

Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

**MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CON  
MSC.ADAMS DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE PAR  
CON RUEDAS LIBRES.**

Autor: Javier Martínez Montoya  
Tutores: Francisco José Morales Sánchez  
Francisco García Benítez

**Dpto. de Transportes  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

**MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS  
CON MSC.ADAMS DE UN SISTEMA DE  
TRANSMISIÓN DE PAR CON RUEDAS  
LIBRES.**

Autor:  
Javier Martínez Montoya

Tutores:  
Francisco José Morales Sánchez  
Francisco García Benítez

Dpto. de Transportes  
Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera: MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CON  
MSC.ADAMS DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE PAR CON RUEDAS  
LIBRES.

Autor: Javier Martínez Montoya  
Tutor: Francisco José Morales Sánchez  
Francisco García Benítez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

*Quiero agradecerles a mis tutores el trabajo y empeño puesto en mí, en especial a mi cotutor Francisco José Morales Sánchez por su tiempo y ayuda en el estudio y del uso del software MSC.ADAMS. También agradecerle a mi familia y amigos cercanos el apoyo recibido durante este tiempo para la realización del estudio.*





# Resumen

---

El siguiente proyecto tiene como presente y objetivo principal el modelado de una rueda libre de una forma realista para compararla con los resultados obtenidos con rueda libre simplificada dentro de un sistema de transmisión de potencia empleando el software MSC.Adams

Para el éxito del objetivo principal se ha realizado el análisis cinemático y dinámico de todos sus elementos partiendo de la elaboración de un modelo ideal y elaborando luego un modelo que se ajuste más a uno real. Como el elemento central del proyecto son las ruedas libres, se ha comenzado con el modelado de la misma junto con su análisis, pasando luego al resto de elementos hasta llegar al sistema completo de transmisión de potencia.

Se conoce de estudios previos (Martínez Brugarolas, A.A., 2017) que el modelo de ruedas libres ideales funciona muy bien en ciertas situaciones, pero mal en otras, por lo que se introducirán diferentes condiciones de contorno al sistema completo para su análisis, para poder ver cuál es el comportamiento de las ruedas libres dentro de este sistema ante estas diferentes situaciones y poder comparar los resultados de ruedas libres ideales y realistas y poder extraer unas conclusiones.



# Abstract

---

The following project has as main objective and present the modeling of a free wheel in a realistic way to compare it with the results obtained with simplified freewheeling within a power transmission system using the MSC.Adams software.

For the success of the main objective, the kinematic and dynamic analysis of all its elements has been carried out starting from the elaboration of an ideal model and then elaborating a model that fits more to a real one. As the central element of the project are the free wheels, it has begun with the modeling of the same along with its analysis, passing then to the rest of elements until arriving at the complete system of transmission of power.

It is known from previous studies (Martínez Brugarolas, AA, 2017) that the ideal freewheels model works very well in certain situations, but badly in others, so that different contour conditions will be used in the complete system for its analysis, in order to be able to see what is the behavior of the free wheels within this system before these different situations and be able to compare the results of ideal and real free wheels and be able to draw conclusions.



# Índice

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>7</b>  |
| <b>Resumen</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>11</b> |
| <b>Índice</b>   | <b>13</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>  | <b>16</b> |
| <b>Notación</b>   | <b>19</b> |
| <b>Introducción</b>   | <b>21</b> |
| <b>1. MOTIVACIÓN</b>  | <b>21</b> |
| <b>2. OBJETO DEL PROYECTO</b>   | <b>21</b> |
| <b>3. ETAPAS DEL PROYECTO</b>   | <b>22</b> |
| <b>4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA</b>  | <b>23</b> |
| <b>Memoria</b>  | <b>25</b> |
| <b>1. ANTECEDENTES DE LA RUEDA LIBRE</b>  | <b>25</b> |
| 1.1. <i>RUEDA LIBRE EN BICICLETAS</i>   | 25        |
| 1.2. <i>RUEDAS LIBRES EN VEHÍCULOS</i>  | 26        |
| <b>2. CLASIFICACIÓN DE LA RUEDA LIBRE Y FUNCIONAMIENTO</b>                      | <b>28</b> |
| 2.1. <i>CLASIFICACIÓN DE RUEDAS LIBRES</i>                                      | 28        |
| 2.1.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU MODO DE FUNCIONAMIENTO                            | 28        |
| 2.1.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS ELEMENTOS DE BLOQUEO                             | 30        |
| 2.2. <i>FUNCIONAMIENTO DE LA RUEDA LIBRE</i>                                    | 32        |
| <b>3. TREN EPICICLOIDAL</b>   | <b>34</b> |
| <b>4. SOFTWARE</b>  | <b>36</b> |
| <b>5. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA</b>                                    | <b>38</b> |
| <b>6. MODELADO ADAMS VIEW</b>   | <b>42</b> |
| 6.1. <i>RUEDA LIBRE</i>   | 42        |
| 6.1.1. MODELIZACION   | 42        |
| 6.1.2. JUSTIFICACIÓN DEL MODELO   | 44        |
| 6.1.3. CONDICIONES DE CONTORNO  | 45        |
| 6.1.4. COMPROBACION Y VERIFICACIÓN DE LA RUEDA LIBRE                            | 50        |
| 6.2. <i>TREN EPICICLOIDAL</i>   | 51        |
| 6.2.1. MODELADO   | 51        |
| 6.2.2. JUSTIFICACIÓN DEL MODELO   | 52        |
| 6.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO  | 54        |
| 6.2.4. COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL TREN EPICICLOIDAL                        | 58        |
| 6.3. <i>TREN EPICICLOIDAL CON EL MECANISMO RECTIFICADOR (DOS RUEDAS LIBRES)</i> | 61        |
| 6.3.1. MODELADO   | 61        |
| 6.3.2. CONDICIONES DE CONTORNO  | 62        |
| 6.3.3. COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN  | 64        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 6.4.      | <i>MECANISMO RECTIFICADOR</i>                               | 67        |
| 6.4.1.    | MODELADO RECTIFICADOR                                       | 68        |
| 6.4.2.    | CONDICIONES DE CONTORNO                                     | 70        |
| <b>7.</b> | <b>ANÁLISIS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA</b>      | <b>71</b> |
| 7.1.      | <i>ANÁLISIS DEL SISTEMA CON UN PAR RESISTENTE EN EL EJE</i> | 71        |
| 7.2.      | <i>ANÁLISIS CON EL EJE LIBRE</i>                            | 74        |
| 7.3.      | <i>ANÁLISIS CON EL EJE BLOQUEADO</i>                        | 76        |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>                      | <b>80</b> |
| <b>9.</b> | <b>REFERENCIAS</b>  | <b>82</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1-1: CELÍFERO .....  | 25 |
| FIGURA 1-2: PRIMERA BICICLETA A PEDALES .....   | 26 |
| FIGURA 1-3: BICICLETA DE SEGURIDAD .....  | 26 |
| FIGURA 1-4: BICICLETA ACTUAL .....  | 26 |
| FIGURA 2-1: ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RUEDA LIBRE .....  | 28 |
| FIGURA 2-2: RUEDA LIBRE DE ANTIRRETROCESO. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....                        | 29 |
| FIGURA 2-3: RUEDA LIBRE DE EMBRAGUE POR ADELANTAMIENTO. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....           | 29 |
| FIGURA 2-4: RUEDAS LIBRES DE AVANCE. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....                              | 30 |
| FIGURA 2-5: RUEDA LIBRE DE RODILLOS. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....                              | 30 |
| FIGURA 2-6: ESQUEMA DE LA FUNCIÓN DE LOS RODILLOS. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....                | 31 |
| FIGURA 2-7: RUEDA LIBRE CON CUERPOS DE APRIETE. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN .....                   | 31 |
| FIGURA 2-8: ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS CUERPOS DE APRIETE. FUENTE: CATÁLOGO DE RINGSPANN ..... | 32 |
| FIGURA 2-9: MECANISMO DE RUEDA LIBRE .....  | 32 |
| FIGURA 2-10: RUEDAS LIBRES EN UN MOTOR (WWW.MOTORPASION.COM) .....                                    | 33 |
| FIGURA 3-1: ESQUEMA Y SECCIÓN DE UN TREN EPICICLOIDAL. ....   | 34 |
| FIGURA 4-1: LOGOTIPO MSC.ADAMS .....  | 36 |
| FIGURA 5-1: ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA .....                                      | 38 |
| FIGURA 5-2: ESQUEMA DEL MECANISMO DE ACCIONAMIENTO .....  | 39 |
| FIGURA 5-3: RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE UNA VELOCIDAD VARIABLE .....                                   | 40 |
| FIGURA 5-4: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL MECANISMO RECTIFICADOR.....                                 | 41 |
| FIGURA 6-1: MODELO DEL SISTEMA COMPLETO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....                               | 42 |
| FIGURA 6-2: MODELO DE RUEDA LIBRE IDEAL.....  | 43 |
| FIGURA 6-3: MODELO DE RUEDA LIBRE REALISTA .....  | 43 |
| FIGURA 6-4: MODELO DEL ANILLO INTERIOR DE LA RUEDA LIBRE .....  | 44 |
| FIGURA 6-5: MODELO DEL ANILLO EXTERIOR DE LA RUEDA LIBRE .....  | 44 |
| FIGURA 6-6: RODILLOS DE LA RUEDA LIBRE REALISTA .....   | 45 |
| FIGURA 6-7: RUEDA LIBRE PARA MOSTRAR LA DIRECCIÓN DEL EJE Z .....                                     | 46 |
| FIGURA 6-8: FUERZA DE CONTACTO EN ADAMS.....  | 47 |
| FIGURA 6-9: CURVA DEL PAR RESISTENTE.....   | 47 |
| FIGURA 6-10: PAR RELATIVO DE LA RUEDA LIBRE IDEAL .....   | 48 |
| FIGURA 6-11: MOTOR PARA EL MOVIMIENTO DE LA RUEDA LIBRE .....   | 48 |
| FIGURA 6-12:REFERENCIA A LA FUNCIÓN STEP EN ADAMS.....  | 49 |
| FIGURA 6-13: FUNCTION BUILDER DE ADAMS .....  | 49 |
| FIGURA 6-14: EJEMPLO DE FUNCIÓN APLICANDO UN STEP .....   | 50 |
| FIGURA 6-15: FUNCIONAMIENTO COMO RUEDA LIBRE IDEAL .....  | 50 |
| FIGURA 6-16: FUNCIONAMIENTO COMO RUEDA LIBRE REALISTA .....   | 50 |
| FIGURA 6-17. MODELO DEL TREN EPICICLOIDAL EN ADAMS .....  | 52 |
| FIGURA 6-18: MODELO DEL PORTA SATÉLITES EN ADAMS.....   | 53 |
| FIGURA 6-19: MODELO DE LOS SATÉLITES EN ADAMS .....   | 53 |
| FIGURA 6-20: MODELO DE LA CORONA EN ADAMS.....  | 54 |
| FIGURA 6-21: MODELO DEL PLANETA CON EL EJE SOLIDARIO EN ADAMS.....                                    | 54 |
| FIGURA 6-22: JOINTS DE ADAMS.....   | 55 |
| FIGURA 6-23: COUPLERS EN ADAMS .....  | 55 |
| FIGURA 6-24: REFERENCIA AL GEAR JOINT DE ADAMS .....  | 55 |
| FIGURA 6-25: MOVIMIENTO DEL PORTA SATÉLITES .....   | 56 |
| FIGURA 6-26: MOVIMIENTO DEL SATÉLITE CON EL PORTA SATÉLITES.....                                      | 56 |
| FIGURA 6-27: MOVIMIENTO DEL SATÉLITE.....   | 57 |
| FIGURA 6-28: MOVIMIENTO DE LA CORONA .....  | 57 |
| FIGURA 6-29: MOVIMIENTO DEL PLANETA .....   | 57 |
| FIGURA 6-30: VELOCIDADES ANGULARES DE LOS ELEMENTOS DEL TREN EPICICLOIDAL .....                       | 58 |
| FIGURA 6-31: VELOCIDADES DEL PORTA SATÉLITES Y PLANETA ESCALADAS.....                                 | 59 |
| FIGURA 6-32: SUMA DE LAS VELOCIDADES DEL PORTA SATÉLITES Y PLANETA .....                              | 59 |
| FIGURA 6-33: VELOCIDADES DEL PLANETA Y PORTA SATÉLITES SIN ESCALAR .....                              | 60 |
| FIGURA 6-34: VELOCIDAD ESCALADA DEL PORTA SATÉLITES.....  | 60 |



|   |    |
|---|----|
| FIGURA 6-35: VELOCIDAD DE LA CORONA Y DEL PORTA SATÉLITES .....   | 60 |
| FIGURA 6-36: MODELO TREN EPICICLOIDAL CON DOS RUEDAS LIBRES REALISTAS EN ADAMS .....                                | 61 |
| FIGURA 6-37: AMPLIACIÓN SOBRE LAS DOS RUEDAS LIBRES REALISTAS .....   | 62 |
| FIGURA 6-38: MODELO CON EJE DE SALIDA DEL TREN SOLIDARIO A LAS RUEDAS LIBRES REALISTAS.....                         | 63 |
| FIGURA 6-39: MODELO SIN EJE DE SALIDA DEL TREN EPICICLOIDAL .....   | 64 |
| FIGURA 6-40: VELOCIDAD ANGULAR VARIABLE DEL PLANETA .....   | 64 |
| FIGURA 6-41: SISTEMA CON LA RUEDA LIBRE IDEAL POSITIVA.....   | 65 |
| FIGURA 6-42: SISTEMA CON LA RUEDA LIBRE REALISTA POSITIVA .....   | 65 |
| FIGURA 6-43: SISTEMA CON LA RUEDA LIBRE IDEA NEGATIVA .....   | 65 |
| FIGURA 6-44: SISTEMA CON LA RUEDA LIBRE REALISTA NEGATIVA .....   | 66 |
| FIGURA 6-45: SISTEMA CON LAS DOS RUEDAS LIBRES IDEALES .....  | 66 |
| FIGURA 6-46: SISTEMA CON LAS DOS RUEDAS LIBRES REALISTAS .....  | 66 |
| FIGURA 6-47: ESQUEMA DE UN MECANISMO RECTIFICADOR .....   | 67 |
| FIGURA 6-48: MODELO CON LOS TRES INVERSORES .....   | 69 |
| FIGURA 6-49: MODELO CON LOS TRES INVERSORES Y EL EJE DE SALIDA .....  | 69 |
| FIGURA 6-50: PAR RESISTENTE DEL MODELO.....   | 70 |
| FIGURA 7-1: SIMULACIÓN CON UN PAR RESISTENTE EN EL EJE DE SALIDA .....  | 71 |
| FIGURA 7-2: ANÁLISIS CON PAR RESISTENTE Y RUEDAS LIBRES IDEALES.....  | 72 |
| FIGURA 7-3: PAR RELATIVO DE LAS RUEDAS LIBRES IDEALES EN EL SISTEMA COMPLETO .....                                  | 72 |
| FIGURA 7-4: ANÁLISIS CON PAR RESISTENTE Y RUEDAS LIBRES REALISTAS .....   | 73 |
| FIGURA 7-5: VELOCIDAD DE SALIDA DE UN ENSAYO EXPERIMENTAL CON PAR EN EL EJE .....                                   | 73 |
| FIGURA 7-6: SIMULACIÓN CON EL EJE LIBRE.....  | 74 |
| FIGURA 7-7: ANÁLISIS CON RUEDAS LIBRES IDEALES CON EL EJE LIBRE .....   | 74 |
| FIGURA 7-8: PAR RELATIVO DE LAS RUEDAS CON EL EJE LIBRE .....   | 75 |
| FIGURA 7-9: ANÁLISIS CON RUEDAS LIBRES REALISTAS Y EL EJE LIBRE .....   | 75 |
| FIGURA 7-10: VELOCIDAD ANGULAR DE SALIDA EN UN ENSAYO EXPERIMENTAL CON EL EJE LIBRE .....                           | 76 |
| FIGURA 7-11: SIMULACIÓN CON EL EJE BLOQUEADO .....  | 76 |
| FIGURA 7-12: VELOCIDAD DEL PLANETA CON RUEDAS LIBRES IDEALES Y EL EJE BLOQUEADO .....                               | 77 |
| FIGURA 7-13: VELOCIDADES DEL PORTA SATÉLITES, CORONA Y SATÉLITES CON EL EJE BLOQUEADO Y RUEDAS LIBRES IDEALES ..... | 77 |
| FIGURA 7-14: PAR GENERADO EN EL EJE DE SALIDA BLOQUEADO CON RUEDAS LIBRES IDEALES .....                             | 77 |
| FIGURA 7-15: PAR ORIGINADO EN EL EJE DE SALIDA BLOQUEADO EN UN ENSAYO EXPERIMENTAL CON RUEDAS LIBRES .....          | 78 |
| FIGURA 7-16: VELOCIDAD DEL PLANETA CON RUEDAS LIBRES REALISTAS Y EL EJE BLOQUEADO .....                             | 78 |
| FIGURA 7-17: PAR ORIGINADO EN EL EJE DE SALIDA BLOQUEADO CON RUEDAS LIBRES REALISTAS.....                           | 79 |



# Notación

---

|                |  |
|----------------|--|
| $w_p$          | Velocidad del planeta  |
| $w_{ps}$       | Velocidad del porta satélites  |
| $w_c$          | Velocidad de la corona   |
| $\mu$          | Parámetro que depende de la geometría y el tipo de tren epicicloidal |
| Z1             | Radio del planeta  |
| Z3             | Radio de la corona   |
| STEP           | Función de paso  |
| Sen            | Función seno   |
| Gear           | Engranaje  |
| Joint          | Articulación   |
| Revolute joint | Articulación de revolución   |
| Fixed joint    | Articulación fija  |
| Planar joint   | Articulación planar  |
| Ground         | Tierra   |



# Introducción

---

## 1. MOTIVACIÓN

Hoy en día, en los procesos mecánicos dentro de la producción industrial se les exige una gran eficiencia y una mayor fiabilidad que les permita ser más competitivos contra diferentes empresas.

La sencillez de implementar en softwares un modelo parametrizado es fundamental para su diseño, análisis y verificación con el objetivo de conocer el funcionamiento y detectar posibles fallos con el suficiente tiempo de antelación, proporcionando soluciones sin consecuencias graves para realizar su posterior fabricación y puesta en uso.

Los sistemas mecánicos actuales suelen ser bastante complejos, y es complicado particularizar y predecir donde pueden aparecer los fallos en estos sistemas, ya que cuenta con un gran número de elementos.

Las ruedas libres son un sistema que siempre han estado incorporadas en las transmisiones automáticas por las ventajas que presentan, tales como: reducción de peso y tamaño, aprovechamiento de la inercia, transmisión de par y sencillez del sistema.

Sin embargo, de los estudios previos (Martínez Brugarolas, A.A., 2017) se sabe que un modelo de rueda libre ideal funciona correctamente y ajustándose a una rueda libre real en todas las situaciones en las que se encuentra el eje de salida en movimiento, pero en cambio, si el eje de salida se encuentra bloqueado, su funcionamiento ya no es el correcto. Por ello, este estudio se centrará en la obtención de un modelo, partiendo y elaborando un modelo ideal que se conoce que funciona en las situaciones mencionadas, que se ajuste a una rueda libre real con todos sus componentes y que funcione correctamente en todas las situaciones.

## 2. OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente Proyecto Fin de Máster es el modelado, simulación y análisis de un modelo de ruedas libres de una forma realista dentro de un sistema de transmisión de potencia empleando el software MSC.Adams.

La finalidad del mismo es la obtención de un modelo con ruedas libres realistas y compararlas con un modelo provisto de ruedas libres simplificadas. También, se parte de que, en proyectos

Anteriores (Martínez Brugarolas, A.A., 2017), como se ha mencionado en el apartado anterior, se ha conocido que este sistema con ruedas libres ideales no funciona correctamente en determinadas situaciones que se han comprobado en ensayos realizados en este departamento.

Por lo que el presente proyecto tratará de exponer de forma ordenada, metódica y secuencial el contenido de forma que el orden lógico de las cosas resulte intuitivo a prácticamente cualquier lector y comprensible.

El proceso de elaboración del proyecto se ha compuesto de diferentes pasos:

- Realizar un modelo multi-cuerpo de una rueda libre de rodillos como elementos de bloqueo, elaborando un anillo interior que pueda satisfacer los requerimientos de la rueda libre, con espacio para los cuatro rodillos y con reducción de espacio para el encaje de los mismos.
- Comprobar y verificar que el modelo de la rueda libre se ajusta a los resultados de una rueda real partiendo de una ideal tras su simulación.
- Realizar un modelo multi-cuerpo de un tren epicicloidal, contando con un porta satélites, cuatro satélites, un planeta y una corona.
- Comprobar y verificar que las velocidades del modelo del tren epicicloidal cumplen con las leyes cinemáticas mediante la ecuación de Willis
- Modelar el sistema de transferencia de par completo, compuesta por dos ruedas libres, un tren epicicloidal, una serie de engranajes y un eje de salida con dos engranajes solidarios.
- Análisis del sistema de transmisión de potencia con diferentes condiciones de contorno.
- Sacar conclusiones y propuestas de futuro.

La herramienta que se usará en todo momento será el software MSC.Adams View y PostProcessor.

### 3. ETAPAS DEL PROYECTO

Todos los estudios y proyectos dentro de la ingeniería siempre se dividen en diferentes etapas para tener éxito en el mismo que son bastante comunes entre todos.

- **ETAPA 1: Búsqueda de información y estudio del software**

En esta primera etapa un ingeniero se plantea, que se tiene que hacer, cuál es el objetivo a alcanzar, cuál es la mejor forma de poder hacerse y que necesidades se requiere en el proyecto. Se establecen los objetivos del proyecto y se realiza una búsqueda intensiva sobre todo tema relacionado y sobre los diferentes elementos que se van a tener que ejecutar.

También se sabe que la herramienta de uso es el MSC.Adams, por lo que hay que familiarizarse con un primer contacto con el programa y ver cómo funciona, cuáles son sus puntos fuertes y sus puntos débiles, cuáles son los comandos que son imprescindibles y que hay que saber cómo funcionan y resolución de cualquier duda sobre el programa.

Este aprendizaje se realiza en específico en los módulos de View y Postprocessor, que son los necesarios para modelizar y simular en este estudio, y la obtención de los resultados que se van buscando.

- **ETAPA 2: Modelado y simulación**

En esta segunda etapa, se modela, simula y verifica cada elemento del sistema individualmente para posteriormente componerlos para obtener el sistema completo, que es el modelo final buscado, para simularlo y que sus datos sean analizados.

- **ETAPA 3: Obtención, análisis de resultados y conclusiones**

Por último, cuando el modelo es satisfactorio y acorde a lo planteado, se analiza el modelo con diferentes condiciones de contorno que simulan diferentes situaciones que se pueden dar.

