



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Modelado y simulación dinámica de una bicicleta convencional y su sistema de transmisión de movimiento

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

ETSID, Universidad Politécnica de Valencia

Alumno: Darío Ramos Pérez

Tutor: D. Josep Lluís Suñer Martínez

Curso 2017 - 2018

Valencia, septiembre de 2018

*A mi familia y amigos,
porque sin ellos estos cuatro años no habrían sido lo mismo
y no sería quien soy hoy.*

Modelado y simulación dinámica de una bicicleta convencional y su sistema de transmisión de movimiento

Resumen.....	9
Resum	10
Abstract	11
Memoria del proyecto.....	13
1. Introducción.....	15
1.1. Contexto histórico	15
1.2. Estructura mecánica de la bicicleta.....	17
1.3. Sistema de accionamiento de la bicicleta.....	18
1.4. Objetivos y motivación del proyecto	19
2. Estudio de alternativas y elección del modelo	20
2.1. Búsqueda del modelo ideal y análisis de alternativas	20
2.2. Elección final del modelo	23
3. Modelado del sistema en MSC Adams.....	24
3.1. Despiece del modelo	24
3.2. Modelado de la bicicleta.....	26
3.2.1. Obtención del factor de escala	26
3.2.2. Importación de las piezas en MSC Adams.....	29
3.2.3. Asignación de materiales a cada elemento	31
3.2.4. Ajuste geométrico de los elementos.....	34
3.3. Creación de restricciones y pares cinemáticos en el modelo.....	35
3.3.1. Pares de rotación de las ruedas, pedales y sillín	36
3.3.2. Par de rotación entre la horquilla y el cuadro	36
3.3.3. Resumen de pares cinemáticos.....	39
3.4. Condiciones de contorno del modelo	40

3.4.1.	Terreno de apoyo.....	40
3.4.2.	Contacto entre las ruedas y el terreno	43
3.4.3.	Prueba del modelo	44
3.4.4.	Adición del peso del ciclista.....	46
4.	Creación del sistema de transmisión de movimiento.....	48
4.1.	Preparación previa de la bicicleta	48
4.2.	Definición de la geometría de la transmisión	51
4.2.1.	Escenarios de simulación.....	51
4.2.2.	Creación del plato y el piñón.....	52
4.2.3.	Creación de la cadena	56
4.3.	Accionamiento de los pedales.....	59
4.3.1.	Movimiento rotatorio en el par de los pedales.....	60
5.	Proceso de simulación	62
5.1.	Ajuste de la simulación.....	62
5.2.	Ventanas de medida de parámetros	63
5.3.	Postprocesado de resultados	65
6.	Resultados obtenidos y análisis	66
6.1.	Escenarios 1, 2 y 3: pendiente del terreno del 0%	66
6.1.1.	Parámetros del centro de masas del sistema	66
6.1.2.	Parámetros de los pedales	69
6.1.3.	Parámetros de la rueda trasera.....	70
6.1.4.	Parámetros en la transmisión.....	72
6.2.	Escenarios 4, 5 y 6: pendiente del terreno del 12%	74
6.2.1.	Parámetros en el centro de masas del sistema	74
6.2.2.	Parámetros en los pedales	76
6.2.3.	Parámetros en la rueda trasera.....	77
6.2.4.	Parámetros en la transmisión.....	78
7.	Conclusiones del proyecto y desarrollos futuros	79

8. Bibliografía.....	81
Pliego de condiciones.....	83
1. Condiciones de ejecución del proyecto	85
1.1. Condiciones de los equipos utilizados	85
1.1.1. Hardware	85
1.1.2. Software	86
1.2. Condiciones del modelo	86
Presupuesto del proyecto	89
1. Presupuesto del proyecto	91
1.1. Mano de obra	91
1.2. Gastos generales y derivados.....	92
1.3. Software, hardware y amortizaciones.....	93
1.4. Resumen de costes totales.....	95
Planos	96
1.01. Plano de conjunto	
1.1. Cuadro	
1.2. Horquilla y manillar	
1.3. Pedales	
1.4. Rueda delantera	
1.5. Rueda trasera	
1.6. Sillín	
2.1. Plato de 34 dientes	
2.2. Piñón de 10 dientes	
2.3. Piñón de 24 dientes	
2.4. Piñón de 50 dientes	
2.5. Eslabón de la cadena	

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: 'BICICLETA DE LEONARDO DA VINCI'	15
ILUSTRACIÓN 2: 'ROVER SAFETY BICYCLE'	16
ILUSTRACIÓN 3: 'BICICLETA DE JOSÉ HERMIDA EN 2014'	16
ILUSTRACIÓN 4: 'BICICLETA DE ALBERTO CONTADOR EN 2017'	17
ILUSTRACIÓN 5: 'SISTEMA PLATO-CADENA-PIÑÓN'	18
ILUSTRACIÓN 6: 'LIBRERÍA GRABCAD'	21
ILUSTRACIÓN 7: 'CANDIDATO 1'	21
ILUSTRACIÓN 8: 'CANDIDATO 2'	21
ILUSTRACIÓN 9: 'CANDIDATO 4'	22
ILUSTRACIÓN 10: 'CANDIDATO 5'	22
ILUSTRACIÓN 11: 'CANDIDATO 6'	22
ILUSTRACIÓN 12: 'CANDIDATO 7'	22
ILUSTRACIÓN 13: 'CANDIDATO 8'	22
ILUSTRACIÓN 14: 'CANDIDATO 9'	22
ILUSTRACIÓN 15: 'MODELO DE BICICLETA ESCOGIDO'	23
ILUSTRACIÓN 16: 'DESPIECE CUADRO'	25
ILUSTRACIÓN 17: 'DESPIECE MANILLAR Y HORQUILLA'	25
ILUSTRACIÓN 18: 'DESPIECE SILLÍN'	25
ILUSTRACIÓN 19: 'DESPIECE PEDALES'	25
ILUSTRACIÓN 20: 'DESPIECE RUEDA DELANTERA Y TRASERA'	25
ILUSTRACIÓN 21: 'IMPORTACIÓN DE ARCHIVO CAD EN MSC ADAMS'	27
ILUSTRACIÓN 22: 'RUEDA IMPORTADA EN MSC ADAMS'	27
ILUSTRACIÓN 23: 'MARKERS CREADOS EN LOS EXTREMOS DE LA RUEDA'	28
ILUSTRACIÓN 24: 'IMPORTACIÓN DEL MODELO CON EL FACTOR DE ESCALA'	30
ILUSTRACIÓN 25: 'MODELO IMPORTADO CON TODOS LOS SÓLIDOS AGRUPADOS'	30
ILUSTRACIÓN 26: 'ÁRBOL DE ELEMENTOS TRAS LA MODIFICACIÓN'	31
ILUSTRACIÓN 27: 'ASIGNACIÓN DEL MATERIAL A CADA PIEZA'	33
ILUSTRACIÓN 28: 'EN ROJO, CILINDRO HUECO AUXILIAR'	34
ILUSTRACIÓN 29: 'NUEVA GEOMETRÍA DE LOS PEDALES TRAS EL CORTE'	35
ILUSTRACIÓN 30: 'MARKERS AUXILIARES EN EL CUADRO'	37
ILUSTRACIÓN 31: 'TRIGONOMETRÍA AUXILIAR'	38
ILUSTRACIÓN 32: 'COORDENADAS Y ORIENTACIÓN DEL MARKER CENTRAL EN EL MODELO'	38
ILUSTRACIÓN 33: 'VISUALIZACIÓN DE LOS PARES CINEMÁTICOS EN EL MODELO'	39
ILUSTRACIÓN 34: 'DIMENSIONES INICIALES DEL TERRENO'	40

ILUSTRACIÓN 35: 'POSICIÓN INICIAL DEL TERRENO Y LA BICICLETA'	41
ILUSTRACIÓN 36: 'VENTANA MOVE PARA DESPLAZAR ENTIDADES'	41
ILUSTRACIÓN 37: 'NUEVA POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DEL SISTEMA'	42
ILUSTRACIÓN 38: 'TERRENO CON INCLINACIÓN DEL 12%'	42
ILUSTRACIÓN 39: 'CREACIÓN DE CONTACTOS DE FRICCIÓN'	43
ILUSTRACIÓN 40: 'VENTANA DE LA SIMULACIÓN'	45
ILUSTRACIÓN 41: 'BICICLETA DESEQUILIBRADA'	46
ILUSTRACIÓN 42: 'MASAS PUNTUALES EN EL ÁRBOL DE ENTIDADES'	47
ILUSTRACIÓN 43: 'UBICACIÓN DEL MARKER_31 EN LOS PEDALES'	49
ILUSTRACIÓN 44: 'ACOPLE DE LOS PIÑONES CON LA RUEDA TRASERA'	49
ILUSTRACIÓN 45: 'IMPORTACIÓN DE LA PIEZA GEARFIT'	50
ILUSTRACIÓN 46: 'POSICIÓN DE LOS MARKERS PSMAR32 Y MARKER_31 EN EL MODELO'	51
ILUSTRACIÓN 47: 'CREACIÓN DE LAS RUEDAS DENTADAS'	53
ILUSTRACIÓN 48: 'MÉTODO 2D LINKS PARA LA TRANSMISIÓN'	53
ILUSTRACIÓN 49: 'GEOMETRÍA DEL PLATO'	54
ILUSTRACIÓN 50: 'GEOMETRÍA DEL PIÑÓN'	54
ILUSTRACIÓN 51: 'PAR Y UBICACIÓN DEL PLATO'	55
ILUSTRACIÓN 52: 'PAR Y UBICACIÓN DEL PIÑÓN'	55
ILUSTRACIÓN 53: 'PLATO Y PIÑÓN CREADOS EN EL MODELO'	55
ILUSTRACIÓN 54: 'CREACIÓN DE LA CADENA'	56
ILUSTRACIÓN 55: 'MÉTODO LINEAR PARA LA CADENA'	56
ILUSTRACIÓN 56: 'ADVERTENCIA TRAS CREAR LA CADENA'	57
ILUSTRACIÓN 57: 'TRANSMISIÓN CREADA COMPLETAMENTE'	58
ILUSTRACIÓN 58: 'DESARROLLOS CREADOS EN EL ÁRBOL DE ENTIDADES'	58
ILUSTRACIÓN 59: 'FUNCIÓN DE VELOCIDAD DEFINIDA EN ADAMS'	60
ILUSTRACIÓN 60: 'VENTANA DE LA SIMULACIÓN'	62
ILUSTRACIÓN 61: 'CONTROLES DE ANIMACIÓN DE LA SIMULACIÓN'	63
ILUSTRACIÓN 62: 'CREACIÓN DE UNA MEDICIÓN'	64
ILUSTRACIÓN 63: 'POSTPROCESADO EN VÍDEO'	65
ILUSTRACIÓN 64: 'VELOCIDAD LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 0%)'	66
ILUSTRACIÓN 65: 'ACELERACIÓN LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 0%)'	67
ILUSTRACIÓN 66: 'DISTANCIA RECORRIDA POR LA BICICLETA (PENDIENTE 0%)'	68
ILUSTRACIÓN 67: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 0%)'	69
ILUSTRACIÓN 68: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 0%)'	70
ILUSTRACIÓN 69: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 0%)'	71
ILUSTRACIÓN 70: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 0%)'	71

ILUSTRACIÓN 71: 'MEDIDA DE LA FUERZA EN EL ESLABÓN DE UNIÓN'	72
ILUSTRACIÓN 72: 'FUERZA ACTUANTE EN EL ESLABÓN DE LA CADENA (PENDIENTE 0%)'	73
ILUSTRACIÓN 73: 'VELOCIDAD LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 12%)'	74
ILUSTRACIÓN 74: 'ACELERACIÓN LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 12%)'	75
ILUSTRACIÓN 75: 'DISTANCIA RECORRIDA POR EL SISTEMA (PENDIENTE 12%)'	75
ILUSTRACIÓN 76: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 12%)'	76
ILUSTRACIÓN 77: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 12%)'	76
ILUSTRACIÓN 78: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 12%)'	77
ILUSTRACIÓN 79: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 12%)'	77
ILUSTRACIÓN 80: 'FUERZA ACTUANTE EN EL ESLABÓN DE LA CADENA (PENDIENTE 12%)'	78

Anotación: todas las ilustraciones son de creación propia, excepto las citadas en la bibliografía, en el apartado 8 de la memoria del proyecto.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: 'COMPONENTES DEL MODELO'	24
TABLA 2: 'POSICIÓN Y DISTANCIA ENTRE MARKERS DE LA RUEDA AUXILIAR'	28
TABLA 3: 'MATERIAL Y MASA DE CADA COMPONENTE'	33
TABLA 4: 'PARES CINEMÁTICOS DEL MODELO'	35
TABLA 5: 'COORDENADAS DE LOS MARKERS AUXILIARES'	37
TABLA 6: 'CONTACTOS ENTRE LAS RUEDAS Y EL SUELO'	43
TABLA 7: 'CARACTERÍSTICAS DE LAS MASAS PUNTUALES'	47
TABLA 8: 'MARKERS DE REFERENCIA PARA LA TRANSMISIÓN'	50
TABLA 9: 'ESCENARIOS DE ESTUDIO DE LA SIMULACIÓN'	52
TABLA 10: 'MEDICIONES TOMADAS EN LA SIMULACIÓN'	64
TABLA 11: 'PRESUPUESTO MANO DE OBRA DIRECTA'	92
TABLA 12: 'PRESUPUESTO GASTOS GENERALES'	93
TABLA 13: 'AMORTIZACIÓN DEL SOFTWARE'	94
TABLA 14: 'AMORTIZACIÓN HARDWARE'	95
TABLA 15: 'RESUMEN PRESUPUESTO TOTAL'	95

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: 'CONSERVACIÓN DE LA VELOCIDAD LINEAL EN LA CADENA'	19
ECUACIÓN 2: 'CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALA'	28
ECUACIÓN 3: 'CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL CUADRO Y LA HORQUILLA'	32
ECUACIÓN 4: 'COORDENADAS DEL MARKER CENTRAL DE LA DIRECCIÓN'	37
ECUACIÓN 5: 'ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DEL MARKER CENTRAL DE LA DIRECCIÓN'	38
ECUACIÓN 6: 'DISTRIBUCIÓN DEL PESO DEL CICLISTA EN EL SILLÍN Y EL MANILLAR'	46
ECUACIÓN 7: 'FUNCIÓN DE VELOCIDAD PARA EL PAR R_PEDAL_CUADRO'	60
ECUACIÓN 8: 'ESTRUCTURA DE LA FUNCIÓN STEP'	61
ECUACIÓN 9: 'CÁLCULO DE LA VELOCIDAD LINEAL DE LA BICICLETA'	67
ECUACIÓN 10: 'COSTE POR HORA TRABAJADA SEGÚN EL BOE'	91
ECUACIÓN 11: 'COSTE DE LA SEGURIDAD SOCIAL'	91
ECUACIÓN 12: 'COSTE PAGAS EXTRA'	92
ECUACIÓN 13: 'CÁLCULO AMORTIZACIÓN SOFTWARE'	94
ECUACIÓN 14: 'CÁLCULO AMORTIZACIÓN EQUIPO PERSONAL'	94
ECUACIÓN 15: 'CÁLCULO AMORTIZACIÓN EQUIPO ETSID'	94

RESUMEN

El objetivo del siguiente trabajo fin de grado es modelar y simular dinámicamente una bicicleta de uso convencional, con el fin de realizar un análisis dinámico en profundidad sometiéndola a diversas situaciones. El principal software que se va a utilizar es MSC Adams, uno de los referentes en el campo de la simulación de la dinámica de sistemas multi-cuerpo.

En primer lugar, se creará el modelo de la bicicleta mediante un diseño CAD obtenido de una comunidad de libre acceso, atendiendo a las proporciones de una bicicleta real y el peso del conjunto. Después se crearán los pares cinemáticos y restricciones necesarias para el correcto funcionamiento del modelo. En tercer lugar, se desarrollará el sistema de piñones, platos y cadena para transmitir el movimiento y someterlo a estudio.

Una vez creado el modelo del conjunto, se someterá a diversas situaciones específicas para estudiar su dinámica, variando la pendiente del terreno y el desarrollo utilizado en la transmisión.

RESUM

L'objectiu del següent treball fi de grau és modelar i simular dinàmicament una bicicleta d'ús convencional, per tal de realitzar un anàlisi dinàmic en profunditat sotmetent-la a diverses situacions. El principal programa que es va a utilitzar és MSC Adams, un dels referents en el camp de la simulació de la dinàmica de sistemes multi-cos.

En primer lloc, es crearà el model de la bicicleta mitjançant un disseny CAD obtingut d'una comunitat de lliure accés, atenent a les proporcions d'una bicicleta real i el pes del conjunt. Després es crearan els parells cinemàtics i restriccions necessàries per al correcte funcionament del model. En tercer lloc, es desenvoluparà el sistema de pinyons, plats i cadena per transmetre el moviment i sotmetre-ho a estudi.

Una vegada creat el model del conjunt, es sotmetrà a diverses situacions específiques per estudiar la seua dinàmica, variant la pendent del terreny i el desenvolupament utilitzat en la transmissió.

ABSTRACT

The goal of the following final degree project is to model and simulate a conventional bicycle, in order to perform a dynamic analysis in depth submitting to various situations. The main software that will be used is MSC Adams, one of the leaders in the field of simulation of multi-body systems dynamics.

First, the model of the bicycle will be created with a CAD design obtained from a free access community, taking into account the proportions of a real bicycle and the weight of the whole. After that, the kinematic pairs and restrictions necessary for the correct operation of the model will be created. In the third place, the system of cassette, chainrings and chain will be developed to transmit the movement and submit it to study.

Once the model of the set has been created, it will be simulated in several specific situations to study its dynamics, varying the slope of the terrain and the development used in the transmission.

Memoria
del
proyecto

1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto histórico

Si nos preguntamos cuál es el origen de la bicicleta, tal vez debamos retroceder hasta el Antiguo Egipto. A lo largo de la historia se han encontrado jeroglíficos como los que aparecen en el obelisco de Luxor situado en París en los que se ilustran hombres montados en una barra horizontal apoyada sobre dos ruedas para desplazarse. También se han encontrado figuras similares de la época de los romanos en algunos frescos de la ciudad volcánica de Pompeya, incluso bocetos hechos por Leonardo da Vinci que se asemejan mucho a la bicicleta de hoy en día.

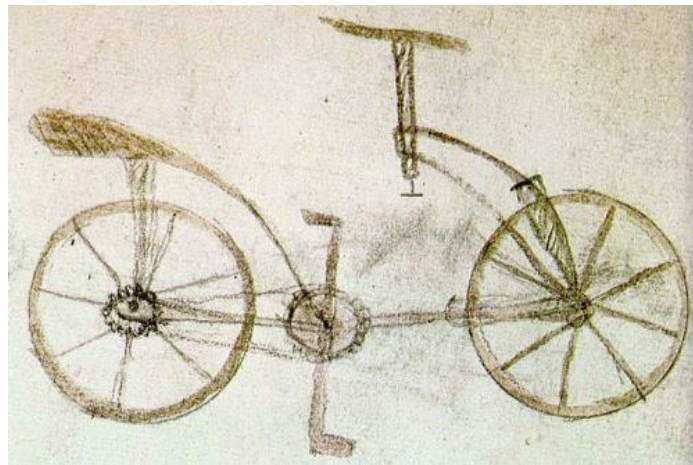


ILUSTRACIÓN 1: 'BICICLETA DE LEONARDO DA VINCI'

A principios del siglo XIX, el escocés Kirkpatrick MacMillan creó la primera bicicleta realmente manejable por una persona utilizando pedales, y no propulsándose con los pies en el suelo como se había hecho hasta el momento. A partir de este primer modelo se fueron haciendo sucesivas innovaciones y mejoras en el sistema de transmisión de movimiento, y en el año 1864 se inventó la primera que contaba con una cadena de transmisión.

Tras muchas innovaciones y variaciones del modelo original de MacMillan, en el año 1885 el británico John Starley Kemp, considerado el padre de la bicicleta moderna, creó la 'Rover Safety Bicycle', con las dos ruedas del mismo radio, transmisión por cadena y engranajes, pedales y horquilla inclinada, modelo a partir del cuál se han desarrollado las bicicletas modernas de hoy en día. Once años

después, y tras el exitoso invento del neumático, el ciclismo pasó a declararse deporte olímpico en los primeros Juegos Olímpicos de la era moderna.



ILUSTRACIÓN 2: 'ROVER SAFETY BICYCLE'

Desde entonces, la bicicleta ha ido evolucionando hasta convertirse en lo que se conoce hoy en día: auténticas obras de ingeniería con miles de estudios a sus espaldas, alzándose como uno de los vehículos más utilizados por la población en todo el mundo.

Existen múltiples modalidades de ciclismo de alto nivel, siendo las dos más conocidas y estandarizadas el ciclismo de montaña y carretera. En ambas modalidades han destacado varios españoles durante la historia, entre ellos, José Hermida, campeón mundial de ciclismo de montaña en diversas ocasiones.



ILUSTRACIÓN 3: 'BICICLETA DE JOSÉ HERMIDA EN 2014'

También destaca Alberto Contador, retirado como ciclista profesional en el año 2017 y conocido en el mundo del ciclismo como uno de los mejores escaladores (ciclistas especialistas en terrenos con un gran desnivel prolongado) de la historia y ganador de dos Giros de Italia, dos Tours de Francia y tres Vueltas a España. Ambos ciclistas han utilizado bicicletas del más alto nivel en cuanto a diseño y materiales, cuyo valor en el mercado superaría los diez mil euros.



ILUSTRACIÓN 4: 'BICICLETA DE ALBERTO CONTADOR EN 2017'

1.2. Estructura mecánica de la bicicleta

A pesar de los múltiples tipos de bicicletas existentes en el mercado, hoy en día los componentes básicos de todas ellas son los mismos:

- Cuadro: es el componente principal de la bicicleta y sirve de elemento de unión entre todos los elementos de la misma. Es el encargado de repartir el peso del ciclista al resto de componentes para lograr un correcto funcionamiento. Al ser la parte más voluminosa del conjunto, es también la más pesada y supone más de un 50% del peso total.
- Horquilla: es el elemento que transmite el movimiento desde el manillar hasta la rueda delantera. Básicamente existen dos tipos: horquilla rígida, formada por un solo bloque de material; horquilla de suspensión: como su

nombre indica, sirve para amortiguar los impactos del terreno en la bicicleta y el ciclista.

- Asiento: formado por la tija y el sillín.
- Ruedas: formadas por cinco elementos principales: radios, buje, cubierta, llanta y cámara.
- Frenos: existen de varios tipos, principalmente los de pinza o V-Brake y los de disco.

Estos elementos son los que cualquier tipo de bicicleta incluye. Obviamente, dependiendo del objetivo con el que se ha diseñado cada bicicleta, estos componentes tendrán unas características u otras, variando así su material de fabricación, forma, dimensiones, peso, precio, etc.

1.3. Sistema de accionamiento de la bicicleta

El sistema de accionamiento de una bicicleta se basa en el tradicional sistema de plato-cadena-piñón. Para accionarlo, el ciclista debe ejercer una fuerza sobre el pedal en la dirección del movimiento, haciendo girar el plato en sentido horario si se toma un sistema de coordenadas cartesianas y suponiendo que el desplazamiento de la bicicleta va en la dirección del eje X positivo.

El estudio de este componente del conjunto será el objetivo principal de este proyecto.

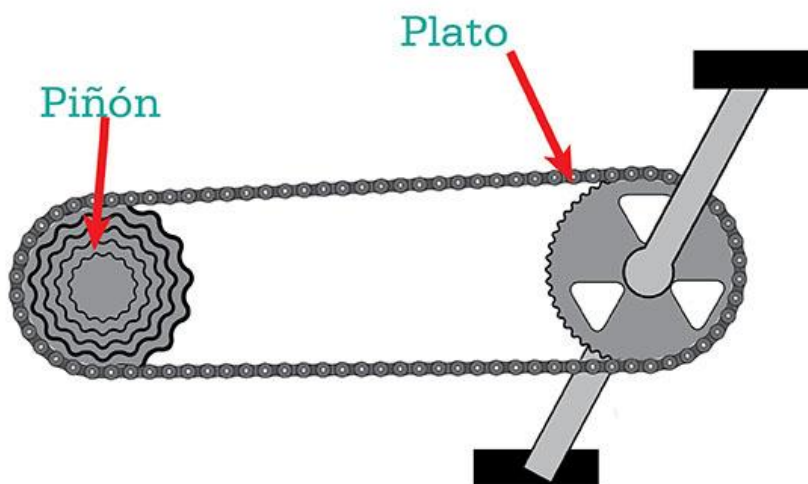


ILUSTRACIÓN 5: 'SISTEMA PLATO-CADENA-PIÑÓN'

Los cálculos sobre este componente pueden ser muy complejos y de muchos tipos, pero este proyecto se va a basar en el siguiente principio básico:

$$\text{Velocidad lineal de la cadena} = \omega_{\text{piñón}} \cdot r_{\text{piñón}} = \omega_{\text{plato}} \cdot r_{\text{plato}}$$

ECUACIÓN 1: 'CONSERVACIÓN DE LA VELOCIDAD LINEAL EN LA CADENA'

Este principio determina que la velocidad lineal de cualquier punto de la cadena se mantiene a lo largo de todo el recorrido, pero no ocurre así con las velocidades angulares del plato y el piñón. Es precisamente esta última aclaración la que hace que la bicicleta adquiera más velocidad lineal o menos en función del desarrollo utilizado, y ese será el objetivo del proyecto.

