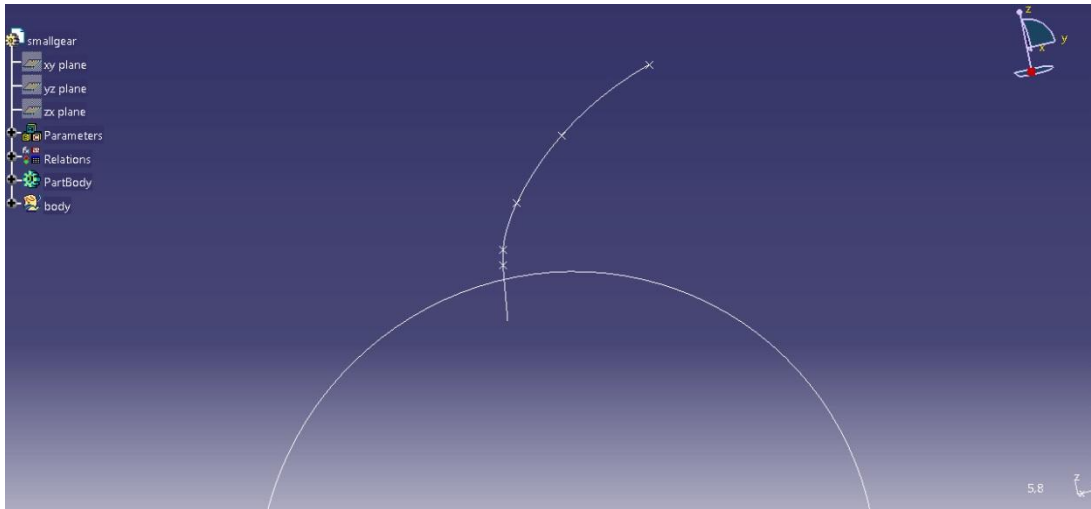


Figura 3.4: curva evolvente.

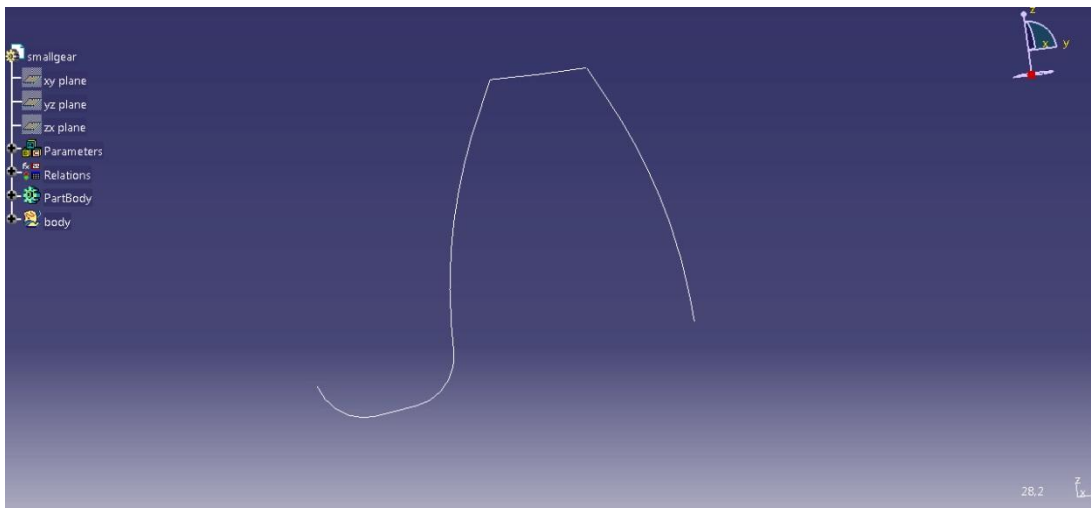


Figura 3.5: Perfil del diente .

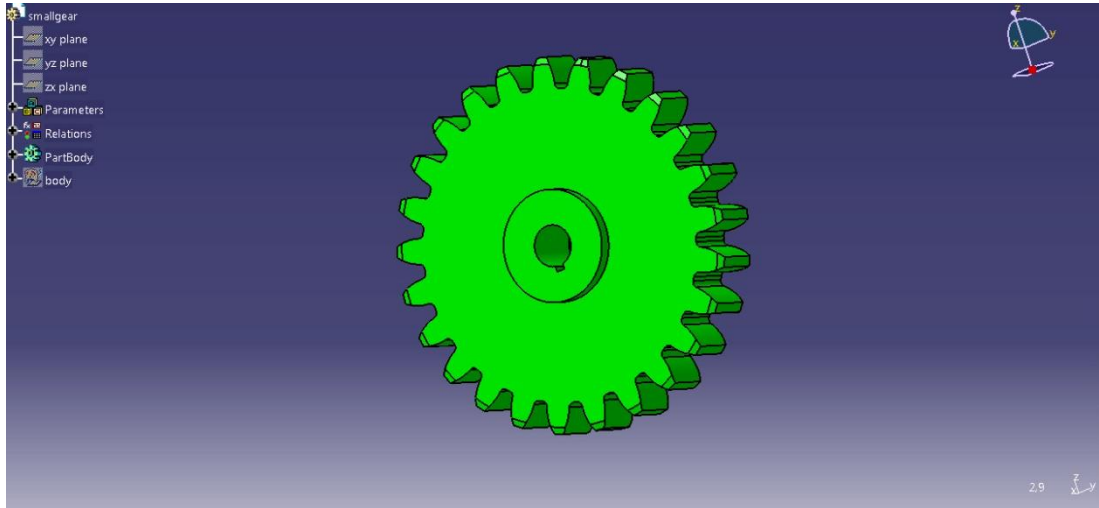


Figura 3.6: Engranaje plano con 25 dientes.