Finalmente, establecer unas conclusiones con estos resultados y propuestas de futuro si son necesarias.

## 4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Se ha empezado este documento con una introducción general donde se exponen la motivación por la que se decidió realizar este proyecto, su objetivo principal, etapas de desarrollo que se han llevado a cabo y su organización dentro del mismo documento.

Esta memoria se divide en ocho capítulos que a continuación se explican brevemente el contenido de los mismos:

- Capítulo I: Breve introducción histórica de las ruedas libres, cuál es su origen y el uso que se les ha dado dentro de los vehículos.
- Capítulo II: Clasificación de las ruedas libres y funcionamiento, ya que son el elemento principal de este proyecto, es aconsejable conocer que tipos hay. Existen en el mercado diferentes tipos de ruedas libres que son usadas para unas funciones específicas, ya que cada tipo de rueda libre tiene sus propias características.
- Capítulo III: Breve introducción a la definición de un tren epicicloidal, elemento necesario en este proyecto dentro del sistema de transmisión de potencia como se explicará en los capítulos siguientes
- Capítulo IV: Introducción al software utilizado para el modelado, simulación y análisis del sistema de transmisión, así como las ventajas y desventajas que pueda tener el programa.
- Capítulo V: Introducción al sistema de potencia, cómo está conformado con una explicación de todos los elementos que lo forman.
- Capítulo VI: Modelado de todos los elementos, empezando con modelos ideales y pasando a modelos que se ajusten a uno real. También se incluye en este apartado las

simulaciones y comprobaciones de los componentes del sistema individualmente y de varios de ellos en conjunto, exceptuando el análisis del sistema completo final.

- Capítulo VII: Simulación y análisis del sistema completo ante diferentes condiciones de contorno, realizando primero el análisis del sistema con ruedas libres ideales simplificadas y posteriormente con un modelo de ruedas libres realistas y comparándolas.
- Capítulo VIII: Exposición de las conclusiones obtenidas y propuestas de trabajos futuros relacionados con el modelo y la simulación de sistemas de transmisión de potencia con ruedas libres.
- Capítulo IX: Referencias utilizadas para la realización del estudio, apoyo y búsqueda de información.



En esta parte del documento se comienza a explicar el estudio llevado a cabo explicado de manera coherente y ordenada, siguiendo todos los pasos que se han llevado a cabo hasta la obtención del modelo, sus respectivos análisis individuales y del sistema completo, con su posterior conclusión.

## 1. ANTECEDENTES DE LA RUEDA LIBRE

Como el elemento principal de este proyecto es la rueda libre, se incorpora una breve introducción histórica para empezar a entender su funcionamiento.

El mecanismo de la rueda libre lleva existiendo durante muchos años, porque es el mecanismo básico de una la bicicleta, pero que comúnmente por todo el mundo es conocido como el piñón de la bici, para entenderlo fácil.

### 1.1. RUEDA LIBRE EN BICICLETAS

Sus primeros indicios se encuentran con la invención de la bicicleta, por lo que se puede ir al 1790 cuando el francés Sivrac inventó el celífero (Figura 1-1), una máquina para correr consistente en dos ruedas alineadas, conectadas por una barra sobre la cual se montaba el deportista a horcajadas, impulsándose con los pies, la cual aún no llevaba rueda libre.



*Figura 1-1: Celífero*

Desde aquí, la bicicleta empezó a sufrir muchos cambios, desde la primera bicicleta a pedales de Macmillan en 1839 (Figura 1-2):



*Figura 1-2: Primera bicicleta a pedales*

Hasta que, en 1885, John Kemp Starley crea la “bicicleta de seguridad” (Figura 1-3), donde la rueda trasera es más pequeña y gracias al uso de los rodamientos, es propulsada por una cadena, se le acopló frenos y por lo tanto de mayor seguridad.



*Figura 1-3: Bicicleta de seguridad*

Aquí se observa ya el primer indicio de la rueda libre, porque en esta bici si el usuario dejaba de dar pedales, la bici por su inercia seguía avanzando, hasta llegar a las bicis actuales (Figura 1-4).



*Figura 1-4: Bicicleta actual*

En estas bicicletas ya se ve con más claridad el mecanismo de la rueda libre o piñón libre, cuyo funcionamiento para el usuario es transmitir el par de la pedaleada a las ruedas para avanzar pero que cuando no se esté transmitiendo par, dicho mecanismo siga girando y, por lo tanto, la bicicleta moviéndose, que es el funcionamiento como rueda libre.

Este funcionamiento es el que causó mucho interés y se extrapoló a los vehículos automóviles, el cual se muestra a continuación.

## 1.2. RUEDAS LIBRES EN VEHÍCULOS

La rueda libre es una posibilidad que cada vez más fabricantes ofrecen en sus modelos para poder “rodar a vela” o con inercia, especialmente en las versiones automáticas.

Actualmente son las leyes y las homologaciones las que obligan a las marcas a buscar ingenios para reducir los consumos y las emisiones. Es por ello que cada vez proliferan más

sistemas como el de la rueda libre con la que se puede reducir el consumo.

Hubo momentos en la historia en los que el ahorro de combustible fue una necesidad imperiosa. El mayor de ellos fue, tal vez, en la posguerra, de ahí que fuese en esos años precisamente cuando la gente más buscó y puso ingenio para inventar toda clase de mecanismo, entre ellos el mecanismo de rueda libre fijándose en la bicicleta.

Gracias a este mecanismo, los coches pueden rodar sin freno motor con la máxima inercia, lo que baja el consumo de combustible cuando se llanea. Los anglosajones lo denominan “coasting” y aquí se suele expresar como “rodar a vela”.

Este sistema no es nada nuevo y se montaba en muchos coches y camiones de los años 40 y 50 del siglo pasado, pero tenía un defecto, ya que lo que ocurría al soltar el acelerador, era que se desacoplaba el motor y entonces el coche no estaba sujeto por la transmisión y, si se está bajando un puerto, se embalaba.

Los frenos ahora son muy buenos, pero no lo eran tanto hace veinte o treinta años, de modo que era frecuente quedarse sin ellos por temperatura en los descensos, con el riesgo que ello conllevaba.

En la actualidad, con los modernos sistemas de frenos controlados por centralitas electrónicas y en comunicación con otras unidades de mando (concretamente la de motor y la del cambio automático), es posible acoplar de nuevo el motor a la transmisión en cuanto pisamos el pedal de freno, logrando ese efecto de freno motor y reteniendo el coche de manera efectiva. Esta es la gran novedad de los sistemas modernos, que un sistema electrónico hace de forma automática e instantánea lo que debería hacer un conductor de forma manual, tardando más tiempo y sin manos ni pies suficientes para todo: pisar el embrague, desconectar la rueda libre, soltar el embrague y reducir marcha, etc

*(Autocasión. Que es la rueda libre: así funciona y así ahorra, s.f.)*

## 2. CLASIFICACIÓN DE LA RUEDA LIBRE Y FUNCIONAMIENTO

### 2.1. CLASIFICACIÓN DE RUEDAS LIBRES

Las ruedas libres son mecanismos con unas características especiales:

- Tienen la capacidad de funcionar en vacío en uno de los sentidos de giro, es decir, de girar libremente porque no existe una unión entre los aros interior y exterior.
- Tienen la capacidad de funcionar en arrastre en el otro sentido, es decir, transmitiendo un par porque existe una unión entre el anillo interior y el exterior.

Por lo que fijándose en la Figura 2-1, el anillo interior puede girar libremente en el sentido anti horario con el anillo exterior inmóvil, sin embargo, si el aro interior gira en sentido horario, se producirá una unión entre los aros interior y exterior, arrastrando al anillo exterior.

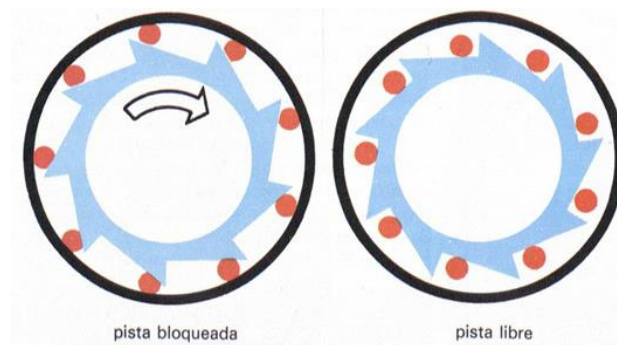


Figura 2-1: Esquema del funcionamiento de la rueda libre

#### 2.1.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU MODO DE FUNCIONAMIENTO

Las ruedas libres tienen tres modos de funcionamiento:

1. Como antirretroceso
2. Como embragues por adelantamiento
3. Como ruedas libres de avance

Todas las imágenes mostradas en los siguientes apartados son extraídas del catálogo de Ringspann, fabricante de ruedas libres.

##### 2.1.1.1. Rueda libre como antirretroceso

Este mecanismo se usa como antirretroceso siempre que se quiera bloquear el giro contrario al de servicio (Figura 2-2). Muchas máquinas e instalaciones deben de tener este mecanismo y es imprescindible, ya sea por seguridad o buen funcionamiento, para que el sentido de giro sea siempre el que se haya determinado previamente. Para el servicio de instalaciones de transporte existen prescripciones legales que exigen un dispositivo de seguridad mecánico. Su estado de funcionamiento normal es el de vacío (giro libre), mientras el bloqueo (la

transmisión de par) se realiza a cero revoluciones. Por esto, el enganche inmediato de los elementos de bloqueo garantiza la mayor seguridad).

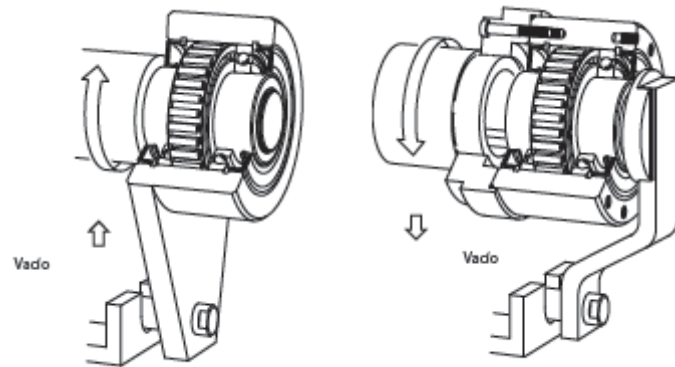


Figura 2-2: Rueda libre de antirretroceso. Fuente: Catálogo de Ringspann.

#### 2.1.1.2. Rueda libre como embrague por adelantamiento

Este mecanismo se usa para desconectar las máquinas o piezas de máquinas e interrumpe automáticamente la interconexión entre las mismas, cuando la parte accionada del embrague por adelantamiento gire a mayor velocidad que la parte motriz, se puede sustituir por un embrague de cambio de construcción más compleja.

Dicho embrague por adelantamiento (Figura 2-3) engancha en modo de arrastre (transmitiendo par), mientras que en vacío (giro libre), la transmisión de par entre los aros interior y exterior se encuentra interrumpida. En arrastre el número de revoluciones de los aros interior y exterior es la misma, sin embargo, en vacío difieren.

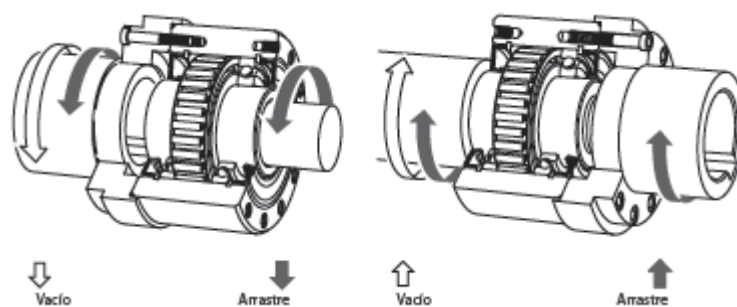


Figura 2-3: Rueda libre de embrague por adelantamiento. Fuente: Catálogo de Ringspann

#### 2.1.1.3. Rueda libre de avance

Este mecanismo como rueda libre de avance (Figura 2-4) tiene la capacidad de transformar un movimiento de vaivén en un movimiento unidireccional y de un solo sentido. En este proyecto, estas son las ruedas que se van a modelizar de una manera realista.

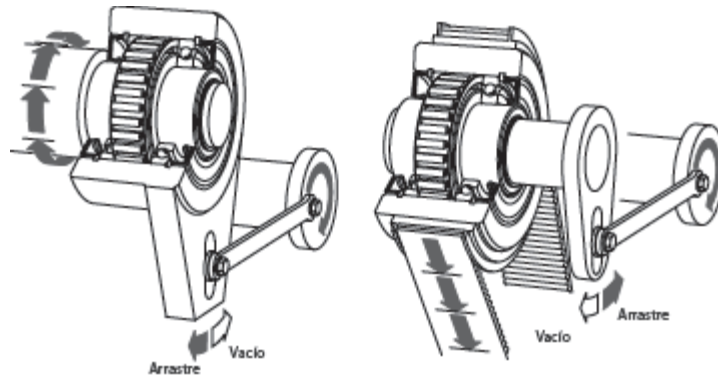


Figura 2-4: Ruedas libres de avance. Fuente: Catálogo de Ringspann

La ventaja que tienen las ruedas libres es que pueden ejercer estas funciones automáticamente en una gran variedad de máquinas, sin necesidad de dispositivos de accionamiento mecánico o hidráulico como pasa en embragues de cambio o frenos.

#### 2.1.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SUS ELEMENTOS DE BLOQUEO

Entonces, las ruedas libres se componen de un anillo exterior y un anillo interior, entre los que se encuentran los elementos de bloqueo que son los que provocan la unión entre ambos anillos en uno de los sentidos de giro.

Por lo que se podrá clasificar las ruedas libres en base a sus elementos de bloqueo:

- Ruedas libres con elementos de bloqueo de rodillos
- Ruedas libres con elementos de bloqueo de cuerpos de apriete

##### 2.1.2.1. Ruedas libres con elementos de bloqueo de rodillos

Las ruedas libres con rodillos de bloqueo disponen de rampas de bloqueo en el anillo exterior o en el interior (Figura 2-5). La pista de rodadura del otro anillo es cilíndrica. Entre ambos anillos se encuentran colocados los rodillos de bloqueo, y, además, llevan unos resortes pretensados para asegurar el bloqueo y evitar impactos en el movimiento de giro libre.

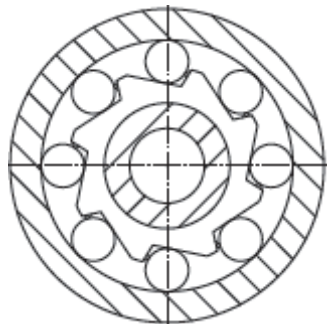


Figura 2-5: Rueda libre de rodillos. Fuente: Catálogo de Ringspann

Este modelo que se muestra en la Figura 2-5, tiene el anillo exterior que le permite girar libremente en sentido horario cuando el anillo interior gira en sentido anti horario, está fijado o gira en sentido horario con una velocidad inferior a la del anillo exterior.

Si se encuentra el anillo interior estático y el anillo exterior gira en sentido contrario, los rodillos entran en acción y bloquean el mecanismo. Los rodillos de bloqueo se encajan entre los anillos sin deslizamiento (Figura 2-6) y puede transmitirse un par elevado.

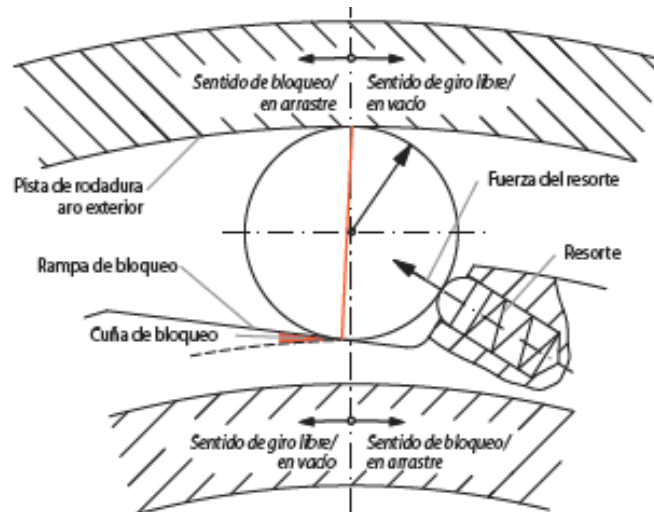


Figura 2-6: Esquema de la función de los rodillos. Fuente: Catálogo de Ringspann

#### 2.1.2.2. Ruedas libres con elementos de bloqueo de cuerpos de apriete

Estas ruedas requieren de una técnica más costosa que la de rodillos, pero para un mismo tamaño tiene la capacidad de transmitir mayores pares.

Disponen de una jaula de resortes entre los anillos interior y exterior donde se encuentran los cuerpos de apriete en forma de haltera (Figura 2-7). Estos cuerpos de apriete en el sentido de giro libre, se abaten sin impedir el movimiento, en cambio, en el sentido de bloqueo se levantan uniendo el anillo interior y exterior impidiendo el movimiento.

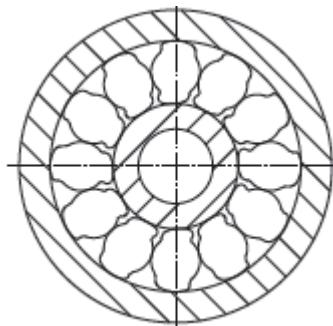


Figura 2-7: Rueda libre con cuerpos de apriete. Fuente: Catálogo de Ringspann

Con la disposición de los elementos de bloqueo de la Figura 2-7, el anillo exterior puede girar libremente en sentido horario, cuando el anillo interior está fijado, gira en sentido antihorario o gira en sentido horario con una velocidad menor a la del anillo interior. Si el anillo interior se encuentra fijado y el anillo exterior gira en sentido contrario, se produce el bloqueo poniéndose en contacto los elementos de bloqueo con los anillos interior y exterior, de esta manera puede transmitir un par elevado (Figura 2-8). En cambio, si se dispone como en la Figura 2-8, permite el giro libre, girando el anillo interior en sentido antihorario, y el arrastre, girando en sentido horario.

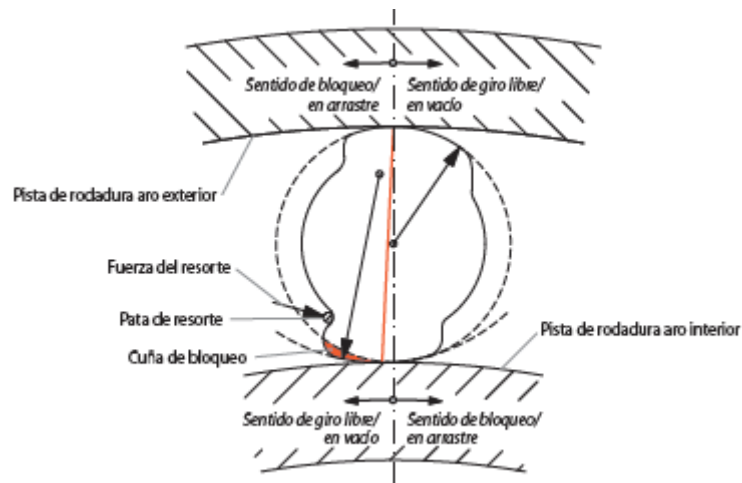


Figura 2-8: Esquema del funcionamiento de los cuerpos de apriete. Fuente: Catálogo de Ringspann

## 2.2. FUNCIONAMIENTO DE LA RUEDA LIBRE

En los sistemas antiguos, la rueda libre (Figura 2-9) era un dispositivo completamente mecánico con unas bolas o rodillos que giran entre dos piezas excéntricas, de forma que en un sentido la excéntrica interior arrastra a la exterior porque las bolas o rodillos quedan atrapados entre ellas, pero en sentido opuesto el rodamiento queda libre. Prácticamente es el mismo mecanismo que tiene el piñón de una bicicleta.

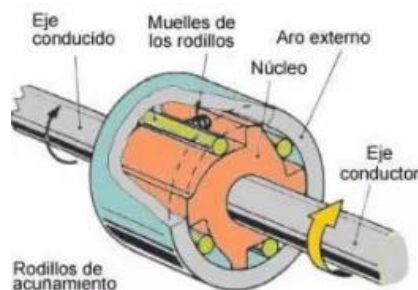


Figura 2-9: Mecanismo de rueda libre

Para ejemplificarlo de manera sencilla se va al caso de una bicicleta, ya que lo que ocurre en una bici, cuando se va llaneando o bajando una cuesta es que se puede dejar de dar pedales y seguir rodando con la inercia; incluso se puede dar pedales hacia atrás y seguir hacia delante. Esto es posible gracias a que el piñón de la rueda trasera no está fijo al



eje como sí lo está la catalina a los pedales, sino que tiene un trinquete que lo hace fijo en un sentido, pero deja que gire en sentido opuesto.

Extrapolándolo a los vehículos, el sistema de rueda libre tiene el mismo efecto. Cuando se acelera (se aplica par), el motor arrastra la caja de cambios y ésta hace girar las ruedas y empujar el coche. Al soltar el acelerador, en un coche sin rueda libre el motor sigue solidario con las ruedas, de modo que éstas son las que hacen girar el motor.

Si un coche no lleva rueda libre, el sistema de inyección corta el combustible y por lo tanto, es nulo el consume de gasolina (o diésel o GLP, etc...), pero la compresión del motor hace perder velocidad rápidamente, de forma que no se tiene casi inercia.

Pero en cambio, en un coche con rueda libre, al levantar el pie del acelerador, el motor se desacopla de las ruedas, de forma que se tiene mucha más inercia. Esto permite que se pueda ir llaneando a cierta velocidad con el motor consumiendo lo mínimo para mantener el ralentí, lo cual reduce mucho el gasto medio de combustible.

En la actualidad, este dispositivo se monta en coches con cajas de cambio automáticas, de modo que lo que hace el sistema es directamente dar la orden de cambio y dejar el selector en punto muerto, volviendo a engranar una marcha en cuanto se presiona el acelerador o el freno.



*Figura 2-10: Ruedas libres en un motor (www.motorpasion.com)*

### 3. TREN EPICICLOIDAL

Como el estudio que se va a realizar trata sobre el modelo completo de un sistema de transmisión de potencia en un vehículo, se va a hacer una mención junto con una breve explicación de una de las partes que tiene el modelo, el tren epicicloidal.

El tren epicicloidal también llamado “engranaje epicicloidal”, es utilizado en las cajas de cambios automáticas como en muchas otras máquinas. Este sistema de engranajes está accionado mediante un sistema de mando normalmente hidráulico o electrónico que acciona frenos y embragues que controlan los diferentes elementos de los engranajes.

La ventaja fundamental de los engranajes planetarios frente a los engranajes utilizados por las cajas de cambio manuales es que su forma es más compacta y permiten un reparto de par en distintos puntos a través de los satélites, pudiendo transmitir pares más elevados.