1.4. Objetivos y motivación del proyecto

Para fabricar una bicicleta, deben tenerse en cuenta muchos factores para adaptarla al terreno y las condiciones en que va a ser utilizada y optimizarla para conseguir el mejor rendimiento posible. Como todo en la industria, el nivel de adaptación y optimización dependerá del coste del producto y a medida que éste suba, también lo hará la calidad de la bicicleta.

Con este trabajo final de grado se pretende realizar un estudio sobre una bicicleta convencional, y más concretamente, sobre su sistema de plato-cadena-piñón y los distintos desarrollos disponibles en la misma. Para ello se van a seguir unos sucesivos pasos que se detallarán a lo largo del proyecto.

Los elementos que se utilizarán para componer la bicicleta serán básicos, para así no desviarse del objetivo principal. La bicicleta no dispondrá de suspensión, y las dimensiones y pesos se establecerán en base a lo estándar en este tipo de bicicletas.

Personalmente, la elección de este proyecto se basa en el interés por aprender y visualizar algo tan cotidiano en nuestras vidas que en un principio parece complejo de entender para nosotros. En ocasiones es difícil visualizar la teoría si no se demuestra con ejemplos prácticos reales, y por ese motivo he decidido realizar este proyecto, ya que es algo muy práctico y útil para entender el funcionamiento de una bicicleta.

2. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS Y ELECCIÓN DEL MODELO

Desde hace unos años, internet se ha convertido en una de las principales fuentes de información mundial. Gracias a la inmensa cantidad de usuarios que navegan cada día en la red, existe una infinidad de recursos disponibles para todo el mundo. En muchas ocasiones, la información que se puede encontrar es de dudosa procedencia y no se puede confiar en ella. Sin embargo, existen muchísimas fuentes oficiales fiables y que se deben tener muy en cuenta.

Para el proyecto que se está desarrollando, es necesario obtener un modelo en CAD (*Computer Assisted Design*) asimilable por el software que se va a utilizar para la simulación, que en este caso es MSC Adams View. Para ello, existen múltiples librerías en la red con excelentes modelos que se podrán utilizar de forma libre.

Una vez obtenido el modelo adecuado, se debe ajustar el mismo a la simulación que se desea realizar, creando las restricciones necesarias e imponiendo las condiciones de contorno que sean pertinentes.

2.1. Búsqueda del modelo ideal y análisis de alternativas

De las múltiples librerías existentes en la red, la elegida para este proyecto ha sido la librería de GrabCAD, una comunidad online de libre acceso en la que los usuarios colaboran entre ellos y comparten sus recursos de forma altruista y desinteresada. En ella existen una infinidad de modelos realizados en CAD en diferentes formatos, los cuales pueden ser utilizados en softwares especializados. Cualquier usuario puede colaborar en esta comunidad, por lo que existen desde modelos muy básicos con simples formas geométricas hasta modelos excepcionales con todo tipo de detalles.

Para este proyecto, se necesita un modelo básico que no sea demasiado pesado, ya que el entorno de Adams no está creado para utilizarse como software de diseño gráfico y modelado 3D, por lo que si se incluye un modelo demasiado complejo puede resultar muy laborioso realizar cualquier tarea. Por eso, la búsqueda del modelo se debe basar en la simplicidad, intentando que se asemeje a una bicicleta real pero sin detalles innecesarios para este proyecto.

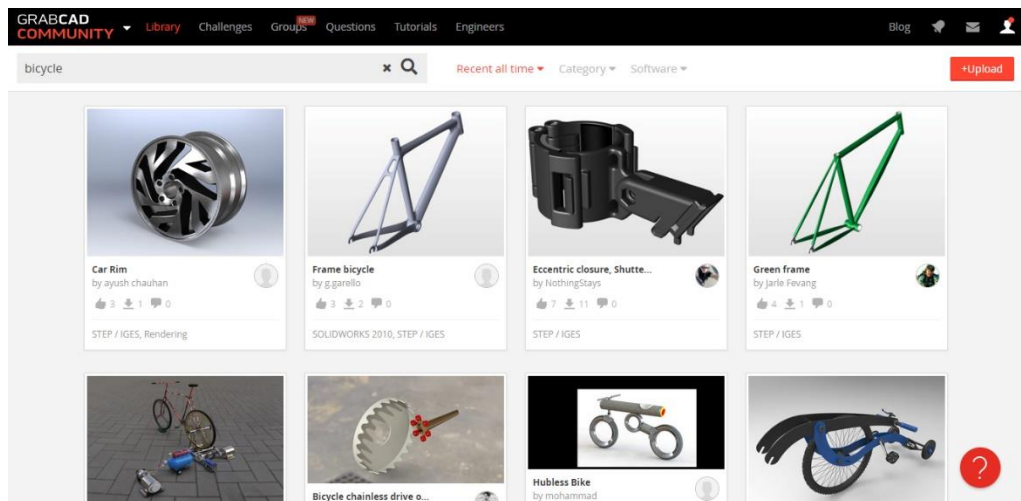


ILUSTRACIÓN 6: 'LIBRERÍA GRABCAD'

Para encontrar recursos, basta con hacer una simple búsqueda en la librería. Buscando el término *Bicycle*, comienzan a aparecer modelos y componentes de todo tipo: cadenas, platos, piñones, horquillas, manillares, cuadros, bicicletas completas, etc.

Tras una búsqueda exhaustiva, se establece una lista de nueve modelos candidatos para la simulación y se estudia cada uno detalladamente como se detallará a continuación:

En primer lugar, se encuentran dos modelos muy básicos. En un principio parecían buenos candidatos, pero tras analizarlos se decide descartarlos debido a la falta de algunos de los componentes clave y el poco detalle de otros.



ILUSTRACIÓN 7: 'CANDIDATO 1'



ILUSTRACIÓN 8: 'CANDIDATO 2'

En segundo lugar, se encuentra un modelo de bicicleta de carretera muy bien modelado. En principio parece el candidato ideal, pero su autor lo modeló en un solo archivo y con componentes muy detallados, por lo que tras intentar importarlo en Adams y comprobar que resulta muy pesado, se decide descartarlo también, y lo mismo ocurre con los dos siguientes modelos de montaña.



ILUSTRACIÓN 9: 'CANDIDATO 4'



ILUSTRACIÓN 10: 'CANDIDATO 5'



ILUSTRACIÓN 11: 'CANDIDATO 6'



ILUSTRACIÓN 12: 'CANDIDATO 7'

Después se encuentran otros dos modelos de bicicleta de montaña más básicos, pero su formato no es admisible por Adams y requeriría de un software externo, por lo que se descartan también.



ILUSTRACIÓN 13: 'CANDIDATO 8'



ILUSTRACIÓN 14: 'CANDIDATO 9'

2.2. Elección final del modelo

Finalmente, tras realizar una búsqueda exhaustiva, se ha optado por un modelo de bicicleta sin suspensión, ya que el objetivo del proyecto es estudiar el sistema de transmisión de velocidades y no es necesario incluir suspensiones para dicho objetivo. Tampoco incluye cables, pinzas o discos de freno, para que el modelo sea lo más simétrico posible y evitar problemas de equilibrio a la hora de realizar la simulación.



ILUSTRACIÓN 15: 'MODELO DE BICICLETA ESCOGIDO'

Puede observarse que el modelo es una versión muy básica de bicicleta, pero es suficiente y óptimo para el desarrollo del proyecto, ya que al constar de pocos componentes el peso del archivo será mucho menor, por lo que será más fácil procesarlo, simularlo y analizarlo y se evitarán problemas de “cuelgues” del programa. Cabe destacar que algunos de los componentes del modelo serán modificados o no serán utilizados, como los platos y piñones, ya que MSC Adams cuenta con el módulo *Machinery*, ideado para modelar este tipo de sistemas de transmisión, como se explicará más adelante.

3. MODELADO DEL SISTEMA EN MSC ADAMS

Tras haber encontrado el modelo ideal para este proyecto, se procede a su introducción en el software de desarrollo del mismo. El proceso consta de varios pasos y supone la parte más laboriosa y compleja del proyecto, por lo que se realizará una explicación pormenorizada en los apéndices siguientes.

3.1. Despiece del modelo

En la librería de GrabCAD, el modelo se encuentra dividido en varios archivos en formato ProE (.prt), incluyendo cada uno una pieza, por lo que es muy sencillo seleccionar qué piezas se utilizarán para la simulación. A pesar de que el formato recomendado para utilizar en MSC Adams es el Parasolid (.x_t), el formato ProE también es admisible y se genera de forma correcta, por lo que se utilizará ese a pesar de que aparentemente no es el más óptimo.

Como ya se ha comentado previamente, algunos de los componentes que vienen en el modelo escogido no serán utilizados, por lo que se han obviado en el detalle. Los componentes elegidos para realizar la simulación en MSC Adams son los que se detallan a continuación:

Pieza	Descripción
<i>Cuadro</i>	Componente principal del conjunto. Se encarga de ensamblar el resto de partes de la bicicleta y de distribuir el peso del ciclista.
<i>Manillar y horquilla</i>	Forman una sola pieza, y se encargan de unir el movimiento de los brazos del ciclista con la rueda delantera para darle el movimiento directriz.
<i>Sillín</i>	Su función es únicamente servir de punto de apoyo del tronco del ciclista.
<i>Pedales</i>	Se encargan de transmitir el movimiento de los pies del ciclista al plato e, indirectamente, a la rueda motriz.
<i>Ruedas delantera y trasera</i>	Ambas son del mismo tamaño y materiales. La rueda delantera es la directriz y la trasera es la que, ensamblada al piñón, actúa como rueda motriz.

TABLA 1: 'COMPONENTES DEL MODELO'

Los materiales utilizados serán básicamente dos: aluminio y caucho. El cuadro, el conjunto manillar y horquilla, los pedales y las llantas serán de aluminio. Obviamente, en una bicicleta real hay más materiales, como el caucho de las manetas del manillar, la goma protectora de los cables de freno y cambio de velocidad, el acero de dichos cables y algunos más, pero como esto se escapa del objetivo del proyecto, se va a simplificar todo en un único material, ya que además, esos componentes minoritarios no suponen una gran masa sobre el total del conjunto y no influyen de forma tan acusada. A continuación se presentan unas imágenes de las piezas ya importadas en MSC Adams, proceso que se explicará a continuación.



ILUSTRACIÓN 16: 'DESPIECE CUADRO'



ILUSTRACIÓN 17: 'DESPIECE MANILLAR Y HORQUILLA'

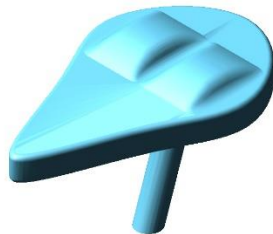


ILUSTRACIÓN 18: 'DESPIECE SILLÍN'

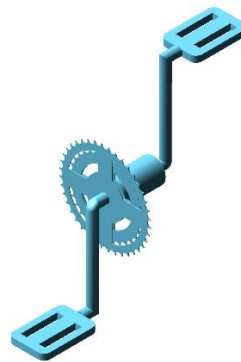


ILUSTRACIÓN 19: 'DESPIECE PEDALES'



ILUSTRACIÓN 20: 'DESPIECE RUEDA DELANTERA Y TRASERA'

Obsérvese que, como ya se ha comentado, algunas de las piezas deberán ser modificadas para simplificar el modelo.

Principalmente, se realizarán dos modificaciones:

1. Se eliminará el plato previamente modelado en el conjunto de los pedales, ya que se utilizará el módulo *Machinery* de MSC Adams para tal fin.
2. Se separarán llantas y neumáticos para poder asignar el material correspondiente a cada uno, siendo las llantas de aluminio y los neumáticos de caucho. Esto es así porque si no se hiciera esa distinción, el peso final del conjunto se alejaría bastante de la realidad.

3.2. Modelado de la bicicleta

En este apartado del proyecto se explicará pormenorizadamente cómo realizar la importación de las piezas obtenidas en GrabCAD en el entorno de simulación. Después de ello, se deberán agrupar en distintos sólidos con el objetivo de facilitar el ensamblaje y evitar problemas durante la simulación. Una vez hecha la separación, se añadirán elementos en los puntos clave de las piezas para facilitar la identificación de dichos puntos y el movimiento de ellas en el plano de trabajo, y se añadirán las restricciones necesarias entre las piezas, creando los pares adecuados para el correcto funcionamiento del conjunto. También se asignarán los materiales de cada pieza y se orientará el sistema de la forma más conveniente para el análisis.

3.2.1. Obtención del factor de escala

El primer paso para generar el modelo de simulación es importar los archivos descargados en GrabCAD. En este caso, los archivos se encuentran en formato ProE (extensiones .asm y .prt), formato ampliamente utilizado en el diseño asistido por ordenador (CAD). Para generar dichos archivos, su autor ha utilizado el software PTC Creo Parametric.

Antes de nada, hay que destacar que este modelo ha sido realizado a escala por su autor, por lo que para importarlo correctamente se deberá multiplicar cada pieza por el factor proporcional correspondiente, para que las dimensiones finales sean reales y los análisis no se vean alterados proporcionando resultados incorrectos.

Para averiguar este factor, hay que importar alguno de los elementos del conjunto y calcular sus dimensiones en el plano. Obtenidas esas dimensiones, se compararán con las dimensiones reales que debería tener y se calcula el factor de ampliación o reducción necesario.

La pieza que se utilizará para calcular el factor será la rueda, y se utilizará como dimensión de referencia el diámetro externo de ella. Se considerará que la rueda a tamaño real tendría un diámetro externo de 26 pulgadas, es decir, 660,40 mm.

El primer paso es importar la rueda al entorno de MSC Adams. Para ello, se crea un nuevo modelo en la ruta de trabajo, que deberá ser la misma en la que se ubican los archivos CAD y no deberá tener espacios ni caracteres especiales para evitar problemas. Una vez creado el modelo, se importa el archivo a través del menú *File > Import...*, seleccionando el tipo de archivo adecuado y asignándole un nombre (esto no es importante, ya que el archivo es temporal y no se utilizará más adelante).

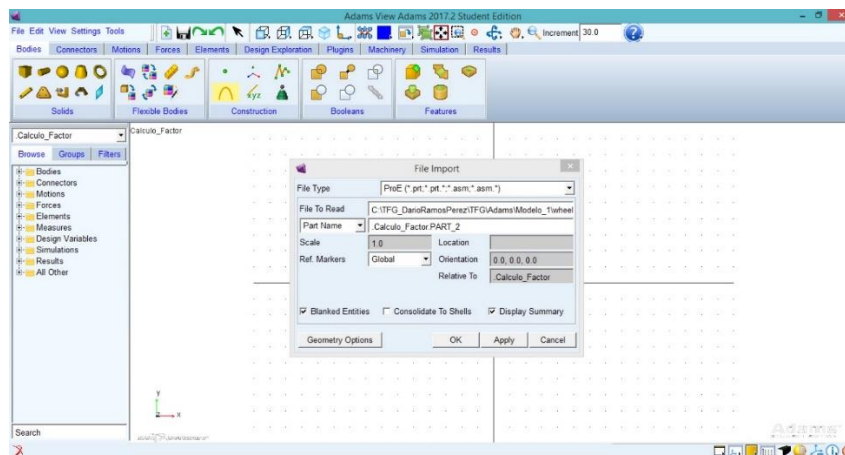


ILUSTRACIÓN 21: 'IMPORTACIÓN DE ARCHIVO CAD EN MSC ADAMS'

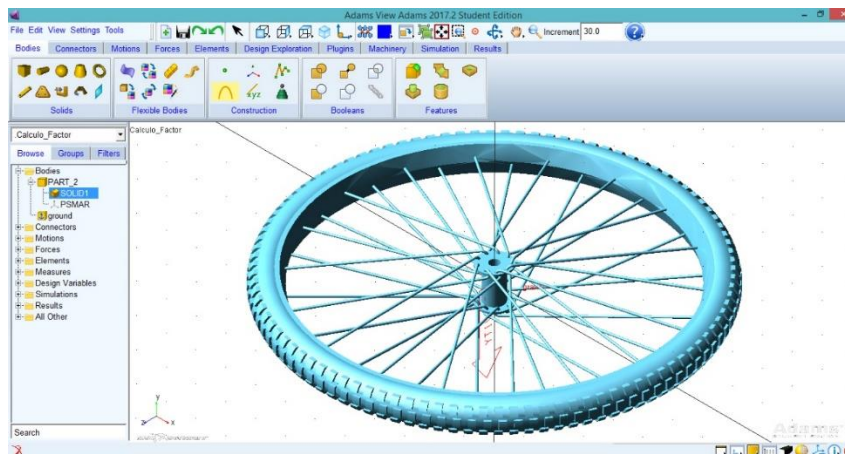


ILUSTRACIÓN 22: 'RUEDA IMPORTADA EN MSC ADAMS'

Tras tener el archivo en Adams, lo siguiente es añadir *Markers* de referencia sobre el objeto para poder obtener el diámetro externo de la rueda. Para ello se hace click en *Bodies > Construction > Marker*, y marcando la opción *Add to Part* se crea el *Marker* en el punto que se crea conveniente.

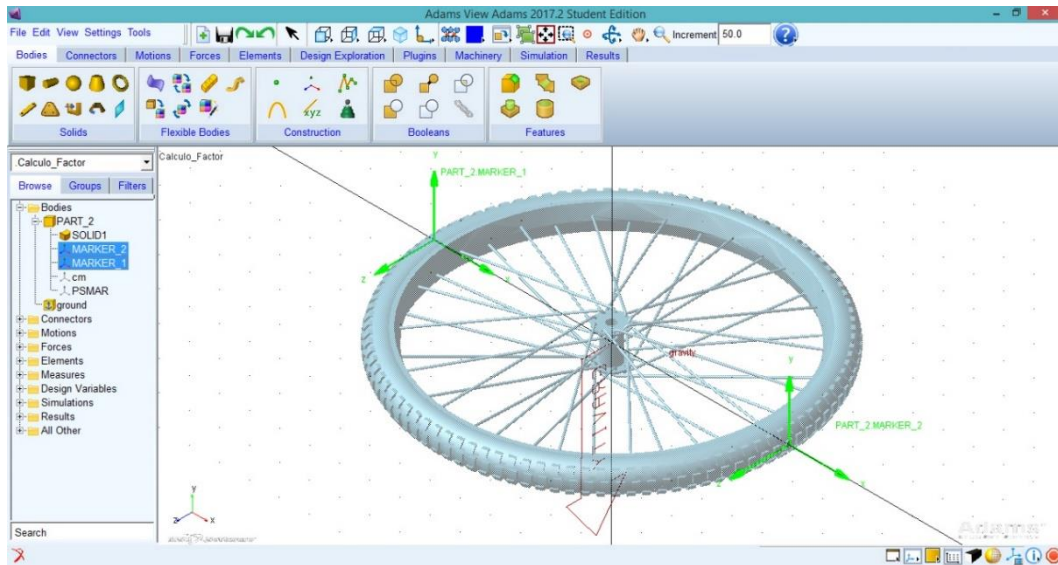


ILUSTRACIÓN 23: 'MARKERS CREADOS EN LOS EXTREMOS DE LA RUEDA'

Con las coordenadas de los *Markers* creados, puede obtenerse el diámetro de la rueda:

Marker	Coordenada X
MARKER_1	-294,7840674628 mm
MARKER_2	294,7840674628 mm
<i>Distancia entre Markers</i>	589,568134926 mm

TABLA 2: 'POSICIÓN Y DISTANCIA ENTRE MARKERS DE LA RUEDA AUXILIAR'

Por lo tanto, el diámetro exterior de la rueda del modelo es de 589,57 mm. Como el diámetro real es de 660,40 mm, el factor de escala de las piezas es:

$$\text{Factor de escala} = \frac{660,40}{589,57} = 1,12$$

ECUACIÓN 2: 'CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALA'

Es decir, para obtener medidas reales en el modelo de MSC Adams, habrá que multiplicar por 1,12 las piezas importadas para que su tamaño aumente hasta las dimensiones reales. Esto se hace en el momento de la importación, incluyendo ese valor en el campo *Scale*. Es importante decir que este valor se habría podido hallar de forma más sencilla en otro software, como SolidWorks o AutoCAD, pero como el programa principal de este proyecto es MSC Adams, se ha preferido utilizar los recursos disponibles en él para conseguir el factor de escala.

3.2.2. Importación de las piezas en MSC Adams

Una vez obtenido el factor de ampliación de la pieza para que las dimensiones en Adams sean las correctas, el siguiente paso es importar las piezas al entorno del programa. Para ello, los pasos a seguir se detallarán a continuación:

Se crea la base de datos de trabajo en la misma ruta donde se ubican los archivos CAD, y se modifica la mesa de trabajo para darle las dimensiones adecuadas, aunque esto puede hacerse en cualquier momento del proyecto. Después, se importan las piezas mediante el menú *File > Import...*, de la misma manera que en el apartado anterior. En este caso, el modelo permite hacer la importación de dos maneras: importando todo el conjunto de una sola vez y eliminando las partes que no se necesitan, o importando solamente las piezas necesarias una por una, ya que el autor ha proporcionado el modelo de las dos maneras.

Tras analizar las posibilidades, se decide importar el modelo completo para evitar problemas con la orientación y localización de cada pieza para así asegurar que todo concuerda y está bien situado en el plano. Es importante incluir en este paso el factor de escala calculado previamente y desmarcar la casilla *Consolidate To Shells*, para que los sólidos se importen de forma separada. La extensión del modelo completo es *.asm*, pero es el mismo formato que el de extensión *.prt* de los apartados anteriores, por lo que para realizar la importación se actúa de la misma manera. También se puede modificar en este paso la localización y orientación del modelo, pero no es necesario en este caso.

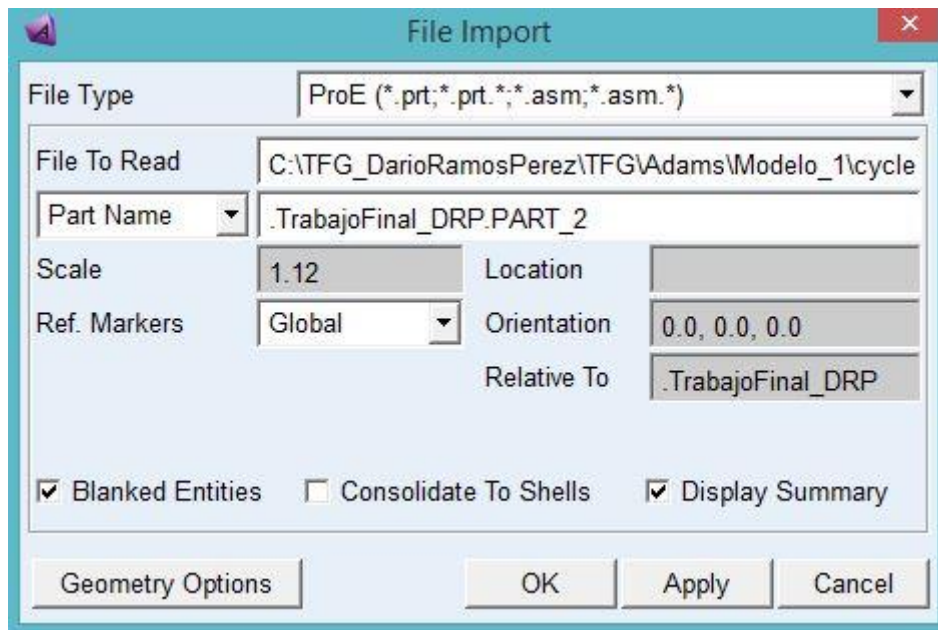


ILUSTRACIÓN 24: 'IMPORTACIÓN DEL MODELO CON EL FACTOR DE ESCALA'

Como el modelo habrá importado todos los sólidos en un mismo Body, denominado en este caso como PART_2, es necesario separarlos para poder establecer los pares y restricciones entre ellos, por lo que deberá copiarse el conjunto PART_2 inicial tantas veces como sea necesario, y se eliminarán los sólidos que no pertenezcan a cada uno de ellos, para que cada pieza del modelo quede correctamente diferenciada. También se puede comprobar que el factor de escala es correcto y que las dimensiones del modelo son las que se buscaban.