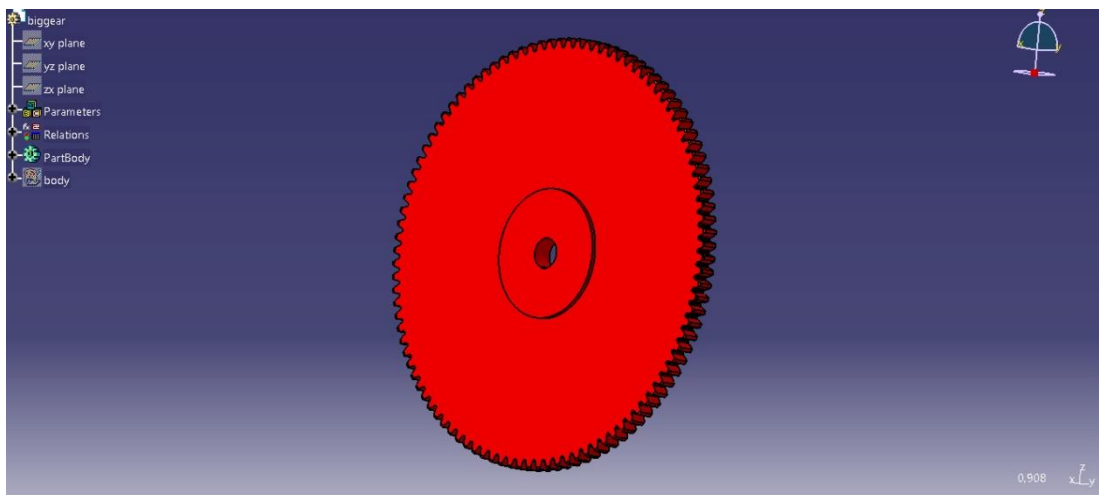


Figura 3.7: Engranaje plano con 100 dientes.

3.2.3 Engranajes cónicos

Estos engranajes definen el segundo eslabón del tren de engranajes. El engranaje pequeño estará unido al mismo eje que el pequeño plano, a su vez será el conductor. El engranaje grande será el engranaje conducido y será en encargado del movimiento de la rueda motriz, estando unido a su eje.

Estos engranajes será definidos de igual manera que los anteriores, se usaran los mismos módulos, con la diferencia que en el módulo de *Generative shape design* si se definirá una superficie, para luego completar la creación en el módulo *part design*.

En este tipo de engranajes se cumple todas las relaciones descritas en los anteriores, teniendo en cuenta que, en este caso, el ángulo entre los ejes va a ser de 90°.

Igual que en los anteriores se debe definir ciertos parámetros, tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros para definir los engranajes cónicos

Parámetro	Nombre	Valor
Z_1	Número de dientes	--
Z_2	Número de dientes complementarios	--
α	Ángulo de presión	20°
m	Módulo	2
δ	Mitad del ángulo del cono primitivo	$\delta = \tan^{-1}(Z_1/Z_2)$
l_p	Distancia de los dientes al cono primitivo	10 mm
P	Paso de los dientes	$P = m \pi$
r_p	Radio del círculo primitivo	$r_p = m Z/2$
r_a	Radio del círculo exterior	$r_a = r_p + h_a$
r_b	Radio del círculo base	$r_b = r_p \cos \alpha$
r_f	Radio del círculo raíz	$r_f = r_p + h_f$
h_a	Addendum	$h_a = m$
h_f	Deddendum	$h_f = m 1.25$

El primer paso será dibujar uno de los dientes, ahora no estamos trabajando en un plano, si no en la superficie exterior de un cono, para poder trabajar aquí debemos definirlo previamente, figura 3.8. El resto de la ejecución será similar a la utilizada en el engranaje plano.

Una vez tenemos la superficie del diente definida, definimos la superficie de engrane, figura 3.9.

Definimos las superficies cónicas interior y exterior. A continuación en el módulo *part design* se termina la el montaje del engranaje, figura 3.10.

Igual que en el caso anterior, se han definido los engranajes en función de unos parámetros pudiendo modificar éstos, pudiendo así definir la pareja de engranajes necesaria para el mecanismo.

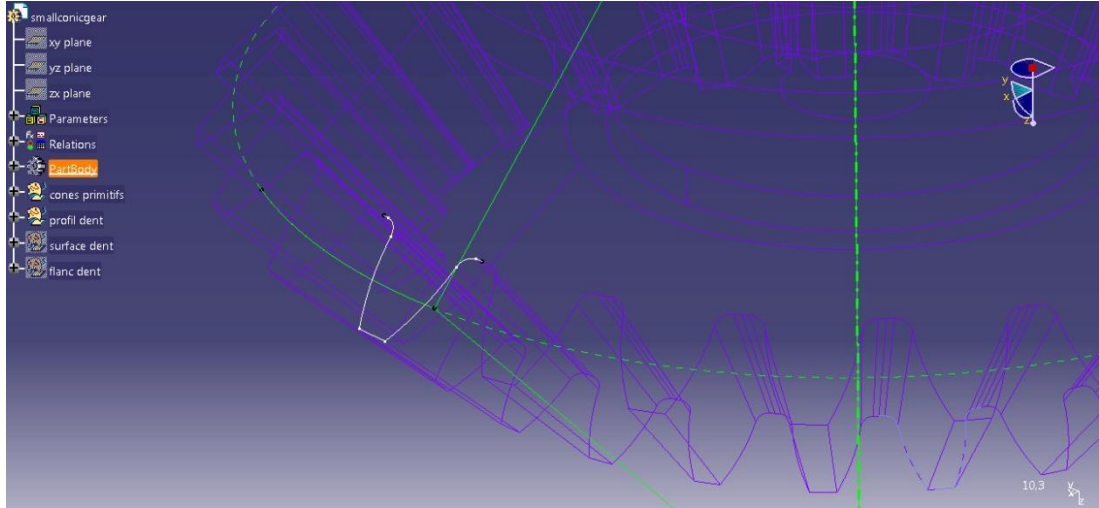


Figura 3.8: Geometría del diente de un engranaje cónico.