El tren epicicloidal está formado por varios engranajes que son denominados (Figura 3-1):

- Planeta
- Satélite
- Porta satélites
- Corona

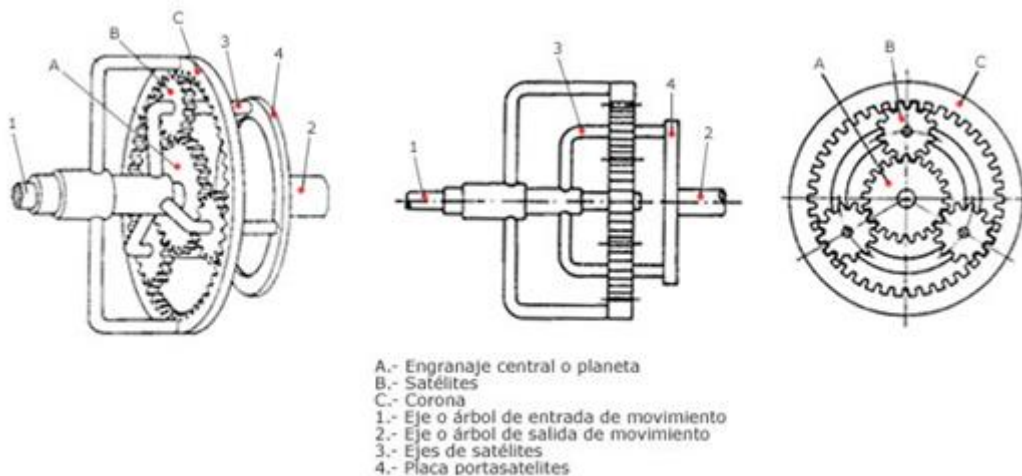


Figura 3-1: Esquema y sección de un tren epicicloidal.

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/caja-cambios3.htm>

En el centro se encuentra el planeta, el cual gira en torno de un eje central. Los satélites engranan en el planeta y la corona y, además, pueden girar tanto en torno de su propio eje como también en un circuito alrededor del planeta y se encuentran alojados con sus ejes en el porta satélites.

El porta satélites inicia el movimiento rotatorio de los satélites alrededor del planeta; con esto, también en torno al eje central.

La corona engrana en su interior con los satélites y encierra todo el tren epicicloidal, además, el eje central también es centro de giro de la corona.

En los apartados siguiente se explica y se muestra dónde va colocado este mecanismo dentro del sistema de transmisión de potencia y su utilización.

El tren epicicloidal se rige por unas leyes cinemáticas que siempre se deben de cumplir. Estas leyes se comprueban mediante la ecuación de Willis:

$$w_c = \mu \cdot w_p + (1 - \mu) \cdot w_{ps} \quad (1)$$
$$\mu = -\frac{Z_1}{Z_3}$$

$w_p$ : *Velocidad angular del planeta*

$w_{ps}$ : *Velocidad angular del porta satélites*

$w_c$ : *Velocidad angular de la corona*

$\mu$ : *Parámetro que depende de la geometría y del tipo de tren*

$Z_1, Z_3$ : *Radio del planeta y corona respectivamente*

## 4. SOFTWARE

Para el presente estudio se ha utilizado el software ADAMS.

ADAMS es el software *Multibody Dynamics* (MBD) más reconocido y utilizado en la ingeniería. Es un programa que mejora la eficiencia del modelado y simulación del comportamiento cineto-dinámico de sistemas mecánicos, disminuyendo los costos de desarrollo del producto y proyectos por permitir una validación temprana a nivel del sistema. A través de él, se pueden evaluar y gestionar complejas interacciones entre disciplinas, incluidas el movimiento, la transmisión de fuerzas y control para optimizar el diseño en cuanto a rendimiento, seguridad y comodidad. Esto permite a los usuarios realizar prototipos virtuales realistas simulando su comportamiento de movimiento con sistemas complejos y rápidamente analiza múltiples variaciones de diseño hasta que un diseño óptimo sea alcanzado.

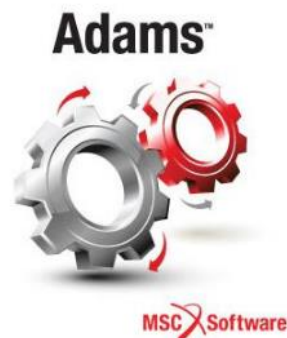


Figura 4-1: Logotipo MSC.Adams

MSC.Adams dispone de una interfaz gráfica que está dividida en varios módulos que se comercializan de manera independiente donde cada uno de ellos está destinado a resolver un tipo de problemas. Los módulos son:

- Adams/ Aircraft
- Adams/Car y Adams/Car Real Time
- Adams/Chassis
- Adams/Driveline
- Adams/Engine
- Adams/Flex
- Adams/Insight
- Adams/Rail
- Adams/Solver
- Adams/View
- Adams/PostProcessor

Para este proyecto solo se va a utilizar el módulo Adams/View, por lo que es el único que se va a explicar de qué trata.

Adams/View es un software con el que se pueden hacer proyectos muy complejos donde puede ser necesario la creación de subrutinas o combinación con otros softwares. Este módulo permite la importación de archivos CAD como AutoCad y Catia y poder realizar modelos. Es una interfaz gráfica diseñada para tener un acceso a las herramientas de simulación muy dinámica, además, combina iconos simples, menús desplegables y herramientas CAD para facilitar la creación de modelos.

Adams/View también tiene la posibilidad de simulación y animación de los modelos para la obtención de resultados, es un programa de simulación en tres dimensiones orientada a la simulación de mecanismos. Su mayor ventaja, es la obtención directa de los datos tras la simulación de una manera muy fiable, por lo que éste ha sido el módulo seleccionado para la obtención de todos los resultados que se muestran en los apartados siguientes.

## 5. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Antes de empezar a describir los pasos llevados a cabo para la consecución del modelo se va explicar en una pequeña introducción el significado y los componentes del sistema de transmisión de potencia que se va a modelar, haciendo una descripción de los mecanismos que lo componen: el mecanismo de accionamiento, el mecanismo inercial y el mecanismo rectificador. Si se desea ampliar y tener una información más detallada del sistema y todos sus mecanismos, se puede ver en la tesis doctoral de Morales, F.J., (2011).

Este sistema de transmisión constituye por sí mismo un regulador de par de tipo inercial oscilante. La inclusión de un mecanismo de variación de la amplitud de la señal generada por el mecanismo de accionamiento permite su uso como transmisión continuamente variable. La regulación de dicha amplitud en la CVT se realizaría mediante la adición de un mecanismo de regulación adaptativo del radio de la manivela del mecanismo de accionamiento.

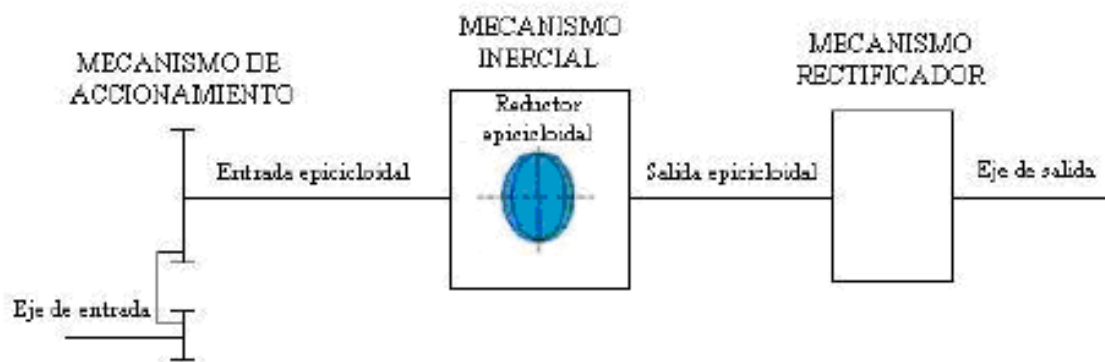


Figura 5-1: Esquema del sistema de transmisión de potencia

- Mecanismo de accionamiento:

El motor que acciona la transmisión solo es capaz de originar una velocidad angular en un único sentido, entonces para poder generar una señal variable, es decir, una velocidad angular oscilante de amplitud variable en la entrada del tren epicicloidal, es necesario un mecanismo adicional de accionamiento.

Para este mecanismo, basta con utilizar un mecanismo de cuatro barras (Figura 5-2) que lo conforman una manivela, una biela y un balancín. La manivela es el elemento que se encuentra unida al eje de salida del motor y es la que transmite un movimiento oscilatorio al balancín por medio de la biela. El radio de la biela puede variar entre cero y un radio máximo que correspondería a la amplitud máxima de la velocidad angular para cada velocidad de giro del motor.

De esta manera, este mecanismo genera una velocidad angular variable, la cual posee una aceleración angular no nula por medio de una velocidad de entrada constante, como podría ser la de un motor eléctrico, de combustión u otro motor rotativo.

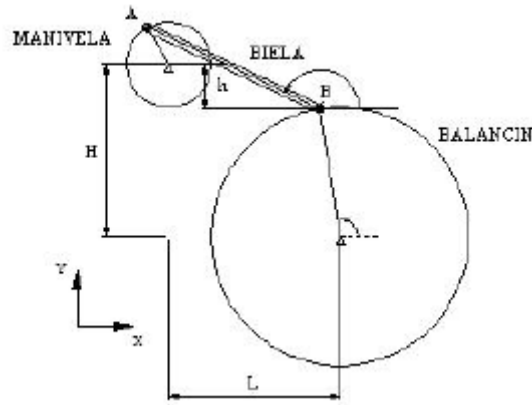


Figura 5-2: Esquema del mecanismo de accionamiento

En este estudio, para agilizar las simulaciones con Adams, este mecanismo se simplifica por un movimiento senoidal sobre la entrada del mecanismo inercial, que es el movimiento que originaría en su salida el mecanismo de accionamiento, un movimiento oscilatorio de amplitud variable.

- Mecanismo inercial:

El mecanismo inercial es un regulador de inercia y el elemento central del sistema de transmisión. Este mecanismo tiene como objetivo regular de manera inercial la señal de salida del mecanismo de accionamiento para proporcionar en su eje de salida y entrada del mecanismo rectificador, una señal distinta.

Para este mecanismo se utiliza un reductor epicicloidal pero colocado de forma inversa, es decir, el eje de entrada se encuentra conectado al porta satélites y el eje de salida al planeta. Colocándolo de esta manera lo que se consigue es que se multiplique la velocidad angular del eje de entrada y por esta razón, se va a denominar tren epicicloidal.

Su comportamiento y funcionamiento se rige tanto por leyes cinemáticas como se ha explicado anteriormente como por leyes dinámicas como se va a explicar a continuación.

Para explicar esto, se toma como referencia que todo flujo siempre tiende a irse por el camino por donde encuentra menos oposición, que comparándolo con un sistema de transmisión de potencia se puede entender que este flujo es la potencia y la oposición es el par resistente. Si se analiza la situación del tren epicicloidal con el eje bloqueado que es el eje de salida que conecta con las ruedas libres, y el sistema parado, es decir, que el sistema se encuentre en reposo sin movimiento alguno, en cuanto comience el movimiento de giro en el eje de entrada, la corona se verá acelerada, y como la corona es la que posee una inercia, tenderá a oponerse a este movimiento de giro y que cuanto mayor sea su inercia, mayor será su oposición y la potencia, por tanto, se repartirá entre acelerar a la corona y originar un par en el eje de salida.

Según la Figura 5-3 si la corona termina adquiriendo una velocidad constante, el par de salida se reduce a cero, es decir, la inercia de la corona deja de hacer su efecto porque ya no proporciona oposición y ni cede ni absorbe potencia alguna por lo que ésta es una situación que no se desea y que se pretende evitar.

Siempre se quiere que se genere un par de salida, y para ello se tiene que proporcionar un sistema de velocidades tal que produzca aceleraciones continuamente, por ello la existencia

del mecanismo de accionamiento anteriormente explicado que proporciona una señal oscilante de amplitud variable, para que en todo momento se esté originando par en el eje de salida.

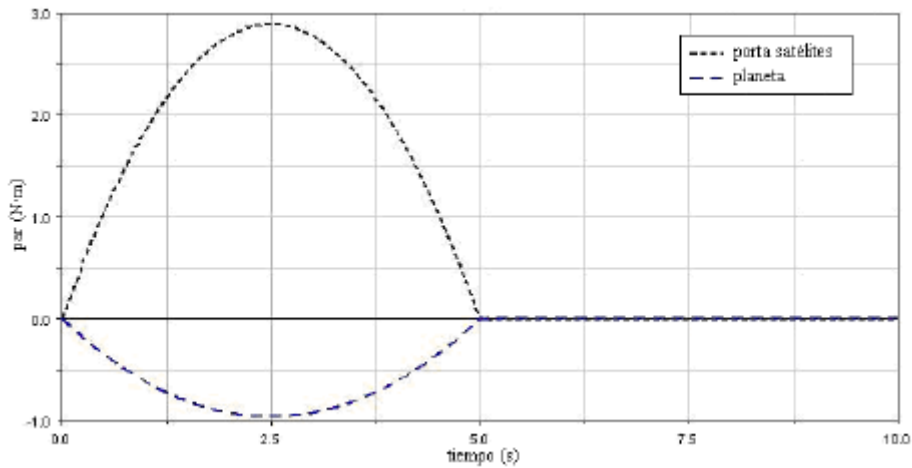


Figura 5-3: Respuesta del sistema ante una velocidad variable

- Mecanismo de rectificación:

Como dentro del sistema se está teniendo con los elementos explicados hasta ahora un movimiento oscilatorio, la velocidad angular, y, por tanto, el par de salida del tren epicicloidal en el planeta es del mismo tipo. Pero una señal de doble sentido no se puede aprovechar para la tracción de un vehículo, por lo que es necesario la rectificación de este movimiento mediante un mecanismo para obtener una señal del par en un solo sentido.

Para este mecanismo se van a utilizar dos ruedas libres para aprovechar el movimiento oscilatorio en ambos sentidos. El mecanismo de rectificador cuenta dos ruedas libres que aprovecharán una el par positivo y otra el negativo, junto con unos engranajes que transmitirán el par al eje de salida, siendo los engranajes de la rueda del par negativo los inversores que invertirán el movimiento de giro, originando en el eje de salida del sistema de transmisión una señal y un par en un solo sentido.

Entonces este mecanismo de rectificación, que está formado por dos ruedas libres como se ha mencionado, que van colocadas una seguida de la otra, están ambas unidas al eje de salida del tren epicicloidal. Los engranajes de la segunda rueda libre, la que se encuentra más alejada del tren epicicloidal, son los que se van a tratar a partir de ahora como inversores, ya que son los que rectificarán la señal oscilatoria para que sea la misma que transmite la primera rueda libre con sus engranajes y dando entre ambas una señal conjunta en un solo sentido para que pueda ser aprovechada por el vehículo.



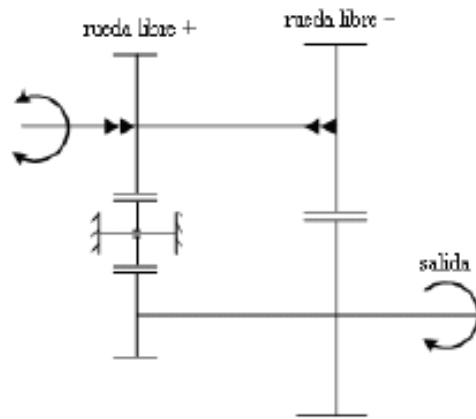


Figura 5-4: Esquema de funcionamiento del mecanismo rectificador

## 6. MODELADO ADAMS VIEW

Para explicar de manera coherente, ordenada y fácil de entender, se muestra a continuación una imagen del sistema completo (Figura 6-1) y se irá explicando como se ha llegado a él paso a paso:

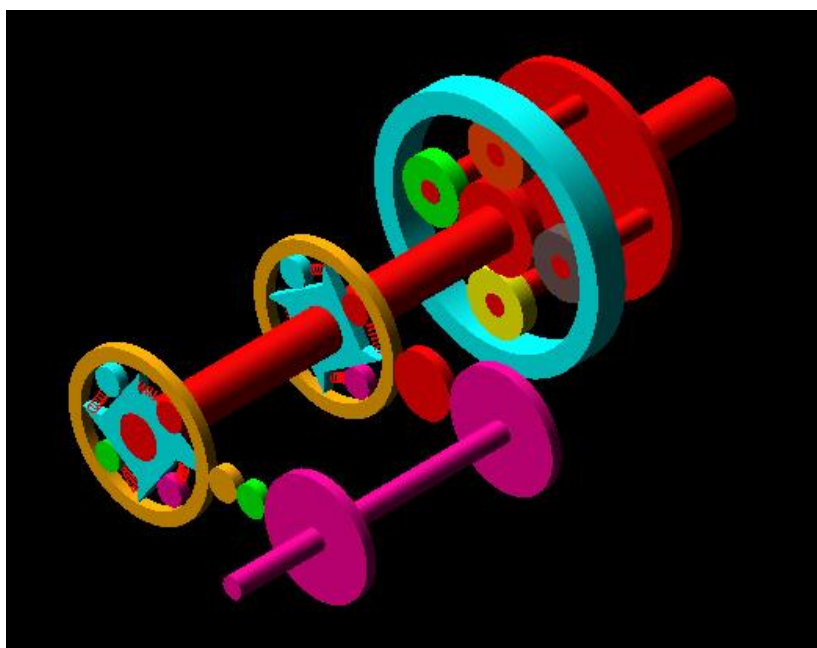


Figura 6-1: Modelo del sistema completo de transmisión de potencia

### 6.1. RUEDA LIBRE

Como primer paso para la realización del modelo era conseguir modelar una rueda libre ideal y después una que fuera realista y que funcionara como se ha explicado en los capítulos anteriores. La rueda libre va a constar de cuatro rodillos como elementos de bloqueo con sus respectivos muelles pretensados.

La diferencia a la ahora de modelizar la rueda libre ideal de la realista es que la realista contará con rodillos y muelles y unas condiciones de contorno diferentes para estos elementos, mientras que la ideal solo dispondrá de anillo interior y exterior y un par relativo entre los dos anillos. La rueda libre realista que se estudia lleva rodillos como elementos de bloqueo y su funcionamiento es como rueda libre de avance.

#### 6.1.1. MODELIZACION

A través de CATIA V5 se ha elaborado un modelo que se importaría a ADAMS, ya que este software nos permite importarle modelos desde otros softwares, ya que hacerlo con sus

herramientas de CAD es bastante más costoso.

- Rueda libre ideal:



*Figura 6-2: Modelo de rueda libre ideal*

Para este modelo basta con dibujar el anillo interior y el anillo exterior.

- Rueda libre realista:



*Figura 6-3: Modelo de rueda libre realista*

En la imagen se representa la rueda libre realista modelizada, que, a diferencia de la ideal, se distinguen los elementos que se han mencionado al principio:

- Anillo interior (Azul claro)
- Anillo exterior (Amarillo)
- 4 rodillos (Azul, verde, rojo, lila)
- 4 muelles que unen el anillo interior con los rodillos

### 6.1.2. JUSTIFICACIÓN DEL MODELO

Para que funcione como rueda libre, se diseña de tal forma que el anillo exterior pueda girar libremente en un sentido, mientras que en el otro es forzada a girar por el anillo interior, por las fuerzas de contacto que tienen lugar entre los rodillos y los anillos debido al efecto cuña que se produce.

#### 6.1.2.1. ANILLO INTERIOR

El anillo interior se ha decidido modelarlo con la forma de la Figura 6-4, para que el espacio se reduzca en la parte plana de las cuatro puntas y sea mayor en la parte inclinada de las mismas. De esta manera, cuando gire en sentido libre el rodillo se encontrará en la zona de mayor espacio entre los anillos que es donde se colocará la unión del muelle con el anillo y cuando no sea así, que el rodillo se encuentre en la zona con menor espacio y entre en contacto a la vez con el anillo interior y anillo exterior y con dicho contacto, impida el giro libre y sea arrastrado sin que haya deslizamiento.

El anillo para el modelo de la rueda ideal es indiferente cual sea su forma, pero se usará el de la rueda libre realista para ambos modelos.



Figura 6-4: Modelo del anillo interior de la rueda libre

#### 6.1.2.2. ANILLO EXTERIOR

El anillo exterior se ha modelizado como un anillo normal y corriente. Se colocará tanto en la rueda ideal como real.



Figura 6-5: Modelo del anillo exterior de la rueda libre

### 6.1.2.3. ELEMENTOS DE BLOQUEO

Elementos de bloqueo solo lo tendrá la rueda libre realista. Como elementos de bloqueo de la rueda en estudio se han usado rodillos y se han modelizado como cilindros. Estos elementos bloquearán la rueda cuando entren en contacto entre los anillos, donde se reduce el espacio entre ambos anillos y se produzca el acuñaamiento.



Figura 6-6: Rodillos de la rueda libre realista

### 6.1.2.4. MUELLES

Este elemento solo estará en la rueda libre real. Se han modelizado cuatro muelles pretensados que unan los rodillos con el anillo interior por la razón de asegurar el bloqueo. Al principio se hizo una prueba de la rueda sin los muelles, y los resultados no fueron los correctos porque los rodillos, cuando la rueda gira libre, empiezan a rebotar en el pequeño espacio que tienen entre los anillos y estos golpes que sufren los anillos producen vibraciones indeseadas. Además, durante el bloqueo no se podría asegurar que los rodillos se acuñaaran entre ambos anillos y garantizaran su bloqueo, necesitan de una fuerza externa que haga que se acüne para su función de bloqueo.

Por estas razones, las ruedas libres reales que se fabrican llevan incorporados los muelles, asegurándose el bloqueo y evitando el rebote de los rodillos y de vibraciones indeseadas, entonces se decide incorporarlos al modelo de rueda libre realista.

## 6.1.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Para que sea posible la simulación del modelo y funcionamiento como rueda libre hay que incorporarle al programa unas condiciones de contorno.

### 6.1.3.1. CONECTORES

La rueda libre solo va a tener un grado de libertad, que es el giro en Z (Figura 6-7), el mismo que el sistema completo.

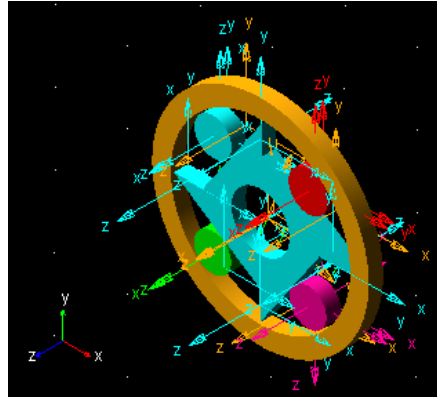


Figura 6-7: Rueda libre para mostrar la dirección del eje Z

Los conectores son articulaciones que dan la posibilidad de movimiento a los diferentes cuerpos y los que se coloquen solo deben de permitir este movimiento de giro en el eje Z. Se van a utilizar en casi todos los cuerpos dos tipos de conectores, el *revolute joint*, que impide movimiento de desplazamiento y solo permite el giro en un eje, o el *planar joint*, que es una articulación planar que permite que el cuerpo deslice en un plano y gire en el plano de otro elemento.