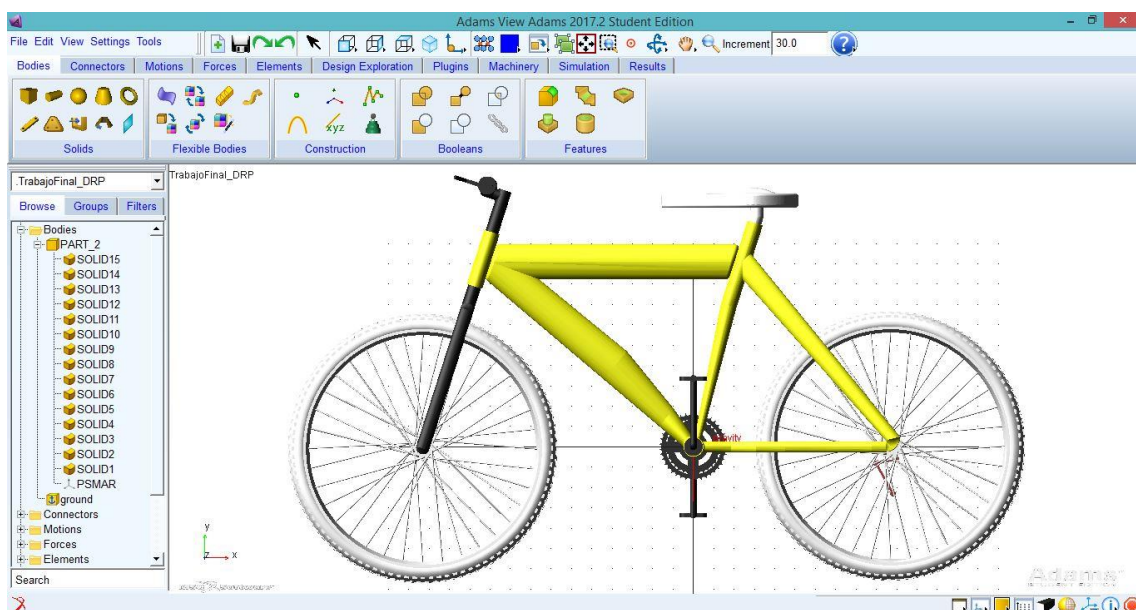


ILUSTRACIÓN 25: 'MODELO IMPORTADO CON TODOS LOS SÓLIDOS AGRUPADOS'

Para copiar el *Body* inicial, se hace click con el botón derecho y se selecciona *Copy*, y para renombrar cada parte se selecciona *Rename*. También se deben eliminar los sólidos innecesarios en cada una de las nuevas *PART* copiadas haciendo click y seleccionando *Delete*. Tras esto, el árbol de elementos queda de la siguiente manera:

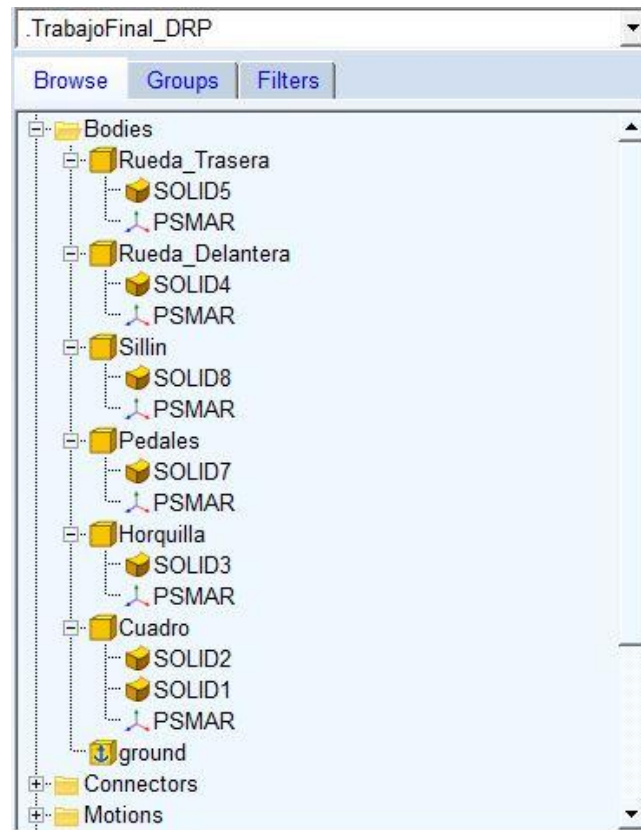


ILUSTRACIÓN 26: 'ÁRBOL DE ELEMENTOS TRAS LA MODIFICACIÓN'

Esta modificación no afecta a la visualización del modelo, ya que aparentemente sigue teniendo el mismo aspecto que al inicio de la importación, pero este último paso era necesario para poder crear los pares cinemáticos entre los sólidos.

3.2.3. Asignación de materiales a cada elemento

El siguiente paso es asignar los materiales de cada componente. En este caso, las piezas son de aluminio, caucho o acero, por lo que para asignar el material se hace click con el botón derecho en el *Body* correspondiente y se asigna el material en *Modify > Define Mass By > Geometry and Material Type > Material Type > Material > Guesses* y se selecciona el material deseado en cada componente. Si no se dispone

del material o se desea introducir la densidad manualmente, se hace seleccionando la opción *Define Mass By > Geometry and Density* e introduciendo el valor de densidad requerido.

En el caso del sillín y las ruedas delantera y trasera, el material a asignar es caucho, pero como este material no aparece en la librería de materiales de MSC Adams, se puede asignar una densidad al elemento de forma manual, que en este caso será de 934 kg/m^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ tal y como se indica en la bibliografía.

El conjunto de los pedales y el eje de pedalier es de acero, por lo que se selecciona el material *steel*.

Por último, para el cuadro y la horquilla, el material a asignar es aluminio, denominado en Adams como *aluminum*. El problema de estas piezas es que en un modelo real son piezas huecas, pero en este caso, el autor las ha modelado como piezas macizas, por lo que si se asigna como material el aluminio directamente y se deja que Adams calcule su masa, dará un valor muy superior al real. En concreto, da un valor de $4,519 \text{ kg}$ para la horquilla y $11,936 \text{ kg}$ para el cuadro, lo que hace que el conjunto total de la bicicleta pese $24,415 \text{ kg}$, algo totalmente irreal, ya que una bicicleta de aluminio de talla XL de materiales estándar suele rondar un peso de unos $14,5 \text{ kg}$. Por lo tanto, para asignar el material a estas dos piezas, se calcula su densidad a partir de la masa y el volumen. Teniendo en cuenta el volumen de cada una de las dos piezas, se observa que suman un total de $6,005 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, suponiendo el cuadro un $72,54\%$ y la horquilla un $27,46\%$ (el volumen puede verse en la ventana *Info* de cada elemento). Si además se supone una masa total de $14,5 \text{ kg}$ y se suma la masa del resto de componentes (obteniendo un valor de $7,96 \text{ kg}$), se puede calcular la masa restante, que será de $6,54 \text{ kg}$. Teniendo en cuenta esa masa restante y los porcentajes de volumen de la horquilla y el cuadro, y sabiendo que son del mismo material, se calcula su densidad:

$$\begin{aligned} \text{Masa cuadro} &= \frac{72,54}{100} \cdot 6,54 \text{ kg} = 4,74 \text{ kg} \rightarrow \text{Dens.} = \frac{4,74 \text{ kg}}{4,356 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 1088 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \text{Masa horquilla} &= \frac{27,46}{100} \cdot 6,54 \text{ kg} = 1,80 \text{ kg} \rightarrow \text{Dens.} = \frac{1,80 \text{ kg}}{1,649 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 1091 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

ECUACIÓN 3: 'CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL CUADRO Y LA HORQUILLA'

Como era de esperar, puede considerarse que ambas densidades son iguales. Este es el valor que se debe introducir en Adams para que se calcule la masa automáticamente. Tras introducirlo, puede comprobarse en la ventana *Info* que la masa calculada es correcta. En una bicicleta real, la densidad del material sería incorrecta, pero como en este proyecto no se van a analizar los componentes a rotura ni deformación, se puede prescindir de las propiedades internas del material.

Tras asignar los materiales y densidades a cada elemento, las masas quedan de la siguiente manera:

Componente	Densidad (kg/m ³)	Masa (kg)
Rueda_Trasera	950 kg/m ³	1,817
Rueda_Delanteras	950 kg/m ³	1,807
Sillin	950 kg/m ³	1,582
Pedales	7801 kg/m ³	2,754
Horquilla	1090 kg/m ³	1,798
Cuadro	1090 kg/m ³	4,748
Masa_Total	-	14,506 kg

TABLA 3: 'MATERIAL Y MASA DE CADA COMPONENTE'

Es importante verificar también que la gravedad del entorno es correcta, y para ello hay que ir al menú *Settings > Gravity* y verificar que la gravedad en la dirección vertical y hacia abajo es de 9,81 m/s², o de 9806,65 mm/s² como en este caso.

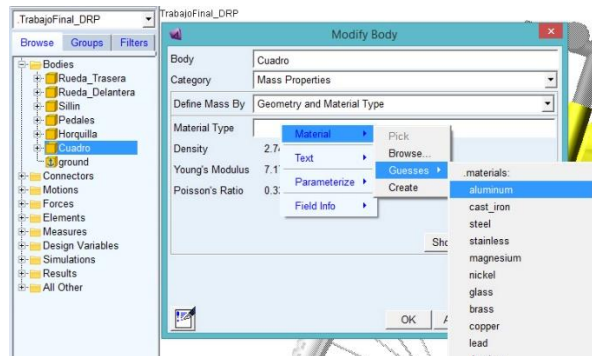


ILUSTRACIÓN 27: 'ASIGNACIÓN DEL MATERIAL A CADA PIEZA'

3.2.4. Ajuste geométrico de los elementos

Como ya se ha comentado, hay elementos del modelo que deben ser modificados para adaptarlos al caso de estudio. En este caso, es necesario eliminar los platos que vienen incluidos en el modelado de los pedales, ya que no serán utilizados de esta manera, sino que se utilizará el módulo *Machinery*. Para ello, hay que crear un sólido nuevo incluido en la entidad *Pedales*, haciendo click en *Bodies > Cylinder*. Seleccionando los diámetros adecuados y ejecutando los *Booleans* y *Features* correspondientes, se consigue eliminar ese elemento innecesario.

Este proceso es algo laborioso, pero con un poco de lógica es sencillo de realizar. Básicamente hay que modelar un cilindro de diámetro mayor que el plato más grande del modelo y aplicar la acción *Features > Add a hole*, con el objetivo de crear un cilindro con un hueco de diámetro igual al del eje de pedaliar. Obtenida esta forma, se sitúa sobre los pedales y aplicando el *Boolean: Cut out a solid with another* se consigue eliminar el conjunto de platos.

Tras todo el proceso, el elemento queda como se muestra en las siguientes ilustraciones:

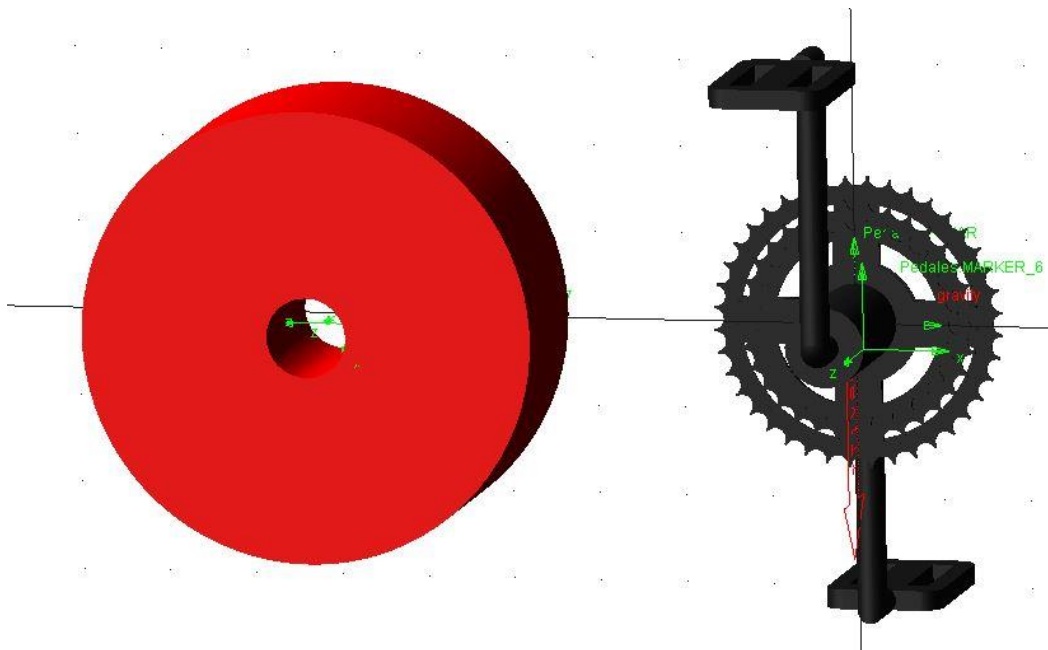


ILUSTRACIÓN 28: 'EN ROJO, CILINDRO HUECO AUXILIAR'

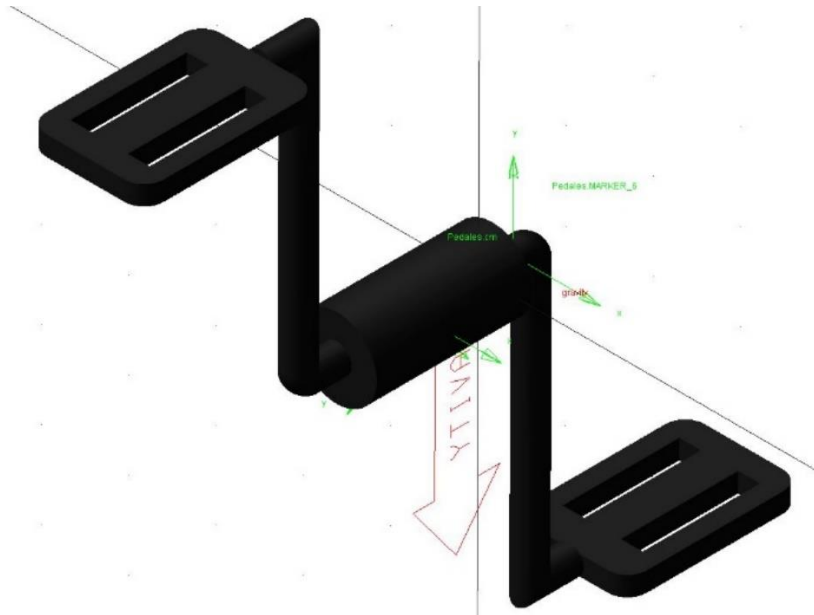


ILUSTRACIÓN 29: 'NUEVA GEOMETRÍA DE LOS PEDALES TRAS EL CORTE'

Con esto se consigue que la nueva geometría esté preparada para montar el sistema de transmisión sobre ella.

3.3. Creación de restricciones y pares cinemáticos

Tras haber realizado correctamente los pasos anteriores, la geometría del modelo queda totalmente definida. Después de esto, hay que establecer una serie de restricciones y pares cinemáticos entre todos los elementos del modelo, ya que si no estarían libres por el espacio y no tendrían ningún sentido en el proyecto.

El listado de pares cinemáticos y los sólidos relacionados es el siguiente:

Nombre del par	Tipo de par	Sólido 1	Sólido 2	Punto de aplicación
R_Horq_Cuadro	Revolución	Cuadro	Horquilla	Cuadro.MARKER_24
R_Pedal_Cuadro	Revolución	Cuadro	Pedales	Pedales.cm
Fijo_Sillin_Cuadro	Fijo	Cuadro	Sillin	Cuadro.SOLID1.V178
R_RDel_Horquilla	Revolución	Horquilla	Rueda_Delantera	Rueda_Delantera.cm
R_RTras_Cuadro	Revolución	Cuadro	Rueda_Trasera	Rueda_Trasera.cm

TABLA 4: 'PARES CINEMÁTICOS DEL MODELO'

Como se observa, el modelo consta de cuatro pares de revolución entre los componentes de la bicicleta y el cuadro, debido a que todos los componentes siguen un movimiento rotatorio a través de un eje y no existe un desplazamiento transversal a lo largo del mismo, por lo que el único par existente es el de rotación. Existe otro par de rotación entre la rueda delantera y la horquilla. Por último, también hay un par fijo entre el cuadro y el sillín, cuya única función es la de fijar e impedir el movimiento del mismo.

3.3.1. Pares de rotación de las ruedas, pedales y sillín

Para crear los pares cinemáticos hay que ir al apartado *Connectors > Joints* y seleccionar el par que se desee crear. En este caso, el par de revolución se crea clickando en *Create a Revolute Joint*, y el par fijo en *Create a Fixed Joint*. Para situar el par en el punto exacto del modelo en el que se desea que actúe dicho par, es necesario localizar ese punto con un *Marker*. Para ello, hay que seguir un proceso similar al de los apartados anteriores para crear *Markers* en los puntos en los que se va a aplicar cada par.

Tras crear los *Markers*, se selecciona *Create a Revolute Joint*, se marca la opción *2 Bodies - 1 Location* y se hace click en uno de los cuerpos, luego en el otro y finalmente en el *Marker* donde se va a localizar el par. Si el par creado no queda en la orientación deseada, se puede seleccionar en el apartado del árbol de entidades, en la opción *Connectors*, y haciendo doble click y después en el segundo icono de la ventana que aparece, llamado *Change Position*, se puede rotar y trasladar el par hasta dejarlo en la posición deseada.

3.3.2. Par de rotación entre la horquilla y el cuadro

En este modelo en concreto, la ubicación espacial de los pares es sencilla debido a que casi todos los ejes en los que actúa cada uno se encuentran de forma perpendicular o paralela al plano de referencia, por lo que es fácil utilizar los centros de masas de los elementos como puntos de aplicación de los pares, a excepción del par de rotación entre la horquilla-manillar y el cuadro, que tiene un pequeño ángulo de inclinación, por lo que primero será necesario ubicar manualmente el *Marker* donde se va a aplicar el par. Como el punto de aplicación de ese par va a ser el centro

del tubo de dirección del cuadro, será necesario crear un *Marker* en dicho punto, y como la geometría del modelo es algo compleja, es necesario crear primero dos *Markers* auxiliares para conocer la ubicación exacta del punto central, así como su orientación. Para ello, se utiliza el procedimiento tradicional y se crea un *Marker* en la cara superior del cilindro y otro en la cara inferior:

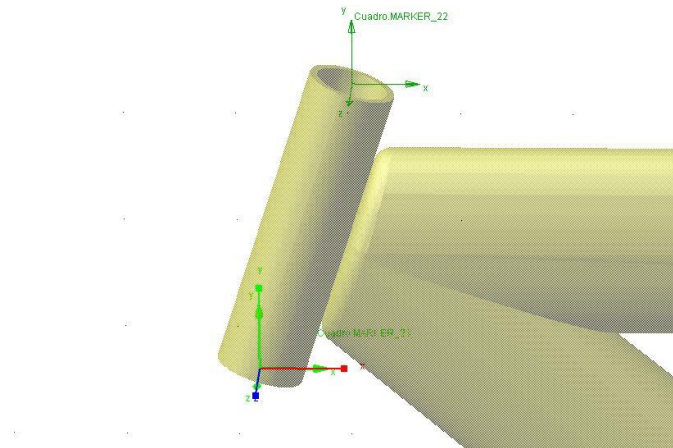


ILUSTRACIÓN 30: 'MARKERS AUXILIARES EN EL CUADRO'

Una vez creados esos puntos auxiliares, se buscan sus coordenadas exactas haciendo click sobre cada uno con el botón derecho y en el apartado *Info* se pueden ver sus coordenadas, siendo estas las que siguen:

Marker	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
Cuadro.MARKER_22	-495,6461078973	527,6553563619	40,88
Cuadro.MARKER_23	-538,3147096335	394,3159757353	40,88

TABLA 5: 'COORDENADAS DE LOS MARKERS AUXILIARES'

Para hallar las coordenadas del punto central, basta con calcular el punto medio entre los dos de la tabla superior:

$$X = -495,6461078973 - \frac{538,3147096335 - 495,6461078973}{2} = -516,9804087654$$

$$Y = 394,3159757353 + \frac{527,6553563619 - 394,3159757353}{2} = 460,9856660486$$

$$Z = 40,88$$

ECUACIÓN 4: 'COORDENADAS DEL MARKER CENTRAL DE LA DIRECCIÓN'

Por otro lado, para calcular la orientación del *Marker* central es necesario hacer un pequeño cálculo trigonométrico:

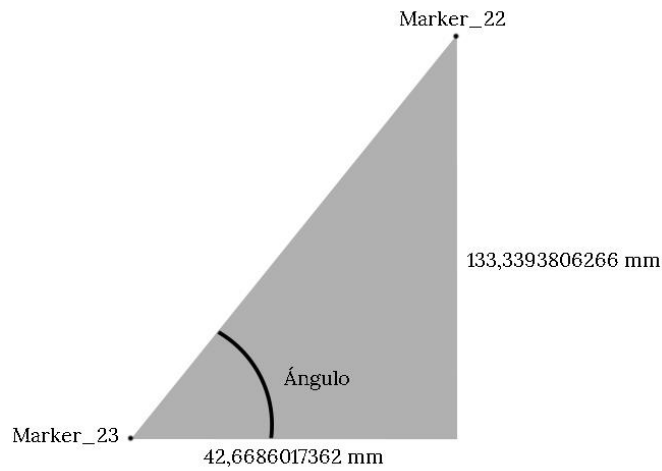


ILUSTRACIÓN 31: 'TRIGONOMETRÍA AUXILIAR'

$$\text{Ángulo} = \text{arctg}\left(\frac{133,3393806266}{42,6686017362}\right) = 72,2553284^\circ$$

ECUACIÓN 5: 'ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DEL MARKER CENTRAL DE LA DIRECCIÓN'

Con las coordenadas cartesianas y el ángulo de inclinación, ya se puede situar el *Marker* en el plano:

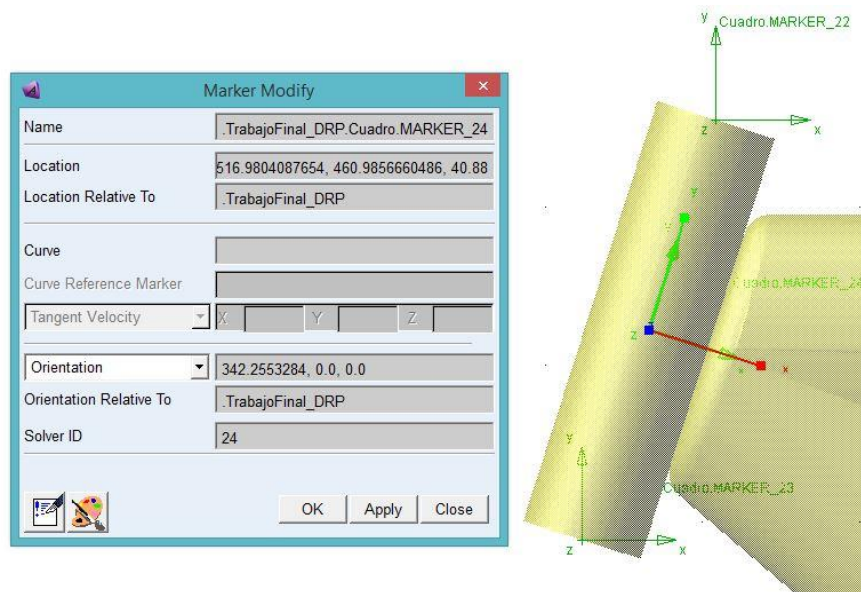


ILUSTRACIÓN 32: 'COORDENADAS Y ORIENTACIÓN DEL MARKER CENTRAL EN EL MODELO'

Cabe destacar que el ángulo de orientación del eje X es el complementario al calculado en el paso anterior, es decir:

$$\text{Ángulo complementario} = 90^\circ - 72,2553284^\circ = 17,7446716^\circ$$

Además, para que la inclinación sea en el sentido correcto se le añade un signo negativo, o lo que es lo mismo, se resta a 360° y da un ángulo de $342,2553284^\circ$.

Una vez creado el Marker y ubicado en su lugar correcto, ya se puede crear el par de rotación correspondiente entre la horquilla y el cuadro. Para ello se procede de la misma forma que para crear los pares anteriores de rotación anteriores.

3.3.3. Resumen de pares cinemáticos

Con todos los pares ya creados la geometría de la bicicleta queda completamente definida, quedando todos sus elementos relacionados y con las restricciones y movimientos adecuados entre ellos. Tras esto, ya se pueden empezar a definir las condiciones de contorno del sistema.

El nuevo árbol de entidades con todos los pares creados queda como se muestra en la siguiente ilustración. Para visualizarlos mejor en el modelo, se ha aumentado su tamaño en el menú *Settings > Icons > New Size*.

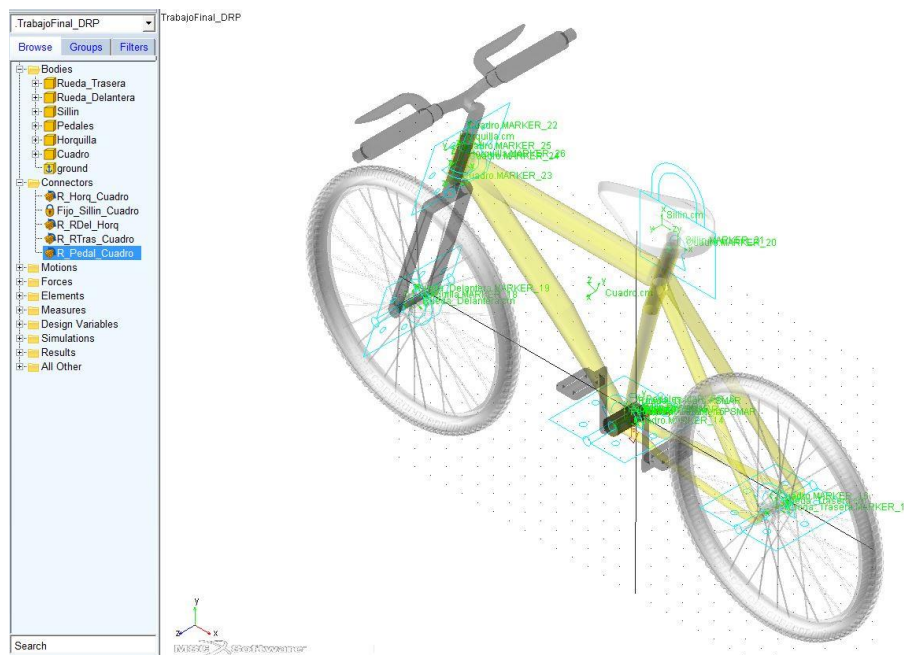


ILUSTRACIÓN 33: 'VISUALIZACIÓN DE LOS PARES CINEMÁTICOS EN EL MODELO'

3.4. Condiciones de contorno del modelo

Tras haber definido completamente la geometría de la bicicleta a excepción del sistema de transmisión de movimiento, se procede a crear las condiciones de contorno del modelo para realizar la simulación.