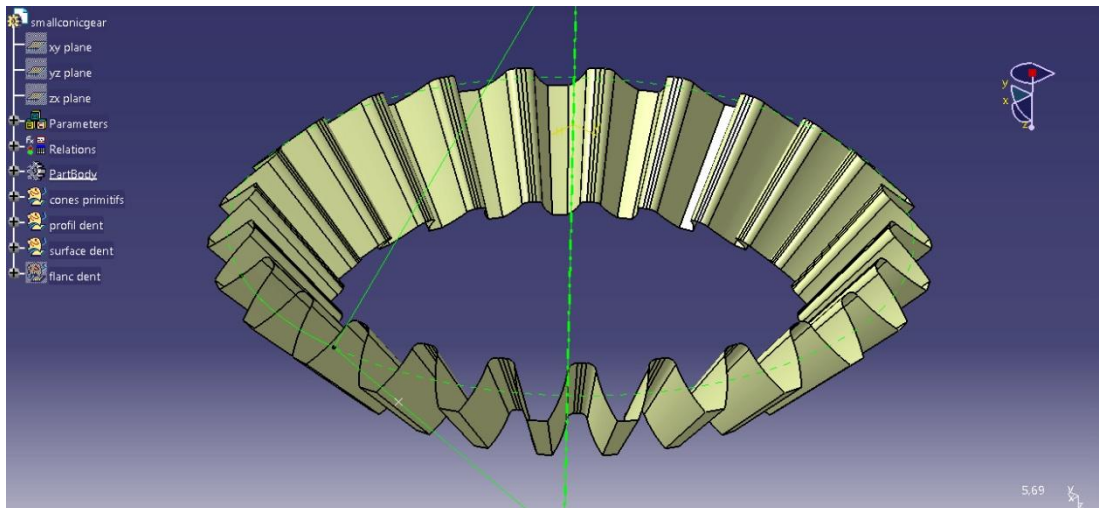


Figura 3.9: Superficie de engrane

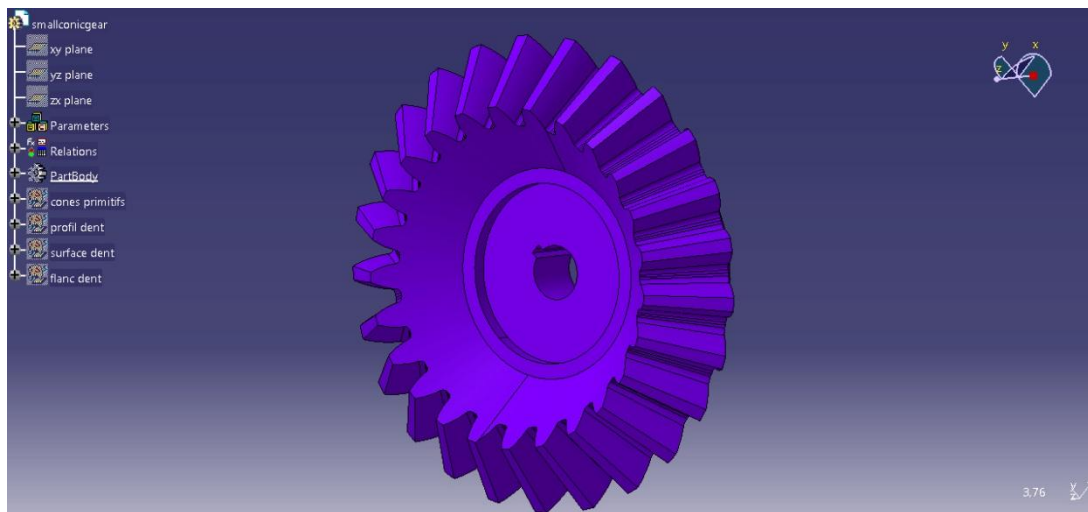


Figura 3.10: Engranaje cónico

3.2.4 Disco de levas

Este disco es en el encargado de transformar el movimiento de rotación en un movimiento de vaivén en el eje de la rueda directriz a través del seguidor. Este disco se ha diseñado de forma que se pueda asemejar al modelo propuesto por Leonardo da Vinci, pudiendo modificar el numero de levas del mismo.

Para el diseño de esta pieza se ha utilizado el módulo *part design* y el modulo *Generative shape Design*. La mayoría de el diseño se ha hecho en el módulo *part design* salvo la curva de contacto entre el disco de levas y el seguidor, figura 3.11, para así poder diseñarlo de tal forma que podamos modificar el numero de levas cambiando únicamente el número del parámetro que lo define, figura 3.12.

