

# Trabajo Fin de Grado

## *Modelización y simulación de un cambio de buje mediante técnicas dinámicas multicuerpo con contacto*

### **Autor:**

Diego Maceira Muíños

### **Tutores:**

Daniel Dopico Dopico

Emilio Sanjurjo Maroño

**Septiembre 2018**



# Introducción

## ▪ Motivación

- Estudiar un mecanismo con engranajes usando dinámica de sistemas multicuerpo con contacto
- Sistema de transmisión de bicicleta basado en engranajes planetarios

## ▪ Objetivos

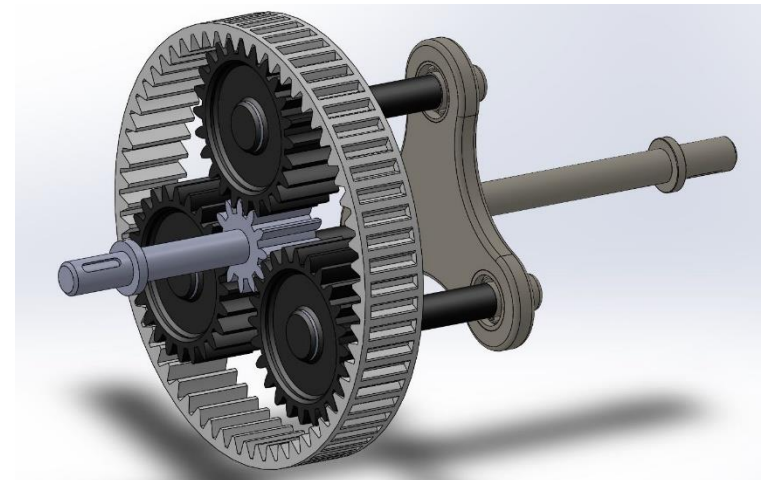
- Crear una herramienta completa de modelado, cálculo y simulación de sistemas de engranajes, englobando:
  - ▶ Creación de un modelo de generación de engranajes a partir de datos primitivos
  - ▶ Estudio y cálculo de las relaciones cinemáticas
  - ▶ Estudio y cálculo de las fuerzas de contacto
  - ▶ Simulación del sistema en condiciones reales de funcionamiento
  - ▶ Estudio y cálculo del rendimiento del sistema



# Descripción del sistema

- Modelo empleado: Shimano Nexus 3
- Sistema de transmisión de 3 velocidades integrado en el buje de la bicicleta
- Propio de bicicletas urbanas
- Basado en un sistema epicicloidal

- ✓ Sistema muy compacto
- ✓ Mantenimiento mínimo
- ✓ Ratios de transmisión aceptables
- ✓ Posibilidad de cambio de marcha en parado
- Poco robusto
- Rendimiento inferior respecto a sistemas basados en desviadores
- Elevado peso del conjunto

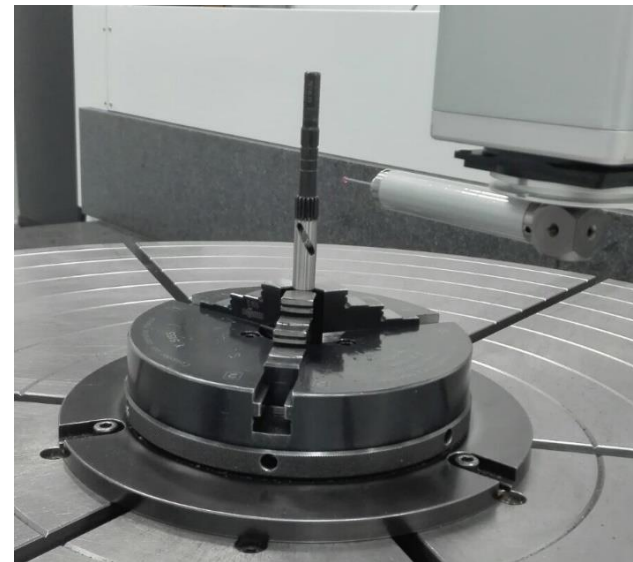


# Descripción del sistema

- Componentes principales:
  - Eje del sistema (sun gear)
  - Cuerpo del buje
  - Unidad driver
  - Portasatélites (unidad carrier)
  - Engranaje anular (ring gear)