#### 6.1.3.1.1. ANILLO INTERIOR

El anillo interior, como se ha mencionado, solo se le debe permitir que gire en Z, por lo que se le coloca un *revolute joint* en su centro de masas, que le fija en su posición impidiendo los desplazamientos y solo permitiendo el giro mencionado.

#### 6.1.3.1.2. ANILLO EXTERIOR

Para el anillo exterior, se hace exactamente igual que en el anillo interior, basta con colocarle un *revolute joint* en su centro de masas, que asegura su movimiento de giro y evita su desplazamiento.

#### 6.1.3.1.3. RODILLOS

Para los rodillos, lo necesario es que durante el movimiento de giro no se salgan del plano paralelo que limitan los espesores de los anillos interior y exterior, ya que una rueda libre de cualquier fabricante tiene unas tapas a ambos laterales de los anillos para que estos rodillos no se salgan, y con ADAMS se simula colocando un *planar joint* a cada rodillo.

### 6.1.3.2. FUERZAS

#### 6.1.3.2.1. FUERZAS DE CONTACTO

Éste va a ser el punto crítico del sistema, la condición de contorno más importante. Estas fuerzas son las que se incorpora en ADAMS a los rodillos, siendo una la fuerza de contacto del rodillo con el anillo interior y otra con el exterior.

Estas fuerzas de contactos tienen varios parámetros, en los que primero se selecciona el tipo de contacto que para este caso es "Solid to Solid". Estas fuerzas se basan en la fuerza de contacto entre los rodillos y los anillos donde aparecen la fuerza normal y la de fricción, en la que, en tipo de fuerza de fricción se selecciona Coulomb. Los valores para los coeficientes

de rozamiento tanto estático como dinámico son 0.3 y 0.1 respectivamente, que son los que vienen por defecto del programa.

Se muestra a continuación una de ellas a modo de ejemplo:

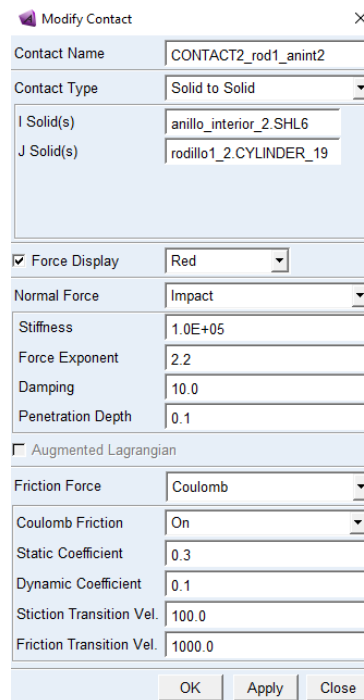


Figura 6-8: Fuerza de contacto en Adams

#### 6.1.3.2.2. PAR RESISTENTE

Este es el par que va a simular la resistencia que se opone al sistema de transmisión y el que se debe de vencer desde el par motor.

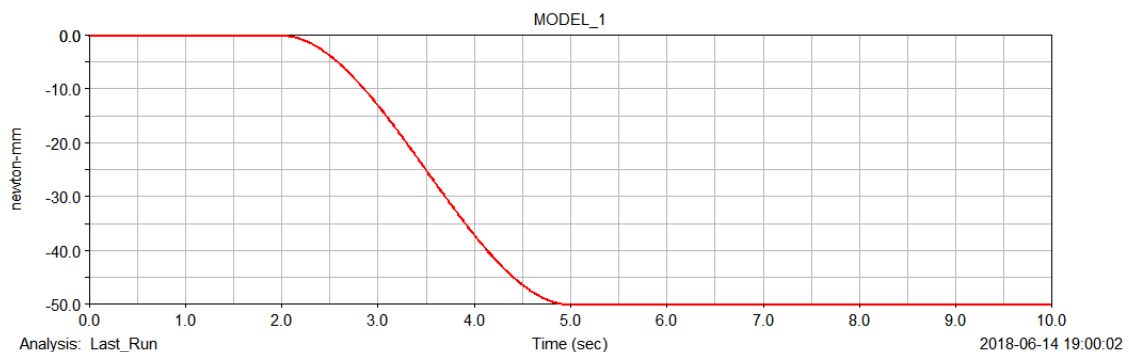


Figura 6-9: Curva del par resistente

La forma de la curva se debe a una función STEP que se le introduce para que no se introduzca todo el par resistente de golpe, es decir, el par comienza a introducirse en el instante  $t=2s$  y se va incrementando hasta el instante  $t=5s$  donde adquiere su valor final. Esto es beneficioso para su simulación con Adams.

### 6.1.3.2.3. PAR RELATIVO

Para modelizar el modelo ideal, sin tener en cuenta las fuerzas de contacto ni los elementos de bloqueo, es necesario un par entre ambos anillos que simule el funcionamiento de la rueda libre. Este par se introduce a través de una función STEP en función de la velocidad angular  $wz$ , que es la velocidad relativa que hay entre las pistas de los dos anillos, con la que se consigue que, cuando la rueda gira en el sentido de la velocidad mencionada se aplica un par, acelerando la pista del anillo exterior, y que cuando lo hace en el sentido contrario no se aplica par y no se ve acelerada la pista del anillo exterior.

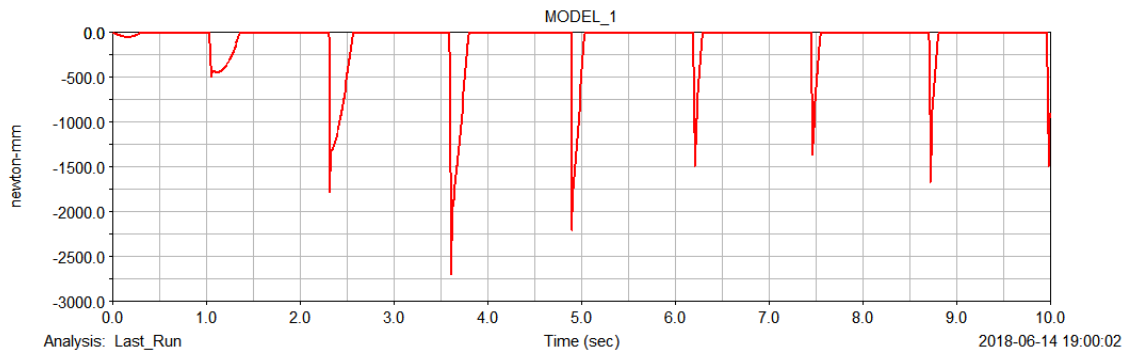


Figura 6-10: Par relativo de la rueda libre ideal

Los picos en la gráfica muestran cuando está ocurriendo la transmisión de par y cuando es nulo es que está girando libremente.

### 6.1.3.3. MOTOR

Como motor, se ha colocado en el anillo interior un *Motion* con un movimiento senoidal que simula el movimiento oscilante de entrada, que es el movimiento regulado por el epicicloidal.

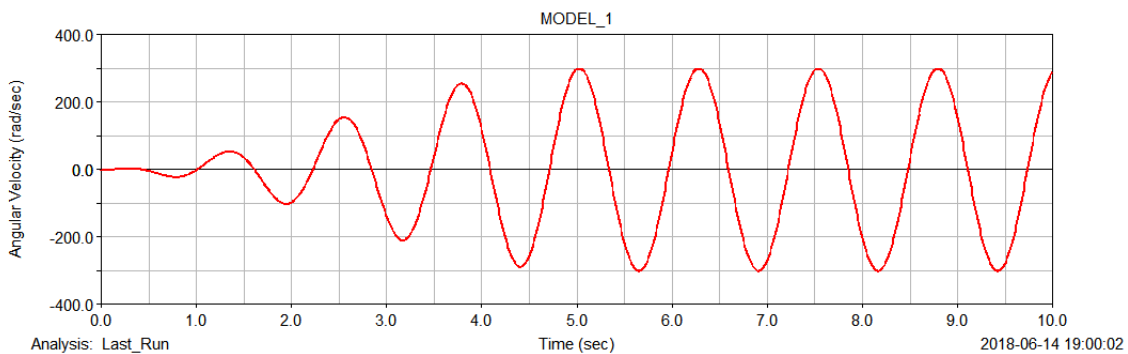


Figura 6-11: Motor para el movimiento de la rueda libre

Al igual que en las fuerzas, se le ha añadido una función STEP a la senoidal para que aumente progresivamente hasta su valor final (Figura 6-11).



#### 6.1.3.4. FUNCIÓN STEP

La función STEP es una función matemática que se va a utilizar tanto a la hora de aplicar el motor y el par resistente como se ha mostrado anteriormente. Como es una función de paso, lo que se pretende es que estas condiciones mencionados se produzcan progresivamente y no de repente, es decir, para que no se produzcan picos en la aceleración o fuerzas por pasar instantáneamente de un estado sin movimiento o sin fuerza a otro con movimiento y fuerzas, esto beneficiará a la hora de simular el sistema, ya que los integradores podrán realizar la simulación sin dar errores.

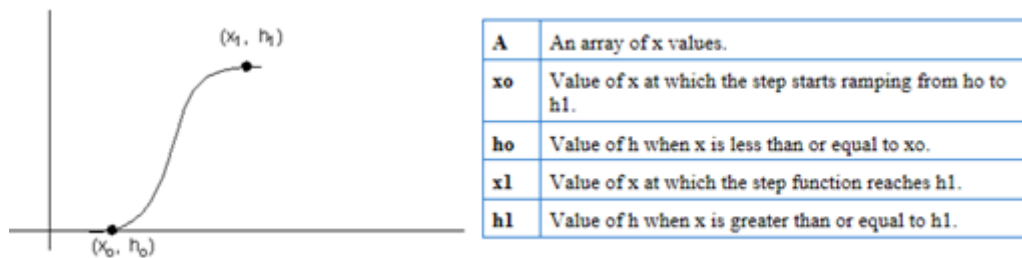


Figura 6-12: Referencia a la función STEP en Adams

La función, como se ve en la Figura 6-12, tiene varios parámetros que se le tiene que introducir. Primero se le introduce la variable sobre la que se quiere actuar, luego el valor inicial en el instante inicial y el valor final, que hace como multiplicador del valor de la función a la que se está añadiendo la función STEP, en el instante final.

A continuación, se muestra un ejemplo:

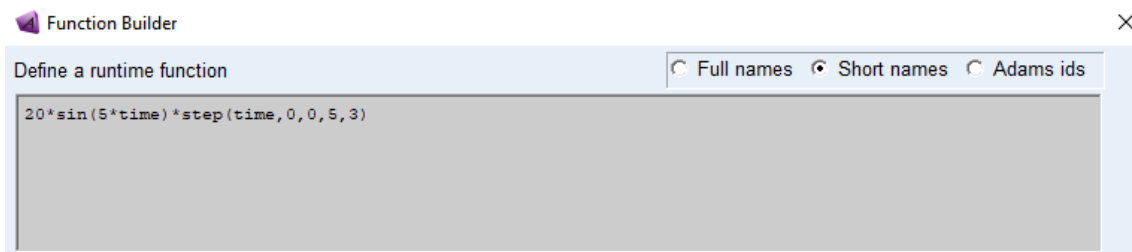


Figura 6-13: Function builder de Adams

En este STEP (Figura 6-13), la variable es el tiempo, en la que la senoidal en el instante  $t=0s$  es nula y en el instante  $t=5s$  vale su valor multiplicado por tres. Su gráfica correspondiente se muestra en la Figura 6-14.

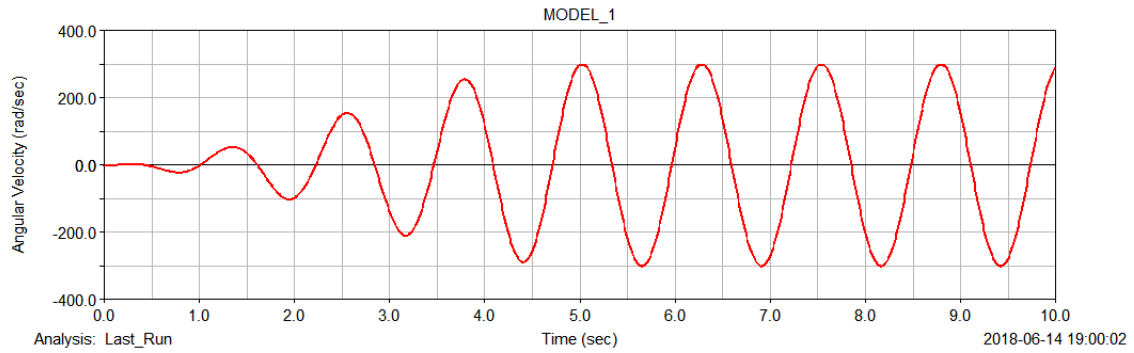


Figura 6-14: Ejemplo de función aplicando un STEP

#### 6.1.4. COMPROBACION Y VERIFICACIÓN DE LA RUEDA LIBRE

Por último, tras haber modelizado e introducido las condiciones de contorno se llega al paso de la simulación.

En este proceso, se simula primero la rueda libre ideal y posteriormente, la rueda libre realista, para comparar sus gráficas y verificar su funcionamiento.

- Rueda libre ideal:

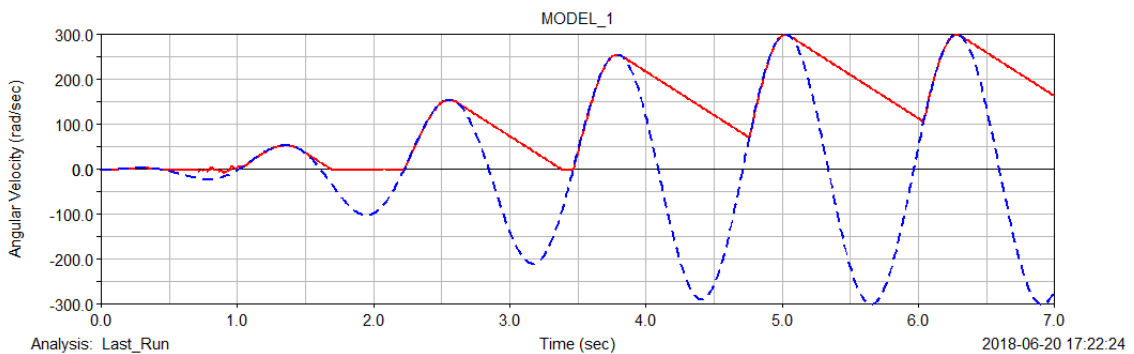


Figura 6-15: Funcionamiento como rueda libre ideal

- Rueda libre realista:

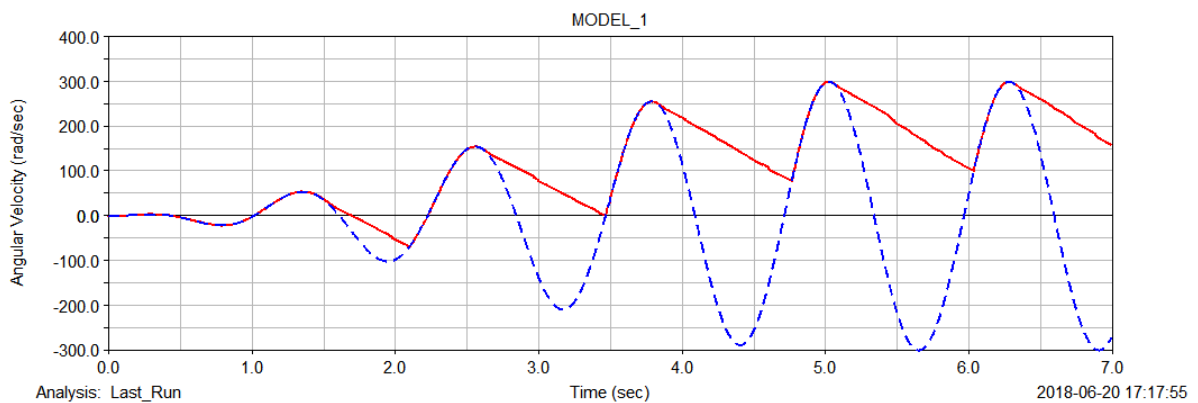


Figura 6-16: Funcionamiento como rueda libre realista

La curva azul en la Figura 6-15 y en Figura 6-16, simulan el motor con movimiento senoidal que se le ha impuesto al anillo interior mientras que las otras curvas son la velocidad con la que gira el anillo exterior, es decir, su funcionamiento como rueda libre. Cuando la curva de la velocidad angular del anillo exterior disminuye y se pierde velocidad quiere decir que es el momento en el que la rueda libre se encuentra girando libremente sin ninguna oposición por su propia inercia, mientras que cuando asciende, quiere decir que se encuentra girando a la velocidad del motor con un par resistente aplicado, es decir, es el momento en el que se transmite el par al anillo exterior, el cual es un par superior al par resistente y entonces hace que gire, entonces los elementos de bloqueo están haciendo su función en el caso de la rueda libre realista. El par resistente sería el par de oposición del vehículo al movimiento. Ambas gráficas muestran comportamientos correctos en el funcionamiento como rueda libre.

## 6.2. TREN EPICICLOIDAL

Como segundo paso, ahora se debe de tratar de modelizar un tren epicicloidal y de realizar su posterior verificación, ya que es un elemento clave como mecanismo inercial en el sistema de transmisión de potencia.

### 6.2.1. MODELADO

El tren epicicloidal es un sistema de engranajes, que para su uso en futuros estudios se va realizar un modelo parametrizado.

Adams View cuenta con un comando con el que introduciendo diferentes parámetros se realiza un tren automáticamente (*Planetary Gear*). En este estudio no se va a utilizar este comando porque si llega el momento en que se tuviera que cambiar algún parámetro, como puede ser el radio de alguno de los elementos o la inercia, se hace mucho más costoso.

Finalmente, se decide realizar el modelo con elementos de modelado parametrizados, porque en cuestión de segundos, se pueden cambiar los diversos parámetros necesarios.

Entonces el modelo realizado queda como (Figura 6-17):

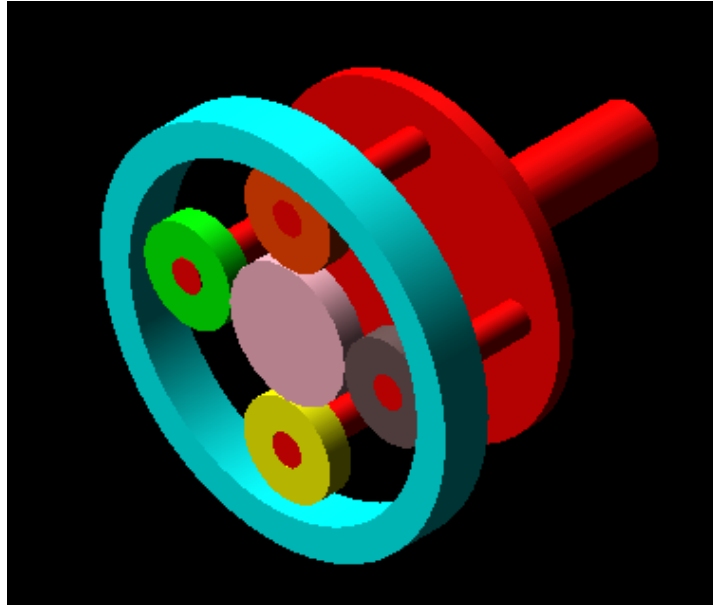


Figura 6-17. Modelo del tren epicycloidal en Adams

Consta de:

- Un porta satélites (elemento rojo)
- Una corona (elemento azul)
- Cuatro satélites (elementos verde, naranja, amarillo y gris)
- Un planeta (elemento rosa)

#### 6.2.2. JUSTIFICACIÓN DEL MODELO

Existen trenes epicycloidales con más y menos satélites, por lo que se ha decidido modelarlo con cuatro satélites, que es uno de los más comunes que hay en un gran número de máquinas, por lo tanto, se ajusta bastante a uno real.

##### 6.2.2.1. PORTASATELITES

El porta satélites (Figura 6-18) está formado por un eje de entrada que recibe el movimiento del mecanismo de accionamiento que es un movimiento senoidal de amplitud variable, cuatro barras que se unen con los cuatro satélites para transmitirles el movimiento y un disco usado como elemento de unión entre las cuatro barras y el eje de entrada.

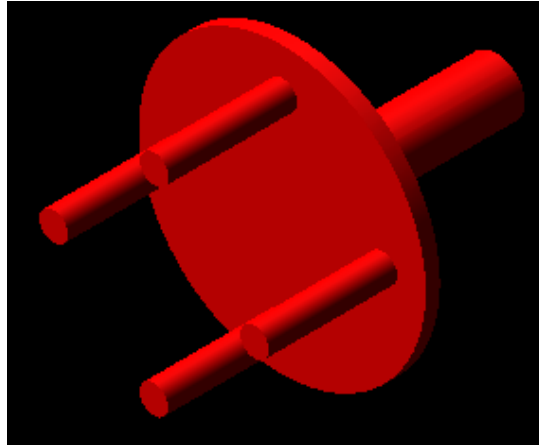


Figura 6-18: Modelo del porta satélites en Adams

#### 6.2.2.2. SATÉLITES

Los cuatro satélites son cilindros donde sus radios se encuentran parametrizados. Transmiten el movimiento del porta satélites mediante engrane al planeta y a la corona

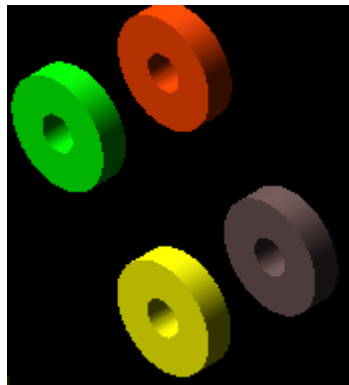


Figura 6-19: Modelo de los satélites en Adams

#### 6.2.2.3. CORONA

La corona se ha modelizado como la diferencia de dos cilindros, donde su radio exterior e interior se encuentran parametrizados. Recibe el movimiento de los satélites y es el elemento más importante inercialmente, por lo que sus dimensiones son importantes. Es el único elemento inercial.



Figura 6-20: Modelo de la corona en Adams

#### 6.2.2.4. PLANETA

El planeta es un cilindro cuyo radio esta parametrizado y recibe el movimiento por engrane de los satélites y éste se lo transmite mediante un eje solidario a los anillos interiores de las ruedas libres.