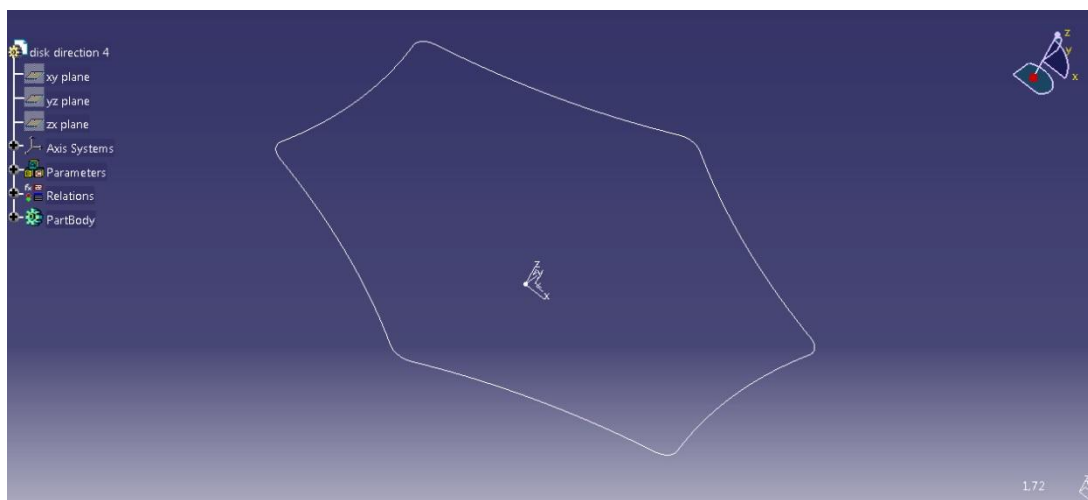


Figura 3.11: Curva de contacto

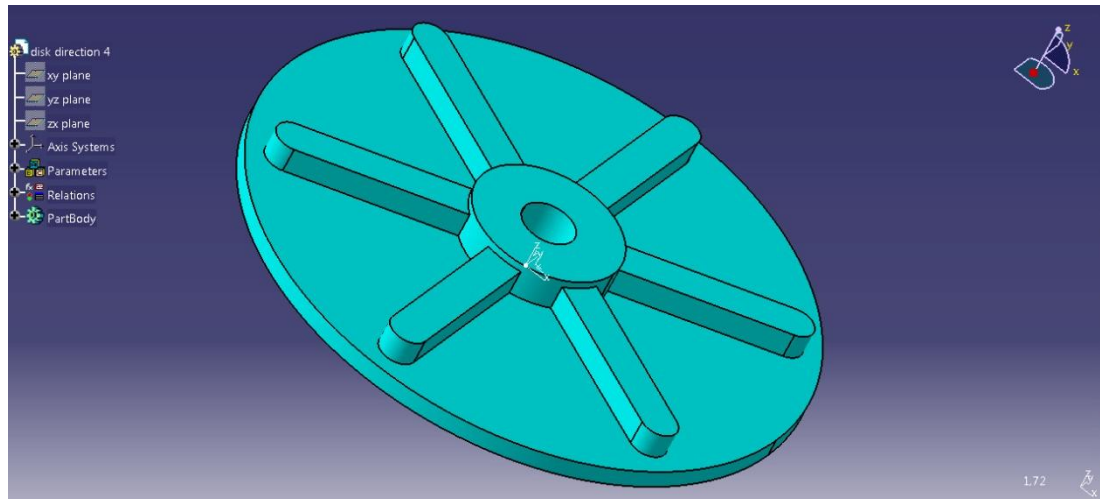


Figura 3.12: Disco de levas con 6 levas.

3.2.5 Seguidor

El seguidor es el encargado de transmitir el movimiento de vaivén al eje de la rueda directriz, es una pieza sencilla sin una geometría particular. Se ha tratado de diseñar de la forma mas sencilla posible, usando el módulo *Part design*.

3.2.6 Trinquete

El trinquete es un mecanismo, está formado principalmente por dos piezas, una rueda dentada y una uñeta. Se encarga de transformar el movimiento de vaivén en un movimiento de rotación discontinuo, es decir permite el giro en un sentido impidiéndolo en el contrario, este movimiento es el que va a provocar la variación de la trayectoria del automóvil.

La rueda dentada se ha diseñado de tal forma que el ángulo mínimo sea lo más pequeño posible, figura 3.13. La uñeta tendrá la misma geometría que el diente de la rueda, figura 3.14. Ambos usando únicamente el módulo *Part design*.