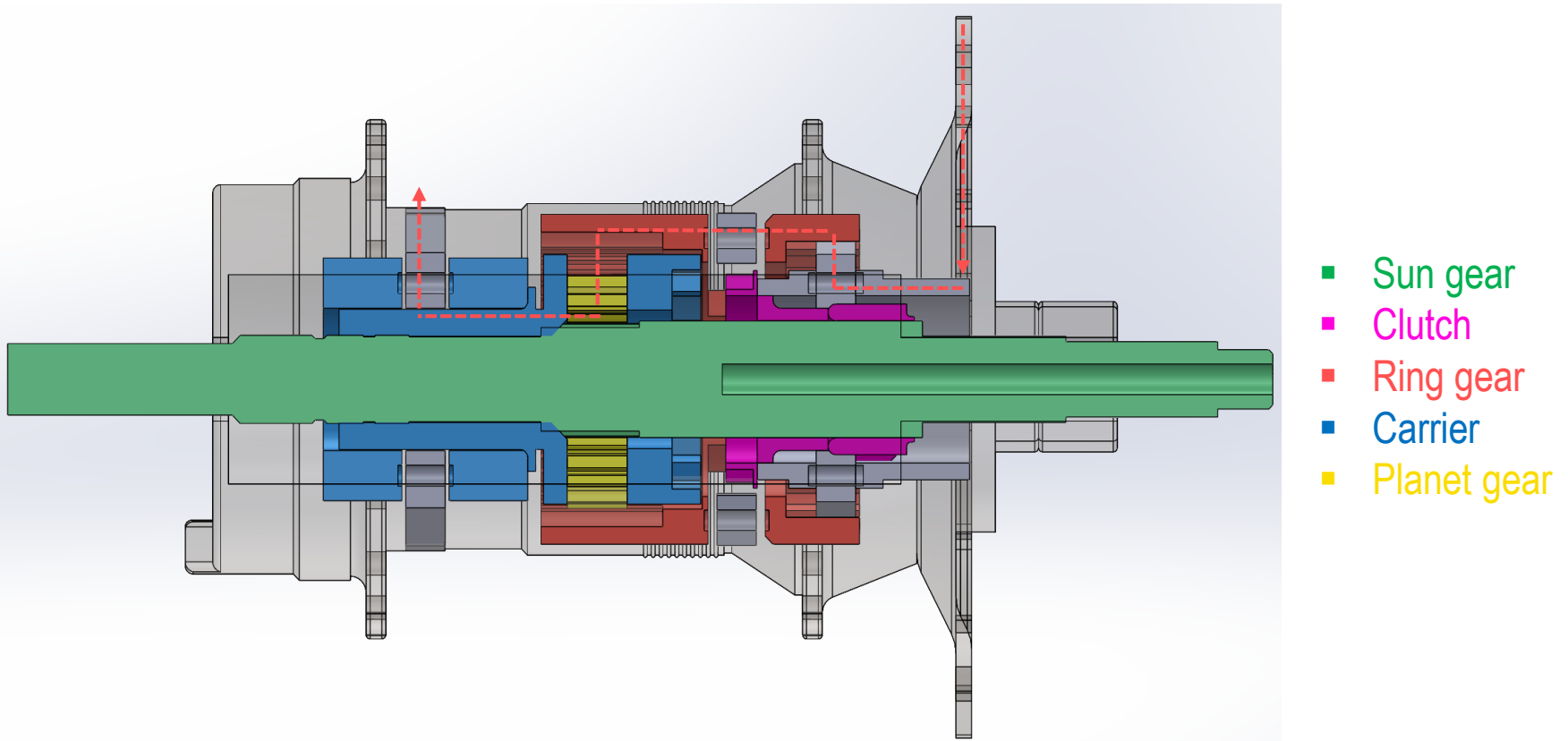


- ▶ Desmontaje del sistema por completo
- ▶ Medición de parámetros primitivos de los engranajes (Sincromecánica)
- ▶ Análisis exhaustivo del funcionamiento del mecanismo en cada velocidad