3.4.1. Terreno de apoyo

Lo primero que hay que definir para poder realizar la simulación es el terreno donde se va a apoyar y desplazar la bicicleta. Este terreno se irá variando a medida que se vayan realizando los sucesivos estudios, pero en este apartado se explicará cómo crear una primera versión del suelo.

En primer lugar, se selecciona el sólido correspondiente en el apartado del menú *Bodies > Solids > RigidBody: Box*. Al seleccionarlo, en el menú de la izquierda se establecen las dimensiones y condiciones en que se va a crear dicho sólido. Se selecciona *New Part* y se establecen unas medidas fijas. En este caso, las dimensiones iniciales podrían ser las siguientes:

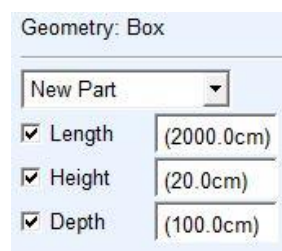


ILUSTRACIÓN 34: 'DIMENSIONES INICIALES DEL TERRENO'

Se establece una anchura de 1 metro para que la bicicleta tenga margen al desplazarse transversalmente, y una longitud inicial de 20 metros para que sea suficiente para el desplazamiento de la bicicleta y tener una buena cantidad de datos disponibles para analizar. Para la altura se establecen 20 centímetros, aunque no es un valor relevante.

Tras crear el sólido, el sistema queda como se muestra en la siguiente ilustración desde una vista cenital:

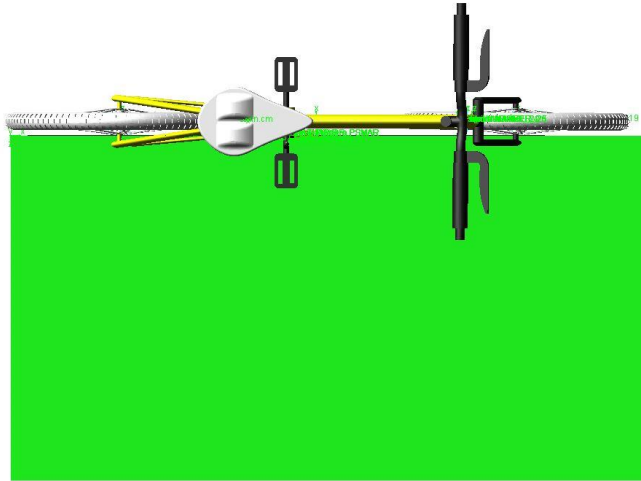


ILUSTRACIÓN 35: 'POSICIÓN INICIAL DEL TERRENO Y LA BICICLETA'

Puede observarse claramente que el sistema está desplazado, por lo que es necesario ubicarlo en su lugar correcto. Lo más sencillo es situar los cuerpos centrados en los ejes de coordenadas globales del sistema. Para ello, se seleccionan las entidades que se desean mover y se hace click en el menú *Edit > Move*. Se selecciona la opción *About the model* y en el campo *Translate* se introduce el valor de desplazamiento necesario. En el caso del suelo, 500 mm en el eje Z negativo, y en el caso de la bicicleta, 77,8371068805 mm en dirección Z positiva. En esta misma ventana se puede cambiar también la orientación de la bicicleta para que se desplace en el eje X positivo, y para ello se introduce 180° en el campo *Rotate* y se hace click en el eje Y.

Por otro lado, también se puede aprovechar para modificar las dimensiones de la rejilla de trabajo y adaptarlas al nuevo modelo. Esto se hace en el menú *Settings > Working Grid* e introduciendo las nuevas medidas en el campo *Size*, adaptándolas para que pueda verse el modelo completo dentro de la rejilla.

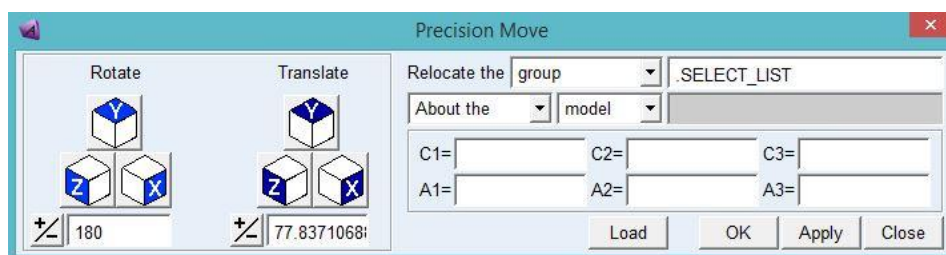


ILUSTRACIÓN 36: 'VENTANA MOVE PARA DESPLAZAR ENTIDADES'

Tras realizar las modificaciones, el sistema queda como se muestra:

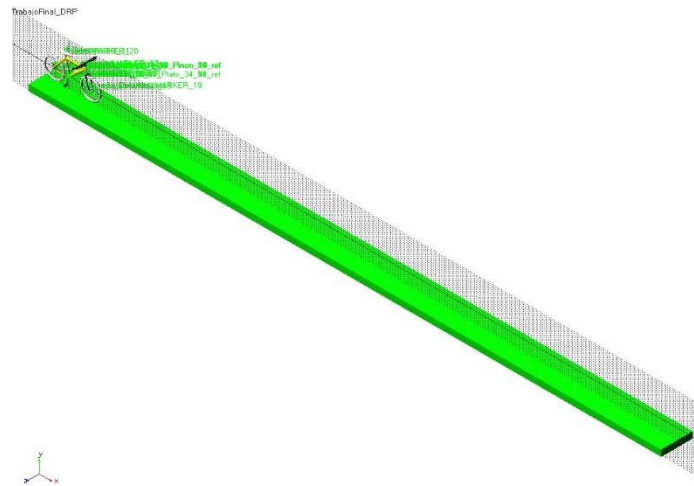


ILUSTRACIÓN 37: 'NUEVA POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DEL SISTEMA'

Por último, se añade un par fijo en cualquier punto del sólido del terreno, con el objetivo de fijarlo al entorno de trabajo. Este par se renombrará como *Fijo_SUELO_Ground* con el método ya explicado en apartados anteriores.

Para crear el suelo con inclinación del 12%, se procede de manera similar. Primero se crea un tramo horizontal de 3 metros, y a continuación un sólido de 20 metros que se creará con la opción *Add to Part* marcada al crearlo, para así añadirlo en el mismo tramo que el horizontal. Tras esto, se selecciona su *Marker* de referencia y se rota 6.84° , obteniendo finalmente el siguiente resultado:

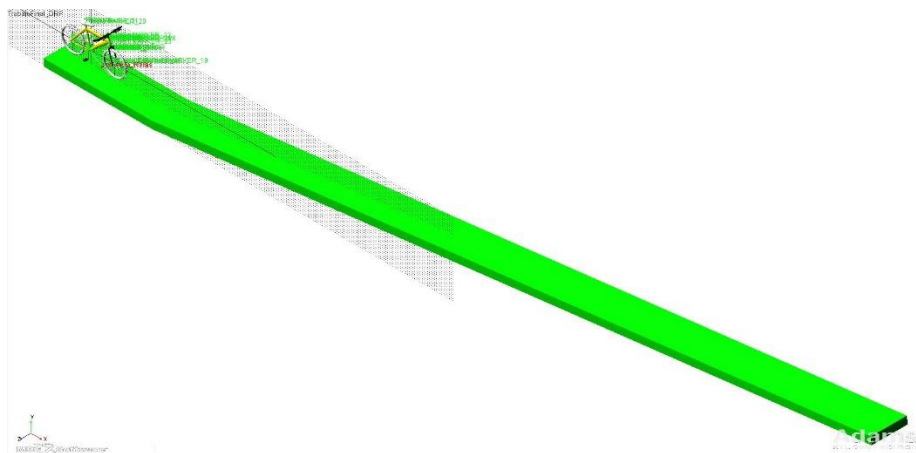


ILUSTRACIÓN 38: TERRENO CON INCLINACIÓN DEL 12%

3.4.2. Contacto entre las ruedas y el terreno

Tras haber creado el terreno de apoyo y desplazamiento, es necesario establecer un contacto entre las ruedas de la bicicleta y el mismo, ya que si no la bicicleta atravesaría el suelo.

Para establecer ese contacto necesario, se hace click en el menú *Forces > Special Forces > Create a Contact*. En la ventana emergente se incluyen los sólidos que harán contacto como en la tabla que sigue:

Contacto	Sólido I	Sólido J
Contacto_RDel	Rueda_Delantera.SOLID4	SUELO.BOX_39
Contacto_RTras	Rueda_Trasera.SOLID5	SUELO.BOX_39

TABLA 6: 'CONTACTOS ENTRE LAS RUEDAS Y EL SUELO'

Es importante que el *Contact Type* sea del tipo *Solid to Solid*. Además, también hay que añadir fricción con el suelo, y para ello se marca la opción *Coulomb* en el apartado *Friction Force*, dejando las opciones por defecto.

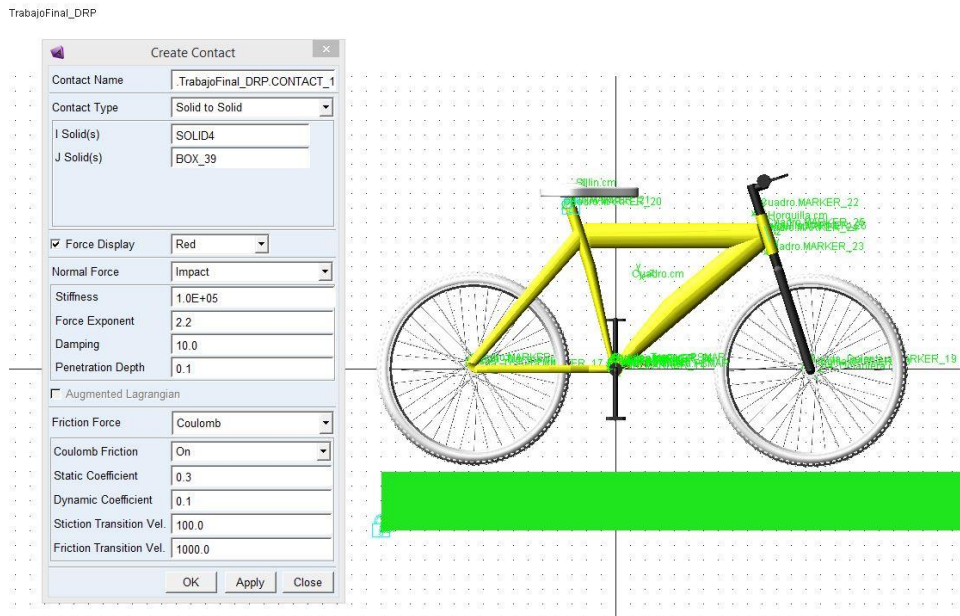


ILUSTRACIÓN 39: 'CREACIÓN DE CONTACTOS DE FRICCIÓN'

Tras crear un contacto de fricción con el suelo tanto en la rueda trasera como la delantera, la bicicleta ya tiene la capacidad de apoyarse y desplazarse en el suelo sin atravesarlo.

Más adelante, cuando se decida modificar el terreno, lo más sencillo es eliminar primero los contactos y después hacer las modificaciones necesarias, ya que la creación de los mismos es muy sencilla y si se cambia la orientación del suelo puede haber problemas con los *Markers* de referencia que serán algo laboriosos de resolver.

3.4.3. Prueba del modelo

Tras haber realizado todos estos pasos, se puede hacer una pequeña prueba con el modelo para ver si todo está correctamente modelado y no hay enfrentamientos entre entidades. Para ello, se puede aplicar una rotación en el par de la rueda trasera con el cuadro, como si estuviera actuando la cadena de transmisión. Para crear esta rotación se hace en el menú *Motions > Joint Motions > Rotational Joint Motion*, y se hace click en el par de rotación donde se desea aplicar el movimiento, en este caso, el par es el *R_RTras_Cuadro*. El movimiento aplicado aparecerá en el apartado *Motions* del árbol de entidades. Se puede modificar la velocidad de rotación haciendo click con el botón derecho y seleccionando *Modify*.

Tras haber creado el movimiento, se puede probar el modelo en el apartado *Simulation > Simulate > Run an Interactive Simulation*. Se establece un tiempo de 2.5 segundos y 200 pasos y se hace click en el botón *Start simulation*. Si todo va correctamente, el sistema se empezará a mover, tal y como ocurre en este caso.

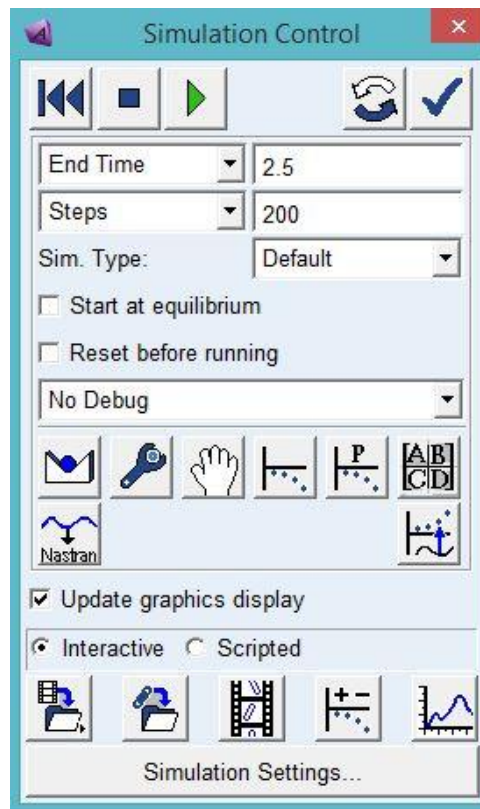


ILUSTRACIÓN 40: 'VENTANA DE LA SIMULACIÓN'

El principal problema ahora es resolver el equilibrio de la bicicleta, ya que tras avanzar unos metros el sistema se desequilibra y cae al suelo completamente. Esto es algo normal, ya que todavía no se han introducido las fuerzas que equilibrarán el sistema, y esto es algo que se desarrollará más adelante.

El principal origen del problema es la ubicación y orientación de los centros de masas de cada elemento de la bicicleta. Al haberse modelado por separado, cada elemento tiene su propio centro de masas, y como estos no están exactamente en el mismo plano X-Y existen momentos desequilibrantes al haber pequeñas distancias entre esos centros de masas y el eje central de la bicicleta. Si fuera necesario, las fuerzas para equilibrar el sistema se añadirán más adelante, ya que todavía no se ha generado el sistema de transmisión y este añadirá más masa al conjunto, por lo que es recomendable no introducir ninguna fuerza hasta probar el modelo definitivo y ver si realmente son necesarias.

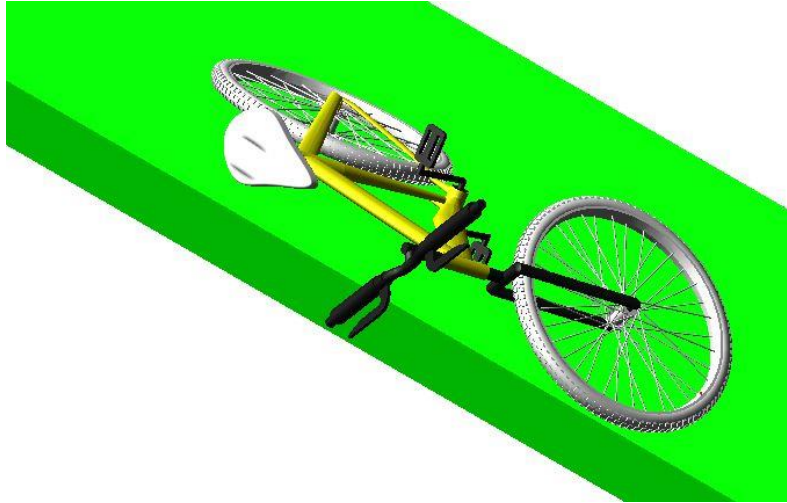


ILUSTRACIÓN 41: 'BICICLETA DESEQUILIBRADA'

3.4.4. Adición del peso del ciclista

La última condición de contorno necesaria es el propio peso del ciclista. En este caso, como el modelado de una persona no es importante para el proyecto, se decide aplicar masas puntuales en los lugares clave donde lo haría un ciclista en la vida real.

Según un estudio biomecánico realizado por el instituto *Ergocycling Iberica*, el sillín de la bicicleta soporta el 60% del peso total del ciclista y el manillar el 40%. Por lo tanto, considerando el peso medio de un hombre adulto en 75 kg, se deberán añadir las siguientes masas puntuales:

$$\text{Masa puntual en el sillín} \rightarrow \frac{60}{100} \cdot 75 \text{ kg} = 45 \text{ kg}$$

$$\text{Masa puntual en el manillar} \rightarrow \frac{40}{100} \cdot 75 \text{ kg} = 30 \text{ kg}$$

ECUACIÓN 6: 'DISTRIBUCIÓN DEL PESO DEL CICLISTA EN EL SILLÍN Y EL MANILLAR'

Para aplicar estas masas puntuales se hace click en *Bodies > Construction > Construction Geometry: Mass*, y se incluye la masa a aplicar y el punto de aplicación. En este caso, los puntos de aplicación son el centro de masas del sillín y el MARKER_26 de la horquilla. Creadas estas dos masas puntuales, el árbol de entidades queda de la siguiente manera:



ILUSTRACIÓN 42: 'MASAS PUNTUALES EN EL ÁRBOL DE ENTIDADES'

En cuanto a las características de ambas masas, quedarían de la siguiente manera:

Masa puntual	Porcentaje de masa total del ciclista	Masa	Marker de aplicación
Masa_Ciclista_Manillar_40	40%	30 kg	Horquilla.MARKER_26
Masa_Ciclista_Sillin_60	60%	45 kg	Sillin.cm

TABLA 7: 'CARACTERÍSTICAS DE LAS MASAS PUNTUALES'

4. CREACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

Una vez generado el modelo de la bicicleta y establecido el contacto con el suelo, ya se puede proceder a crear el sistema de transmisión de movimiento de la bicicleta, objeto principal de estudio de este proyecto. Para comenzar con el desarrollo del sistema de plato-piñón-cadena, es necesario preparar el modelo primero.

4.1. Preparación previa de la bicicleta

Lo primero es eliminar el movimiento de rotación añadido en el apartado anterior para hacer una primera prueba del modelo, y esto se hace en el árbol de entidades, buscando el *Motion* correspondiente y eliminándolo haciendo click con el botón derecho y luego en *Delete*. Eliminado este movimiento, la bicicleta vuelve a estar completamente estática, a excepción del desequilibrio comentado anteriormente que la hará caer a los pocos segundos, tal y como ocurriría en una bicicleta real.

Tras eliminar el movimiento, se deben añadir unos *Markers* en los puntos donde se colocarán el plato y el piñón. Es importante que esos *Markers* se sitúen en el mismo plano X-Y para que no haya desplazamiento transversal en la cadena. Basándose en un modelo de bicicleta real, se puede ver fácilmente que el plato rota de forma solidaria a los pedales, y el piñón lo hace junto a la rueda trasera. Por lo tanto, será necesario añadir un *Marker* en los *Pedales* y otro en la *Rueda_Trasera* para utilizarlos de punto de referencia para añadir la transmisión. Ambos deben compartir la misma coordenada global en Z, ya que así sus puntos de apoyo se situarán en el mismo plano X-Y. También es importante que ambos se ubiquen exactamente sobre el eje de rotación del cuerpo al que van anclados, ya que si no se descentrarían y habría problemas con las transmisiones de movimiento.

Para crear los dos *Markers* de referencia de la transmisión, se procede de igual manera que en los apartados anteriores. Para que ambos tengan la misma coordenada Z, se puede modificar manualmente para introducir su valor exacto.

Primero se crea el *Marker* ubicado en los pedales, ya que es el más sencillo de los dos. Se decide ubicarlo en la posición en la que se situaban originalmente los platos

del modelo descargado de GrabCAD, es decir, en la cara exterior de la parte derecha del eje de pedalier, si se mira la bicicleta desde la parte trasera en dirección perpendicular a los ejes de rotación de las ruedas. Se pueden ocultar los otros sólidos para tener una mejor visualización de los pedales:

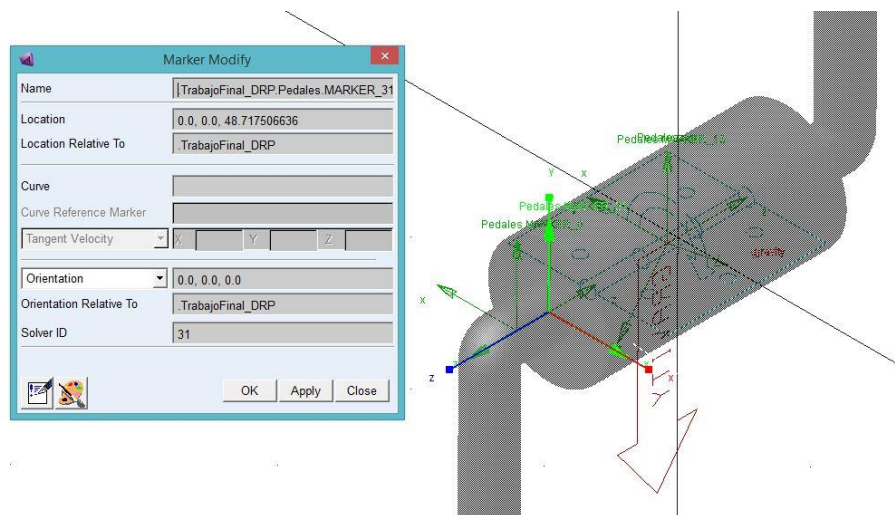


ILUSTRACIÓN 43: 'UBICACIÓN DEL MARKER_31 EN LOS PEDALES'

Creado el *Marker_31* situado en los pedales, se procede a crear de forma similar el *Marker* de referencia situado en la rueda trasera. Para ello es necesario añadir un pequeño suplemento en la rueda, ya que al haber importado el modelo original eliminando piezas innecesarias en un primer momento, esa pieza no está presente ahora. Se trata de la pieza denominada por el autor como *gearfit*, que traducido significa acople del engranaje.



ILUSTRACIÓN 44: 'ACOPLE DE LOS PIÑONES CON LA RUEDA TRASERA'

Para importar esta pieza en el modelo, se procede exactamente de la misma manera que al inicio del proyecto, haciendo click en *File > Import* con el *File Type* seleccionado en *ProE (.prt)*, se busca la pieza *gearfit.prt.6* en la misma ruta de trabajo y se incluye en la *Rueda_Trasera*, sin olvidarse del factor *Scale 1.12*. Si todo ha ido bien, se habrá creado un nuevo *SOLID46* y el *Marker PSMAR32* en la *Rueda_Trasera*, correspondientes a la nueva pieza.

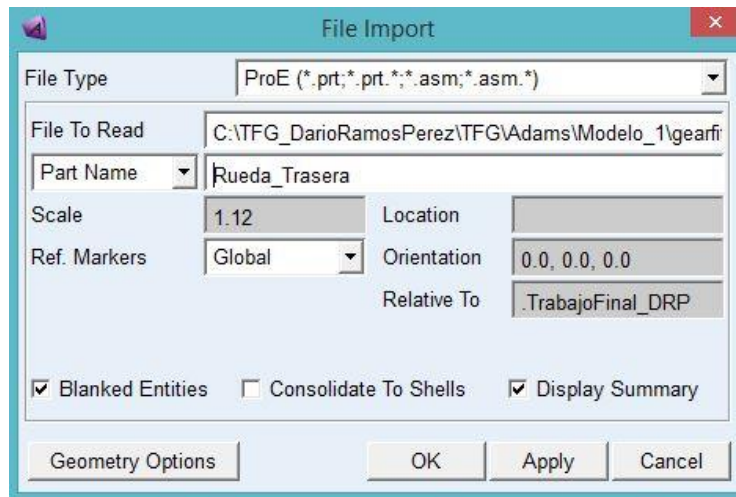


ILUSTRACIÓN 45: 'IMPORTACIÓN DE LA PIEZA GEARFIT'

Con esto, solo queda ubicar la pieza en su posición correcta. Se puede hacer de varias maneras, pero la más sencilla es mover el *Marker PSMAR32* ayudándose de la ventana *Modify* del mismo y del menú *Edit > Move*, como se ha hecho anteriormente, pero primero es necesario conocer las coordenadas exactas donde se quiere colocar. Primero se rota un ángulo de -90° alrededor del eje Y global, y después, basándose en las coordenadas del *MARKER_17* de la rueda trasera se desplaza hasta esa misma posición mediante la ventana *Modify*. Finalmente, se puede ajustar el *Marker* hasta la posición deseada utilizando de nuevo la ventana *Edit > Move*.