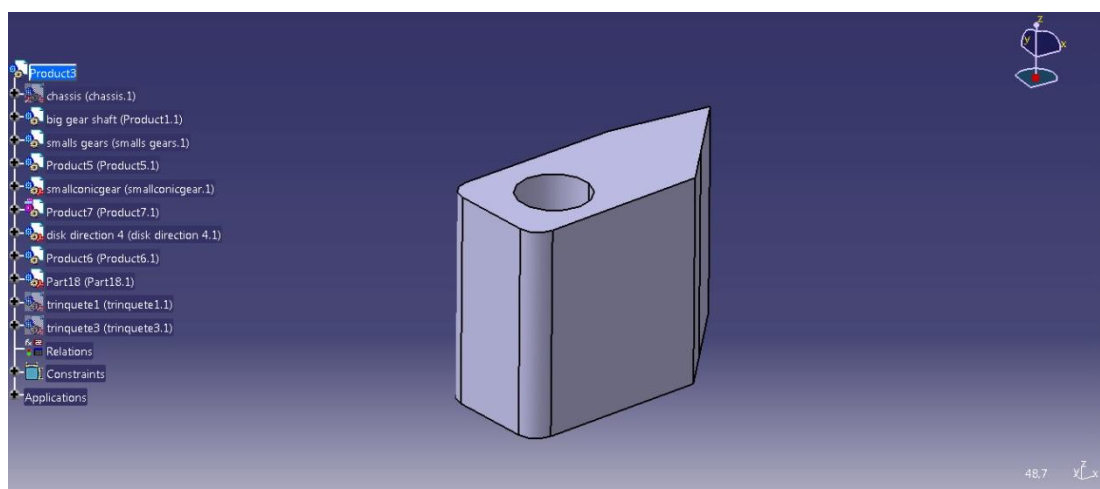


Figure 3.13: Uñeta

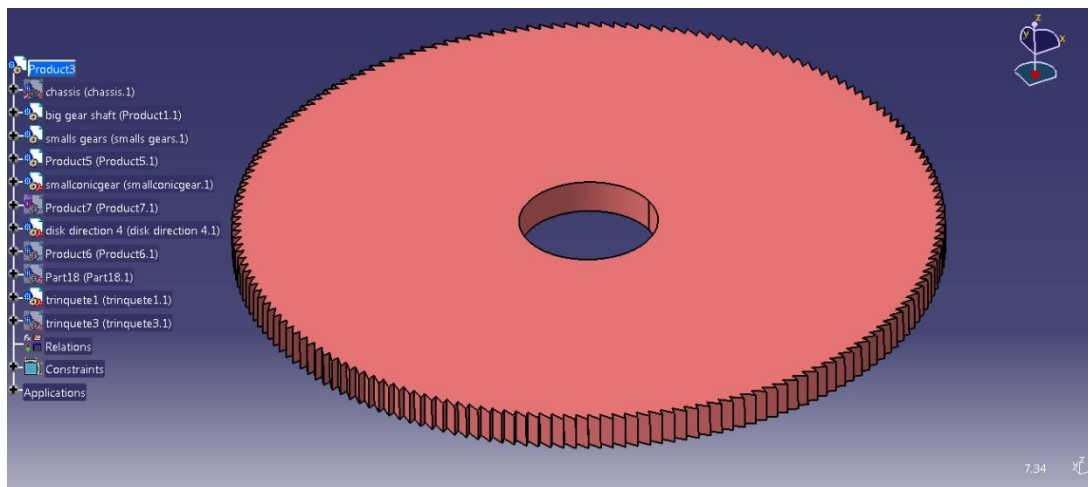


Figura 3.14: Rueda dentada

3.2.7 Ejes

Los ejes se han diseñado usando únicamente utilizando el módulo *Part Design*. Las dimensiones de los mismos son las requeridas por el mecanismo en conjunto.

3.3 Ensamblaje

Este es el ultimo paso antes del análisis cinemático del mecanismo, para la realización de esta parte se ha usado el modulo *Assembly Design*. El proceso que sigue en este módulo es elaborar ensamblajes incluyendo piezas o subconjuntos. Sobre estos componentes se establecen restricciones, de manera que en movimiento de estos componentes y del ensamblaje en sí, siga unas reglas determinadas según el mecanismo.

La primera pieza que se incluye a este ensamblaje será la pieza que se va a tomar como referencia, lo que se ha llamado chasis, se tomará como parte fija del mecanismo.

Una vez tengamos esta pieza fija, incluimos los engranajes planos como subconjuntos, es decir, incluimos los engranajes junto con su eje. Posicionamos estos ejes con las restricciones oportunas, figura 3.15.

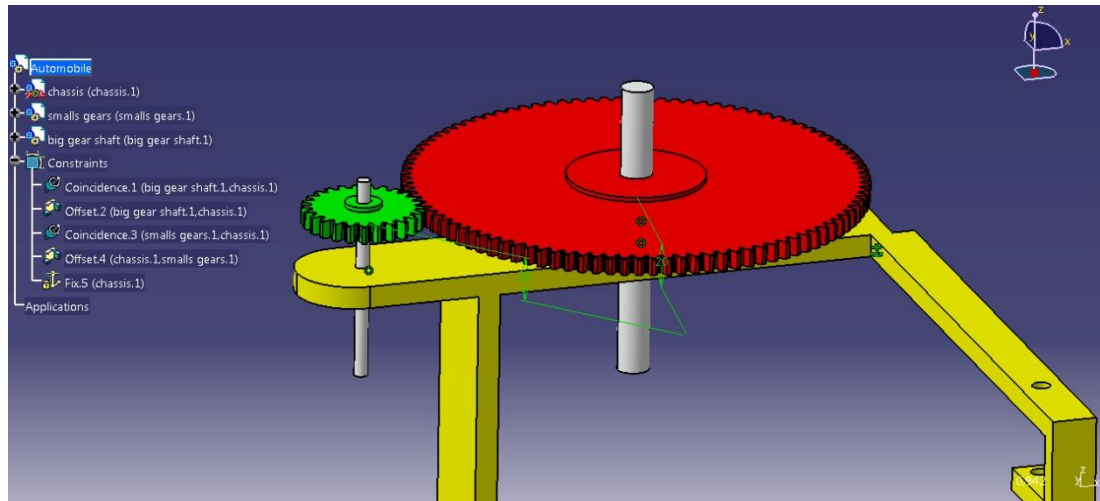


Figura 3.15: Ensamblaje de los engranajes planos

El siguiente paso sería incluir los engranajes cónicos. Del mismo modo que los anteriores restringiendo los movimientos oportunos para el correcto funcionamiento, figura 3.16.