# Descripción del sistema

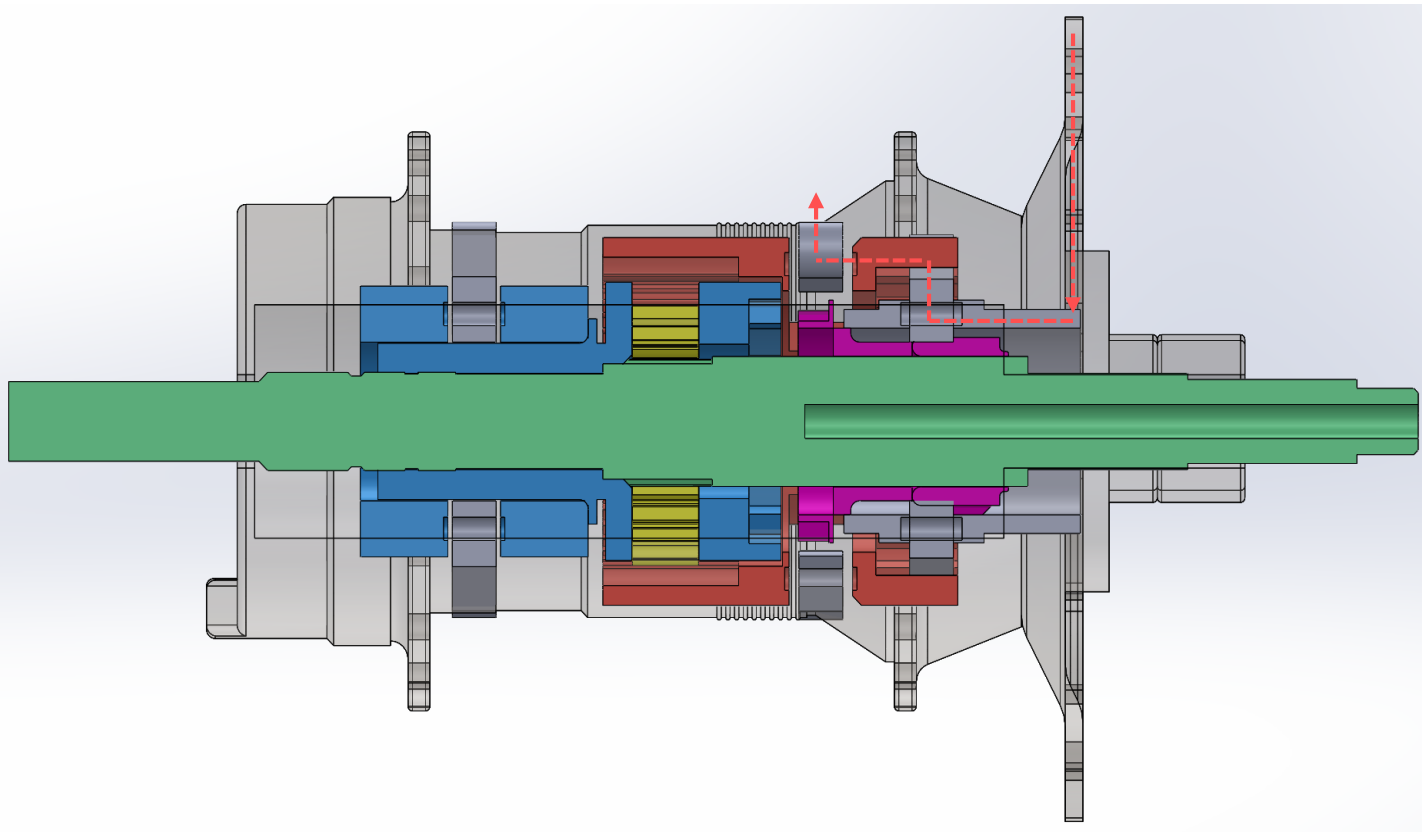
- Primera marcha ► reducción



Flujo de potencia: Piñón – Driver – Ring gear  Carrier – Buje

# Descripción del sistema

- Segunda marcha ► directa

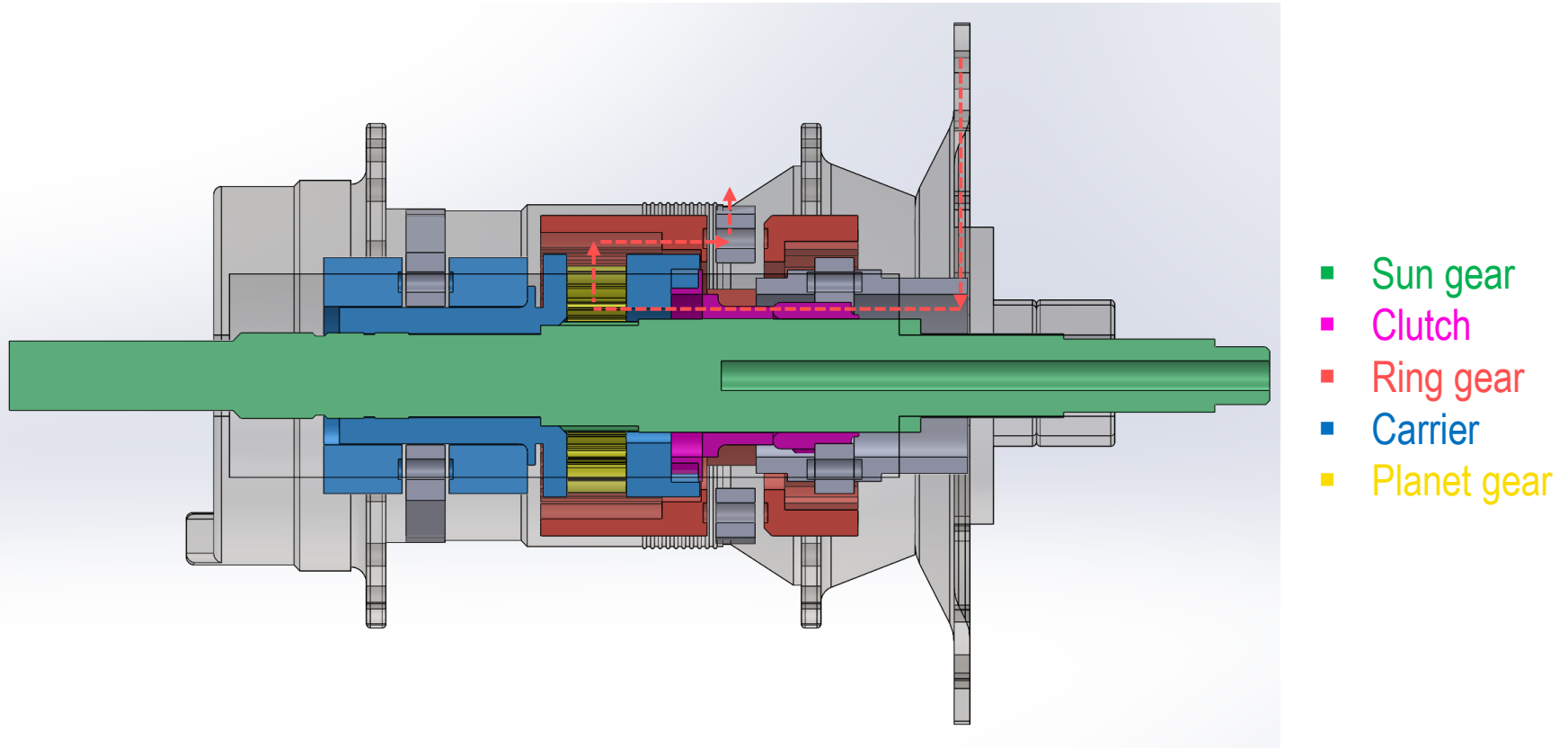


- Sun gear
- Clutch
- Ring gear
- Carrier
- Planet gear

Flujo de potencia: Piñón – Driver – Ring gear – Buje

# Descripción del sistema

- Tercera marcha ► multiplicación

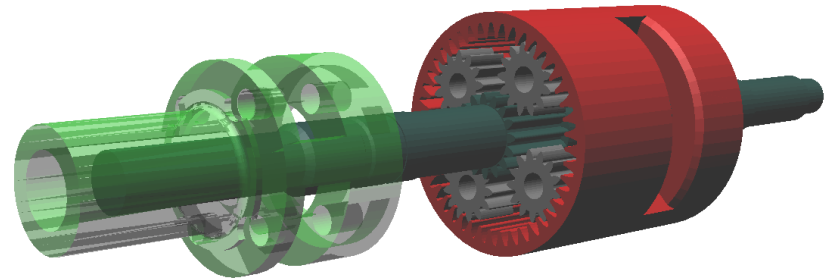


Flujo de potencia: Piñón – Driver - Clutch – Carrier  Ring gear – Buje

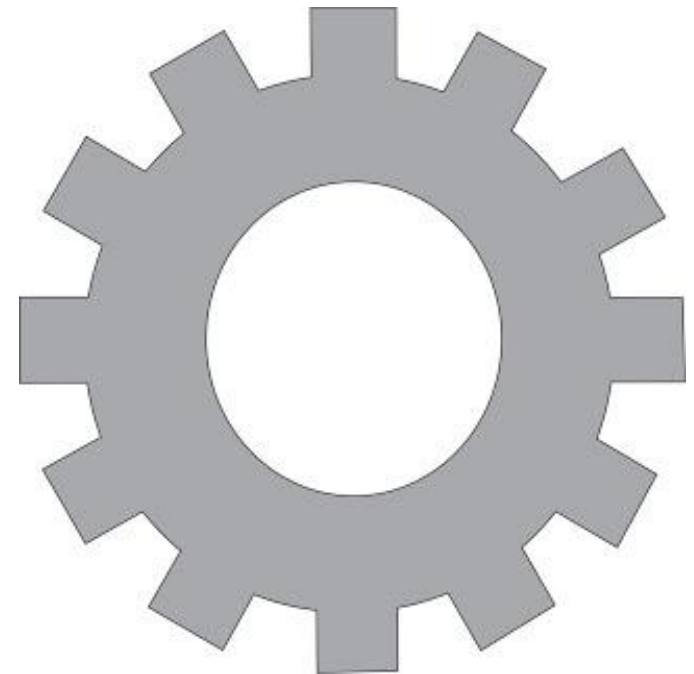
# Modelo multibody del sistema

- **Sólidos del modelo:**

- Sun gear
- 4 Planet gear
- Carrier
- Ring gear



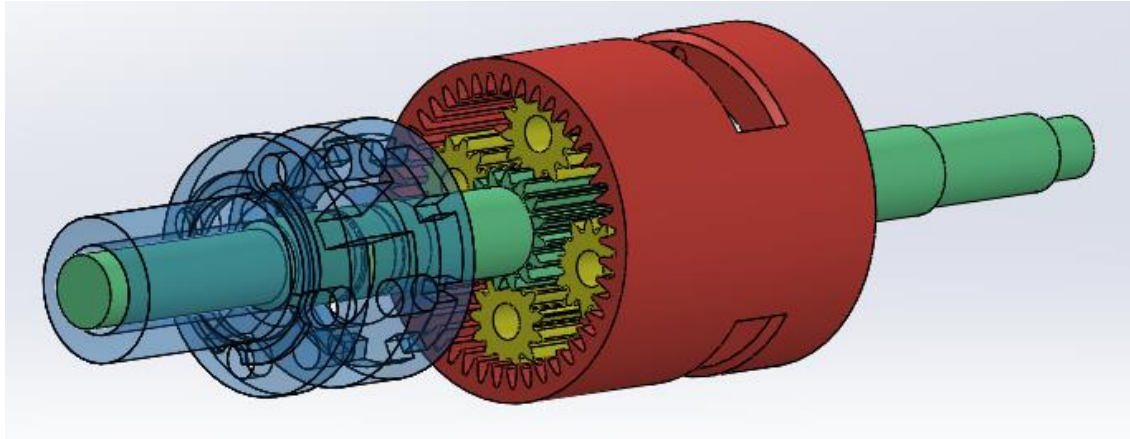
- Creación de una herramienta de modelado de engranajes con Matlab a partir de los datos primitivos de los mismos (módulo, n<sup>o</sup> de dientes, correcciones)
- Creación de perfiles de evolvente reales, con curvas paramétricas para la exportación a software CAD
- Aseguramos la calidad del contacto entre elementos del modelo



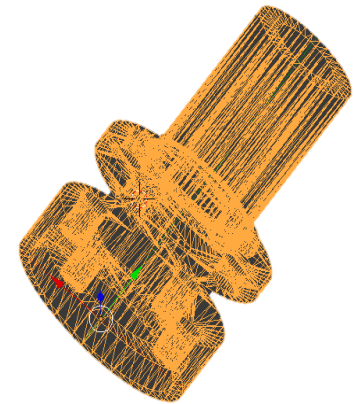


# Modelo multibody del sistema

- Modelado de los elementos del sistema mediante el software Solidworks 2016

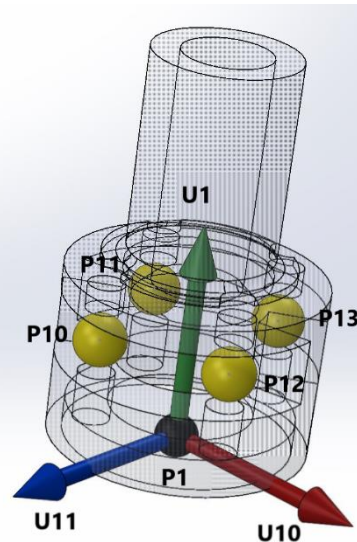