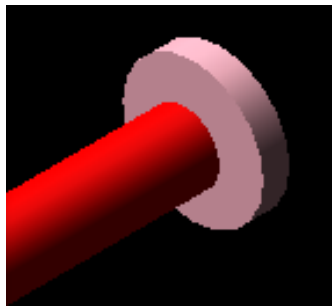


Figura 6-21: Modelo del planeta con el eje solidario en Adams

### 6.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Para que sea posible su funcionamiento cinemático, hay que introducirle ciertos conectores y que hagan su función de engranajes entre ellos.

El tren epicicloidal al igual que la rueda libre, solo tiene un grado de libertad, el giro en el eje Z (Figura 6-7) de todos sus elementos. Se explica a continuación.

#### 6.2.3.1. CONECTORES

Para conseguir una conexión adecuada de los elementos, primero se van a colocar los *joints*, sobre los elementos para que permitan el giro en el eje Z e impidan su desplazamiento en cualquiera de los tres ejes.



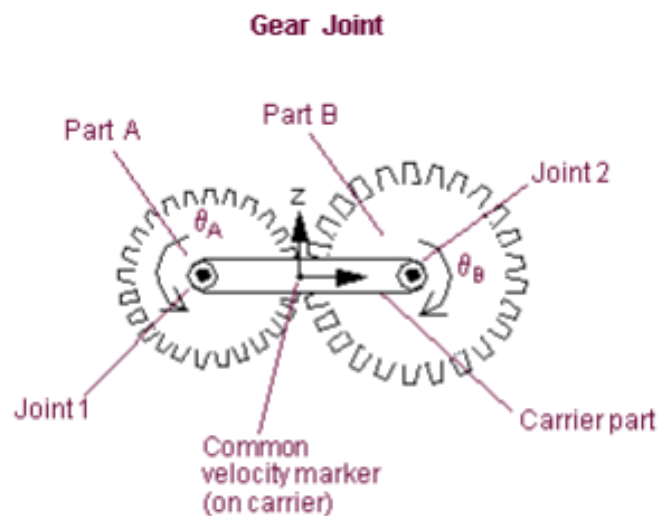
Figura 6-22: Joints de Adams

Pero, ahora bien, hay que especificar el tipo de movimiento que se tiene que dar, que en este caso es el de engrane para el cual hay que utilizar, dentro del comando *couplers*, el *gear*.



Figura 6-23: Couplers en Adams

Para realizar este comando correctamente hay que seguir unos pasos en los que hace falta dibujar elementos auxiliares que unan los elementos que se quieren engranar y sus *joints* respectivamente como se muestra en la Figura 6-24 obtenida de la ayuda de MSC.ADAMS:



- Joint 1 connects Part A to carrier part
- Joint 2 connects Part B to carrier part
- Common velocity marker is fixed in carrier part so its z-axis points along the direction of common movement for the geared parts.

Figura 6-24: Referencia al Gear Joint de Adams

### 6.2.3.1.1. PORTA SATÉLITES

Para que sea posible su movimiento se le ha colocado un *revolute joint* al comienzo del eje de entrada respecto al *ground*, de esta manera se asegura su único movimiento que es el giro en Z, su único grado de libertad. Además, es el que recibe el movimiento senoidal del mecanismo de accionamiento. En la Figura 6-25 se muestra su velocidad angular.

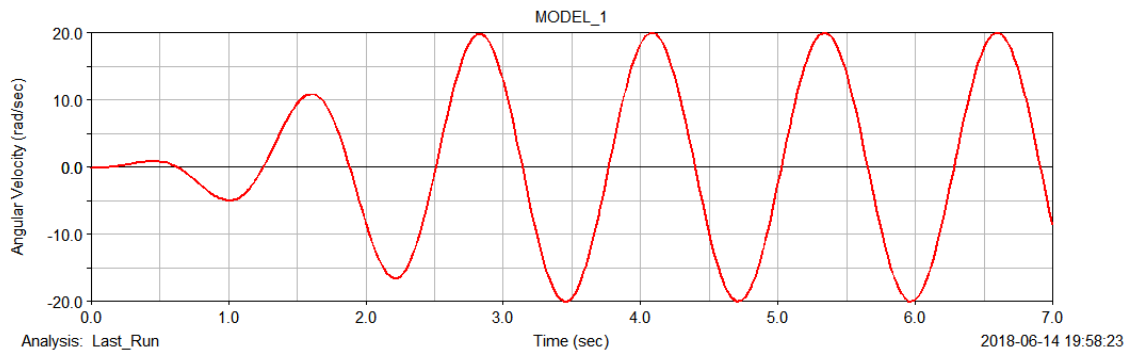


Figura 6-25: Movimiento del porta satélites

### 6.2.3.1.2. SATÉLITES

Para permitir su giro en Z y que, además, gire solidario al porta satélites, hay que incorporarle un *revolute joint* igual que en el anterior apartado. Para esta ocasión, el *joint* tiene que ser del satélite respecto al porta satélites uniendo ambos cuerpos; los satélites girarán junto al porta satélites en su posición asignada, que siendo más específico, el satélite se mueve en un eje móvil teniendo a la vez, la posibilidad de girar sobre sí mismo en el eje Z.

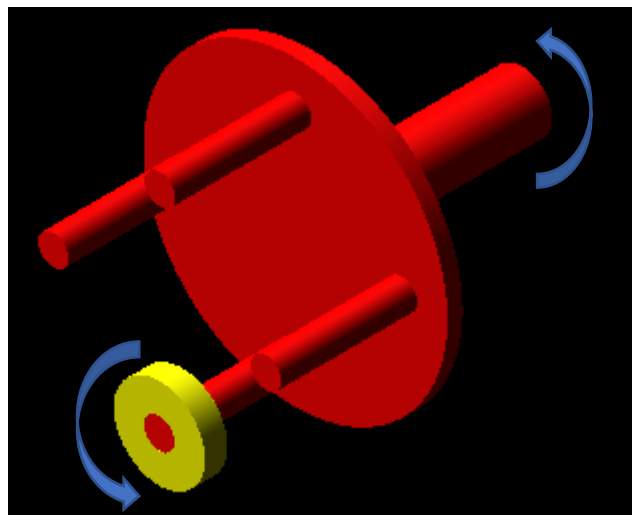


Figura 6-26: Movimiento del satélite con el porta satélites

Además, cada uno de los cuatro satélites se encuentra engranando a la vez con el planeta y con la corona, para los cuales hay que hacer dos *gears*, uno para cada uno con los cuatro satélites. En la Figura 6-27 se muestra su velocidad angular y se observa que es diferente a la del porta satélites.



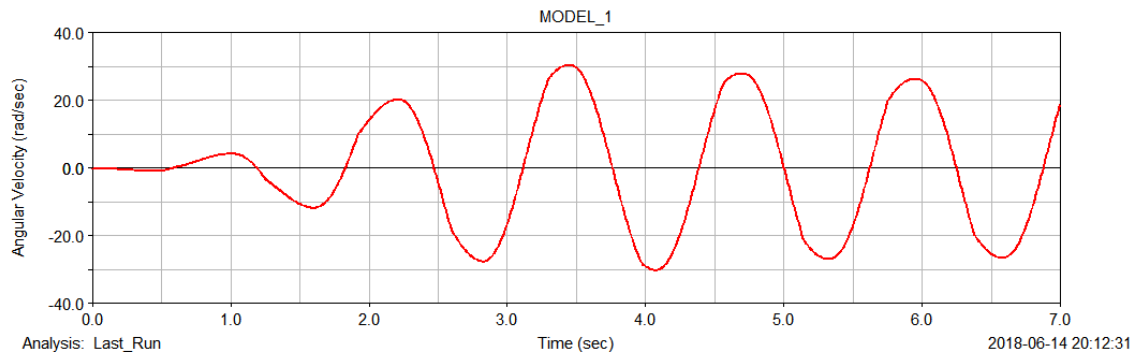


Figura 6-27: Movimiento del satélite

#### 6.2.3.1.3. CORONA

Para permitirle el movimiento basta con incorporarle un *revolute joint* como en el porta satélites, con respecto al *ground*, permitiendo solo su giro en Z y evitando su desplazamiento. A su vez, tiene un *gear* con cada uno de los cuatro satélites. En la Figura 6-28 se muestra su velocidad angular.

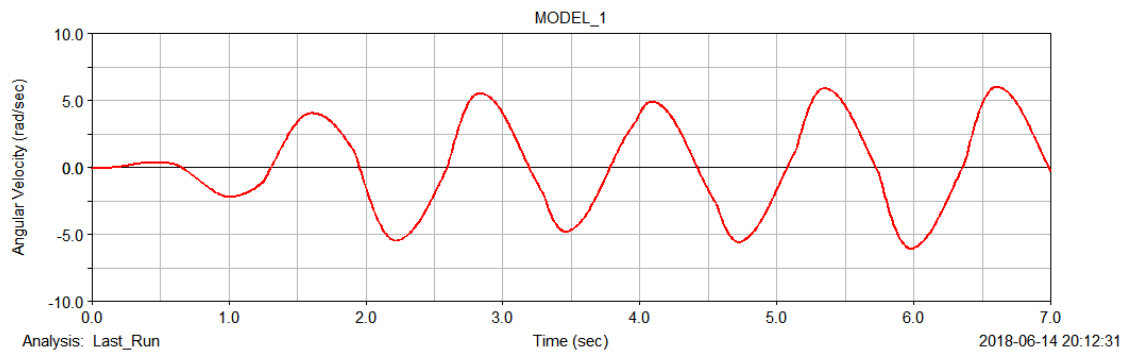


Figura 6-28: Movimiento de la corona

#### 6.2.3.1.4. PLANETA

Con el planeta se repite la misma acción que con la corona y el porta satélites, se coloca un *revolute joint* respecto al *ground*, y solo se permite su giro en Z.

En cuanto su engrane, tiene cuatro *gears*, uno con cada uno de los cuatro satélites de los que recibe el movimiento. En Figura 6-29 se muestra su velocidad angular y se observa que no es la misma que en el resto de elementos del tren epicicloidal.

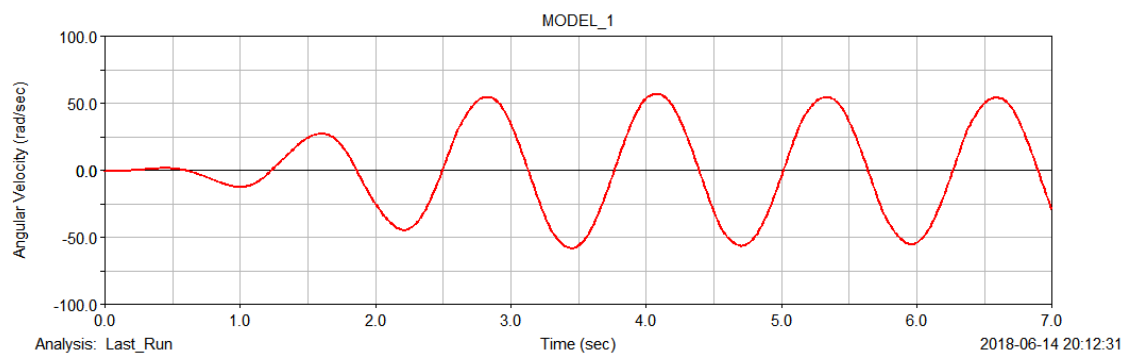


Figura 6-29: Movimiento del planeta

### 6.2.3.2. MOTOR

Para transmitir el movimiento, se posiciona sobre el *revolute joint* previamente colocado en el eje de entrada, cuyo movimiento senoidal será transmitido con los conectores anteriores a todo el sistema con sus respectivas relaciones de transmisión.

Su gráfica correspondiente es la de la Figura 6-25 mostrada en el apartado 6.2.3.1.1. del porta satélites

### 6.2.4. COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL TREN EPICICLOIDAL

Una vez modelado el tren epicicloidal y puesto todas sus condiciones de contornos, se pasa a su simulación y su posterior comprobación.

Se va a comprobar su comportamiento cinemático y que las diferentes velocidades que se transmiten entre los elementos por engrane cumplan con la ecuación de Willis. La fórmula de Willis determina las velocidades angulares obtenidas en un tren de engranajes epicicloidales en función de sus tres componentes, relacionadas en la siguiente ecuación:

$$w_c = \mu \cdot w_p + (1 - \mu) \cdot w_{ps}$$

$$\mu = -\frac{Z_1}{Z_3}$$

$w_p$ : Velocidad angular del planeta

$w_{ps}$ : Velocidad angular del porta satélites

$w_c$ : Velocidad angular de la corona

$\mu$ : Parámetro que depende de la geometría y del tipo de tren

$Z_1, Z_3$ : Radio del planeta y corona respectivamente

Entonces, de la simulación se obtiene la gráfica de las velocidades angulares, que son las curvas mostradas en el anterior punto de los diferentes elementos:

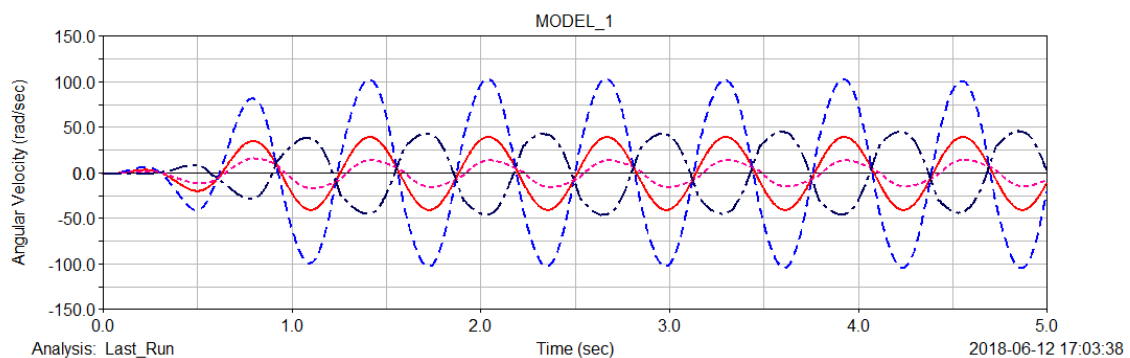


Figura 6-30: Velocidades angulares de los elementos del tren epicicloidal

- Porta satélites (Curva roja)
- Satélite (Curva azul oscuro)
- Planeta (Curva azul)
- Corona (Curva rosa)

Ahora se comprobará si se cumple con la ecuación de Willis y se da por bueno el modelo.

1. Se multiplican las curvas de la velocidad angular del planeta y del porta satélites por el parámetro de relación entre radios  $\mu$  y se obtiene:

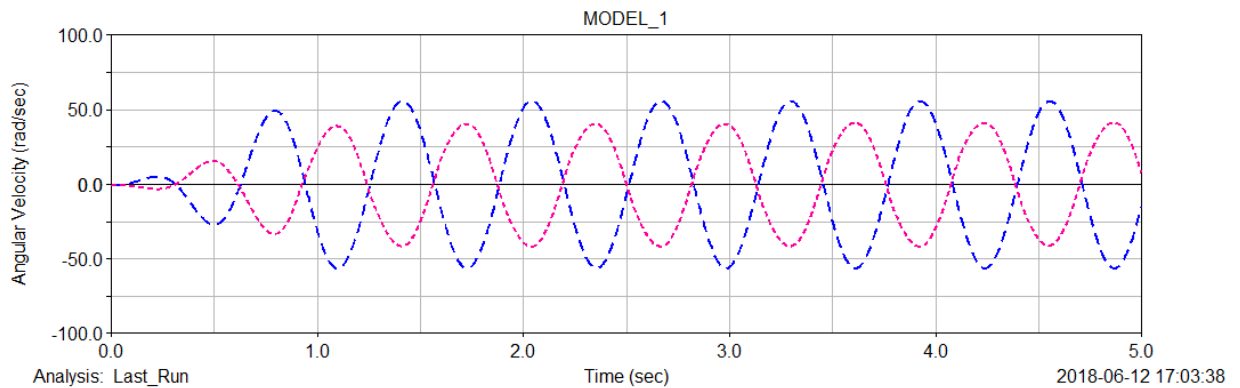


Figura 6-31: Velocidades del porta satélites y planeta escaladas

- Porta satélites (Curva rosa)
- Planeta (Curva azul)

2. Se suman ambas curvas y debe de coincidir con la curva de la velocidad angular de la corona.

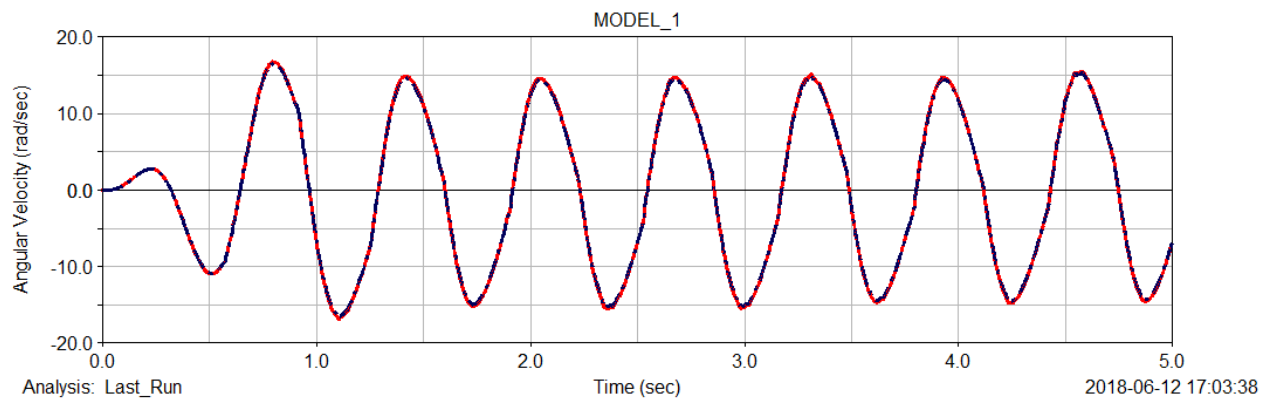


Figura 6-32: Suma de las velocidades del porta satélites y planeta

- Corona por Willis = Corona por Adams del modelo

Como era de esperar, la suma coincide con la curva de la corona proporcionada por Adams. Ahora se va a hacer otra comprobación, pero con el planeta bloqueado, que, si se cumple con la ecuación de Willis, la velocidad de la corona debería ser la misma que la velocidad del porta satélites multiplicado por su parámetro de relación.

De manera analítica, se conoce entonces la velocidad del planeta que es cero al estar bloqueado y la velocidad del porta satélites, quedando como incógnita la de la corona:

$$w_c = \left(-\frac{40}{120}\right) \cdot 0 + \left(1 - \left(-\frac{40}{120}\right)\right) \cdot 20 = 26,6$$

Que, comprobándolo gráficamente con Adams, se obtiene el mismo resultado:

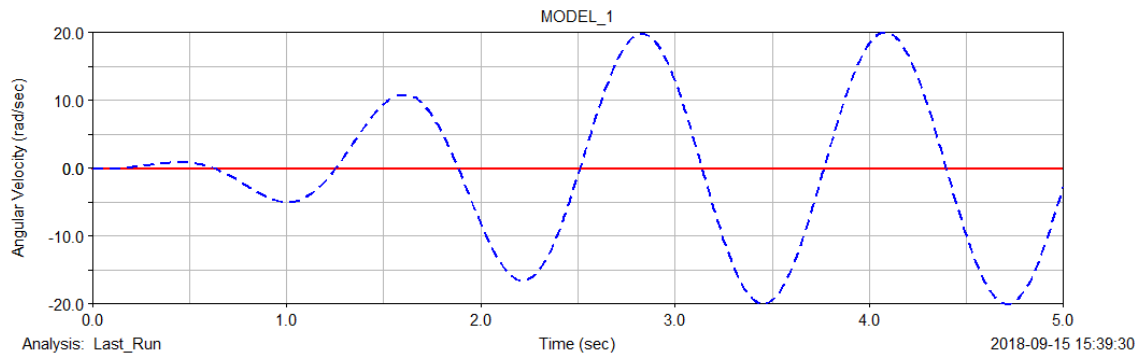


Figura 6-33: Velocidades del planeta y porta satélites sin escalar

- Porta satélites (Curva azul)
- Planeta (Curva roja)

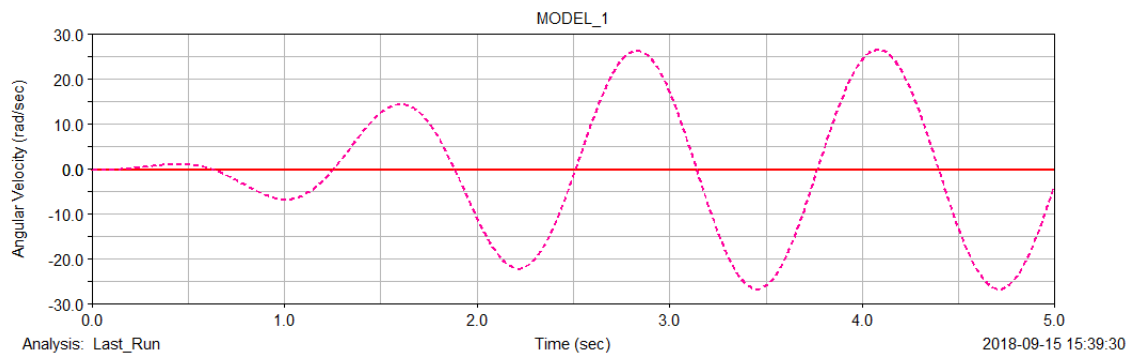


Figura 6-34: Velocidad escalada del porta satélites

- Porta satélites (Curva rosa)
- Planeta (Curva roja)

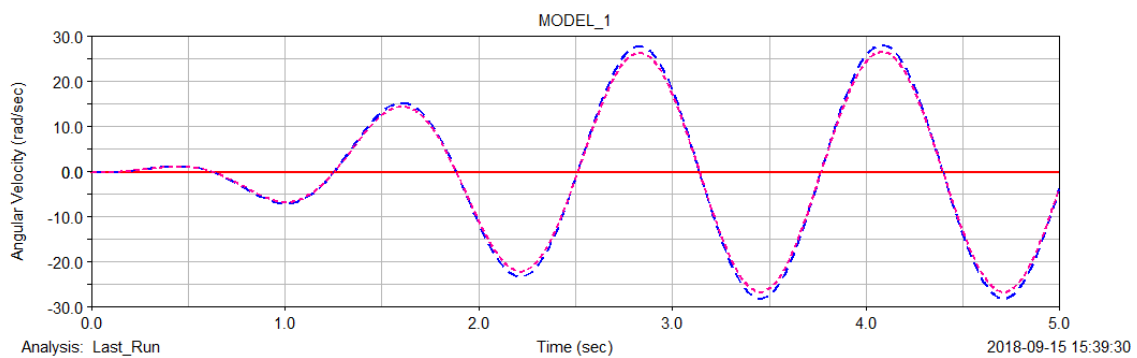


Figura 6-35: Velocidad de la corona y del porta satélites

- Porta satélites (Curva rosa)
- Planeta (Curva roja)
- Corona (Curva azul)

Justo se cumple, el valor que se obtiene de la ecuación de Willis es 26,6 que es el valor aproximadamente del pico de la curva, por lo que gráficamente se ha cumplido la comprobación.