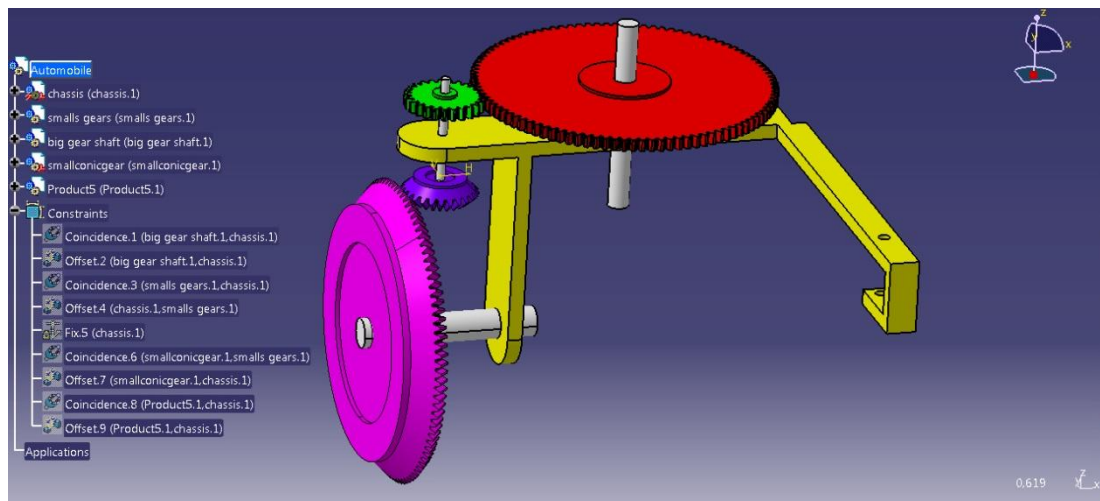


Figura 3.16: Ensamblaje de los engranajes cónicos

Vemos que todas las piezas y subconjuntos las estamos referenciando a la misma pieza, a la pieza fija, el chasis, esto es importante para poder diseñar correctamente el movimiento del mecanismo.

El siguiente paso es incluir en el mecanismo el disco de levas y el seguidor.

Para terminar con la construcción del mecanismo incluimos al mecanismo el trinquete asociado al eje de la rueda directriz, figura 3.18 y 3.19.

Obteniendo así el ensamblaje del mecanismo completo, pudiendo ahora simular algunos de los movimientos del automóvil.