- A partir de los modelos CAD exportamos los elementos del sistema a formato de malla de triángulo (.stl), necesario para la detección del contacto
- Mediante el software Blender agregamos las propiedades gráficas al elemento para su posterior visualización



# Modelo multibody del sistema

- **Modelado del sistema en coordenadas mixtas:**
  - Coordenadas naturales: puntos y vectores
  - Variables adicionales (ángulos): coinciden con los gdl del sistema

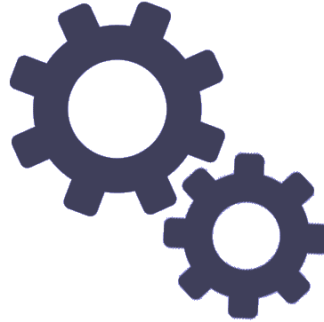


- Contactos entre los engranajes modelados mediante fuerzas, sin restricciones cinemáticas
- Sistema con 6 grados de libertad
- Generamos un sistema con 1 elemento fijo y 6 elementos móviles con pares cinemáticos de revolución

# Simulación

- Software empleado:

**MBSLIM**



**MBSmodel**

- Bibliotecas creadas por el Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM)
- **MBSLIM** es una biblioteca de funciones para la dinámica de sistemas multicuerpo
  - ▶ Escrita en Fortran 2003
  - ▶ Permite plantear y resolver las ecuaciones del movimiento del sistema
  - ▶ Es flexible a la hora de definir el mecanismo y resolver su dinámica
- **MBSmodel** se encarga del apartado gráfico de la simulación y de la detección del contacto
  - ▶ Hace uso de OSG y OpenGL
  - ▶ Escrita en C++