Tras todo este laborioso proceso, las posiciones de los dos *Markers* de referencia quedan como se indica en la siguiente tabla:

Marker	Body	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
Marker_31	Pedales	0,0	0,0	48,717506636
PSMAR32	Rueda_Trasera	-484,6300073216	2,1409370639	48,717506636

TABLA 8: 'MARKERS DE REFERENCIA PARA LA TRANSMISIÓN'

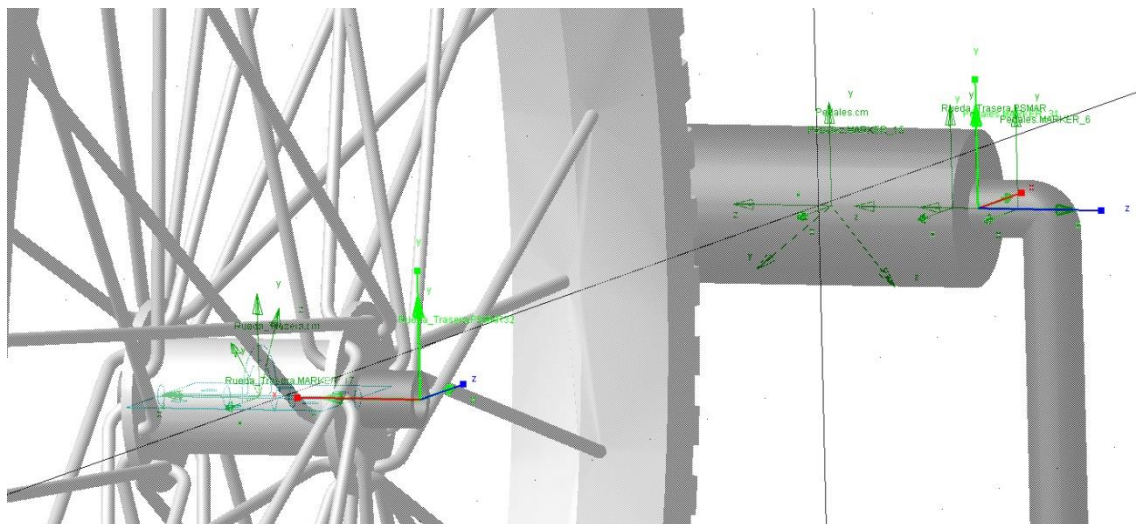


ILUSTRACIÓN 46: 'POSICIÓN DE LOS MARKERS PSMAR32 Y MARKER_31 EN EL MODELO'

Estos *Markers* son los puntos clave para colocar el plato y el piñón del sistema de transmisión.

4.2. Definición de la geometría de la transmisión

Una vez establecidos los *Markers* de referencia para colocar la transmisión sobre el sistema, es necesario definir la geometría de la propia transmisión.

4.2.1. Escenarios de simulación

El proyecto se va a desarrollar en seis escenarios distintos, para poder recopilar una buena cantidad de datos para someterlos a estudio, pero sin hacer más de los necesarios. Estos escenarios se diferenciarán, básicamente, en la pendiente del terreno y en el desarrollo utilizado en la transmisión. Así, se podrán comparar los datos para cada terreno en función del piñón utilizado en cada momento.

Con el estudio de los distintos escenarios, se pretende relacionar la fuerza necesaria a ejercer en los pedales con la velocidad adquirida, para así demostrar por qué es mejor utilizar unos desarrollos u otros en función de la inclinación del terreno.

Se utilizará el mismo tamaño de plato para todos los escenarios, ya que es así como trabajan la mayoría de bicicletas de montaña actuales. El plato escogido es el

de 34 dientes, uno de los estándar más utilizados en MTB. En cuanto a los piñones, se utilizarán tres tamaños diferentes: el pequeño, con 10 dientes; el intermedio, con 24 dientes; el grande, con 50 dientes. El resto de la geometría de los elementos la calcula Adams automáticamente al introducir el número de dientes y el ancho del engranaje. Cabe destacar que esta información ha sido extraída de un modelo de bicicleta real, concretamente, la *Orbea Alma M10 19*, que a pesar de tener una geometría y componentes muy distintos a la bicicleta de este proyecto, es un referente en el mundo del ciclismo y por eso se toma como punto de partida. El plato de referencia es el *SRAM X1 Eagle Dub Carbon Boost 34T*, mientras que para los piñones se utiliza el *SRAM GX XG-1275 Eagle 10-50T 12-Speed*.

Con estas tres combinaciones y los dos terrenos distintos, quedan definidos los seis escenarios. Dichos escenarios serán los siguientes:

Escenario	Dientes del plato	Dientes del piñón	Inclinación del terreno
1	34	10	0% (0°)
2	34	24	0% (0°)
3	34	50	0% (0°)
4	34	10	12% (6,84°)
5	34	24	12% (6,84°)
6	34	50	12% (6,84°)

TABLA 9: 'ESCENARIOS DE ESTUDIO DE LA SIMULACIÓN'

4.2.2. Creación del plato y el piñón

El proceso de creación de la transmisión en el modelo consta de varios pasos claramente diferenciados.

En primer lugar, debe crearse el conjunto de plato y piñón que se desea utilizar. Para ello, se hace click en el módulo *Machinery > Chain > Create Closed Loop Sprockets*. Se abrirá una ventana en la que introducir el nombre del sistema de transmisión y del conjunto de ruedas dentadas, así como el tipo de las mismas. Se pueden cambiar los nombres libremente, y se selecciona *Roller Sprocket*, ya que esto crea un sistema con una cadena compuesta por rodillos cilíndricos, que es lo que se

busca en este caso. Después, se selecciona el método *2D Links*, ya que el método *Constraint* está demasiado simplificado y no permite introducir el número de dientes, mientras que el *3D Links* es demasiado complejo para lo que aquí se pretende.

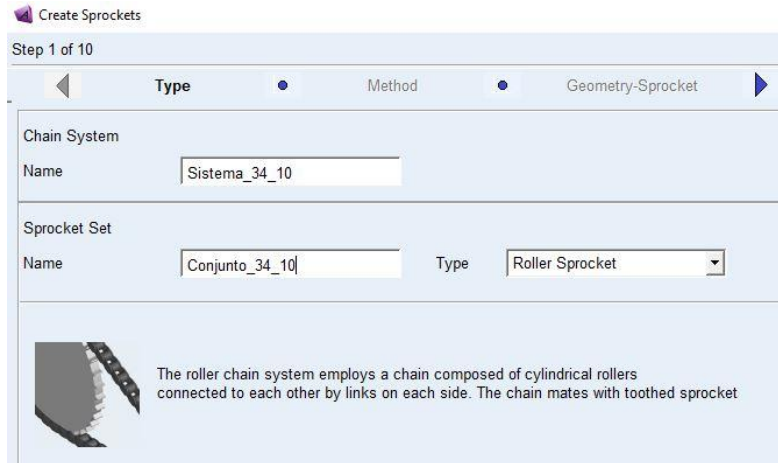


ILUSTRACIÓN 47: 'CREACIÓN DE LAS RUEDAS DENTADAS'

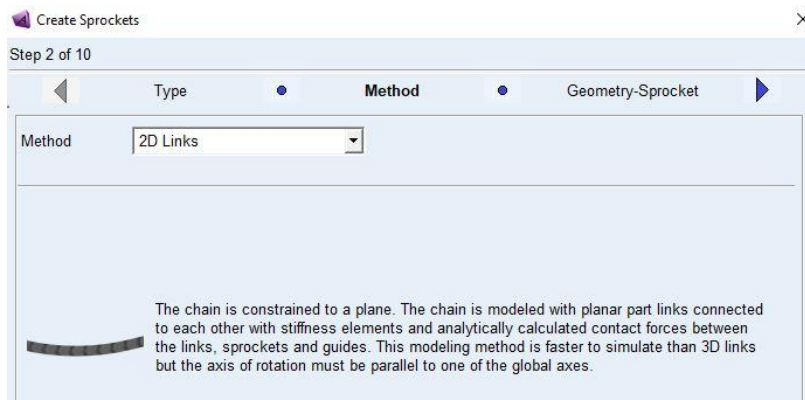


ILUSTRACIÓN 48: 'MÉTODO 2D LINKS PARA LA TRANSMISIÓN'

Si se continúa avanzando, aparece la ventana donde se introducirá la geometría del sistema. En este primer caso, se va a modelar el plato de 34 dientes junto al piñón de 10 dientes.

Pueden observarse en esta ventana dos pestañas, una para cada rueda dentada. Se considerará que la rueda 1 es el plato y la 2 es el piñón. Para modelarlos, primero hay que introducir un nombre para cada uno de ellos. En este caso, el plato será *Plato_34_10* y el piñón será *Pinon_10*. En cuanto a la geometría, Adams permite

modificar muchísimos parámetros, pero en este caso se decide introducir únicamente el número de dientes y el ancho de la rueda dentada, ya que a partir de esos dos datos el software es capaz de calcular el resto de la geometría. Por lo tanto, se introduce en el campo *Number of Teeth* un 34 para el plato, y un 10 para el piñón. En cuanto al ancho, *Width*, puede dejarse en 6 mm, ya que como no se va a estudiar el componente a deformación ni rotura no es un dato tan relevante. Por último, debe seleccionarse también el punto central de ambos elementos. Es aquí donde entran los *Markers* creados en el apéndice 4.1., siendo el *Marker_31* de los pedales el punto central del plato y el *PSMAR32* el del piñón.

Tras introducir los datos, las ventanas quedan de la siguiente manera:

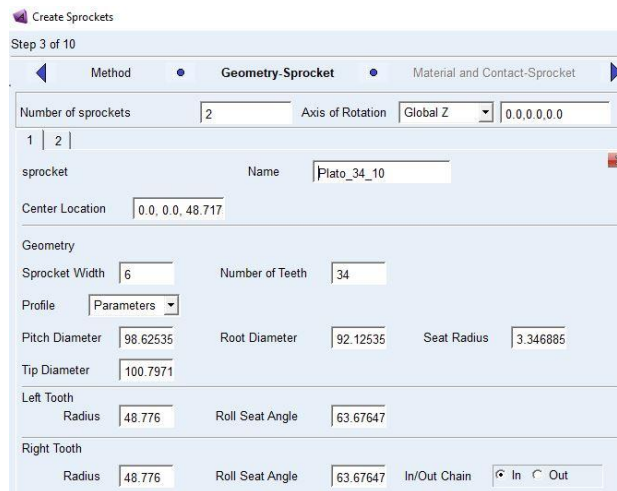


ILUSTRACIÓN 49: 'GEOMETRÍA DEL PLATO'

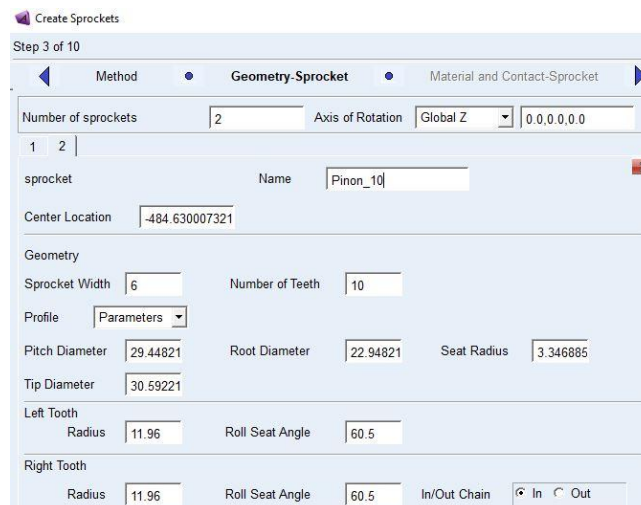


ILUSTRACIÓN 50: 'GEOMETRÍA DEL PIÑÓN'

La siguiente ventana es para definir el material. Se deja el acero como material por defecto para ambos componentes, y las opciones de contacto también se dejan como están.

En el siguiente paso se introducen los tipos de pares que tendrá cada rueda dentada, así como el sólido al que irán ancladas. En el caso del plato, será un par de tipo *Fixed* e irá anclado al sólido *Pedales*, mientras que el piñón también será de tipo *Fixed* y se anclará a la *Rueda_Trasera*. Los pares son de tipo fijo para que no haya rotación de los engranajes respecto a los sólidos, sino para que sea el conjunto del sólido con el engranaje el que rota respecto al cuadro.



ILUSTRACIÓN 51: 'PAR Y UBICACIÓN DEL PLATO'



ILUSTRACIÓN 52: 'PAR Y UBICACIÓN DEL PIÑÓN'

Las siguientes ventanas se pueden dejar con las opciones por defecto. Finalmente, aparecen en el modelo el plato y el piñón recién creados. Puede comprobarse fácilmente si su ubicación es correcta moviendo la vista del modelo.

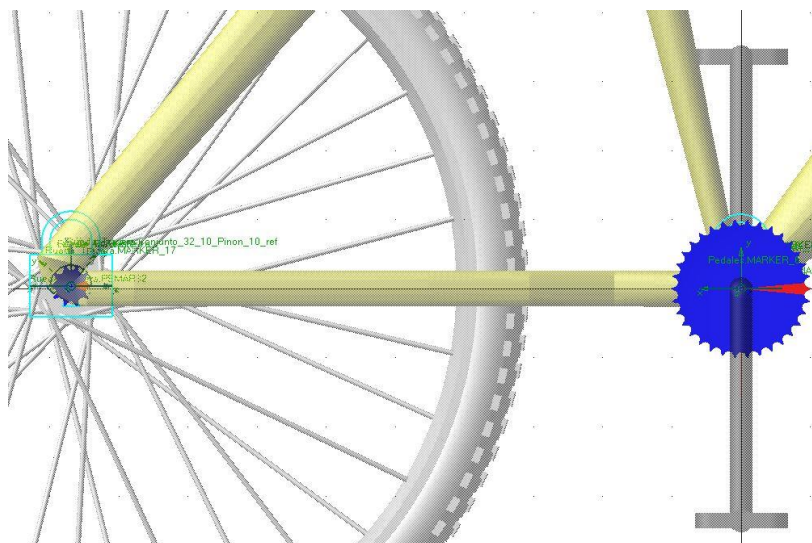


ILUSTRACIÓN 53: 'PLATO Y PIÑÓN CREADOS EN EL MODELO'

Con esto queda definida la creación del plato y el piñón del primer conjunto. Tras esto, se procede a crear la cadena.

4.2.3. Creación de la cadena

Para crear la cadena, se hace click en el módulo *Machinery > Chain > Create Chain*. En la ventana emergente, se selecciona el conjunto creado anteriormente mediante el botón derecho en el recuadro y clickando en *sprocket_set > Guesses > .TrabajoFinal_DRP.Sistema_34_10.Conjunto_34_10*.

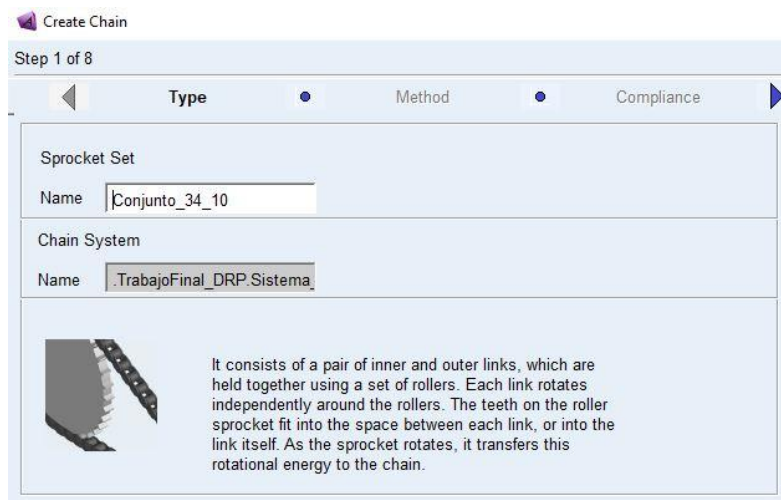


ILUSTRACIÓN 54: 'CREACIÓN DE LA CADENA'

A continuación, se selecciona el método *2D Links* como se ha hecho previamente con las ruedas dentadas, y se selecciona después en el apartado *Compliance* el método *Linear*, para que la cadena sea lineal.



ILUSTRACIÓN 55: 'MÉTODO LINEAR PARA LA CADENA'

En la siguiente ventana se dejan todas las opciones por defecto, a excepción del nombre, que se cambiará en este caso por *Cadena_34_10*.

Se avanzan unos pasos más y se llega al *Wrapping Order*, donde se deben seleccionar los engranajes en el orden correspondiente. En este caso, se selecciona primero el plato y después el piñón. Para ello, se hace click en el recuadro con el botón derecho y en *UDE_Instance > Guesses* se selecciona primero el plato y después el piñón. Al finalizar la creación, Adams lanza una advertencia e indica que la cadena está formada por 130 eslabones.

Si se compara con el modelo de bicicleta mencionado anteriormente (Orbea Alma), se observa que esta tiene 114 eslabones. La diferencia es algo notable, pero es lógico, ya que la distancia entre la rueda trasera y el eje de pedalier no es la misma en el modelo del proyecto que en esa bicicleta, por lo que se da el valor por bueno.

Por otro lado, en el modelo de Adams cada desarrollo tendrá un número de eslabones, debido a que el sistema no cuenta con el desviador de la cadena que sí tiene una bicicleta real y permite que una misma cadena se acople a distintos desarrollos.

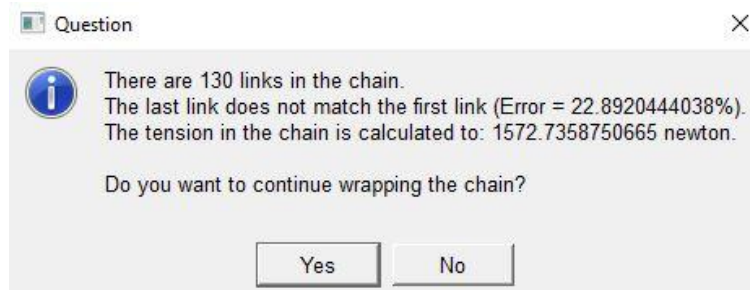


ILUSTRACIÓN 56: 'ADVERTENCIA TRAS CREAR LA CADENA'

Tras aceptar la advertencia, se finaliza la creación de la cadena, y se observa cómo ha aparecido en el modelo correctamente engranada. Puede observarse desde las distintas orientaciones cómo la cadena encaja perfectamente en los dientes de las ruedas dentadas.

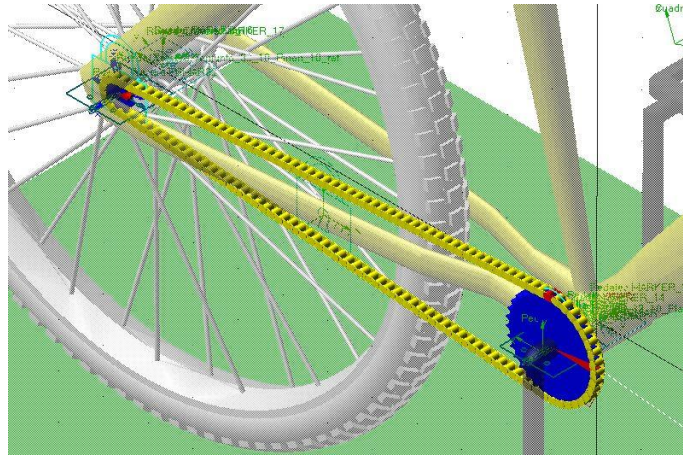


ILUSTRACIÓN 57: 'TRANSMISIÓN CREADA COMPLETAMENTE'

Tras todos estos pasos, la creación del sistema de transmisión queda completamente definida.

Los pasos para crear los otros dos desarrollos son idénticos, simplemente se debe cambiar el número de dientes del piñón. Para ello, lo mejor es desactivar y ocultar el sistema ya creado, para que así puedan convivir los tres desarrollos en el mismo archivo sin que haya conflicto entre unos y otros, y que se active solamente uno cada vez que se realice una simulación.

Para evitar el conflicto, se hace click con el botón derecho en el Sistema_34_10 y luego en (De)activate, desmarcando las dos casillas que aparecen. Después, se hace click en Hide y se oculta el sistema. Esto hace que la transmisión quede completamente desactivada y no influya en el modelo. Hecho esto, se procede con la creación de los otros dos desarrollos siguiendo los mismos pasos.

Tras todo el proceso, el árbol de entidades queda de la siguiente manera:

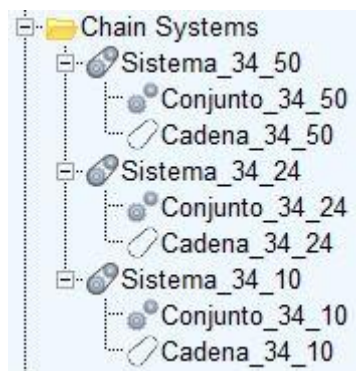


ILUSTRACIÓN 58: 'DESARROLLOS CREADOS EN EL ÁRBOL DE ENTIDADES'

Para que el sistema se mueva, es necesario añadir una rotación en los pedales, ya sea ejerciendo una fuerza en cada uno o introduciendo un movimiento rotatorio en el par *R_Pedal_Cuadro*. A continuación, se explicará cómo realizar este proceso.

4.3. Accionamiento de los pedales

Si se observa el modelo desde una vista de perfil, puede verse que inicialmente la bicicleta se encuentra suspendida en el aire, a una distancia de unos pocos milímetros del suelo. Esto se ha hecho así debido a la superficie irregular de la rueda, ya que al no ser una superficie lisa se vuelve demasiado complejo establecer un contacto perfecto entre el suelo y las ruedas. Por ese motivo, se decide dejar que caiga desde unos milímetros de altura para evitar problemas de choques de sólidos.

Por lo tanto, debido a esta pequeña distancia, es recomendable no empezar el giro de los pedales hasta que se establezca contacto con el suelo. Si se simula el modelo tal cual está, puede observarse que a los 0.25 segundos de la simulación, la bicicleta ya está en contacto perfecto con el suelo. Por lo tanto, se decide comenzar el pedaleo a los 0.5 segundos de haber comenzado.

Para generar el movimiento de los pedales hay varias alternativas:

1. Crear fuerzas en los pedales simulando los pies del ciclista, alternando esas fuerzas y haciendo que cada vez actúe una en función de la posición de los pedales. Esta opción sería más realista, pero implicaría la presencia de fuerzas desequilibrantes alternantes en el modelo, lo que obligaría a compensarlas con otras fuerzas ejercidas en otro punto, lo cual complica el modelo demasiado y se escapa del objetivo de este proyecto.
2. Introducir un movimiento rotatorio en el par *R_Pedal_Cuadro* mediante el menú *Motions > Joint Motions > Rotational Joint Motion*.

Tras analizar las dos alternativas, se decide optar por la segunda, ya que simplifica el modelado considerablemente y los resultados obtenidos son muy similares a los que se obtendrían utilizando el primer método.

4.3.1. Movimiento rotatorio en el par de los pedales

Para generar un movimiento en un par de rotación, se hace click en el menú *Motions > Joint Motions > Rotational Joint Motion*, y se hace click en el par donde se desea aplicar, que en este caso es el par de rotación *R_Pedal_Cuadro*. El movimiento habrá aparecido en el árbol de entidades, en el apartado *Motions*, donde se puede renombrar como *Mov_Rotatorio_Pedales*.

Creado el movimiento, es necesario establecer las condiciones del mismo. Para ello se hace doble click en el *Motion* recién creado y se elige el método de movimiento, que puede ser un desplazamiento (*Displacement*), una velocidad (*Velocity*) o una aceleración (*Acceleration*). En este caso, se elige una velocidad.