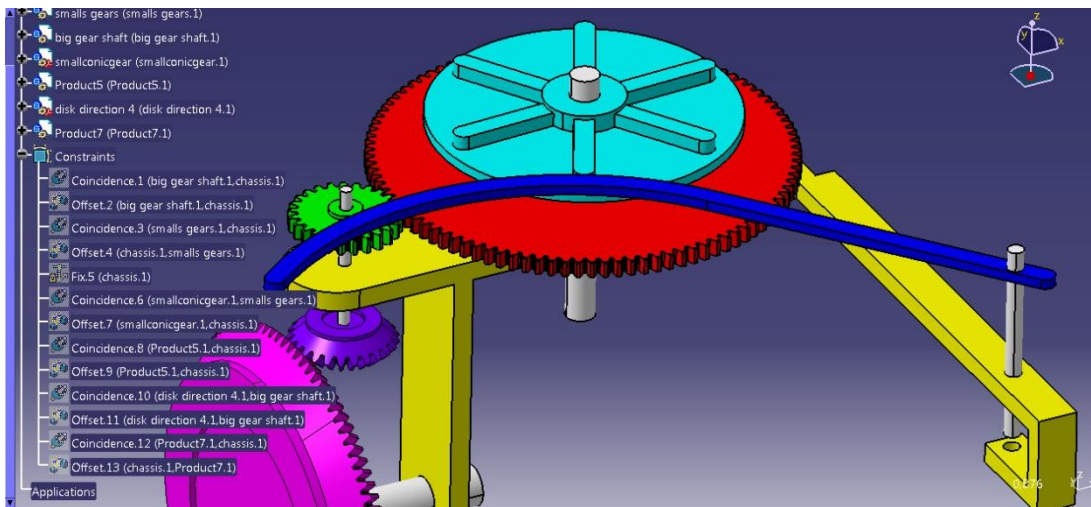


Figura 3.17: Ensamblaje de leva y seguidor

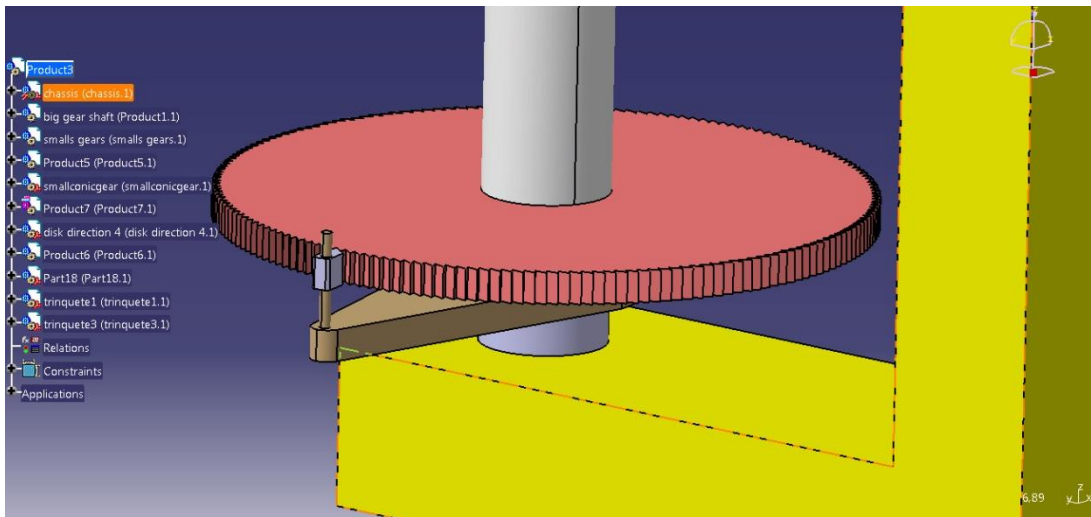


Figura 3.18: Ensamblaje trinquete

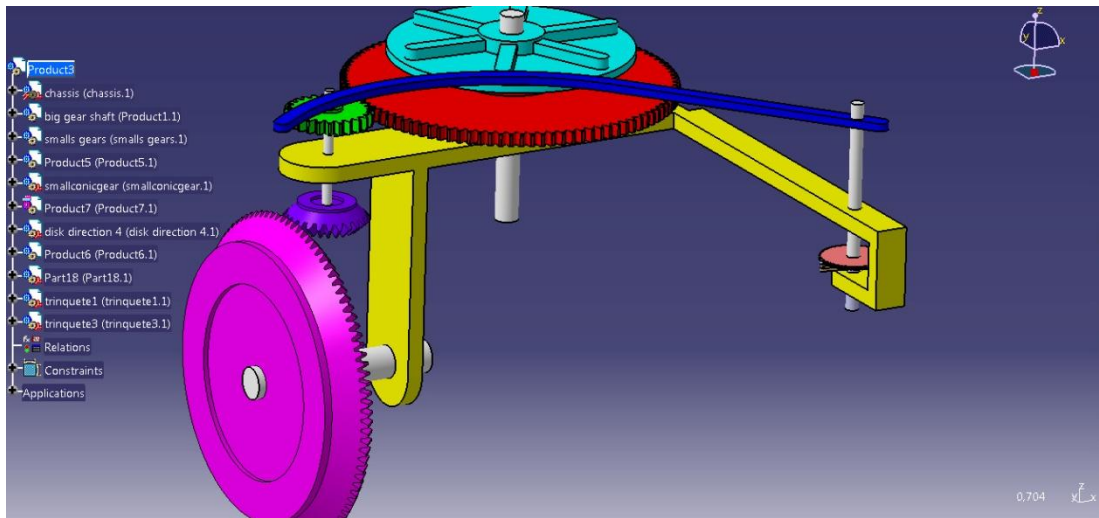


Figura 3.19: Ensamblaje completo

Capítulo 4

Análisis cinemático

4.1 Introducción

Una vez que tenemos el mecanismo ensamblado, en este capítulo se hará el análisis cinemático. Para hacer este análisis se usará el *DMU kinematics*, éste es un producto independiente CAD dedicado a la simulación de ensamblajes. Pudiéndose obtener datos experimentales del mismo.

El primer paso es definir las diferentes articulaciones, y relaciones entre las diferentes partes del mecanismo. Se va a separar el conjunto de mecanismos en tres diferentes mecanismos para así facilitar el la simulación de el conjunto.

4.2 Transmisión

El primer mecanismo es el tren de engranajes, este tren se encarga de transmitir la fuerza del motor a las ruedas motrices, como se ha dicho en capítulos anteriores la relación de transmisión total en el tren de engranajes es 1 a 1. Luego, si al ángulo de entrada, ángulo del motor, lo llamamos φ_1 y al de salida lo llamamos φ_2 , la ecuación resultante será ecuación 4.1 y el módulo de la velocidad lineal obtenida, siendo el radio de la rueda R_w , será ecuación 4.2. La dirección de esta velocidad quedará definida por la posición de la rueda directriz.

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (4.1)$$

$$v = \omega_2 r \quad (4.2)$$

4.3 Dirección

La dirección será separada a su vez en dos diferentes mecanismo, el primero será el compuesto por el disco de levas y el seguidor, y el segundo el formado por el trinquete.

Si llamamos φ_3 al ángulo de salida del seguidor, la variación de este será una serie continua de parábolas, figura 4.1, siendo de más amplitud y mayor periodo si aumentamos el número de levas en el disco, figura 4.2.

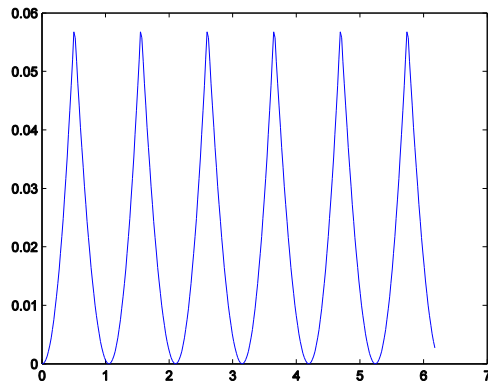


Figura 4.1: Secuencia con 6 levas.

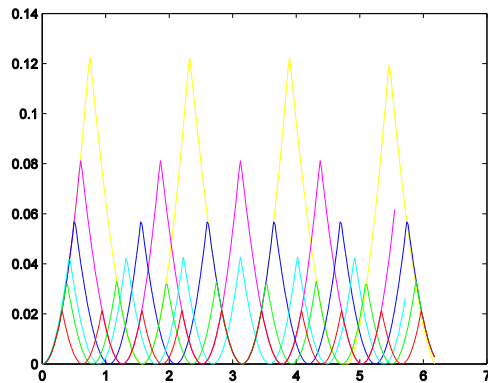


Figura 4.2: Secuencia con 4 a 10 levas.

De esta evolución el trinquete solo tomará la parte de la curva con pendiente positiva. Siendo este ángulo constante cuando la curva anterior tiene pendiente negativa, figura 4.3.

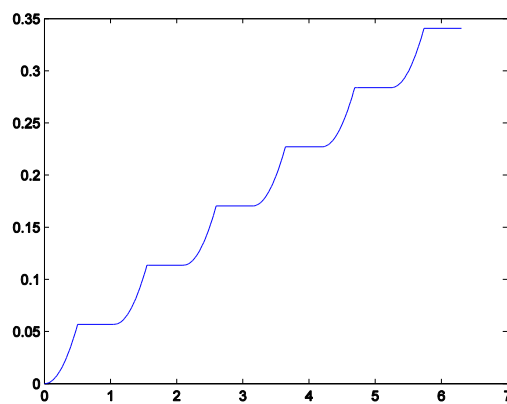


Figura 4.3: Evolución de trinquete con 6 levas

4.3 Trayectoria

Para calcular la trayectoria que sigue el automóvil debemos tener en cuenta varias cosas. El automóvil consta de tres ruedas, dos ruedas delanteras y una trasera. Debemos saber que con este tipo de configuración no se pueden realizar giros de 90°. El punto instantáneo de rotación siempre se encuentra a lo largo del eje que cruza las dos ruedas delanteras.