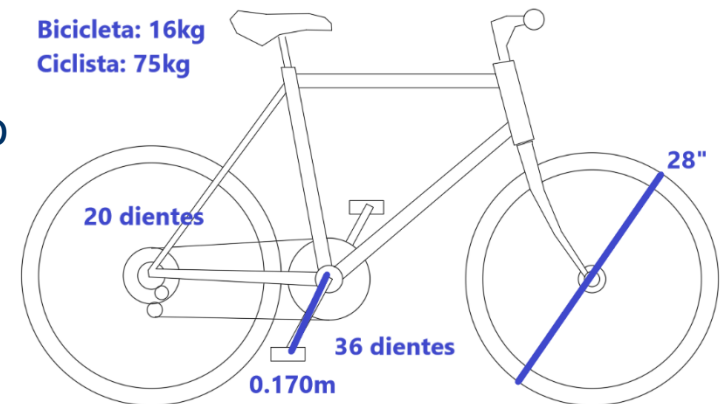
# Simulación

## ▪ Formulación y resolución de la dinámica del sistema

- Formulación del problema en matriz R
- Paso de tiempo del integrador de  $10 \mu s$
- Regla trapezoidal como integrador

## ▪ Condiciones de simulación

- Se recrean las condiciones de funcionamiento del cambio sin modelizar el resto de la bicicleta como sistema multicuerpo
- Valores tomados para bicicleta urbana
- Modelo de potencia constante: 150W
- Simulación del sistema partiendo del reposo
- Par de entrada al sistema variable con  $\omega$
- En función de la marcha seleccionada, el par irá asignado a un elemento u otro



# Simulación

- Modelo de fuerzas aerodinámicas:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho C_x A v^2$$

- Modelo de pendiente:

$$F_{slope} = mg \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{p}{100} \right) \right]$$

- Conversión de fuerzas a pares:

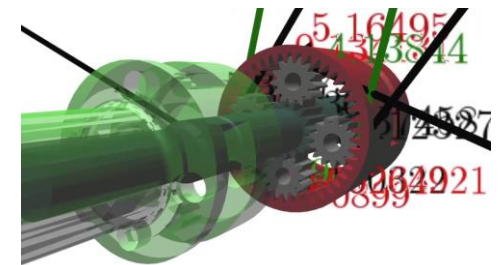
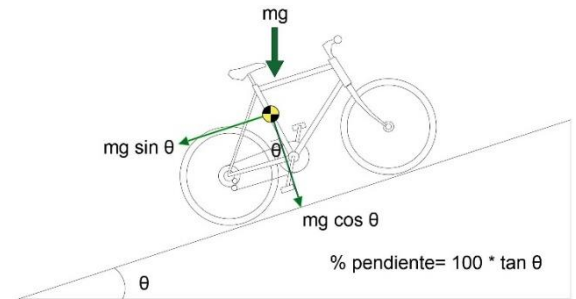
$$T_{oposición} = \frac{1}{2} \rho C_x A \omega^2 r^3 + mgr \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{p}{100} \right) \right]$$

- Inercia de entrada al sistema:

$$I_{buje entrada} = \frac{m_{piernas} L_{bielas}^2}{i^2}$$

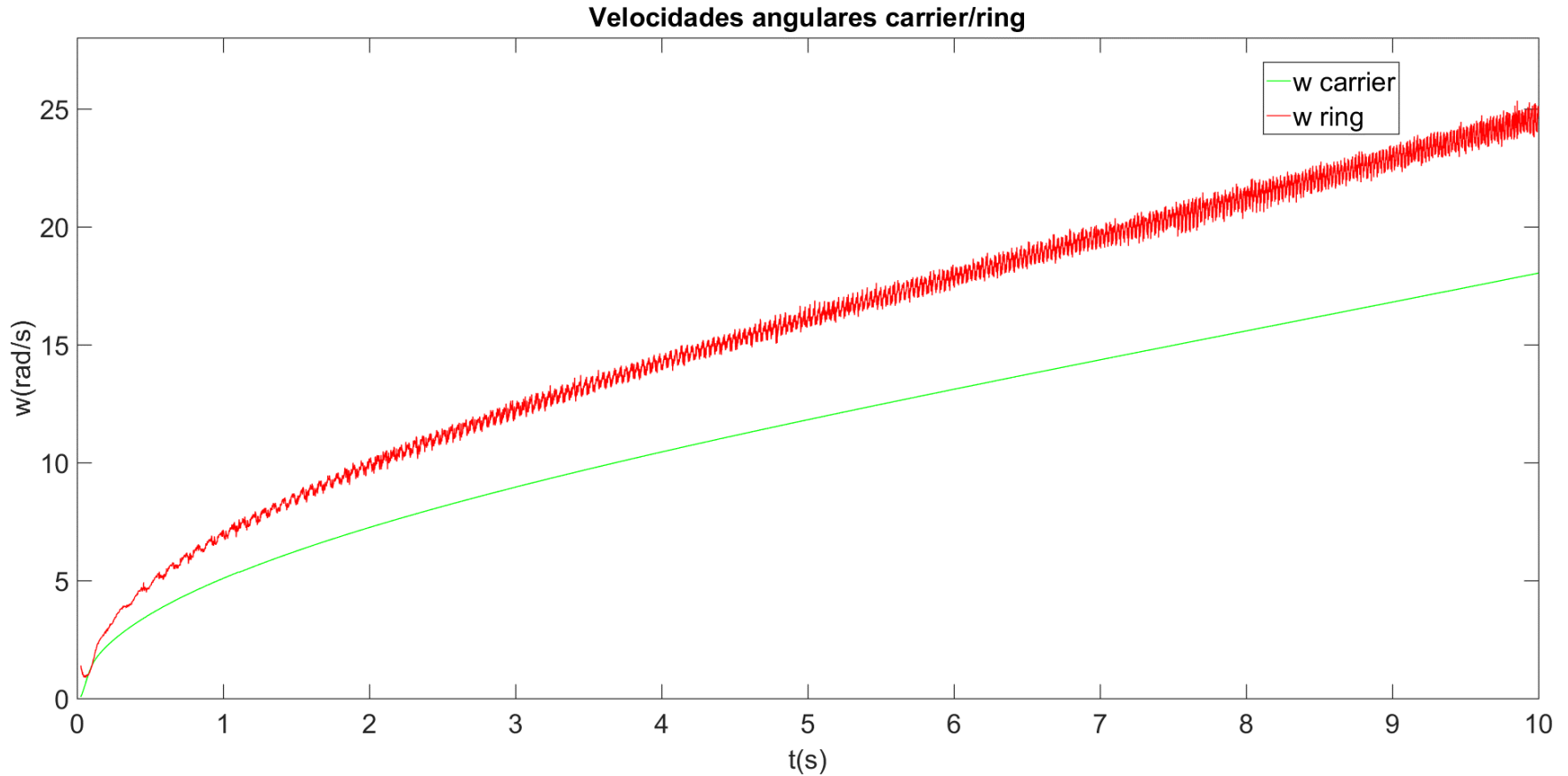
- Inercia de salida al sistema:

$$I_{buje salida} = m_{total} r^2$$



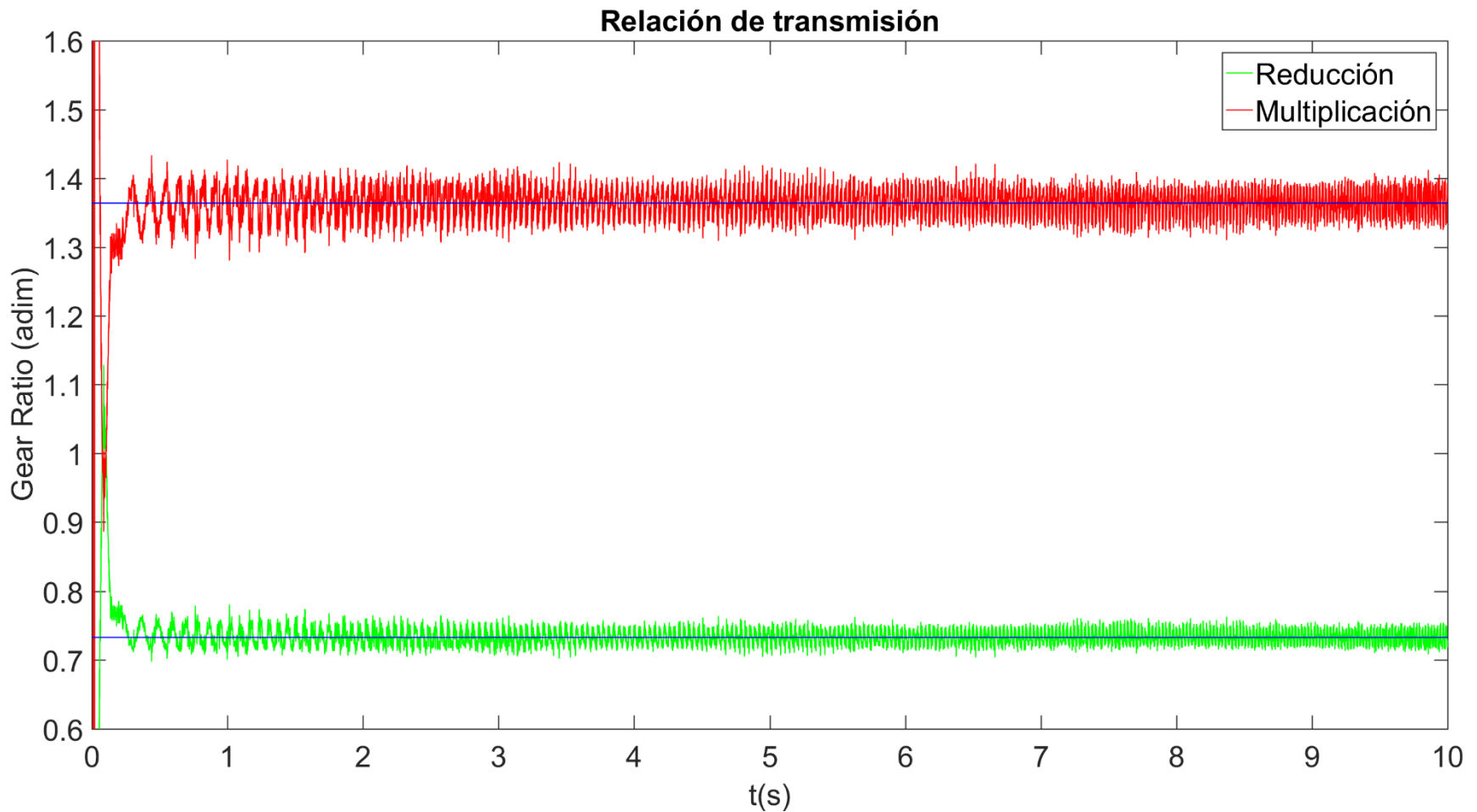
# Resultados

- Velocidades angulares carrier-ring



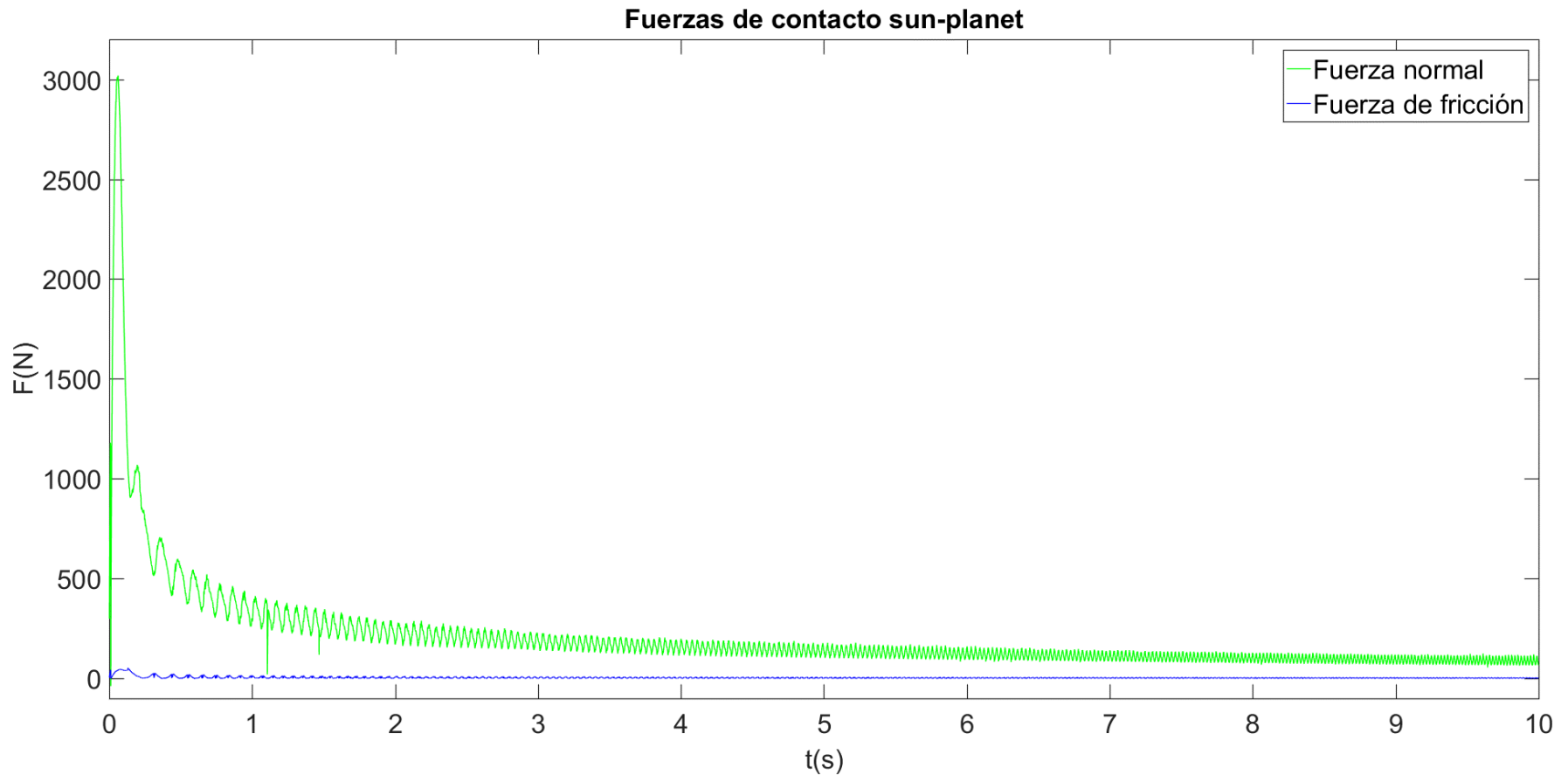