Una vez establecido el tipo de movimiento, se debe decidir cómo va a ser ese movimiento. Para ello se puede introducir un valor constante o una función, como se hará en este caso. Para introducir la función se hace click en el botón con tres puntos suspensivos en el campo *Function (time)*, y se introduce la función deseada en el campo que aparece. En este caso la función será la siguiente:

$$\text{Función de velocidad} = \text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 0.5, 0) + \text{STEP}(\text{time}, 0.5, 0, 7, -360d)$$

ECUACIÓN 7: 'FUNCIÓN DE VELOCIDAD PARA EL PAR R_PEDAL_CUADRO'

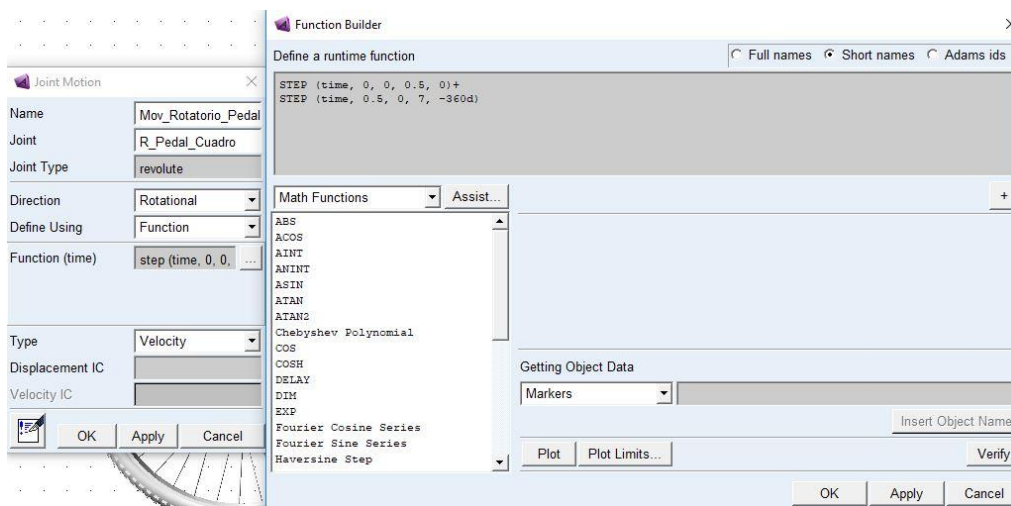


ILUSTRACIÓN 59: 'FUNCIÓN DE VELOCIDAD DEFINIDA EN ADAMS'

La función queda definida en dos pasos debido a la pequeña separación que hay entre la bicicleta y el suelo, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

La función STEP tiene la siguiente estructura:

$$STEP(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$$

ECUACIÓN 8: 'ESTRUCTURA DE LA FUNCIÓN STEP'

Como se observa, la función tiene 5 variables cuyo formato es el siguiente:

- x → la variable
- x_0 → valor inicial de la variable
- h_0 → valor de la función cuando $x = x_0$
- x_1 → valor final de la variable
- h_1 → valor de la función cuando $x = x_1$

En este caso, la variable escogida es el tiempo, y el parámetro donde incide directamente la función es la velocidad. Si se analiza la función escogida con detenimiento, se observan dos intervalos diferenciados: el de 0 a 0.5 segundos, y el de 0.5 a 7 segundos. En el primer intervalo, la velocidad de rotación del par es nula, ya que es necesario darle un margen para que la bicicleta llegue a tocar el suelo. En el segundo intervalo, de 0.5 a 7 segundos, se decide aumentar la velocidad de rotación poco a poco para evitar deslizamientos, es decir, evitar que la rueda trasera “derrape” y los resultados se vean alterados. Por lo tanto, la velocidad aumenta progresivamente hasta que a los 7 segundos la velocidad es de $360^\circ/\text{s}$, es decir, una vuelta completa sobre su eje por cada segundo transcurrido. Estas condiciones se darán hasta el final del recorrido, por lo que se mantendrá constante esta velocidad.

5. PROCESO DE SIMULACIÓN

5.1. Ajuste de la simulación

Tras haber definido todos los parámetros del modelo, se puede proceder a realizar las simulaciones pertinentes.

Como el modelo tiene cierta complejidad debido al montaje de la cadena y las ruedas dentadas, es necesario modificar ligeramente unos parámetros a la hora de realizar la simulación, ya que si no el proceso es demasiado costoso, llegando a más de media hora de cálculos para quince segundos de simulación.

Para ajustar la simulación, se hace click en el apartado *Simulation > Simulate > Run an Interactive Simulation*. En la ventana emergente se controlan las opciones de la simulación. Se establecerá un tiempo de 15 segundos para dejar que la bicicleta recorra toda la distancia del suelo, y se establecerá un tamaño *Step Size* de 0.01. Por último, y más importante, se desactiva la casilla *Update graphics display*, ya que esta opción hace que se previsualice el modelo mientras se realiza la simulación, lo que causa esa larga duración.

Una vez establecidos los parámetros, la ventana queda de la siguiente manera:

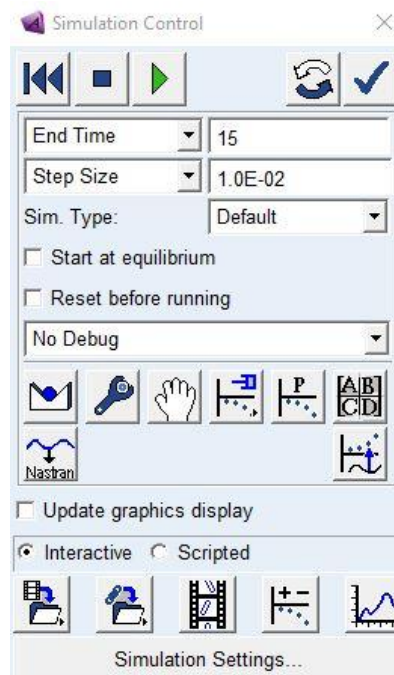


ILUSTRACIÓN 60: 'VENTANA DE LA SIMULACIÓN'

Tras esto, ya se puede proceder a realizar la simulación pulsando el botón *Play* de color verde. El proceso llevará aproximadamente 7 minutos, una reducción bastante notoria comparada con los 30 minutos comentados anteriormente.

Para visualizar la simulación, se hace click en el botón central de la parte inferior (*Switch to animation controls*) y se maneja con los botones de la parte superior. Es en esta ventana donde podrá visualizarse la simulación completa.

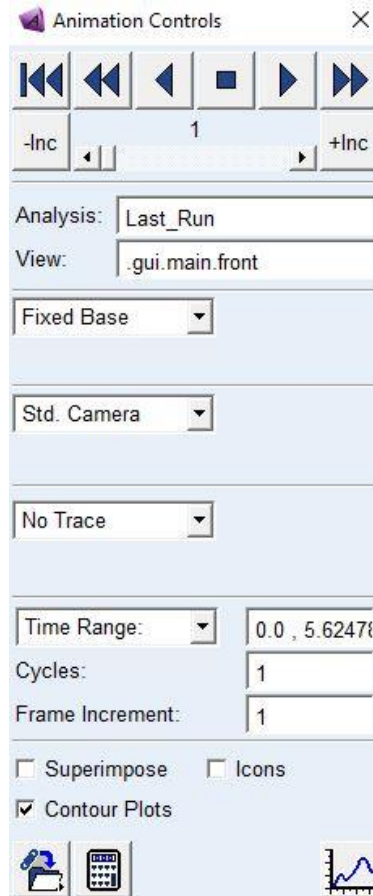


ILUSTRACIÓN 61: 'CONTROLES DE ANIMACIÓN DE LA SIMULACIÓN'

5.2. Ventanas de medida de parámetros

Tras la simulación, se pueden analizar una infinidad de parámetros de cualquier tipo. En este caso, algunos son muy interesantes y son el objeto principal de estudio, por lo que se crearán las ventanas de medida correspondientes.

Para generar una medición, se puede hacer de varias maneras. La más sencilla es buscando el objeto que se desea estudiar y haciendo click sobre él con el botón

derecho y luego en *Measure*. En la ventana emergente se ajustan los parámetros de la medición, que variarán dependiendo de la medida que se quiera tomar.

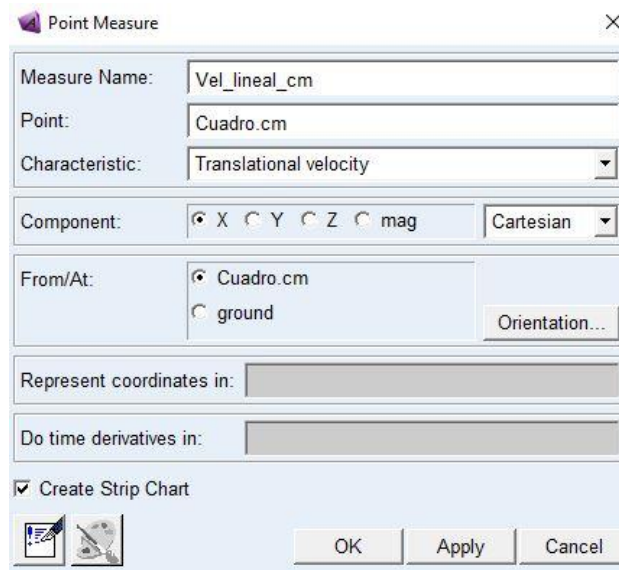


ILUSTRACIÓN 62: 'CREACIÓN DE UNA MEDICIÓN'

En este caso, se decide tomar medición de los siguientes parámetros para poder compararlos posteriormente:

Nombre medición	Punto / Par	Característica
Vel_lineal_cm	Cuadro.cm	Velocidad lineal
Acel_lineal_cm	Cuadro.cm	Aceleración lineal
Distancia_Recorrida	Cuadro.cm	Desplazamiento lineal
Vel_ang_Pedal	R_Pedal_Cuadro	Velocidad angular
Acel_ang_Pedal	R_Pedal_Cuadro	Aceleración angular
Vel_ang_RTras	R_RTras_Cuadro	Velocidad angular
Acel_ang_RTras	R_RTras_Cuadro	Aceleración angular
bushing_i.Total_Force_At_Location.Mag	Link_1	Fuerza en el eslabón

TABLA 10: 'MEDICIONES TOMADAS EN LA SIMULACIÓN'

5.3. Postprocesado de resultados

Las mediciones se calculan automáticamente tras cada simulación. Para visualizarlas puede hacerse a través del menú *View > Measure...* y seleccionando la que se quiera visualizar. También se puede entrar en el menú del post-procesador mediante la tecla F8 para generar gráficos más detallados, incluso exportar los resultados y analizarlos, por ejemplo, con una hoja de Excel. Esta ventana permite exportar a vídeo las simulaciones, haciendo click con el botón derecho en la ventana y en *Load Animation*. Se establecen las condiciones, se pulsa el botón rojo y se simula. Al acabar, se habrá generado un vídeo en formato *.avi* en la ruta de trabajo.

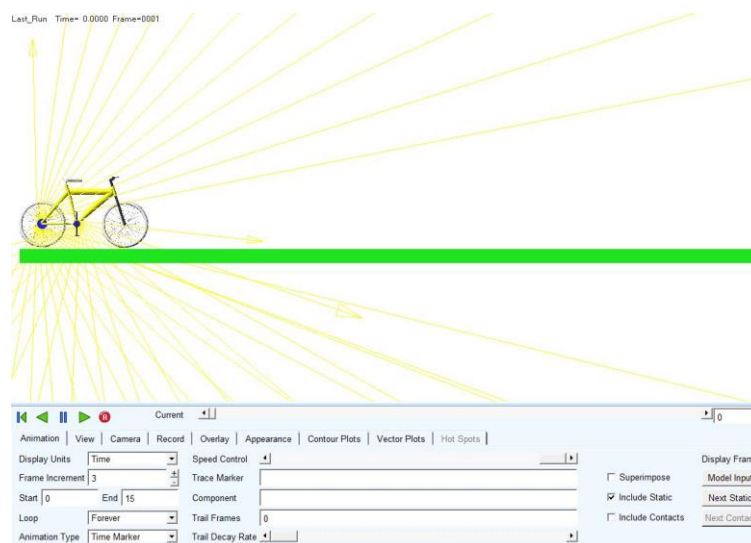


ILUSTRACIÓN 63: 'POSTPROCESADO EN VÍDEO'

Como en este caso se obtienen algunas mediciones erróneas en ciertos puntos que impiden visualizar el resto de datos correctamente, se decide exportar los resultados numéricos para procesarlos con Excel y así poder eliminar dichos puntos erróneos y visualizar mejor los gráficos. Para ello se dibujan las gráficas en el menú de post-procesado, marcando la opción *Plotting* de la esquina superior izquierda. Se selecciona como *Source* la opción *Measures*, y seleccionando la medida que se quiera dibujar se hace click en *Add Curves* y aparecerá su gráfica. Para exportar estos datos se hace click en el menú *File > Export > Numeric Data...*, y en la ventana emergente se escribe el nombre del archivo y se seleccionan los datos a exportar, que serán las líneas correspondientes a *plot_1*. Con el documento exportado, se pueden procesar los datos mediante una hoja de cálculo de Excel.

6. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos en las sucesivas simulaciones del modelo en los distintos escenarios. Destacar que, para la correcta visualización de los gráficos, ha sido necesario ajustar la escala y omitir ciertos puntos erróneos que daban lugar a resultados incorrectos.

6.1. Escenarios 1, 2 y 3: pendiente del terreno del 0%

Los tres primeros escenarios a analizar son aquellos cuya pendiente de inclinación del terreno es de cero grados. A continuación, se detallan los gráficos obtenidos de los datos exportados de Adams para su análisis:

6.1.1. Parámetros del centro de masas del sistema

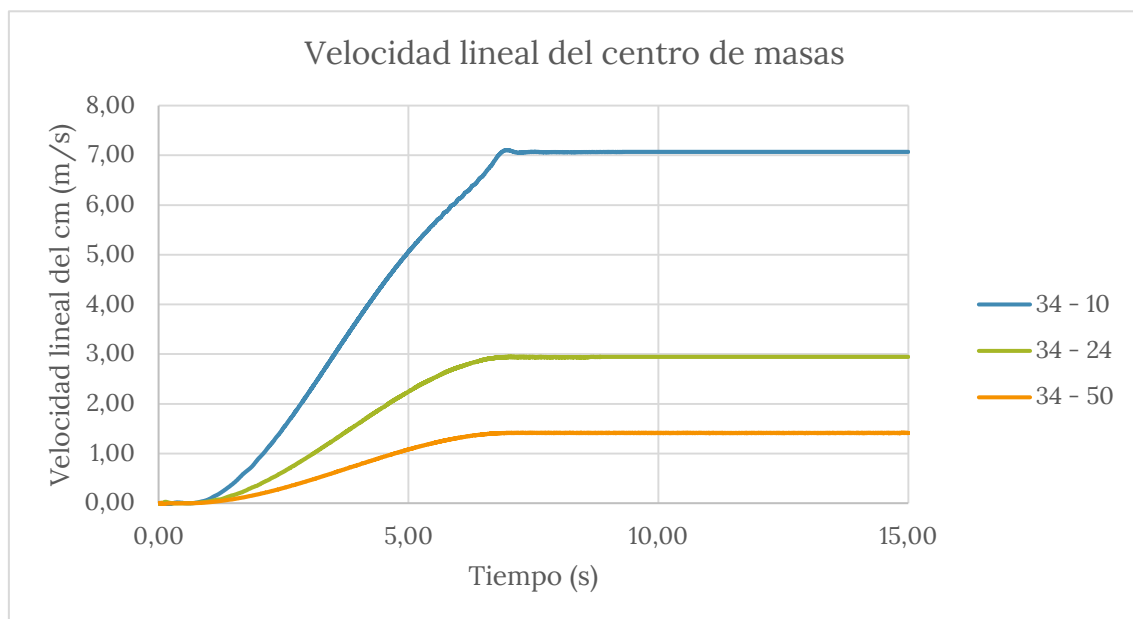


ILUSTRACIÓN 64: 'VELOCIDAD LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 0%)'

Debido a la variación del tamaño del piñón, la relación de transmisión es diferente entre unos desarrollos y otros y, como consecuencia, la velocidad lineal del conjunto cuando se estabiliza la rotación de los pedales es diferente para cada desarrollo, siendo mayor cuanto más pequeño es el piñón de la rueda trasera.

La velocidad de la bicicleta es igual a la velocidad lineal de un punto exterior de la rueda trasera. Por lo tanto, siguiendo el criterio de que la velocidad lineal en la cadena se mantiene y, por lo tanto, el plato y el piñón tienen esa misma velocidad, puede calcularse la velocidad angular del piñón y a partir de ella calcular la velocidad lineal de la bicicleta. Por ejemplo, para el caso del piñón de 10 dientes:

$$v_{plato} = \omega_{plato} \cdot r_{plato} = 2\pi \cdot 0,0493 = 0,3098 \frac{m}{s}$$

$$\omega_{piñón} \cdot r_{piñón} = \omega_{plato} \cdot r_{plato} \rightarrow \omega_{piñón} = \frac{0,3098}{0,0147} = 21,04 \frac{rad}{s}$$

$$Velocidad\ bicicleta = v_{rueda} = \omega_{piñón} \cdot r_{rueda} = 21,04 \cdot 0,3302 = 6,95 \frac{m}{s}$$

ECUACIÓN 9: 'CÁLCULO DE LA VELOCIDAD LINEAL DE LA BICICLETA'

Nota: la velocidad angular del plato es de 2π rad/s, y los radios se extraen de las ilustraciones 48 y 49. El radio de la rueda es 13 pulgadas = 0,3302 m

Procediendo de la misma manera pueden calcularse las otras velocidades lineales.

Para el caso de la aceleración lineal del sistema, ocurre algo particular que puede verse reflejado en el siguiente gráfico:

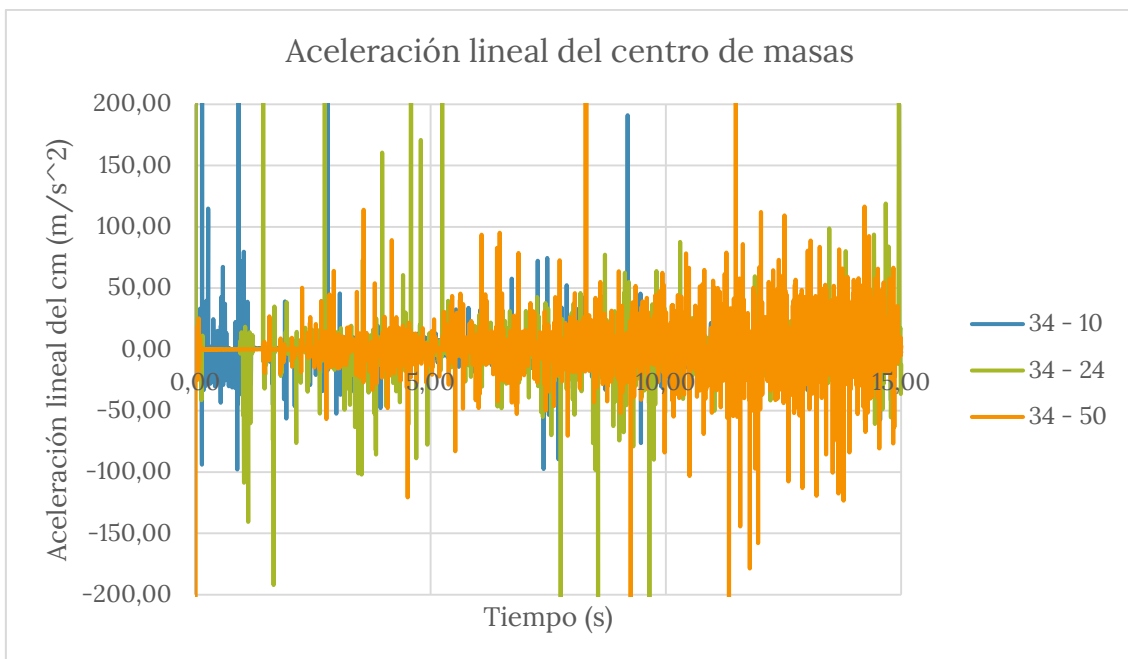


ILUSTRACIÓN 65: 'ACELERACIÓN LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 0%)'

Como se puede observar, los datos obtenidos son muy dispersos y no dejan lugar a conclusiones razonables. El motivo de esta gran dispersión de los datos es la acumulación de errores por varios motivos, pero principalmente dos:

- Transmisión por cadena: el módulo Machinery para la creación de la cadena en MSC Adams introduce pequeños errores en el cálculo que se van acumulando debido a la gran cantidad de cálculos requeridos para realizar la simulación.
- Contacto entre las ruedas y el suelo: para que las ruedas se desplacen correctamente sobre el terreno, es necesario crear una fuerza de tipo contacto en Adams. Este tipo de fuerzas son muy complejas y requieren de muchos cálculos que también inducen a errores.

La acumulación de errores debido a estos dos motivos, hace que los datos obtenidos sean muy dispersos y no proporcionen una solución clara, por lo que no son útiles en este caso.

Por último, puede analizarse también la distancia recorrida por la bicicleta durante la simulación:

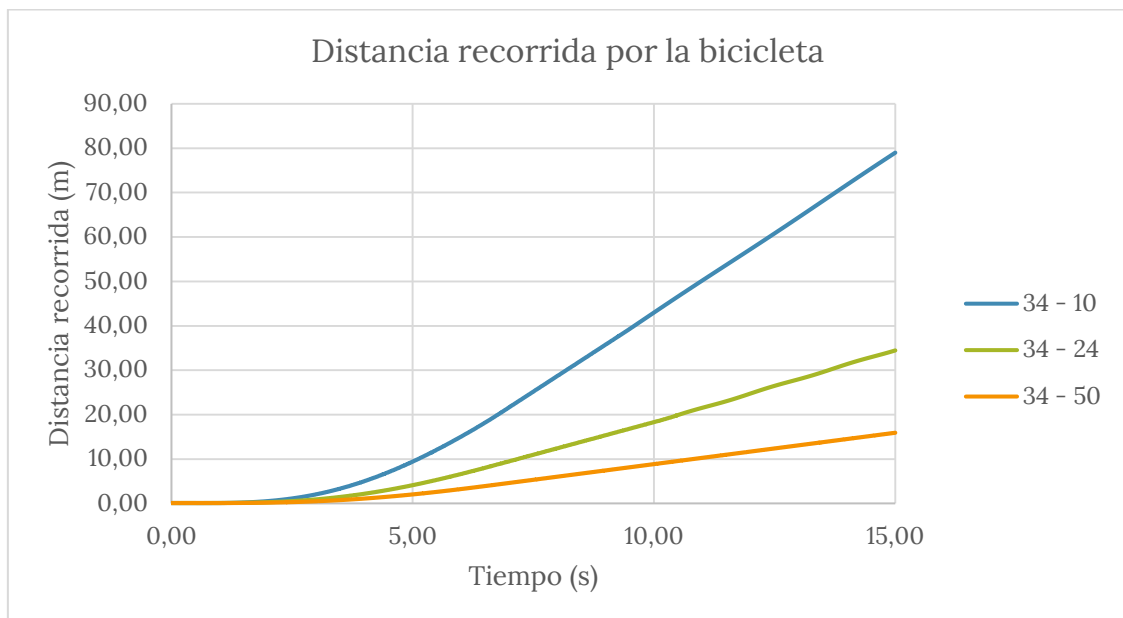


ILUSTRACIÓN 66: 'DISTANCIA RECORRIDA POR LA BICICLETA (PENDIENTE 0%)'

Igual que ocurre con la velocidad de traslación, la distancia recorrida es mayor cuanto mayor es la velocidad del sistema. Durante los primeros 7 segundos, mientras

la bicicleta está acelerando, la distancia sigue una tendencia exponencial, hasta que con la estabilización de la velocidad la distancia recorrida aumenta de forma lineal y regular.

6.1.2. Parámetros de los pedales

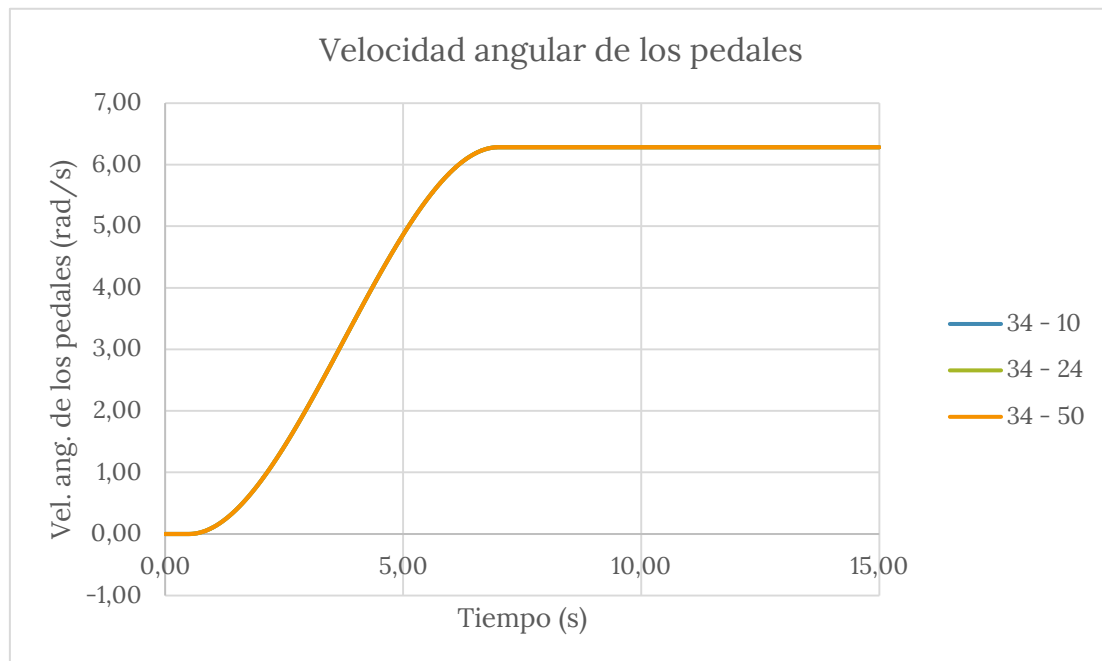


ILUSTRACIÓN 67: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 0%)'

Observando ahora el comportamiento de los pedales, se confirma lo que cabía esperar. Como la ecuación del movimiento se ha introducido como una variación de la velocidad, este parámetro sigue una tendencia exponencial al principio y tiende a ser lineal después, con un punto de inflexión entre ambas tendencias. Como se observa, en los tres desarrollos el comportamiento es exactamente el mismo, ya que el movimiento se ha impuesto directamente como una rotación en los pedales y las condiciones de contorno no variarán este comportamiento.