### 6.3. TREN EPICICLOIDAL CON EL MECANISMO RECTIFICADOR (DOS RUEDAS LIBRES)

Continuando con la consecución del modelo final, el siguiente paso es incorporar una segunda rueda libre.

El objetivo de este punto es la de crear un modelo mucho más eficiente, un modelo que sea capaz de aprovechar tanto la parte positiva como la negativa del movimiento senoidal del planeta que le da el tren epicicloidal. Con esto lo que se consigue es que se transmita par en todo momento.

#### 6.3.1. MODELADO

En esta parte, lo que se lleva a cabo es juntar los modelos anteriormente verificados, el de la rueda libre y el tren epicicloidal y unirlos en un único modelo, pero con la salvedad de que se añade una segunda rueda libre.

Lo primero, para que esto funcione, hay que colocar una segunda rueda libre con coherencia, ya que se debe de tener una rueda libre que sea idéntica en todas sus dimensiones y características como su inercia. Por ello, con Adams lo que se hace es duplicar la rueda modelada y desplazarla, una acción fácil dentro del programa.

Pero con esto no bastaría, ya que se seguiría aprovechando solo media parte de la señal senoidal, por lo que para solucionar esto, se gira el anillo interior de la segunda rueda libre  $180^\circ$  en el eje Y (Figura 6-7). Al realizar este giro, se consigue que los rodillos se bloqueen en el sentido contrario al que lo hacía antes y como lo hace la primera rueda libre.

Para aclarar esto, la Figura 6-36 muestra el modelo final descrito con dos ruedas libres reales:

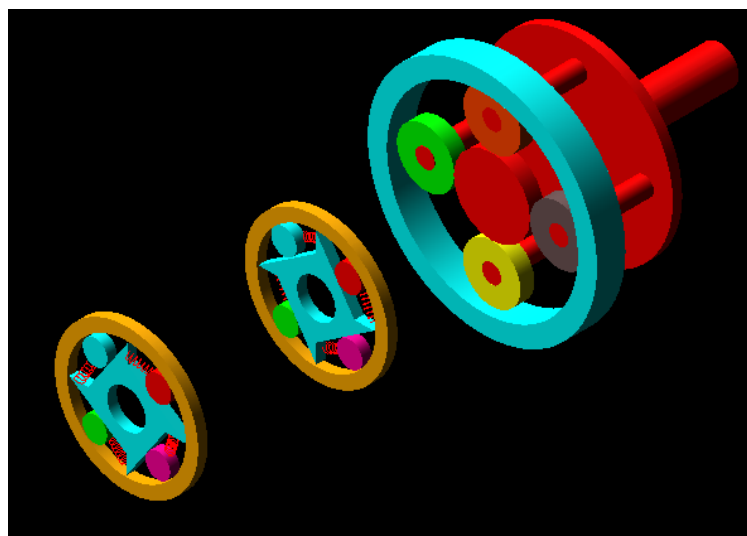
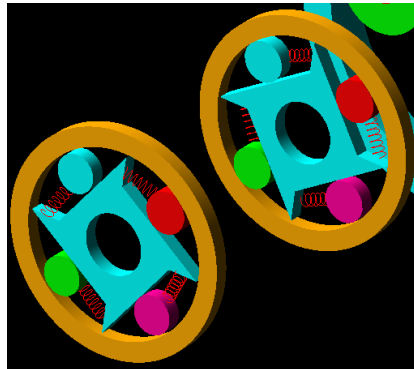


Figura 6-36: Modelo tren epicicloidal con dos ruedas libres realistas en Adams

Para aclarar todavía más el giro que se le ha dado al anillo interior de la segunda rueda, se hace una ampliación (Figura 6-37):



*Figura 6-37: Ampliación sobre las dos ruedas libres realistas*

Así, los rodillos de la primera rueda libre bloquearán en el sentido de giro horario y los de la segunda rueda libre en el sentido anti horario.

Para el caso de las ruedas libres ideales, esta parte es indiferente porque depende de su par relativo entre anillos.

### 6.3.2. CONDICIONES DE CONTORNO

#### 6.3.2.1. CONECTORES

Lo más importante en este modelo es unir los elementos de manera adecuada y que se ajusten a un modelo real como se lleva haciendo en todo momento.

En un modelo real, existe un eje que se encuentra solidario al planeta, y éste a los dos anillos interiores porque los tres elementos se tienen que mover con la misma velocidad angular, siendo el punto más importante de este modelo.

Había dos soluciones para adoptar este sistema:

- La primera era modelizar este eje y hacer que el planeta y los dos anillos interiores fueran un solo cuerpo (Figura 6-38). En Adams, se puede pensar que esto es beneficioso, porque al simplificar el número de elementos que tenemos, también reducimos que el número de ecuaciones el sistema de compilación de Adams debe resolver, por lo que le sería mucho más fácil obtener los resultados.

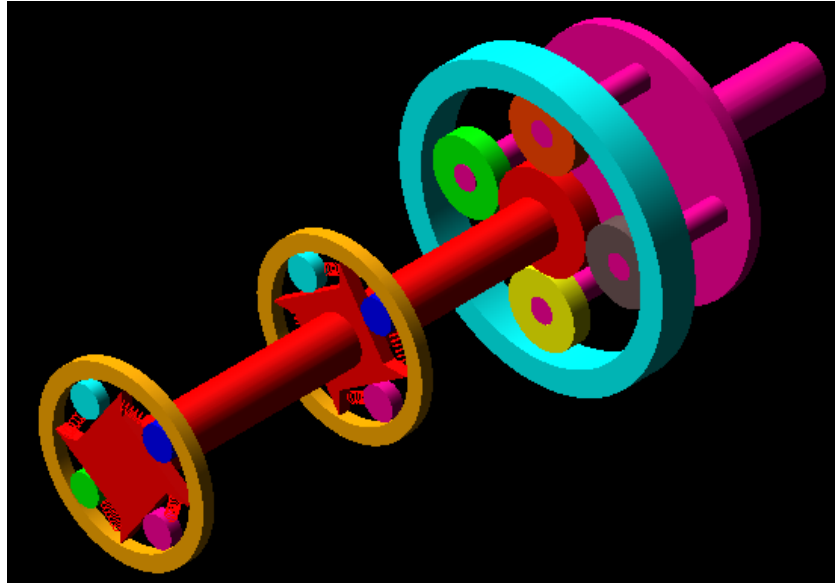


Figura 6-38: Modelo con eje de salida del tren solidario a las ruedas libres realistas

- La segunda opción es una más simple. Lo que se quiere es que funcione cinemáticamente, por lo que no hace falta que se parezca físicamente, entonces se decide eliminar el eje y dejar el planeta y los dos anillos interiores como tres elementos diferentes (Figura 6-39). Para conseguir que se muevan estos tres elementos simultáneamente existe una manera también muy sencilla para unir los tres elementos, que consiste en colocar dos *fixed joint*. Este *joint* hay que aplicarlo por parejas y de un cuerpo respecto otro, es decir, uno el planeta con el primer anillo interior y otra entre los dos anillos interiores, y así, se obliga al cuerpo que no tiene movimiento a adquirir exactamente el mismo movimiento que el cuerpo móvil. Entonces, se pone un *fixed joint* fijando el planeta (cuerpo móvil) respecto el primer anillo interior (cuerpo inmóvil) y un segundo *fixed joint* fijando el primer anillo interior (ahora cuerpo móvil) respecto al segundo anillo interior (cuerpo inmóvil).

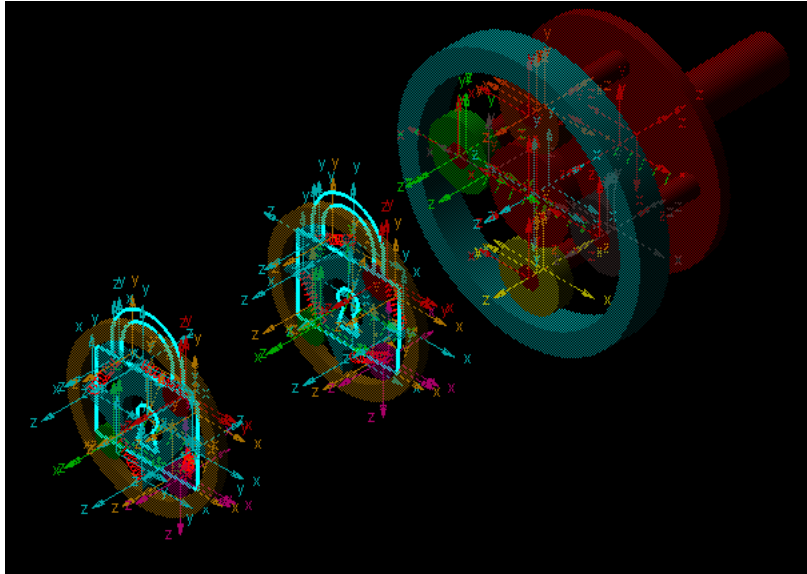


Figura 6-39: Modelo sin eje de salida del tren epicicloid

#### 6.3.2.2. PARES

Dentro de los pares, se conservarán los pares resistentes que se habían puesto y explicado en el punto 6.1.3.2 de la rueda libre, que, por el momento vale para comprobar el buen o mal funcionamiento del modelo.

#### 6.3.3. COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN

Como se ha explicado al principio, este modelo ahora debe ser capaz de transmitir par en todo momento, una rueda transmitiendo en el lado positivo de la onda y la otra en el negativo. Por lo que, desde ahora, a la rueda libre que aprovecha la parte positiva de la senoidal será llamada rueda libre positiva y la que aprovecha la parte negativa, rueda libre negativa.

Para mostrarlo más claro, se muestran a continuación unas gráficas con lo mencionado, partiendo del uso de las ruedas libres ideales y pasando a las reales:

- Movimiento senoidal del planeta:

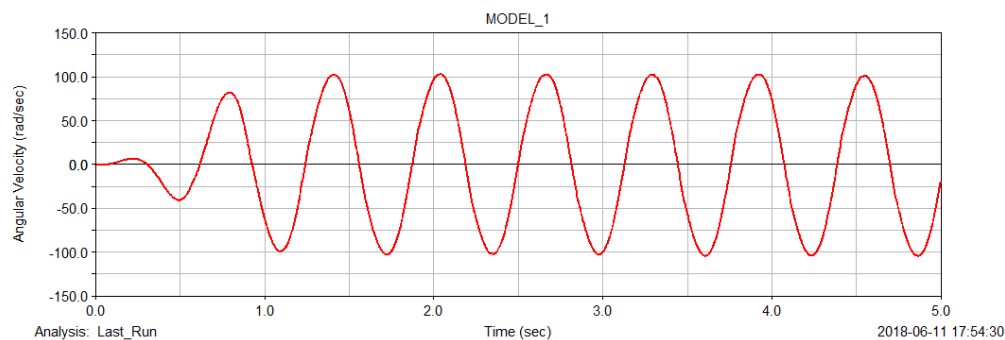


Figura 6-40: Velocidad angular variable del planeta



- Sistema con la rueda libre ideal positiva:

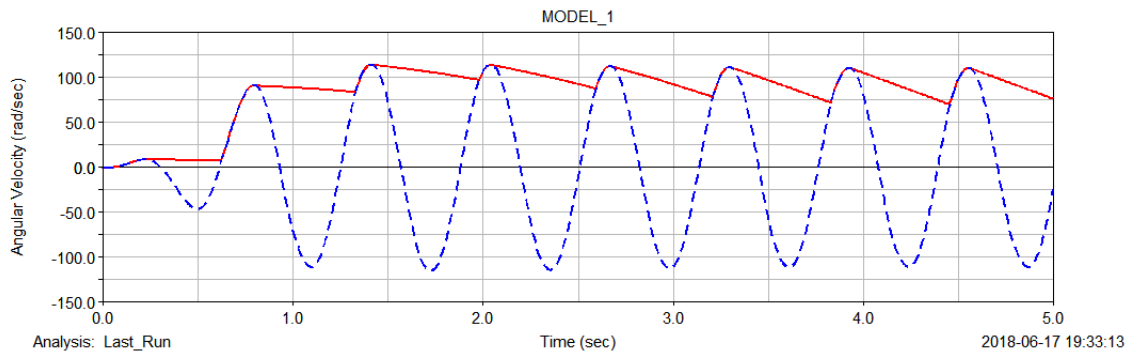


Figura 6-41: Sistema con la rueda libre ideal positiva

- Sistema con la rueda libre realista positiva:

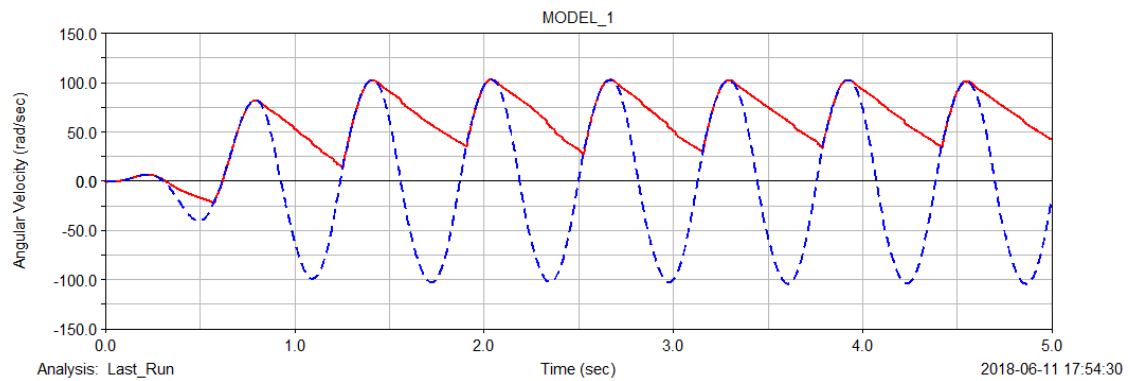


Figura 6-42: Sistema con la rueda libre realista positiva

- Sistema con la rueda libre ideal negativa:

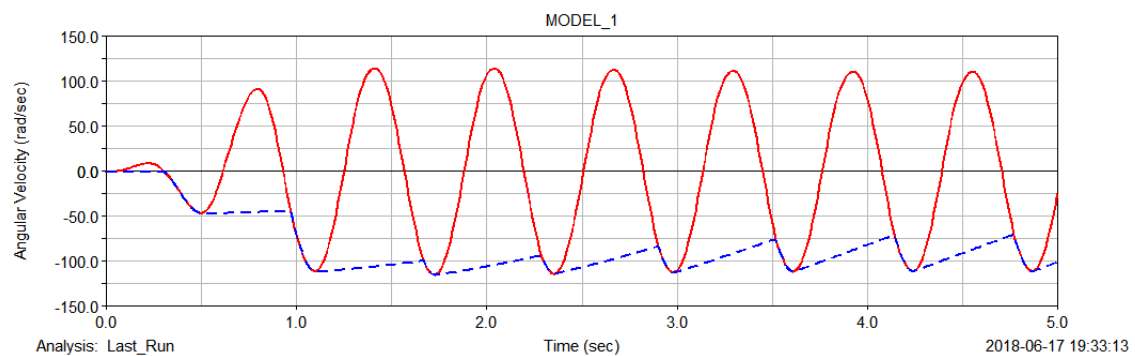


Figura 6-43: Sistema con la rueda libre idea negativa

- Sistema con la rueda libre realista negativa:

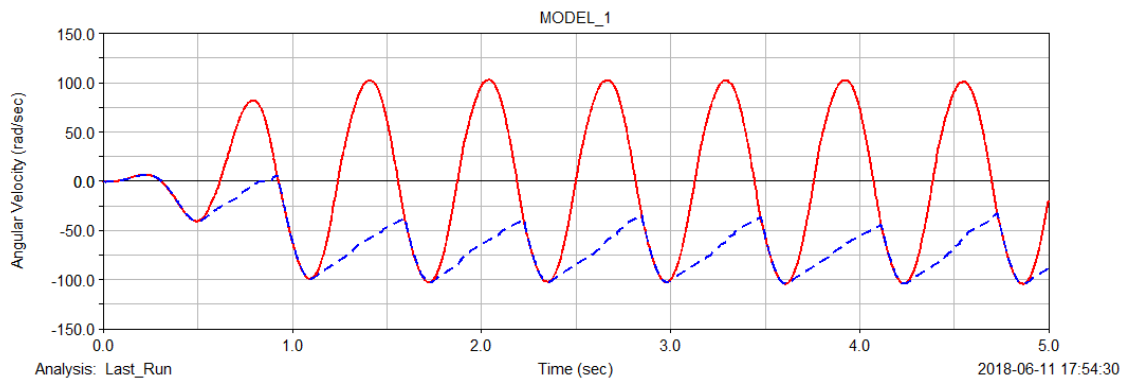


Figura 6-44: Sistema con la rueda libre realista negativa

- Sistema con las dos ruedas libres ideales, positiva y negativa:

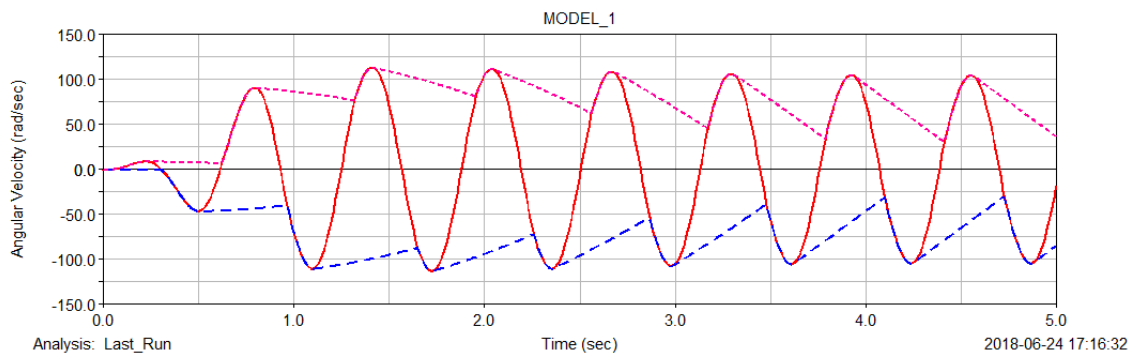


Figura 6-45: Sistema con las dos ruedas libres ideales

- Sistema con las dos ruedas libres realistas, positiva y negativa:

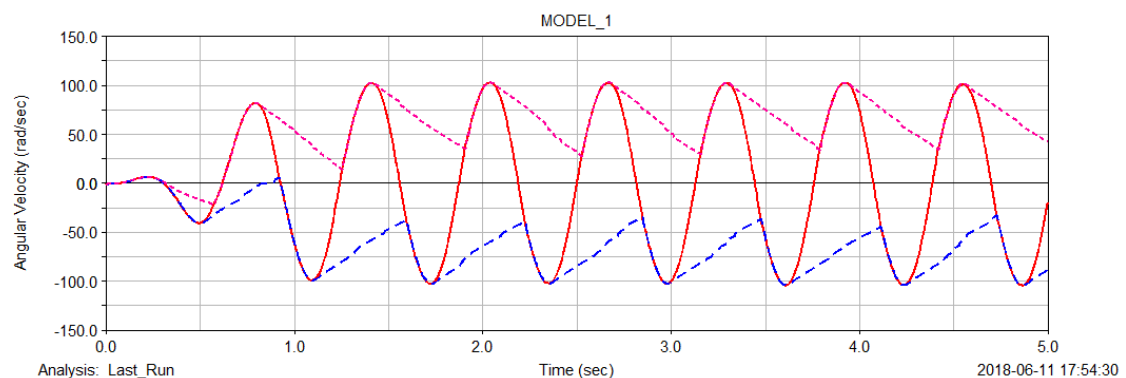


Figura 6-46: Sistema con las dos ruedas libres realistas

En referencia a la última gráfica (Figura 6-46), se muestra que el sistema hace lo que se había previsto al principio. En la parte positiva de la senoidal, cuando la rueda positiva (curva rosa) coincide con la velocidad con el movimiento del planeta se transmite par; al mismo instante, la rueda negativa (curva azul) está disminuyendo su velocidad porque está girando libremente por inercia.

Poniéndose en el caso de la rueda negativa ocurre lo mismo.

Finalmente, se ve que tanto las ruedas libres ideales como las realistas tienen un funcionamiento correcto.

#### 6.4. MECANISMO RECTIFICADOR

El modelo que se tiene hasta ahora todavía no tiene utilidad porque no se puede aprovechar los dos pares que se tienen (el positivo y el negativo), que corresponde cada uno a una rueda libre debido a que tienen sentidos diferentes.

Hasta el momento se tiene un modelo del sistema que cuenta con un tren epicycloidal y dos ruedas libres (Figura 6-36), pero está incompleto. Para poder aprovechar el par que se produce en ambos sentidos de giro del planeta del tren, hace falta incorporar una serie de engranajes, que junto con las ruedas libres formarán el mecanismo rectificador.

Con el mecanismo rectificador, el eje de salida se ve impulsado dos veces por el planeta, lo que quiere decir, que por cada ciclo de la onda senoidal aparecerán dos crestas en la curva de la velocidad angular del eje de salida. Este efecto tendrá como resultado una homogeneización del movimiento de salida.

El diseño del mecanismo rectificador constará de tres engranajes y de las dos ruedas libres. A la primera rueda libre (la más cercana al tren) se le acoplará un engranaje que transmitirá el movimiento y el par positivo; a la segunda rueda libre se le acoplarán dos engranajes que transmitirá el movimiento y el par negativo.

La razón por la que a la segunda rueda libre se le acoplan dos engranajes es que al tener la primera un engranaje, su movimiento se invierte, y si se quiere obtener el mismo movimiento en el eje de salida transmitido por la segunda rueda libre, éste se debe de invertir dos veces.

La necesidad de utilizar unos engranajes es porque los engranajes del eje de salida no pueden ir directamente engranados a los dos anillos exteriores de las ruedas libres a la vez, porque sería un error en el diseño. Si no se colocaran se contrapondrían los movimientos de giro sin dejar que las ruedas giraran libremente.

Como resultado tenemos un mecanismo que es completamente mecánico, aunque no impide la incorporación de elementos electrónicos.