# Resultados

- Ratios de reducción y multiplicación del sistema:



# Resultados

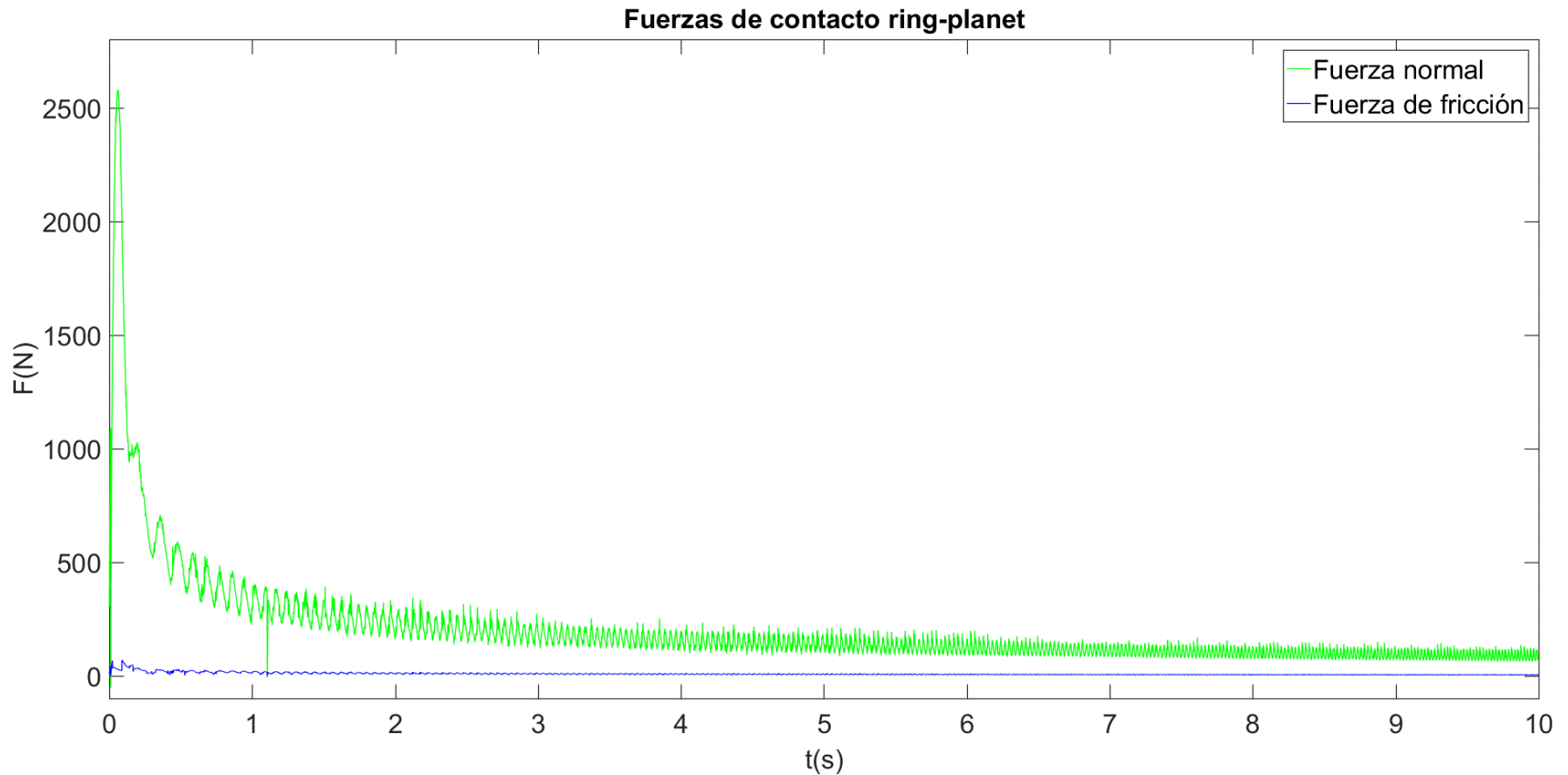
- Fuerzas de contacto normales y de fricción en contacto sun-planet:





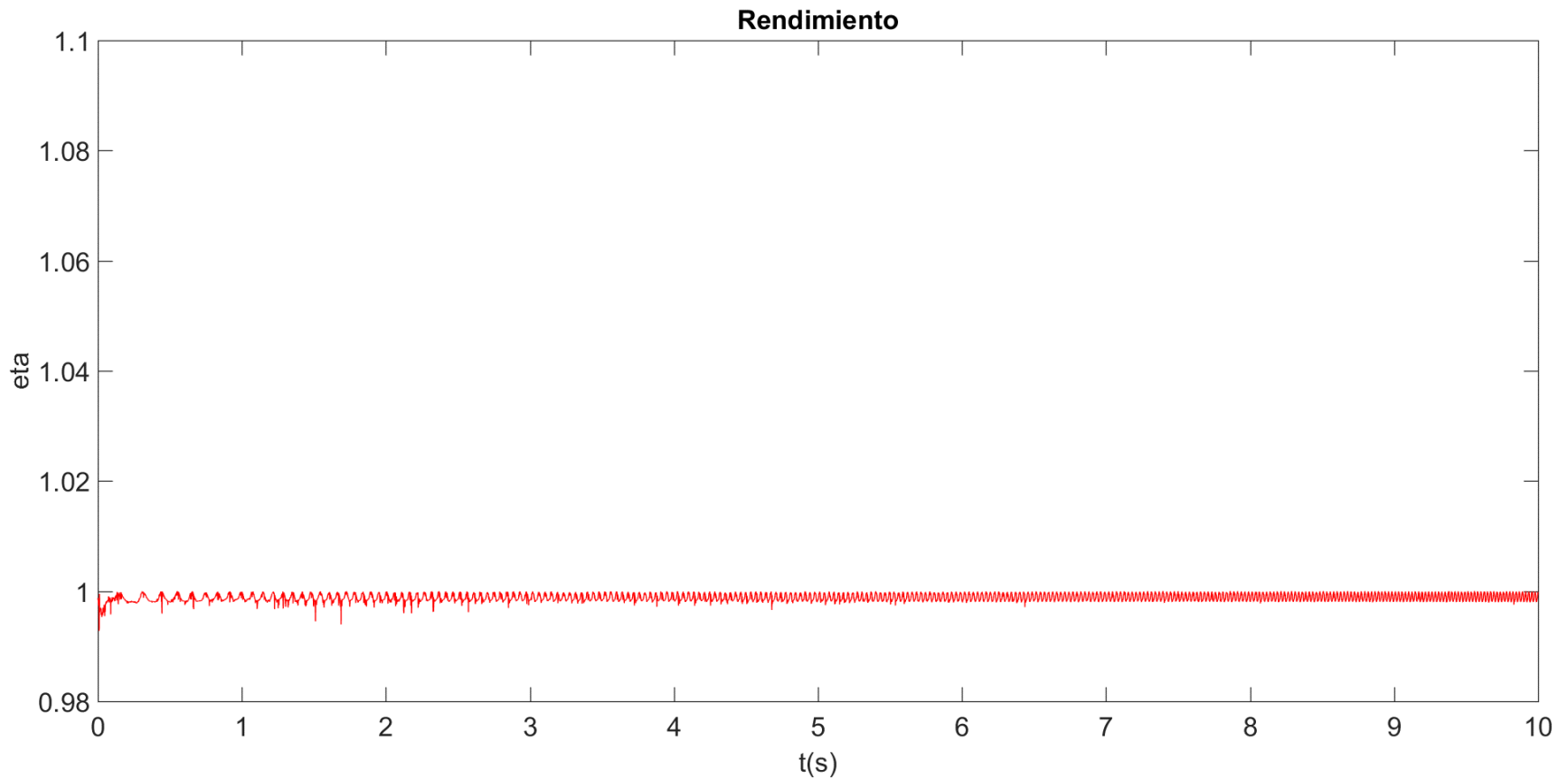
# Resultados

- Fuerzas de contacto normales y de fricción en contacto ring-planet:



# Resultados

- Rendimiento del sistema:



# Conclusiones y trabajo futuro

- Hemos creado una herramienta de simulación de engranajes en condiciones de funcionamiento, válida para el estudio de sistemas similares
- Hemos creado una herramienta de generación de engranajes con perfiles de evolvente real
- Hemos creado un modelo multicuerpo del cambio de buje, con resolución de la dinámica directa, renderizado 3D y detección de colisiones
- Hemos obtenido resultados satisfactorios de velocidades de los elementos del sistema y de las relaciones cinemáticas existentes entre ellos
- Se ha ensayado una nueva técnica de estimación de fuerzas de contacto a partir de simulación dinámica de sistemas con engranajes, así como para el cálculo de su rendimiento
- En el futuro, el trabajo iría encaminado a la validación del modelo creado en este proyecto, así como a la determinación experimental de los parámetros del contacto



# Trabajo Fin de Grado

*Gracias por su atención*

## **Autor:**

Diego Maceira Muíños

## **Tutores:**

Daniel Dopico Dopico

Emilio Sanjurjo Maroño

**Septiembre 2018**