Si el movimiento se hubiera creado mediante una pareja de fuerzas sobre los pedales simulando los pies del ciclista, esta progresión no sería igual para los tres desarrollos, ya que para una misma fuerza de accionamiento cada uno tendría una distinta velocidad de rotación.

En cuanto a la aceleración angular de los pedales existen pequeños errores en los cálculos, pero en este caso los resultados sí que dan lugar a la extracción de conclusiones, ya que a pesar de haber puntos dispersos el gráfico sigue una tendencia claramente apreciable:

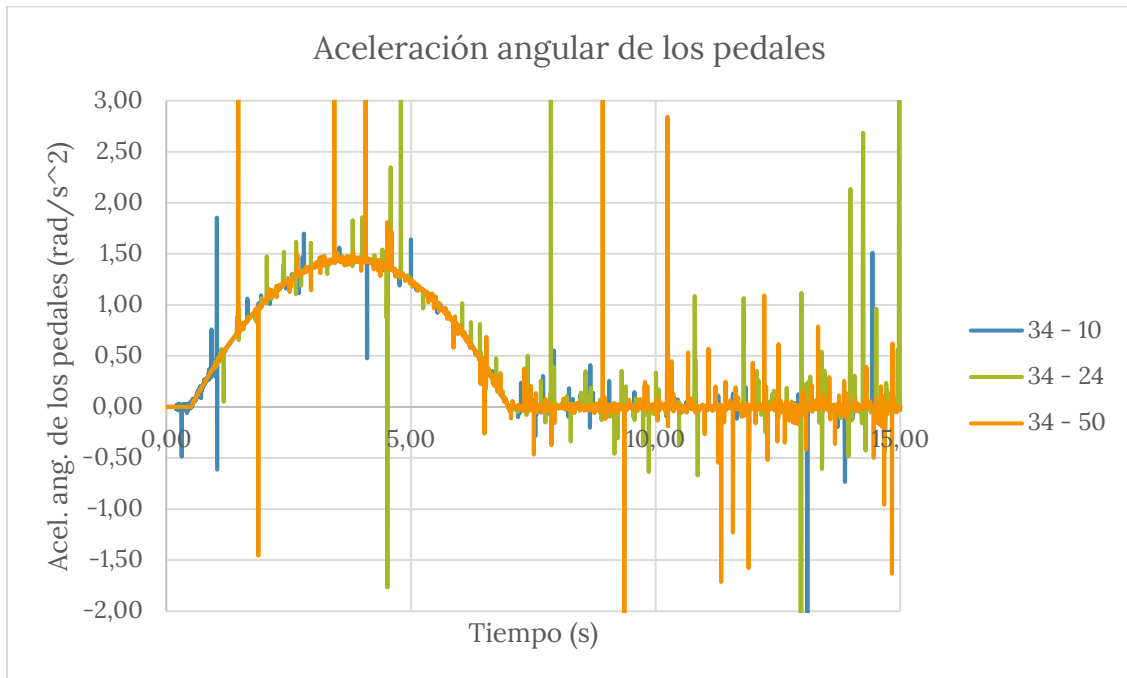


ILUSTRACIÓN 68: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 0%)'

En este caso, puede observarse cómo los pedales aceleran entre 0 y 7 segundos para alcanzar la velocidad exigida de 2π rad/s, con un punto de inflexión a mitad del recorrido. Después, a pesar de los errores obtenidos en muchos resultados, se observa que el gráfico tiende a ser nulo, tal y como cabe esperar al tener el sistema una velocidad constante a partir de los 7 segundos de simulación.

6.1.3. Parámetros de la rueda trasera

En tercer lugar, se procede a analizar la rueda trasera. En este caso, la velocidad angular de la rueda es la misma que la que lleva el piñón, por lo que sigue la regla de la velocidad lineal constante durante el recorrido de la cadena, tal y como se ha calculado en el apartado 6.1.1..

Los resultados obtenidos para la velocidad angular son los siguientes:

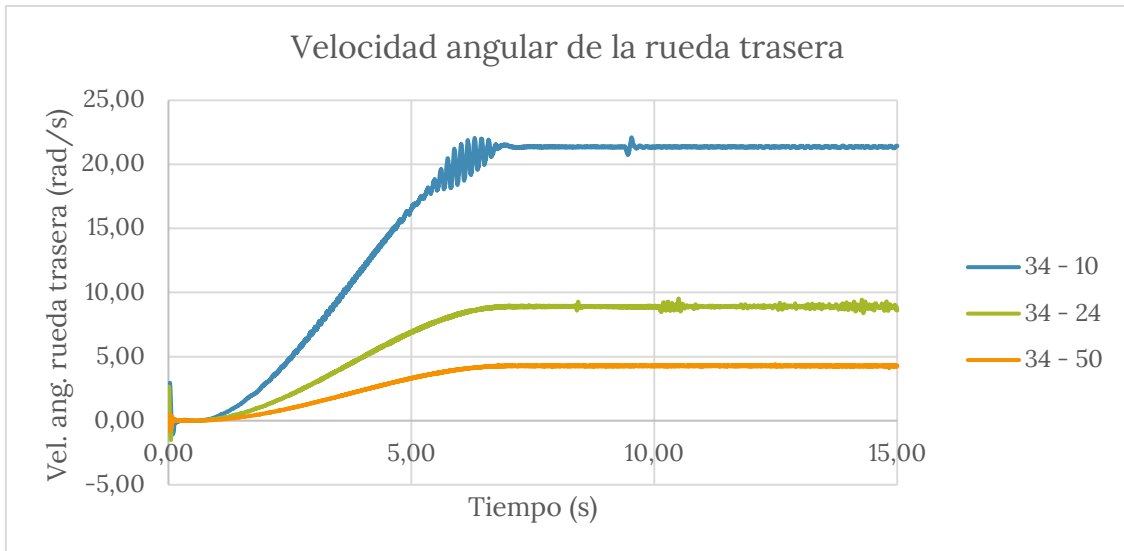


ILUSTRACIÓN 69: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 0%)'

En este caso, a pesar de que la velocidad angular de los pedales es la misma en los tres desarrollos, existe una diferencia bastante visible en la velocidad angular de la rueda trasera, debido a la diferencia de tamaño de los tres piñones. De nuevo, se obtiene una velocidad mayor cuanto menor es el tamaño del piñón.

Por último, en cuanto a la aceleración angular ocurre lo mismo que en el caso de la aceleración lineal del centro de masas del conjunto y no da lugar a conclusiones debido a los errores acumulados y la disparidad de los resultados obtenidos:

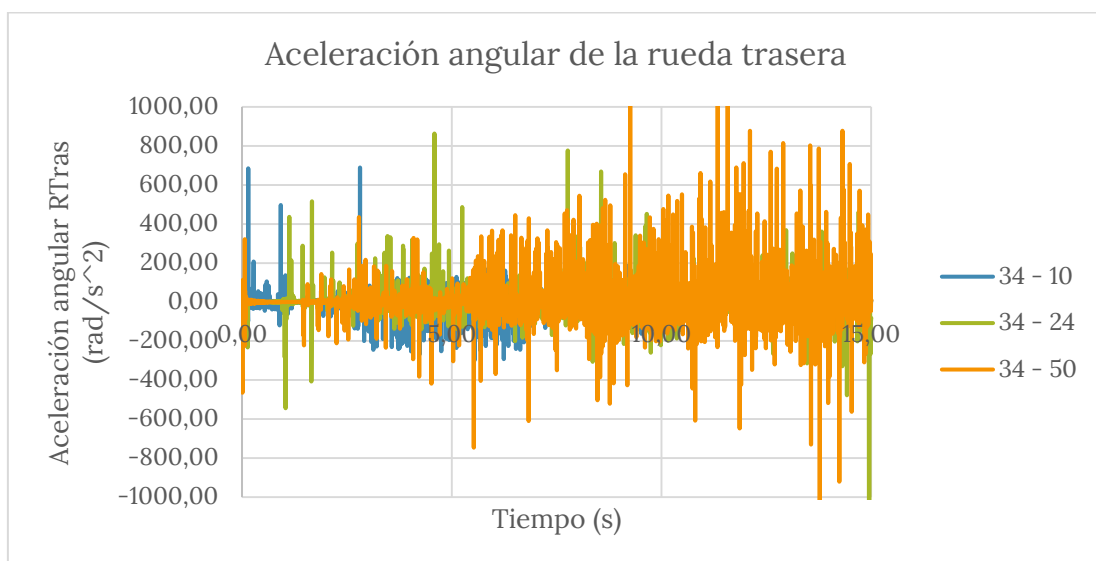


ILUSTRACIÓN 70: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 0%)'

6.1.4. Parámetros en la transmisión

Por último, se procede a analizar los resultados obtenidos en las mediciones de la transmisión. Es en este punto donde se aprecian las mayores diferencias.

En una cadena de transmisión, el punto de rotura en el que los eslabones se separan y la cadena se considera inservible es el denominado como *Bushing*, que es el manguito de unión entre dos eslabones sucesivos de la cadena. Por lo tanto, una buena medición que se puede realizar es la de la fuerza total que actúa en ese punto, y resulta lo siguiente:

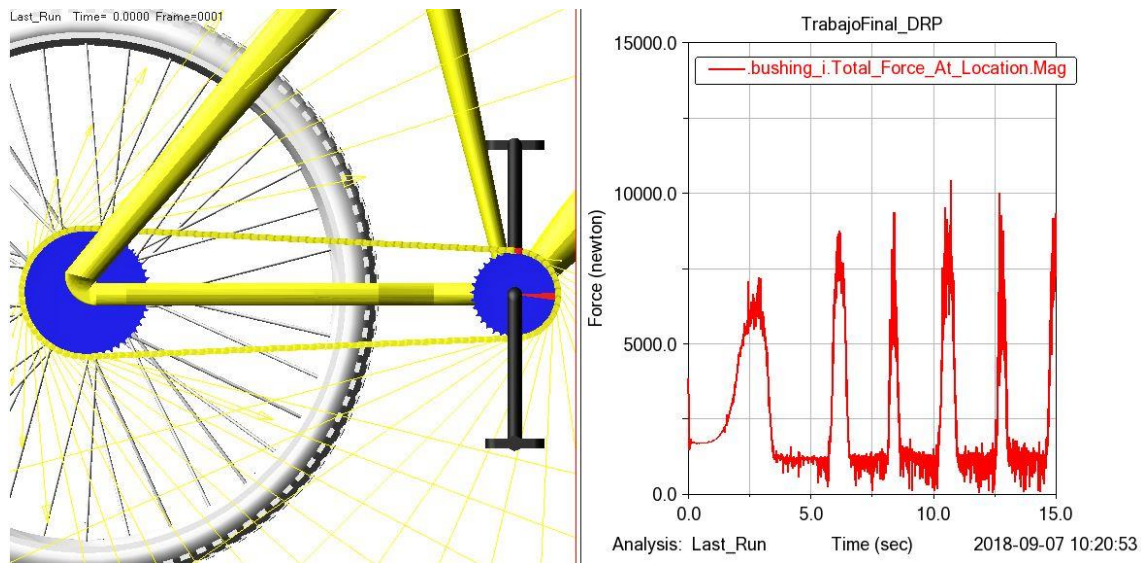


ILUSTRACIÓN 71: 'MEDIDA DE LA FUERZA EN EL ESLABÓN DE UNIÓN'

Considerando el punto de medida coloreado en color rojo en la cadena (en la parte superior del plato en la imagen), se aprecia que la fuerza oscila en función de la posición del eslabón. Así, cuando el eslabón es atacado por el engranaje, la fuerza que soporta comienza a ascender hasta alcanzar su máximo justo cuando el eslabón pasa de “entrar” en el engranaje a “salir”, justo en la mitad del recorrido de la cadena sobre la rueda dentada, y desciende a partir de ese punto hasta alcanzar un valor que parece ser constante y no nulo debido a las tracciones en la cadena.

Si se comparan los resultados obtenidos para los tres desarrollos estudiados, se obtienen los siguientes resultados:

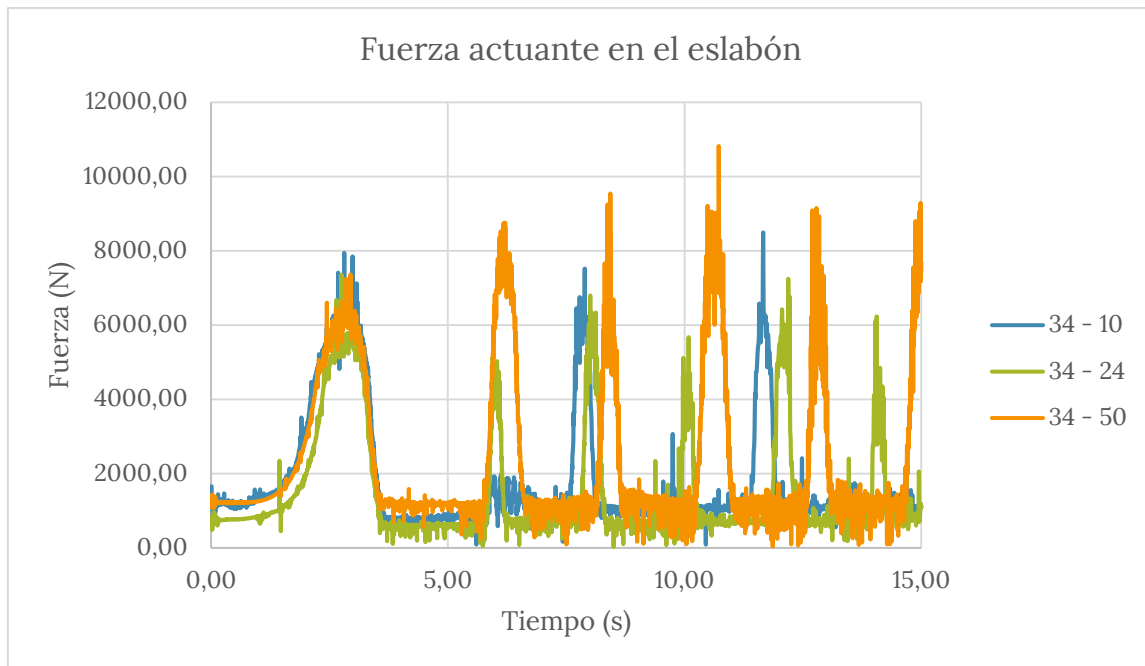


ILUSTRACIÓN 72: 'FUERZA ACTUANTE EN EL ESLABÓN DE LA CADENA (PENDIENTE 0%)'

Observando con detenimiento el gráfico, puede verse que el comportamiento oscilatorio se repite en los tres casos. Sin embargo, se aprecian dos diferencias claras:

- Existe un desfase temporal debido a la diferencia de tamaño del piñón, que hace que el eslabón de la cadena sea atacado antes o después en función del tamaño del mismo.
- Cuando el eslabón es atacado por el piñón, la fuerza que se ejerce es mayor cuanto mayor es el tamaño del piñón, mientras que mantiene un valor máximo constante en los tres casos cuando es atacada por el plato.

A pesar de que la velocidad de rotación de la rueda es mayor cuanto menor es el tamaño del piñón, se observa que la fuerza que se ejerce sobre el eslabón al pasar por el piñón pequeño es menor que cuando pasa por el piñón más grande, a pesar de que pueda parecer que ocurre lo contrario en la realidad. Esto se debe principalmente al tamaño del piñón y al recorrido que debe realizar la cadena. También se observa que cuando el eslabón no es atacado, la fuerza ejercida en el desarrollo con el piñón más grande es algo mayor a las otras dos, aunque la diferencia no es tan notable como en el caso de los piñones.

6.2. Escenarios 4, 5 y 6: pendiente del terreno del 12%

De igual manera que se ha hecho para los tres primeros escenarios, se procede ahora a analizar detalladamente los tres últimos, con una pendiente del terreno del 12%.

Como el movimiento de la bicicleta se ha introducido como una rotación en los pedales con variación progresiva de la velocidad, algunos de los parámetros se mantienen igual que en los tres primeros escenarios, tal y como se verá a continuación.

6.2.1. Parámetros en el centro de masas del sistema

Para el caso de la velocidad lineal del sistema, pueden apreciarse diferencias con los tres primeros escenarios:

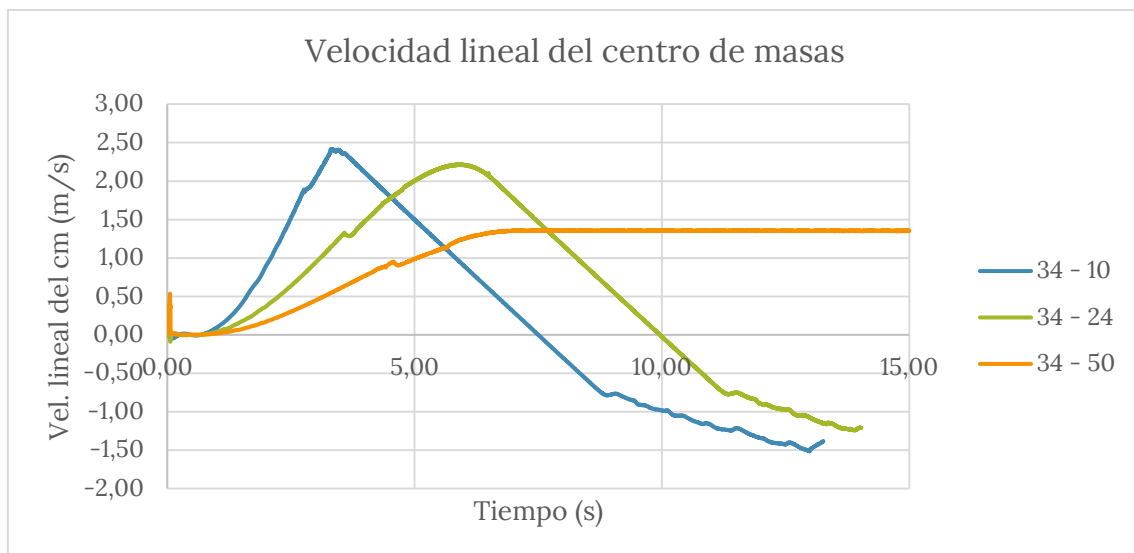


ILUSTRACIÓN 73: 'VELOCIDAD LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 12%)'

Para el caso del desarrollo con 50 dientes en el pedal, se observa que los resultados obtenidos son idénticos a los del primer escenario debido a la imposición del movimiento rotatorio en los pedales.

Por otro lado, en los otros dos desarrollos ocurre algo muy distinto. En un primer momento, la línea sigue la misma tendencia que en el caso de pendiente horizontal, pero llega un punto en el que la velocidad llega a su máximo y comienza a descender, hasta que pasa de ser positiva a negativa. Esto ocurre porque la rueda trasera de la

bicicleta comienza a deslizar, hasta que el sistema comienza a caer hacia atrás debido a la gran velocidad de rotación y la fuerza necesaria para mover el desarrollo, que hace que la fuerza ejercida supere a la fuerza de rozamiento, por lo que no puede mantener el contacto y comienza a “derrapar”. Por ese motivo, la velocidad pasa a ser negativa cuando el sistema se mueve en sentido contrario. Se observa que este comportamiento aparece antes cuanto más pequeño es el piñón.

En cuanto a la aceleración lineal, el error acumulado hace que de nuevo los datos sean muy dispersos y no den lugar al análisis y a la extracción de conclusiones:

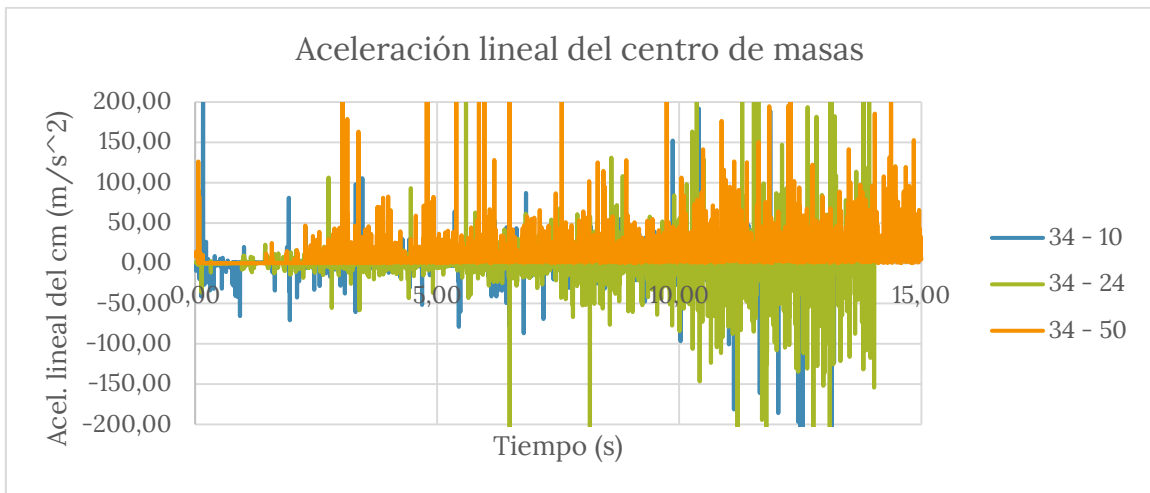


ILUSTRACIÓN 74: 'ACELERACIÓN LINEAL DEL CENTRO DE MASAS (PENDIENTE 12%)'

En tercer lugar, en la distancia recorrida por el sistema ocurre lo mismo que con la velocidad lineal, y es que comienza a descender debido al deslizamiento de la rueda y la caída del sistema:

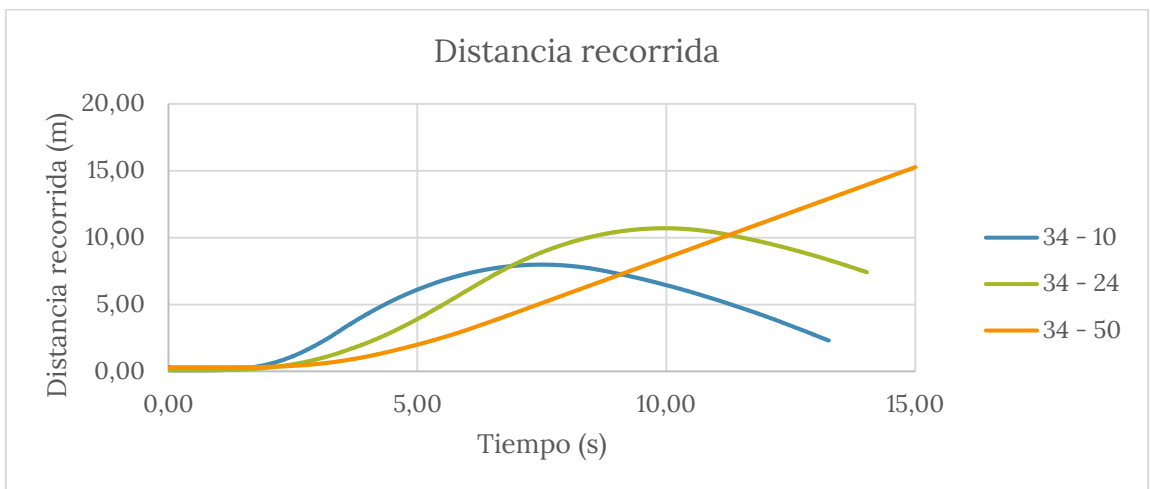


ILUSTRACIÓN 75: 'DISTANCIA RECORRIDA POR EL SISTEMA (PENDIENTE 12%)'

6.2.2. Parámetros en los pedales

Analizando ahora el comportamiento de los pedales, se observan unos valores idénticos a los de los tres primeros escenarios por el motivo ya comentado:

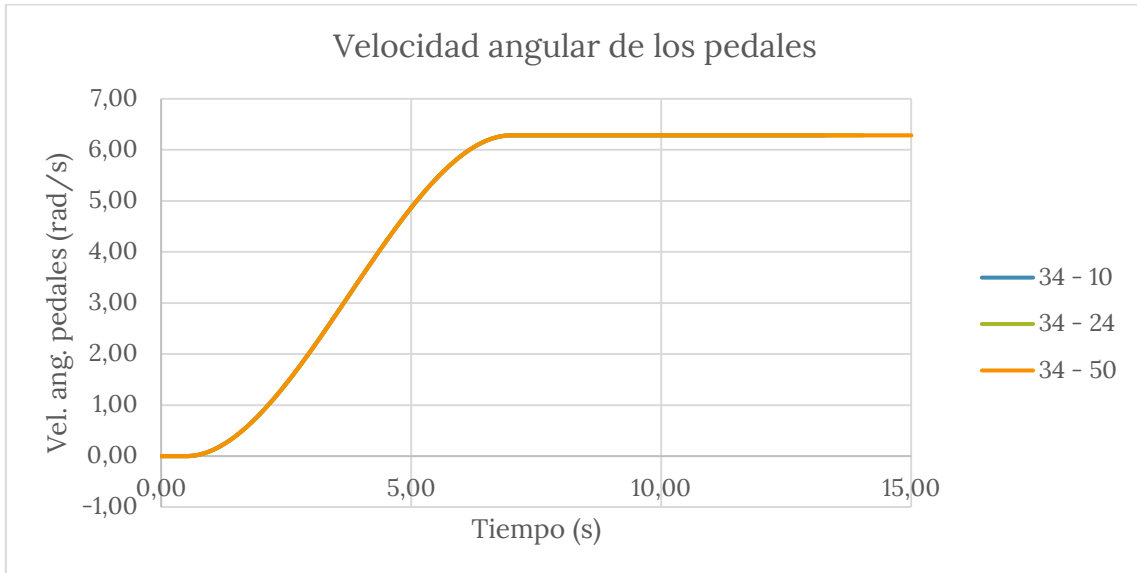


ILUSTRACIÓN 76: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 12%)'

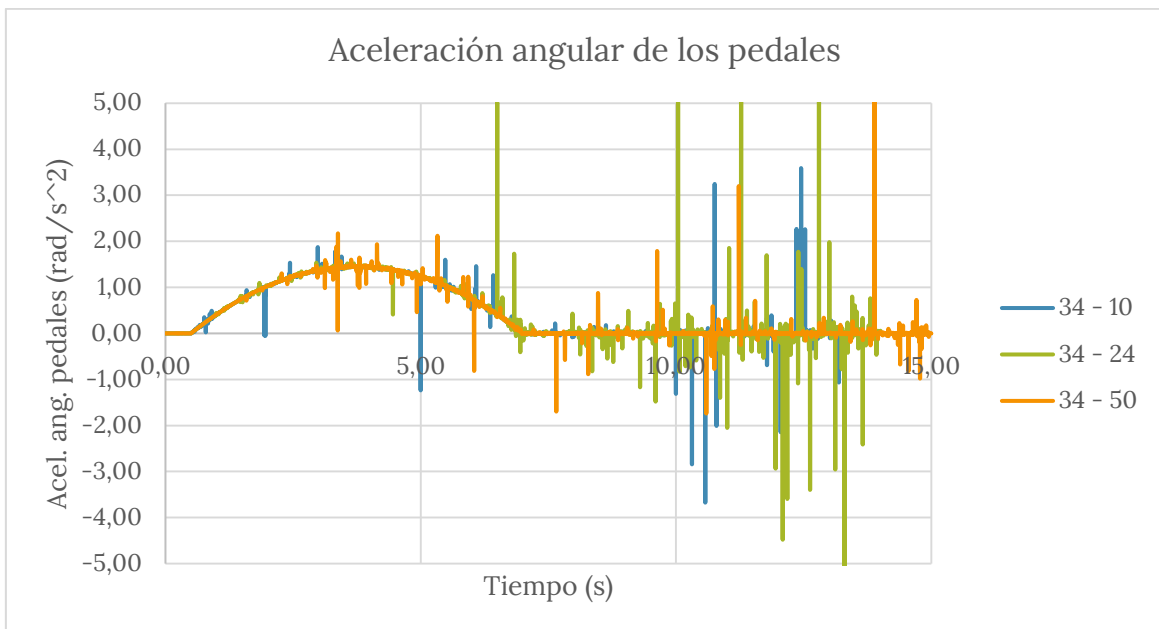


ILUSTRACIÓN 77: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LOS PEDALES (PENDIENTE 12%)'

A pesar del error acumulado en la aceleración, puede verse la tendencia de la curva y su similitud con la del caso con pendiente horizontal.