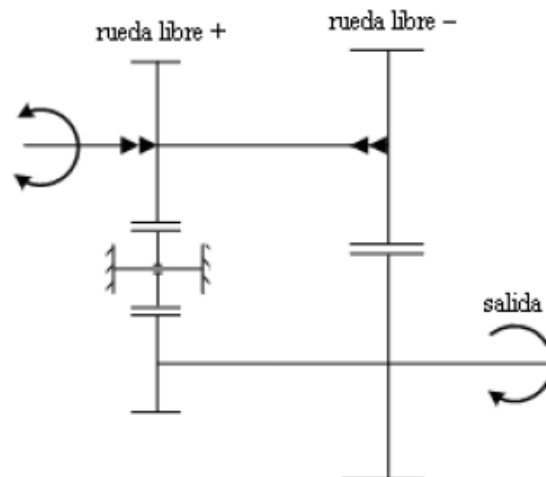


Figura 6-47: Esquema de un mecanismo rectificador

En la Figura 6-47, se muestra un esquema de cómo va a ser el rectificador que se va a modelar. Se observa, como se ha comentado anteriormente, que se van a diferenciar las dos ruedas libres, una es la positiva que aprovecha la parte positiva de la senoidal (par positivo) y la otra la negativa, que aprovecha la parte negativa (par negativo).

En el eje de entrada aparece un par tanto en sentido horario y antihorario por su movimiento senoidal originado por el mecanismo de accionamiento y transmitido a través del tren epicicloidal, mientras que en el eje de salida solo tiene que haber un par en un solo sentido. Esto es conseguido gracias a los componentes explicados del mecanismo, que en su conjunto rectifican el movimiento senoidal en un movimiento unidireccional y en un solo sentido.

La condición para que este sistema sea efectivo es que ambas ruedas deben de transmitir el mismo par al eje de salida. Para que esto ocurra, se debe de cumplir que los elementos que conforman la transmisión del par positivo de la senoidal, tengan la misma relación de transmisión que los elementos de la transmisión del par negativo de la senoidal, por ello, los engranajes son la clave en este punto.

En este modelo, para su simplificación, se ha decidido hacer las ruedas libres de idéntico tamaño y dimensiones, y los engranajes solidarios al eje de salida también son idénticos. Para salvar la distancia libre entre las ruedas libres y los engranajes del eje de salida, se han colocado los engranajes como se ha explicado anteriormente.

Para que cumpla la condición de que tiene que haber la misma relación de transmisión entre las ruedas libres y los engranajes del eje de salida, los engranajes intermedios deben de tener un tamaño e inercia específica. Los dos engranajes de la segunda rueda libre son iguales y tiene un radio e inercia cada uno igual a la mitad del radio e inercia del engranaje de la primera rueda libre. Así, la inercia total de los dos engranajes de la segunda rueda libre es la misma que la del engranaje de la primera.

Teniendo en cuenta estas características, la relación de transmisión será la misma para ambas ruedas libres y transmitirán el mismo par al eje de salida y en un solo sentido. Esto se muestra en la Figura 6-49.

#### 6.4.1. MODELADO RECTIFICADOR

El modelado del rectificador va a consistir en seguir añadiendo componentes al modelo que se ha ido haciendo anteriormente, es decir, sobre el modelo del tren epicicloidal con las dos ruedas libres, se van a modelar los engranajes y el eje de salida.

##### 6.4.1.1. ENGRANAJES

Los engranajes se modelizan como cilindros (Figura 6-48), con todas sus dimensiones parametrizadas como se ha estado haciendo hasta ahora.

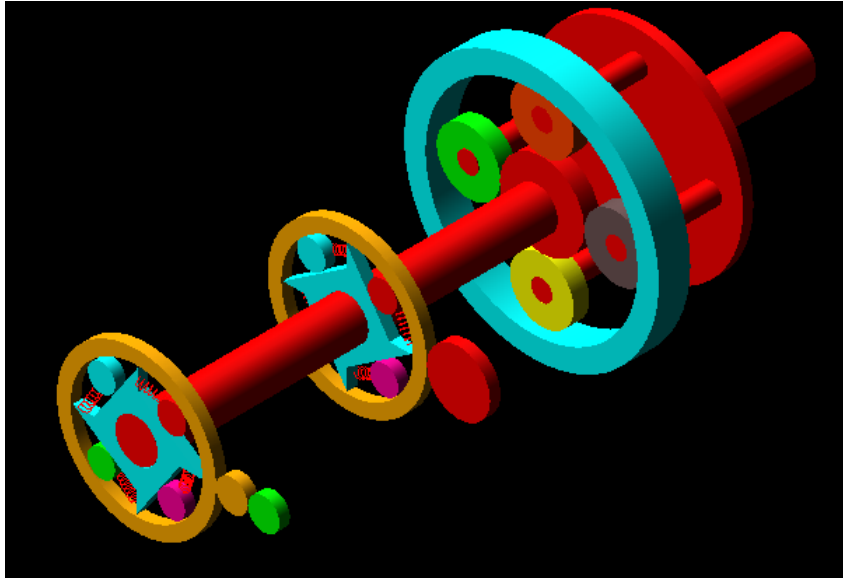


Figura 6-48: Modelo con los tres inversores

#### 6.4.1.2. EJE DE SALIDA

El eje de salida como se ha mencionado con anterioridad, va a ser un eje con dos engranajes solidarios, también modelizados como cilindros y sus radios parametrizados. Además, se unirá todo como un único sólido para facilitar la compilación durante la simulación.

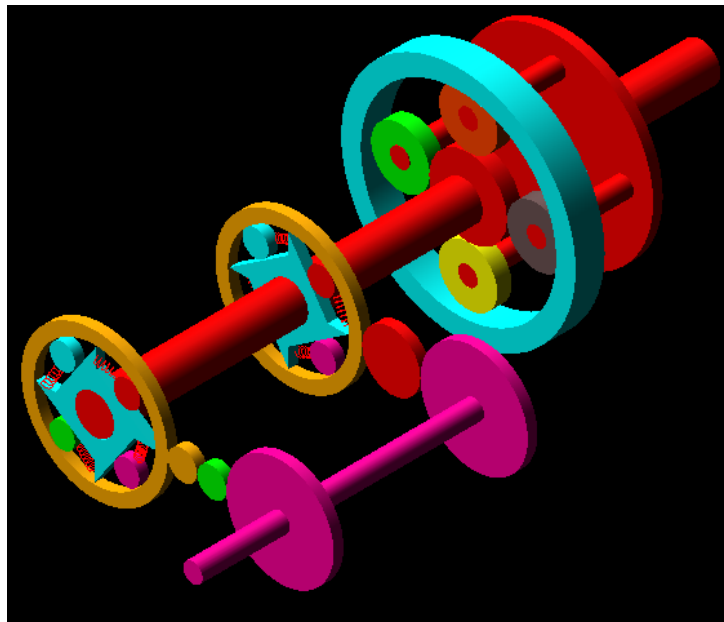


Figura 6-49: Modelo con los tres inversores y el eje de salida

## 6.4.2. CONDICIONES DE CONTORNO

### 6.4.2.1. CONECTORES

Para conectar los elementos modelados, al igual que en muchos casos anteriores, son necesarios la introducción de varios conectores.

#### 6.4.2.1.1. INVERSORES

Los inversores tienen que funcionar como engranajes, entonces para otorgarles ese movimiento se conectan con *Gears* entre sí y a los anillos exteriores de los que reciben el movimiento y se lo transmiten al eje de salida.

Además, se le coloca a cada uno un *Revolute Joint* para permitirles el giro sobre sí mismo en el eje Z (Figura 6-7) y que sea su único grado de libertad.

#### 6.4.2.1.2. EJE DE SALIDA

El eje de salida, como lleva dos engranajes que engranan con los inversores se conectan con *Gears*.

Posee un *Revolute Joint* como en el resto de casos para permitir solo el giro en Z

### 6.4.2.2. PARES

#### 6.4.2.2.1. PAR RESISTENTE

En este caso, el par que se ha ido colocando en los anillos exteriores de las ruedas libres ha dejado ya de tener sentido que siguiera ahí. Ahora que se tiene el sistema completo, solo existe un par resistente, el cual se colocará en la salida del eje de salida. En la Figura 6-50 se muestra la aplicación del par resistente con una función STEP para que el par no se aplique instantáneamente.

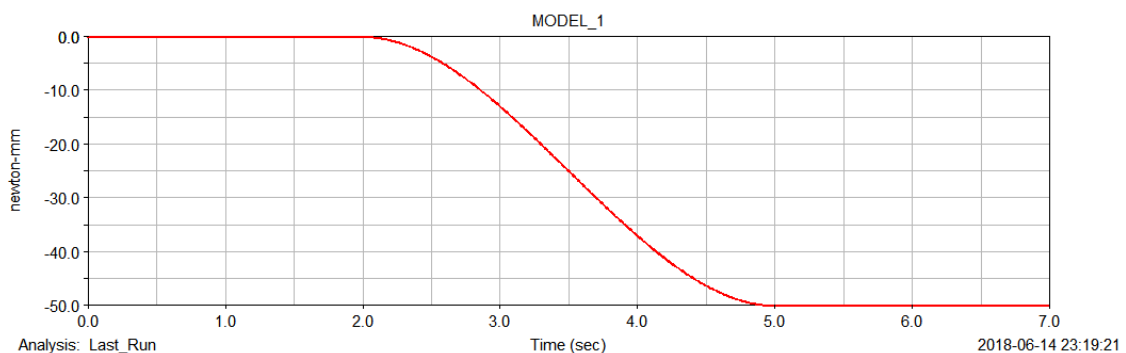


Figura 6-50: Par resistente del modelo

## 7. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Una vez que tenemos el sistema completo modelado y verificado, se pasa a realizar sus respectivos análisis, y como se ha hecho hasta entonces, partiendo del modelo con ruedas libres ideales y luego pasando al modelo con ruedas libres realistas.

En este proyecto se van a realizar tres análisis con Adams que equivalen a tres situaciones diferentes porque son las situaciones donde mejores resultados y conclusiones se podrán obtener.

- Con un par resistente en el eje de salida
- Con el eje de salida libre
- Con el eje de salida bloqueado

Volver a mencionar que en todos los análisis se ha aplicado la función STEP a todos los pares resistente y motores. La razón de esto es para facilitar la resolución de Adams, como hemos llegado a un punto en el que poseemos muchos elementos, con la función STEP lo que se consigue es suavizar la entrada de los parámetros mencionados, y que no estén aplicado a su máximo valor desde el primer instante de la simulación ya que esto ocasiona errores en la simulación.

### 7.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA CON UN PAR RESISTENTE EN EL EJE

Para este análisis se ha colocado, como se ha mencionado en el apartado 6.3.2.2 un par resistente en el eje de salida (Figura 7-1).

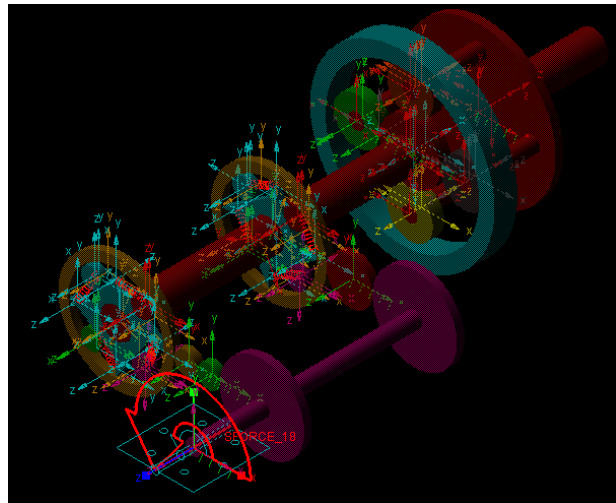


Figura 7-1: Simulación con un par resistente en el eje de salida

El par resistente no es exactamente el valor que sería del par resistente de un vehículo, sino que se le ha colocado un par medio considerando que es un sistema aislado en el que se quiere ver cuál es su comportamiento cuando tiene una oposición al giro en la salida.

- Los resultados obtenidos son:
- Con ruedas libres ideales

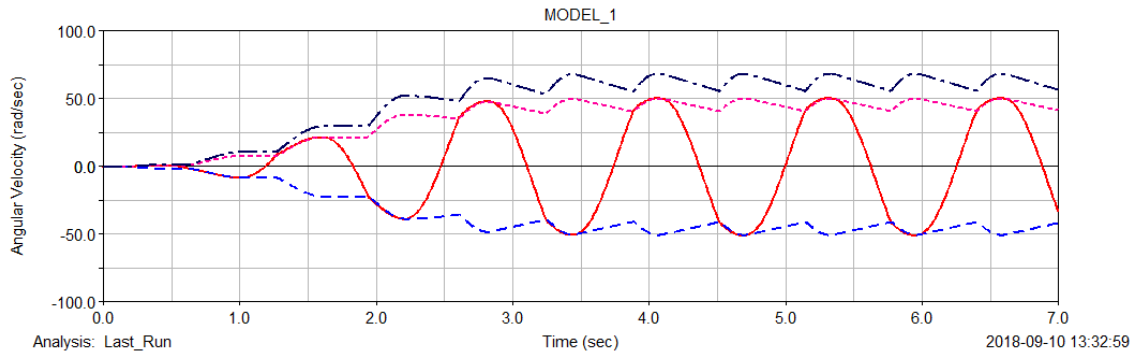


Figura 7-2: Análisis con par resistente y ruedas libres ideales

- Velocidad angular planeta (Curva roja)
- Velocidad rueda libre negativa (Curva azul)
- Velocidad angular rueda libre positiva (Curva rosa)
- Velocidad angular de salida (Curva azul oscuro)

La relación de transmisión entre las ruedas libres y los engranajes es de 1.27 , por lo que hace que sea la velocidad angular de salida un poco mayor que la de la rueda negativa y positiva como se observa en la gráfica, además, se ve cómo funcionan correctamente las ruedas libres ideales, rectificando la señal oscilante, transmitiendo par en la parte positiva y negativa del movimiento del planeta, y proporcionando una señal rectificada del movimiento senoidal con una salida que se encuentra impulsada doblemente.

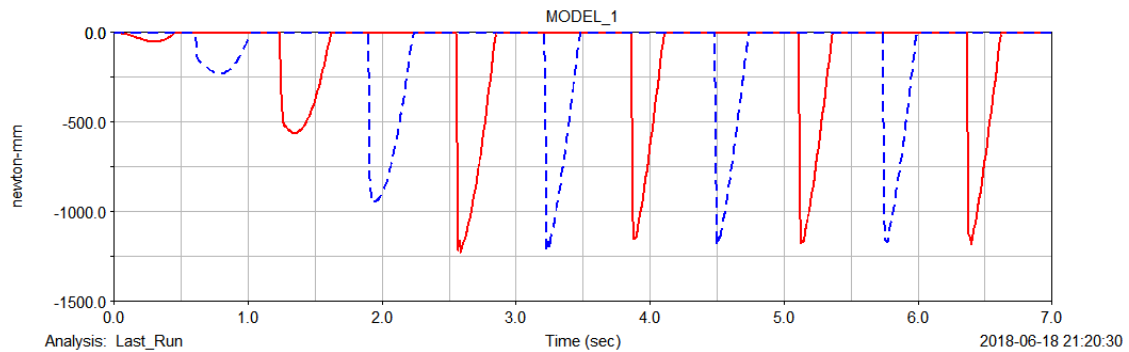


Figura 7-3: Par relativo de las ruedas libres ideales en el sistema completo

Y como se muestra en la Figura 7-3, se ve como las fuerzas relativas puestas entre anillos rectifican la señal senoidal e impulsan doblemente el eje de salida.



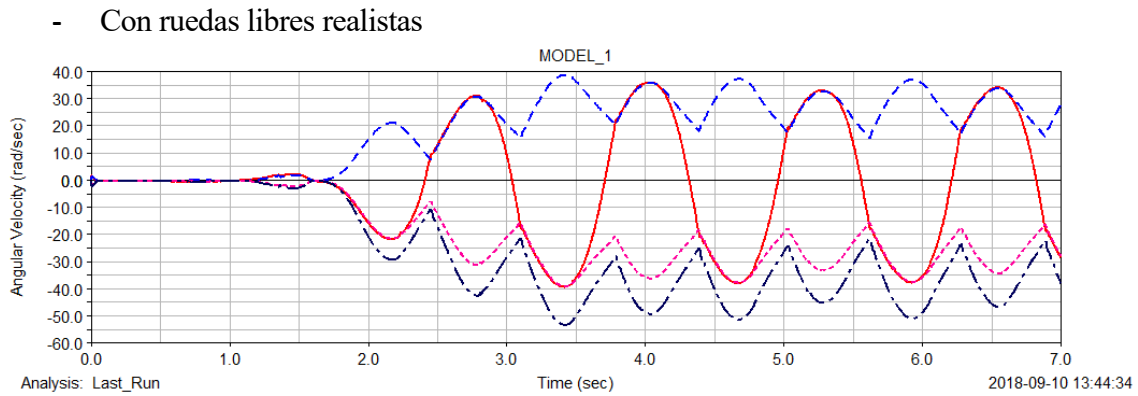


Figura 7-4: Análisis con par resistente y ruedas libres realistas

- Velocidad angular planeta (Curva roja)
- Velocidad rueda libre negativa (Curva azul)
- Velocidad angular rueda libre positiva (Curva rosa)
- Velocidad angular de salida (Curva azul oscuro)

Analizando las gráficas, los resultados son semejantes a los obtenidos con las ruedas libres ideales. El sistema proporciona una señal rectificadora del movimiento senoidal del planeta, con una salida que se encuentra impulsada doblemente, es decir, una velocidad angular de salida doblemente impulsado, la cual, es una señal más homogénea que la que generaría un sistema con una rueda libre o sin mecanismo de rectificación.

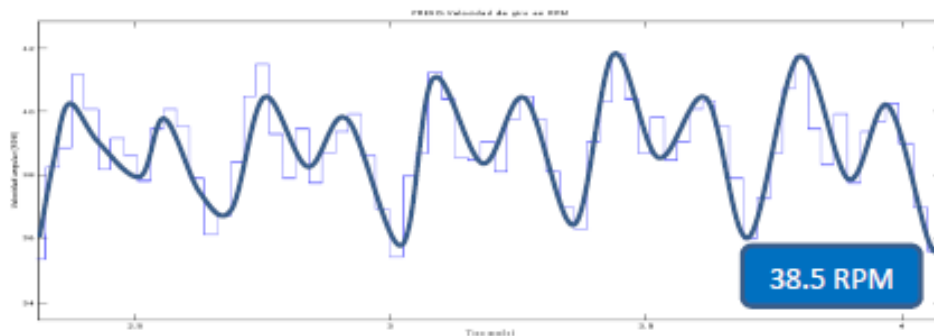


Figura 7-5: Velocidad de salida de un ensayo experimental con par en el eje

En esta gráfica de un estudio previo realizado (Martínez Brugarolas, A.A., 2017), se observa que la curva resultante del ensayo experimental es una curva que a primera vista no se parece a la resultante de la simulación, pero se puede observar que la curva del ensayo experimental (Figura 7-5) tiene dos picos de aceleración en cada ciclo debido a las dos ruedas libres, que es lo que ocurre en la gráfica de la simulación por Adams (Figura 7-4).

## 7.2. ANÁLISIS CON EL EJE LIBRE

Para este análisis no se ha colocado ninguna oposición en el eje, se deja que gire libremente con el movimiento que le transmitan los inversores procedentes del planeta (Figura 7-6).

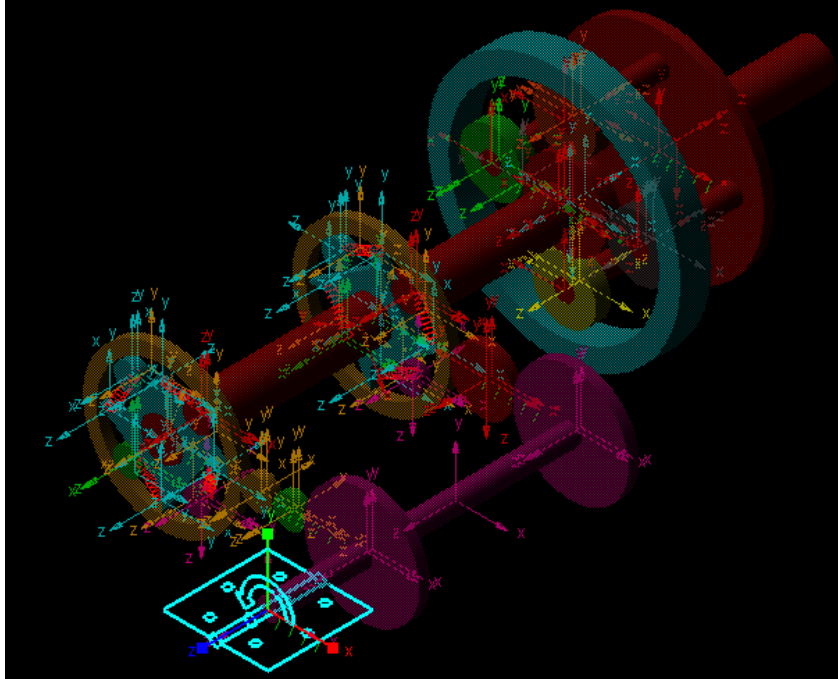


Figura 7-6: Simulación con el eje libre

- Los resultados obtenidos son:
- Con ruedas libres ideales:

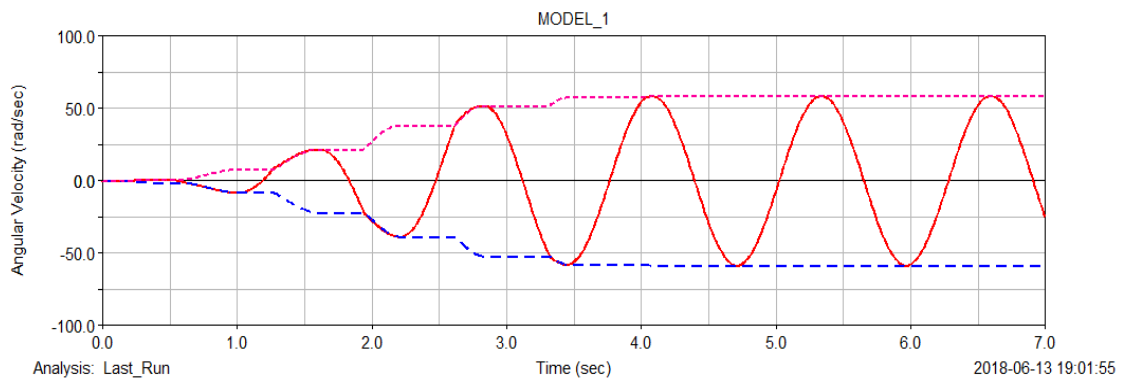


Figura 7-7: Análisis con ruedas libres ideales con el eje libre

Analizando los resultados, se ve que se está produciendo la rectificación, pero en este caso como son ruedas libres ideales, en el momento que le quitamos la oposición y se estabiliza la señal, queda una velocidad lineal como era de esperar al no haber ya ningún par opositor, pero mientras se está realizando la función STEP sí que se está originando un par, que es el de vencer las inercias del sistema para alcanzar su velocidad máxima.