A continuación se calculará la posición del automóvil relativo a un punto de comienzo, mediante el uso de la cinemática y haciendo algunas suposiciones. A las ecuaciones que se desea llegar son:

$$x = f_1(t) \quad (4.3)$$

$$y = f_2(t) \quad (4.4)$$

Para obtener las ecuaciones es necesario establecer el modelo cinemático, el cual se muestra en la figura 4.4. Donde la rueda directriz tiene un ángulo α (ángulo de salida del trinquete) a partir de la dirección de la línea recta del automóvil. El automóvil rotará con una velocidad omega en torno al centro instantáneo de rotación.

Denotaremos como r , V_s , ω_s : al radio, velocidad lineal y velocidad angular de la rueda de dirección. Siendo d la distancia entre el eje de la rueda directriz y el punto central entre las ruedas delanteras.

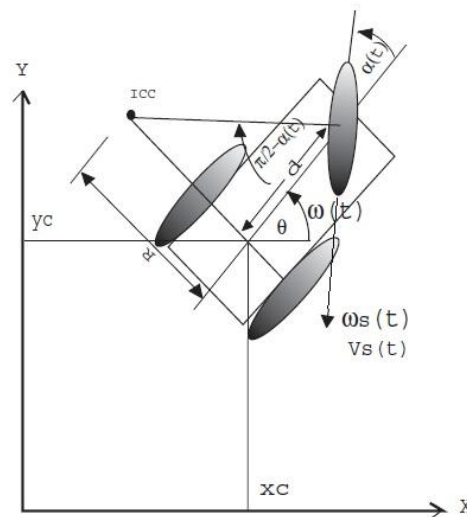


Figura 4.4: Modelo cinemático

Si particularizamos para nuestro caso vemos que, tenemos una función por tramos es decir, debemos separarla en dos partes. En uno de los tramos tendrá una dependencia de ϕ_1 y en otro será una función constante.

Tenemos una discretización por puntos, para poder obtener una dependencia de ϕ_1 respecto al tiempo suponemos que tarda 2 segundos en realizar el ciclo completo, entonces la dependencia de ϕ_1 respecto al tiempo será ecuación 4.5

$$\phi_1 = 0.5236 t \quad (4.5)$$

Y si suponemos, para simplificar el problema, que el diámetro de la rueda directriz es igual que el de las ruedas motrices, tenemos que la velocidad angular de las mismas será ecuación 4.6

$$\omega_s = 0.5236 \text{ rad/s} \quad (4.6)$$

Una vez tenemos esto ya conocemos la dependencia de los términos con el tiempo. Resolvemos el problema de posición.

Nos surge un problema, no podemos calcular el ángulo de curvatura, ya que tenemos una dependencia cuadrática de omegas con el tiempo. Por tanto buscamos una relación lineal de omegas con el tiempo. Modificamos las ecuaciones por una relación menos exacta.

Esta aproximación nos da otro problema, la ecuación no es integrable. Debemos suponer que tenemos ecuaciones lineales, siendo en ese caso las ecuaciones de trayectoria, ecuación 4.7y 4.8.

$$x_c = 38.654 \sin(0.745 t) + 65.56 \sin(0.439 t)$$

$$y_c = 65.6 \cos(0.439 t) - 38.655 \cos(0.745 t)$$

Este caso es para el disco de levas con 6 levas, podemos resolver el mismo problema cambiando el número de levas, observando que la trayectoria será mas lineal con mayor numero de levas, figura 4.5.

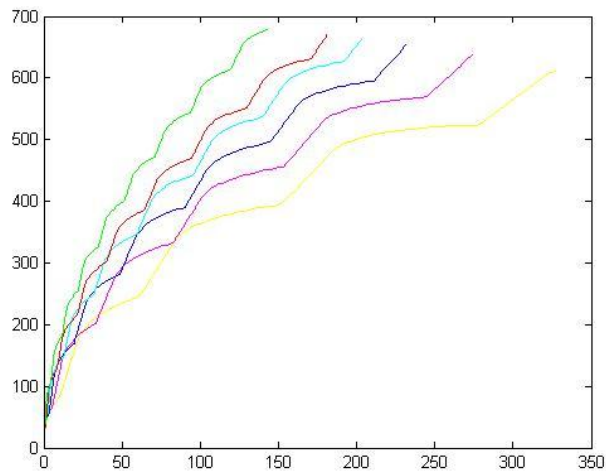


Figura 4.5: Trayectorias definidas con 4 a 6 levas

Capítulo 5

Conclusiones

Una vez que se modela y construyó el mecanismo en forma informo a lo largo del texto, las conclusiones siguientes se pueden extraer:

El movimiento del mecanismo se ajusta con el proceso de trabajo esperado, a pesar de no conseguir un resultado real del movimiento del mismo. Podemos decir que efectivamente cuanto mas levas hay en el disco de levas el movimiento es mas lineal.

Antes del diseño del automóvil había sido importante tener unas dimensiones para facilitar el diseño de la misma.

El software utilizado nos permite estudiar el movimiento de la modelo.

Este diseño es posible que no sea el adecuado para el objetivo a conseguir por Leonardo, una maquina autónoma, posiblemente se pueda diseñar un mecanismo mas sencillo con este fin.

Una vez que tenemos el mecanismo ensamblado, en este capítulo se hará el análisis cinemático. Para hacer este análisis se usará el *DMU kinematics*, éste es un producto independiente CAD dedicado a la simulación de ensamblajes. Pudiéndose obtener datos experimentales del mismo.

El primer paso es definir las diferentes articulaciones, y relaciones entre las diferentes partes del mecanismo. Se va a separar el conjunto de mecanismos en tres diferentes mecanismos para así facilitar el la simulación de el conjunto.