Para comprobar que esto que se afirma es verdad, se comprueba en la gráfica del par relativo sus valores (Figura 7-8), que al principio tendrán un valor y una vez que se estabiliza la señal tenderá a ser nula.

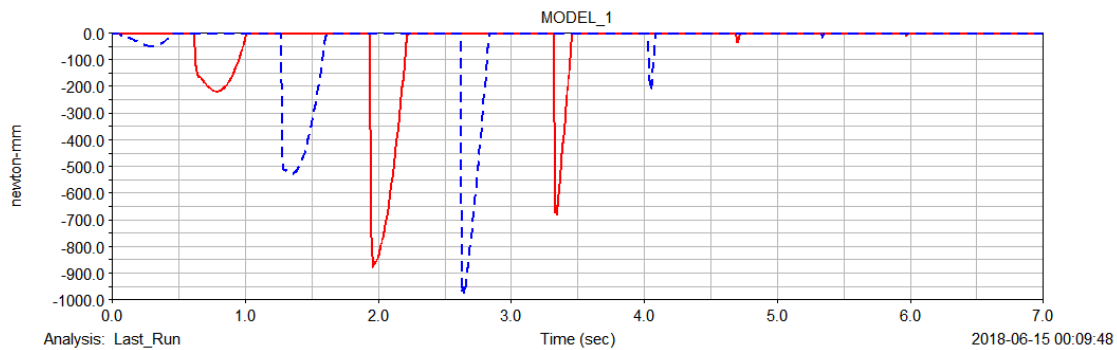


Figura 7-8: Par relativo de las ruedas con el eje libre

Como se estaba comentando, se confirma lo previsto.

- Con ruedas libres realistas:

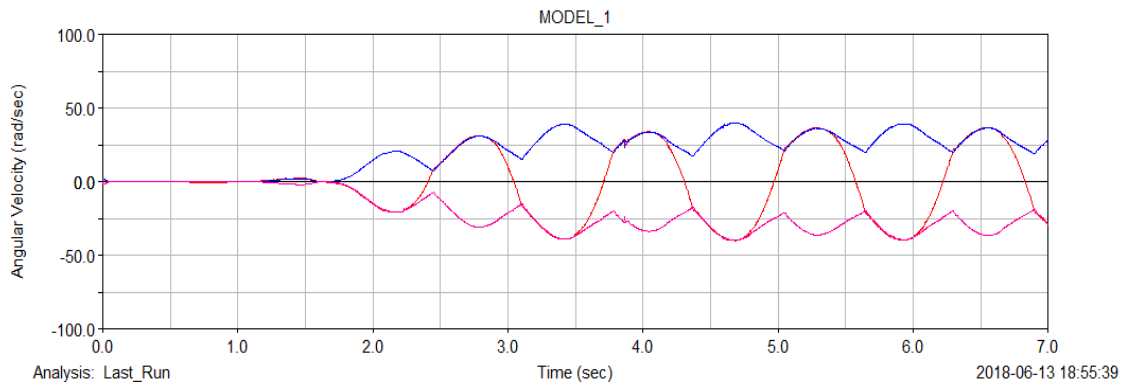


Figura 7-9: Análisis con ruedas libres realistas y el eje libre

Con las ruedas libres reales aparecen claras diferencias respecto a las ruedas libres ideales. Se observa como las velocidades angulares de las ruedas (curvas azul y rosa), sin tener oposición alguna en el eje de salida, se ve reducida su velocidad. Esto deja claro que las únicas fuerzas existente que pueden originar esto, son las fuerzas de contactos que está habiendo entre los rodillos y los anillos de las ruedas libres, donde existen unas fuerzas de rozamiento, que están oponiéndose al movimiento. Esto se justifica porque al modelizar una rueda libre realista deben de existir unas fuerzas de contacto entre los anillos y los elementos de bloqueo para que sigan funcionando como tal, ya que sin ellas el sistema no funcionaría porque no se tiene un par relativo como en las ruedas libres ideales.

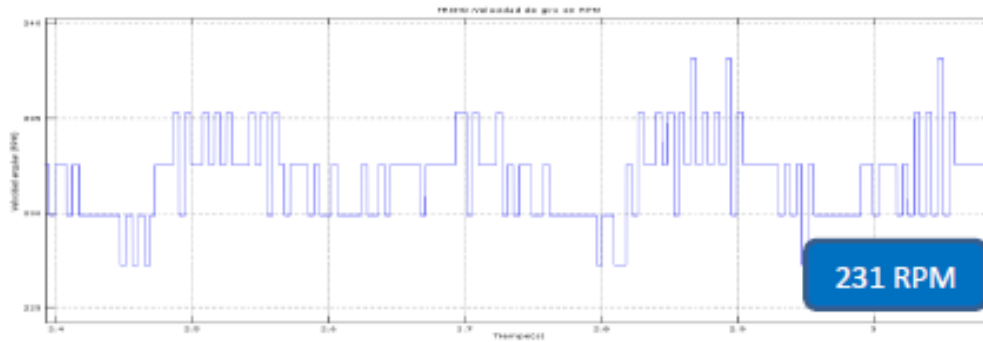


Figura 7-10: Velocidad angular de salida en un ensayo experimental con el eje libre

En esta gráfica (Figura 7-10), también como la Figura 7-5, obtenida de un estudio previo (Martínez Brugarolas, A.A., 2017), se observa que en un ensayo real la curva de la velocidad angular resultante, si se traza una curva por los puntos de sus picos se obtiene una que es muy semejante a la que se obtiene en el modelo de la rueda libre real que se ha realizado.

### 7.3. ANÁLISIS CON EL EJE BLOQUEADO

Como último análisis, se procederá a hacer una simulación con el eje de salida bloqueado, para ello se fija al *ground* (Figura 7-11).

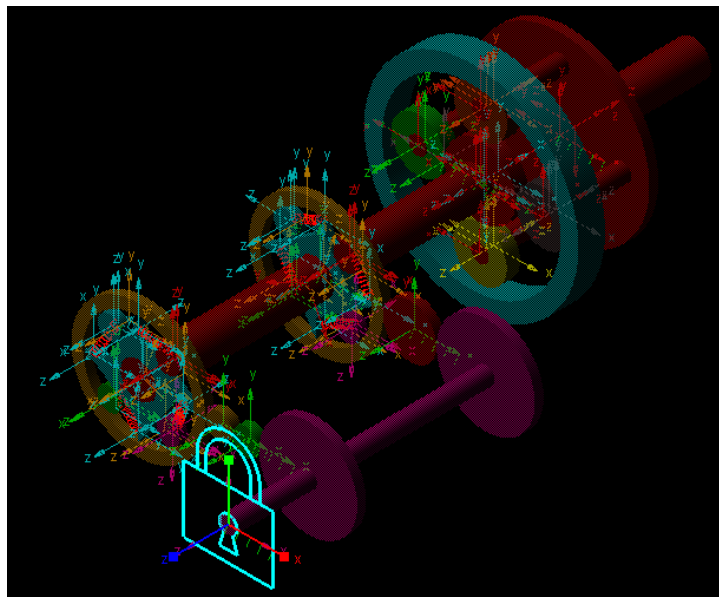


Figura 7-11: Simulación con el eje bloqueado

- Con ruedas libres ideales:

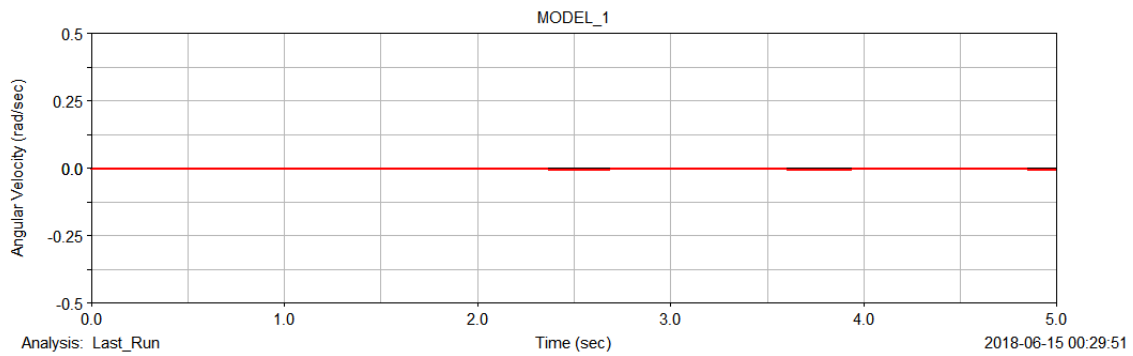


Figura 7-12: Velocidad del planeta con ruedas libres ideales y el eje bloqueado

Como era de esperar, si se bloquea el eje de salida, la velocidad del planeta es nula, donde solo se están moviendo el porta satélites (curva azul), los satélites (azul oscuro) y la corona (curva rosa) como se muestra en la Figura 7-13.

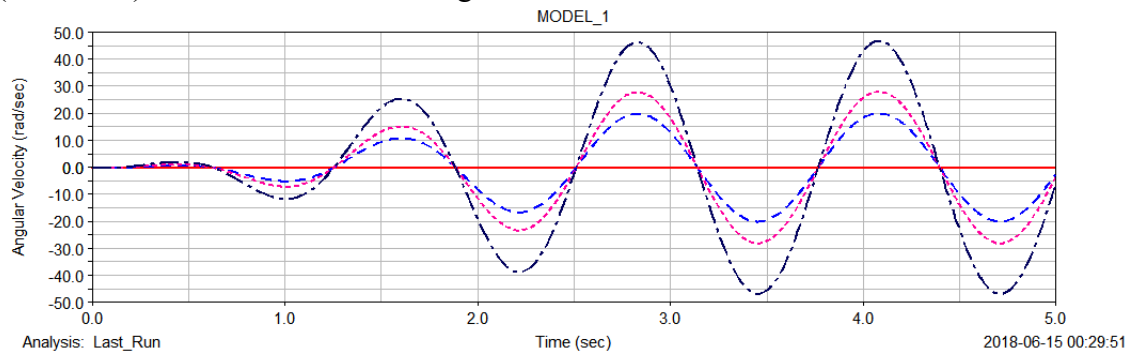


Figura 7-13: Velocidades del porta satélites, corona y satélites con el eje bloqueado y ruedas libres ideales

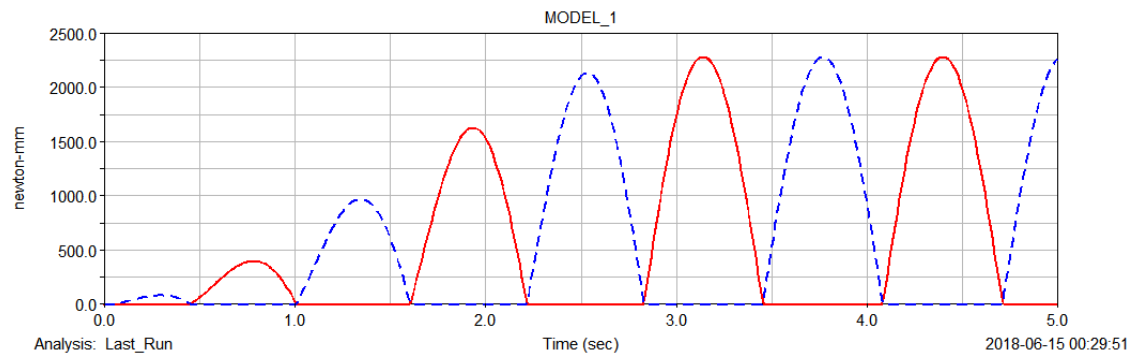


Figura 7-14: Par generado en el eje de salida bloqueado con ruedas libres ideales

En cuanto al par (Figura 7-14) se observa que en cada ciclo tiende a cero. En este modelo, como se trata al fin y al cabo de un modelo matemático, que, aunque se haya modelizado la rueda libre de una forma realista, sigue funcionando como una rueda libre ideal. En referencia al estudio previo (Martínez Brugarolas, A.A., 2017), se realizó este ensayo con el eje bloqueado del cual se obtuvo este resultado:

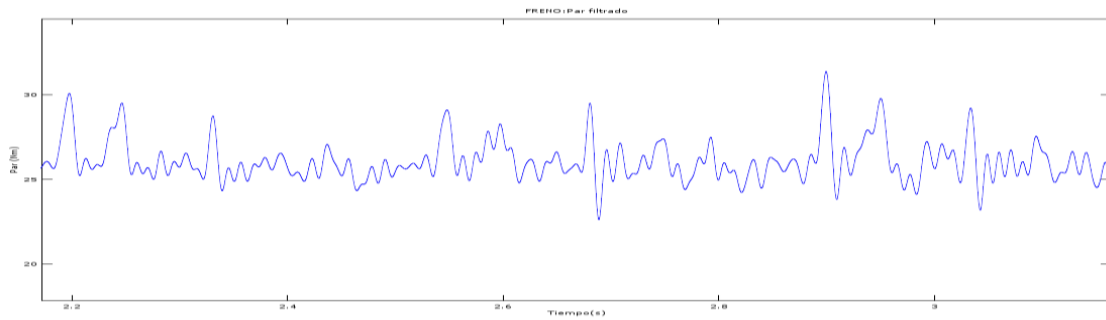


Figura 7-15: Par originado en el eje de salida bloqueado en un ensayo experimental con ruedas libres

Donde se ve, que son dos gráficas que no tienen nada que ver, ya que en el ensayo nunca se da una situación de par nulo. Este es el punto que en estudios previos se comprobó que el modelo de la rueda libre ideal no funcionaba correctamente con el eje bloqueado. En la realidad, lo que ocurre es que las ruedas libres reales cuando están en esta situación en un ensayo experimental, sus elementos de bloqueo, los rodillos, se encuentra en un estado de semibloqueo debido a que necesitan cierto desplazamiento para que sus elementos pasen de estar de un estado de bloqueo a un estado libre y por este motivo, su par nunca se hace nulo, como se muestra en la Figura 7-15.

- Con ruedas libres realistas:

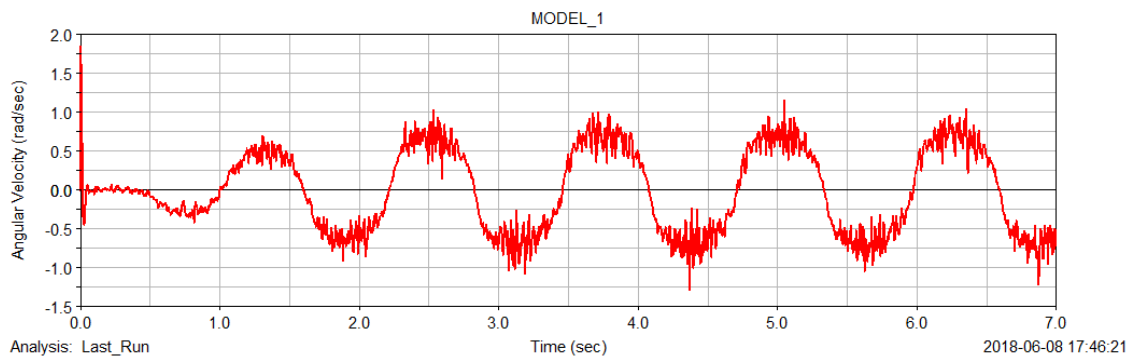
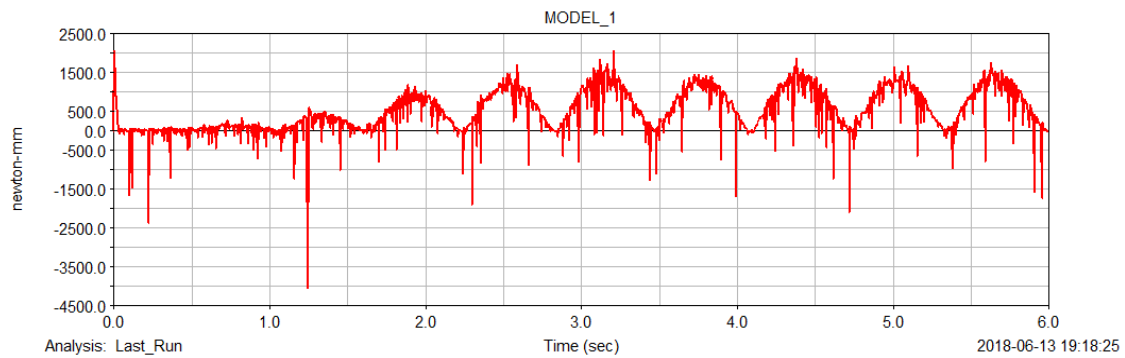


Figura 7-16: Velocidad del planeta con ruedas libres realistas y el eje bloqueado

Con las ruedas libres realistas no se consigue una velocidad nula, como se muestra en la Figura 7-16, caso que no se tenía previsto y resultado que no debería darse. Este principal defecto se debe a que las fuerzas de contactos introducidas en los elementos de bloqueo con sus parámetros por defecto, no son capaces de retener inmóvil el planeta, el cual se está moviendo mínimamente.

Ahora se va a observar el par producido en el eje bloqueado (Figura 7-17).



*Figura 7-17: Par originado en el eje de salida bloqueado con ruedas libres realistas*

El resultado obtenido que se observa en la Figura 7-17 no se parece a la Figura 7-15 del ensayo experimental, sino que se parece a la Figura 7-14 del par originado con el modelo de ruedas libres ideales. Esto ocurre porque en el modelo con las fuerzas de contacto que se han introducido, con sus parámetros por defecto, no han sido suficiente para conseguir hacer que la velocidad sea nula, es decir, se está produciendo un cierto deslizamiento que origina que los elementos de bloqueo puedan desconectarse antes de que entre en juego la otra rueda libre y por existen instantes en la que el par es nulo, y entonces funciona como una rueda libre ideal con la salida bloqueada.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Llegado a este punto de trabajo, finalmente solo queda comentar las conclusiones obtenidas del mismo, al igual que los puntos donde se podría profundizar en posibles trabajos futuros. En primer lugar, se hace una mención a que modelizar un sistema real con todos sus detalles lleva una gran complejidad, y que lo que en un principio no pueda ser importante como determinadas condiciones de contorno sean tan importantes al final, hasta el punto de obtener unos resultados no esperados cambiando de forma sustancial.

En este estudio, se han modelizado unas ruedas libres de manera realista ubicadas dentro de un mecanismo rectificador en un sistema de transmisión de potencia. Siempre se ha tratado de modelizar las ruedas libres de la manera más ajustada a una real. Este elemento, como protagonista que es de este estudio, parecía en un principio que modelizarlo e introducir sus condiciones de contorno era sencillo, lo cual era una equivocación. Mientras que se avanza en el estudio, una persona se percata de la extrema precaución con la que hay que modelar y, sobre todo, con la manera de introducir las condiciones de contorno para que funcione correctamente.

Tras la modelización de las ruedas libres como modelos ideales, se han ido obteniendo resultados que, en cierta manera, se esperaba que en muchos casos fueran resultados semejantes a los de las ruedas libres realistas, hasta llegar al momento donde difieran y donde se hubiera conseguido un modelo realista que funcionara correctamente en los tres análisis, en especial en el análisis con el eje bloqueado, donde las ideales no funcionan correctamente. Esto que ocurre en la última simulación y análisis que se ha realizado, con la situación en el eje bloqueado, se esperaba que el modelo de rueda libre realista con los rodillos y las fuerzas de contacto entre los anillos y estos rodillos, fueran capaz de impedir el movimiento del planeta del tren epicicloidal, pero esto no se ha conseguido, lo que ha originado que se obtuviera una gráfica de pares semejante a la de las ruedas libres ideales. Aquí esta uno de esos detalles, que un principio parecía que no iba a ser importante pero que finalmente ha sido el detalle que se ha descubierto en este estudio que tiene una gran importancia, que son todos los parámetros de las fuerzas de contacto entre los rodillos y los anillos.

Estas fuerzas de contacto, Adams te las da con unos parámetros por defecto que en un principio parecen irrelevantes, pero se ha visto que no lo son, que es necesario un estudio de estas fuerzas de contacto y de todos sus parámetros para poder ajustarlas a los valores que una rueda libre real tuviera dentro de un ensayo experimental, teniendo todos los detalles de las fuerzas de contacto que ocurren entre los rodillos y anillos de la rueda libre, ya que una variación de los parámetros produce un gran cambio en todos los resultados.

A lo largo del estudio ha habido muchos detalles a tener en cuenta, como que debido a la complejidad del sistema se ha tenido que simplificar por su coste computacional, como el sistema cuenta con un gran número de elementos hace que Adams genere todas las ecuaciones de cada uno de los elementos para poder resolverlo, por lo que hay que tener especial cuidado en los conectores que unen los elementos, o simplemente de juntar varios elementos como un sólido si es posible, ya que cuantas menos ecuaciones de los elementos tenga Adams, menor será su coste computacional.



De todo el estudio se obtiene, que no solo es importante realizar un modelo del mecanismo que se quiere modelar, sino que es igual de importante las condiciones de contorno que se le introducen, conectores, fuerzas, etc, porque dependiendo de donde y de qué valor se coloquen, va a cambiar de gran manera la simulación y sus resultados.

Finalmente, las conclusiones obtenidas y mencionadas son que hay que tener extrema precaución con las condiciones de contorno que se introducen a los elementos del sistema, ya que las fuerzas de contacto por defecto de Adams no son válidas para este modelo de rueda libre realista, ya que impiden su correcto funcionamiento como una rueda libre real por su fallo en el análisis con el eje de salida bloqueado.

Como trabajos futuros, se propone que uno de los posibles a realizar para mejorar el modelo sería incorporar en esas ruedas realista unos parámetros de las fuerzas de contacto ajustadas a las de un ensayo experimental haciendo un estudio específico de las fuerzas de contacto, como varían y cuáles son sus parámetros fundamentales, y una vez obtenido este estudio, volver a simular y analizar el funcionamiento de las ruedas libres dentro del sistema de transmisión de potencia, de esta manera se mejorarán sustancialmente los resultados.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Morales, F.J., (2011), Diseño conceptual de rectificadores para CVTs dinámicas, *Tesis doctoral, Universidad de Sevilla*
- [2] Martínez Brugarolas, A.A., (2017). Modelización de una caja de cambios CVT y comparativa con resultados experimentales, *Trabajo de fin de grado, Universidad de Sevilla.*
- [3] Hernández Fraile, A. (2011). Modelado, simulación y análisis con MSC.Adams con aplicación a rodamientos con defectos en una pista de rodadura, *Trabajo fin de grado, Universidad Carlos III de Madrid.*
- [4] Catálogo de Ruedas libres, RINGSPANN.
- [5] Que es la rueda libre: así funciona y así ahorra  
(<https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/que-es-la-rueda-libre-asi-funciona-y-asi-ahorra>)
- [6] Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/caja-cambios3.htm>