6.2.3. Parámetros en la rueda trasera

En tercer lugar, analizando el comportamiento de los resultados en la rueda trasera se observa el mismo comportamiento que en los pedales, y los resultados obtenidos son los mismos que para el primer caso:

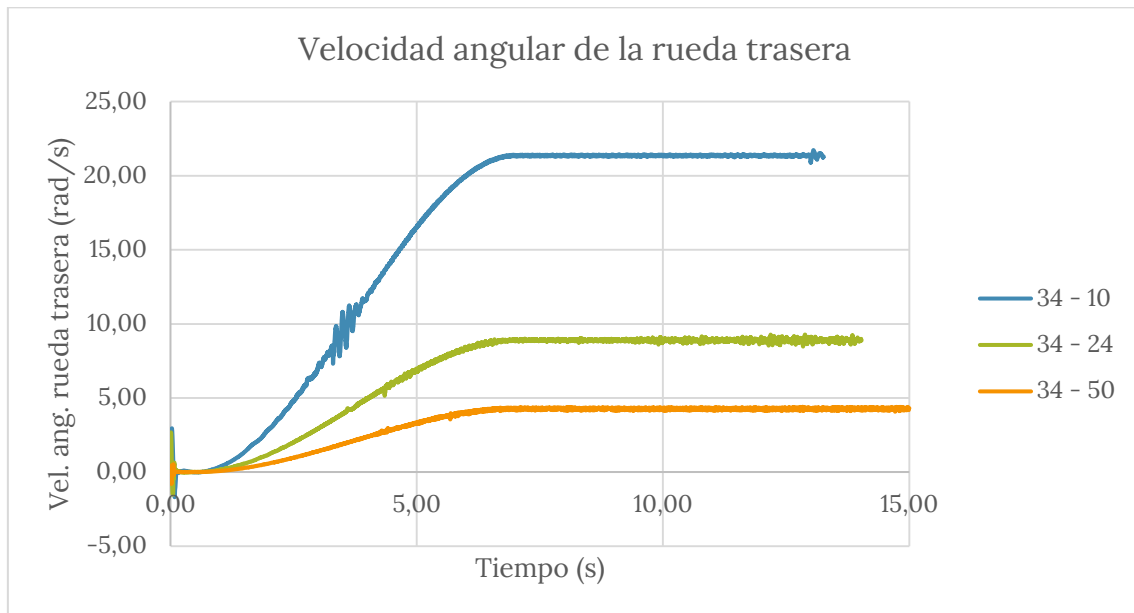


ILUSTRACIÓN 78: 'VELOCIDAD ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 12%)'

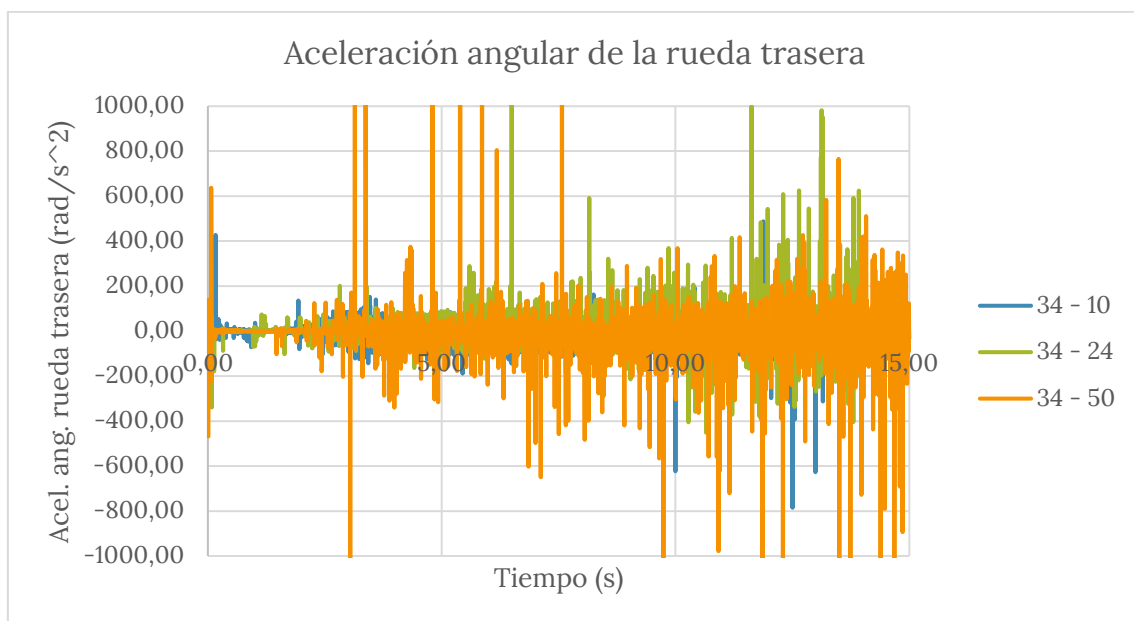


ILUSTRACIÓN 79: 'ACELERACIÓN ANGULAR DE LA RUEDA TRASERA (PENDIENTE 12%)'

Nuevamente, la disparidad de los datos en la aceleración no da lugar a conclusiones.

6.2.4. Parámetros en la transmisión

En último lugar, se procede a analizar la transmisión. De igual manera que ocurría en los tres primeros casos, se observa que la fuerza actuante en el eslabón de la cadena varía en función de la posición de la misma. Así, la fuerza es máxima cuando el eslabón es atacado por el plato o el piñón y desciende mientras se encuentra en el recorrido entre ambas ruedas dentadas.

También se observa una diferencia entre cada desarrollo, siendo menor la fuerza máxima cuanto menor es el tamaño del piñón:

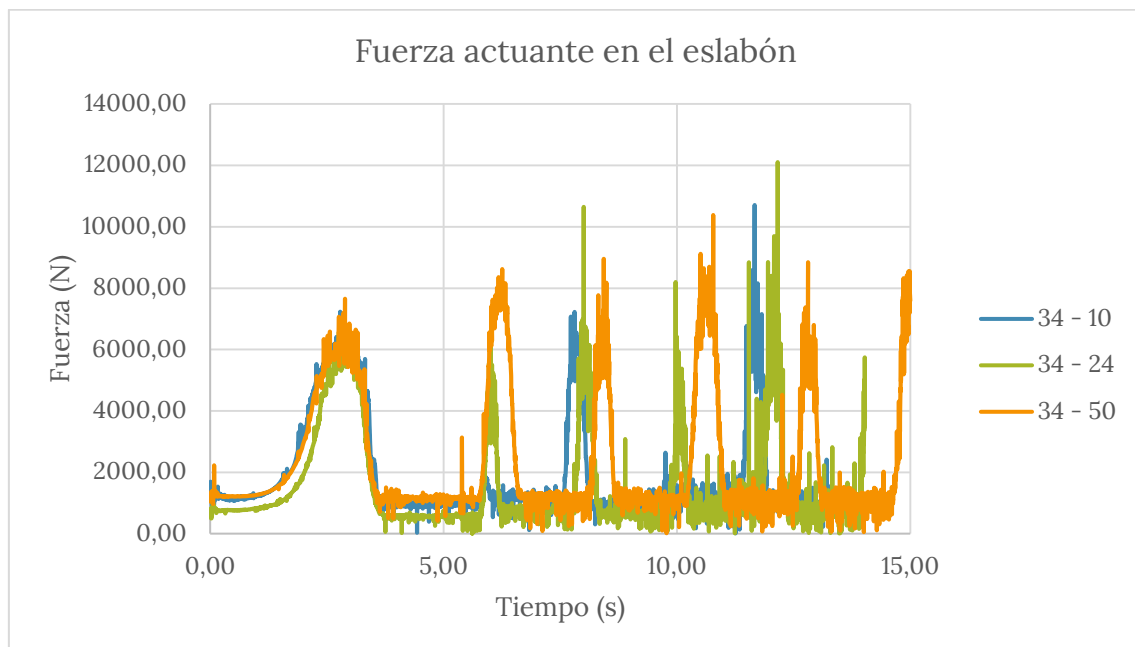


ILUSTRACIÓN 80: 'FUERZA ACTUANTE EN EL ESLABÓN DE LA CADENA (PENDIENTE 12%)'

Se observa que los datos obtenidos y su magnitud son iguales que en el caso de pendiente horizontal, debido a que el movimiento ha sido introducido mediante una rotación y no mediante una fuerza en los pedales como habría ocurrido en la realidad.

7. CONCLUSIONES DEL PROYECTO Y DESARROLLOS FUTUROS

La elaboración de este proyecto ha sido una tarea laboriosa a la par que entretenida. Se ha podido observar el comportamiento de algo tan cotidiano como una bicicleta y que parece complejo de entender a simple vista mediante elementos gráficos muy visuales.

Por un lado, se observa que cuanto más pequeño es el piñón, mayor es la velocidad que adquiere el conjunto. Por otro lado, en una situación en la que hay que afrontar una pendiente del terreno, es más conveniente utilizar desarrollos más grandes para no perder el contacto con el suelo y no tener problemas de deslizamiento, como se ha visto que ocurre en el caso de los desarrollos de 10 y 24 dientes en el piñón.

Por último, se observa que la fuerza que actúa en la cadena varía en función del desarrollo, permitiendo llegar a determinar en qué situaciones rompería y cómo se podría evitar teniendo un conocimiento sobre el comportamiento del sistema de transmisión.

Es importante destacar también que este proyecto queda abierto a futuros desarrollos más complejos, por ejemplo:

- Modelar la ecuación de movimiento como una fuerza actuante en cada pedal simulando los pies del ciclista y no como una rotación fija. Esto haría que las fuerzas fueran diferentes y que las velocidades angulares y lineales variaran en función de la pendiente del terreno, cosa que no ha ocurrido al aplicar directamente el movimiento.
- Analizar qué podría ocurrir al cambiar el tamaño del plato y no solamente el del piñón, ya que en este análisis se ha optado por utilizar un único tamaño de plato.
- Cambiar las condiciones del terreno para adaptarlo a posibles cambios climatológicos, por ejemplo, variando el coeficiente de rozamiento simulando un suelo mojado o embarrado.
- Estudiar el comportamiento con pendientes más pronunciadas.

A pesar de todas estas situaciones posibles, se decide dejar el estudio aquí debido a que someterlo a otros escenarios podría dar muchos resultados que podrían utilizarse para otros estudios, pero es necesario ponerle punto y aparte a este proyecto.

En definitiva, ha sido un proyecto bonito y práctico que deja una buena base para seguir ampliando futuros análisis.

Tras todo esto, aquí culminan cuatro años inolvidables de carrera universitaria. Por un lado, me llevo una gran experiencia y unos conocimientos que difícilmente podría haber aprendido en cualquier otro sitio y que, muy probablemente, marcarán el rumbo del resto de mi vida. Y lo más importante de todo, me llevo unos amigos para toda la vida.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] USUARIO YUVAN. Modelo CAD 'Bicycle Assembly' utilizado en la simulación. <<https://www.grabcad.com/library/bicycle-assembly-1>> [Acceso 22 Mayo 2018]
- [2] CANAL 3D TECHNOCRAFTS YOUTUBE. All Terrain Vehicle Simulation using MSC ADAMS. <<https://www.youtube.com/watch?v=PqwTNJOvZ1g&t=1554s>> [Acceso 2 Julio 2018]
- [3] CANAL JOHN EDISON GONZALEZ YOUTUBE. Relación de transmisión por cadenas. <<https://www.youtube.com/watch?v=WN2jvDhZ03E>> [Acceso 3 Julio 2018]
- [4] IES SIERRA DE SAN QUÍLEZ. Física de la bicicleta. <<http://www.iesbinefar.es/galeria/bici/fuerzas.html>> [Acceso 15 Junio 2018]
- [5] WEIGHT WEENIES. Pesos de los componentes de una bicicleta. <<https://www.weightweenies.starbike.com>> [Acceso 10 Junio 2018]
- [6] BIKE SCALE. Pesos de una bicicleta. <<http://bikescale.com/>> [Acceso 10 Junio 2018]
- [7] INGEMECÁNICA. Transmisión por Cadenas, Cálculo y diseño. <<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>> [Acceso 18 Junio 2018]
- [8] NO SIN MI BICI. Medidas y estándares de la bicicleta. <<https://nosinmibici.com/2014/02/18/medidas-y-estandares-de-la-bicicleta/>> [Acceso 11 Junio 2018]
- [9] ZIKOLAND. ¿Importa el peso? Ciclistas pesados frente a ligeros (76 kilos vs 60 kilos). <<https://www.zikloland.com/importa-peso-ciclistas-pesados-frente-ligeros-76-kilos-vs-60-kilos/>> [Acceso 1 Julio 2018]
- [10] ERGOIBERICA. Punto de contacto con el sillín. <<http://www.ergoiberica.com/index.php/es/biomecanica/punto-contacto-sillin.html>> [Acceso 5 Julio 2018]
- [11] BOE PROVINCIA DE VALENCIA. Anuncio de la Conselleria de Economía Sostenible, sectores Productivos, Comercio y Trabajo sobre la prórroga del convenio colectivo de trabajo del sector Oficinas y despachos (código 46000805011981). [Acceso 16 Agosto 2018]

- [12] CURIOSFERA. *Historia de la bicicleta*. <<https://www.curiosfera.com/historia-de-la-bicicleta/>>fh [Acceso 20 Mayo 2018]
- [13] CURIOSFERA. *Ilustración 1*. <<https://www.curiosfera.com/wp-content/uploads/2017/05/boceto-bicicleta-Leonardo-da-Vinci.jpg>> [Acceso 20 Mayo 2018]
- [14] CURIOSFERA. *Ilustración 2*. <<http://s6218.pcdn.co/wp-content/uploads/2014/09/Rover.jpg>> [Acceso 20 Mayo 2018]
- [15] CURIOSFERA. *Ilustración 3*. <<https://www.eltiodelmazo.com/wp-content/uploads/2014/02/zoom-bike-picture-495d3aea9ee565fd991ce661f67c929a-1.jpg>> [Acceso 22 Mayo 2018]
- [16] MERKABICI. *Ilustración 4*. <https://www.merkabici.es/blog/wp-content/uploads/2016/10/1476000_2016_A_2_Madone_Race_Shop_Limited_H1-3000x2454.jpg> [Acceso 22 Mayo 2018]
- [17] LA BICICLETA. *Ilustración 5*. <<https://labicikleta.com/wp-content/uploads/2013/07/PlatoPi%C3%B1onV2.jpg>> [Acceso 20 Mayo 2018]
- [18] GRABCAD. *Ilustración 6*. <https://grabcad.com/library?page=1&time=all_time&sort=recent&query=bicycle> [Acceso 20 Mayo 2018]
- [19] UPV. *Materiales polímeros y compuestos*. <https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_5.html> [Acceso 9 Agosto 2018]
- [20] ORBEA. *Bicicleta Orbea Alma M10 19*. <<https://www.orbea.com/es-es/bicicletas/alma-29-m10-19>> [Acceso 20 Agosto 2018]
- [21] SRAM. *Casette de piñones XG-1275 Eagle™ Cassette*. <<https://www.sram.com/sram/mountain/products/xg-1275-eagle-cassette>> [Acceso 20 Agosto 2018]
- [22] AMAZON. *Coste equipo HP de la ETSID*. <<https://www.amazon.es/HP-ProDesk-3-4GHz-i7-6700-Micro/dp/B017JZ8ZP0>> [Acceso 16 Agosto 2018]
- [23] PCCOMPONENTES. *Coste equipo personal*. <<https://www.pccomponentes.com/asus-k55vm-sx052v-i7-3610qm-4gb-500gb-gt-630m-15-6->> [Acceso 16 Agosto 2018]
- [24] CIMWORKS. *Coste de la licencia de SolidWorks*. <<https://www.cimworks.es/precios-solidworks/>> [Acceso 16 Julio 2018]

Pliego de condiciones

2

1. CONDICIONES DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

El pliego de condiciones es un documento que recoge los requisitos técnicos y/o legales por los que debe regirse el proyecto en cuestión, para garantizar que el mismo se desarrolla correctamente.

El proyecto consiste en el modelado y simulación dinámica de una bicicleta convencional y su sistema de transmisión de movimiento. Como no se han realizado ensayos experimentales en laboratorio, no será necesario incluir normativa de seguridad ni condiciones facultativas. Por lo tanto, podrá dividirse el documento en dos partes diferenciadas: condiciones de los equipos utilizados y condiciones del modelo.

1.1. Condiciones de los equipos utilizados

Para la realización de este proyecto se han necesitado dos equipos informáticos y dos programas principales, uno de simulación y otro de modelado 3D, por lo que se distinguirá en dos subapartados.

1.1.1. Hardware

Los equipos utilizados en el desarrollo de este proyecto son un ordenador portátil de uso personal y un equipo disponible en la ETSID de la UPV, en concreto, en el aula Alemania.

- **Equipo personal:** utilizado para el desarrollo de la memoria del proyecto y gran parte del modelado de la bicicleta, excepto el sistema de transmisión.
 - Ordenador portátil Asus K55VM
 - Procesador Intel Core i7 3610QM 2.3GHz
 - Tarjeta gráfica Nvidia GeForce 630M 2GB
 - Memoria RAM 8GB DDR3
 - Disco duro SSD Crucial MX100 120GB
 - Sistema operativo Windows 8.1
 - Teclado, ratón y monitor (15.6" 1366x768) integrados

- **Equipo disponible en la ETSID:** utilizado para el modelado del sistema de transmisión de la bicicleta y la simulación final con las condiciones impuestas. Ha sido necesario debido a las restricciones presentes en la versión de estudiante de MSC Adams View instalada en el equipo personal. Instalado en el aula Alemania de la escuela.
 - Ordenador de sobremesa HP ProDesk 490 G3 Microtower
 - Procesador Intel Core i7 6700 3.4GHz
 - Tarjeta gráfica Nvidia GeForce GT 730 2GB
 - Memoria RAM 8GB DDR4-SDRAM
 - Disco duro 1TB
 - Sistema operativo Windows 10 Pro
 - Teclado, ratón y monitor (HP L1950) externos

1.1.2. Software

Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado el siguiente software:

- MSC Adams View: software principal del proyecto. Utilizado para la importación del modelo CAD, la creación de las condiciones de contorno, ajuste de densidades mediante la versión para estudiantes, y creación de la cadena de transmisión, simulación final y extracción de datos mediante la versión completa con licencia.
- SolidWorks 2018: utilizado para la creación de los planos del modelo a partir de exportaciones en formato IGES (.igs) provenientes del modelo de MSC Adams.
- Microsoft Word y Excel 2016: para la redacción de los documentos explicativos del proyecto y la realización de cálculos y gráficos.

1.2. Condiciones del modelo

Para la importación del modelo en el entorno de MSC Adams, es necesario establecer unas condiciones sobre las que se sostendrá el modelo y que implicarán que los resultados obtenidos sean correctos y no den valores dispares. Dichas condiciones son las que se enumeran a continuación:

- Modelo CAD a utilizar: disponible en la librería GrabCAD, denominado “BICYCLE ASSEMBLY” y cuyo autor es el usuario “Yuvan”.
- Modificaciones del modelo: se modifica la pieza que compone los pedales y el eje de pedalier para eliminar las ruedas dentadas modeladas, ya que no se utilizarán.
- Densidades impuestas: como el cuadro y la horquilla son macizos, su densidad calculada será de 1090 kg/m³ para lograr un peso realista. En cuanto a las ruedas y el sillín la densidad será de 950 kg/m³. Los pedales serán de acero con densidad 7801 kg/m³.
- Plato: se impondrá para la transmisión un plato de 34 dientes y 6 mm de espesor, así como el acero para el material. El resto de dimensiones serán calculadas por MSC Adams.
- Piñones: se considerarán tres tamaños de piñón: 10 dientes, 24 dientes y 50 dientes, todos ellos con grosor de 6 mm y como material acero.
- Distribución del peso del ciclista: se considerará una masa promedio de 75 kg para un adulto, y su distribución será de un 60% sobre el sillín (45 kg) y un 40% sobre el manillar (30 kg), aplicados como masas puntuales sobre los cuerpos.
- Movimiento del modelo: se impondrá la función de movimiento como una variación progresiva de la velocidad de rotación de los pedales, siendo nula entre 0 y 0.5 segundos y de 360 grados/s a los 7 segundos de la simulación, con un aumento progresivo entre el intervalo de 0.5 a 7 segundos.
- Pares establecidos: se considerarán pares de rotación para ambas ruedas, pedales y horquilla, todos ellos en relación al manillar. En cuanto al sillín, se establecerá un par fijo.
- Contacto del modelo y el suelo: se creará un contacto con fricción de Coulomb entre las ruedas y el suelo.
- Fijación del suelo: el suelo se anclará a la barra fija con un par de rotación fijo. Su masa será calculada tras crear los contactos con las ruedas.

Presupuesto del proyecto

3

1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Tras la realización completa del proyecto, es necesario establecer un presupuesto definido por el proyectista, atendiendo a las condiciones del propio proyecto y a las condiciones legales que se puedan imponer. Se desglosará el presupuesto en varios apartados que se detallarán a continuación, para finalmente concluir con el coste final del proyecto, incluyendo todos los apartados anteriores. Destacar que en los costes no se incluye el impuesto de valor añadido (IVA) hasta el último de los apartados.

1.1. Mano de obra

Para calcular el presupuesto de la mano de obra del ingeniero, debe tenerse en cuenta el salario de un graduado en ingeniería mecánica establecido por el BOE, en concreto, para el Convenio de Oficinas y Despachos de la provincia de Valencia en el año 2018. Según la tabla salarial del convenio, el salario para un Titulado Medio o Diplomado (Grupo II, Nivel II) es de 1.408,82 €/mes. Además, teniendo en cuenta que el cómputo del convenio es de 1.767 horas anuales de trabajo efectivo, el coste por hora será:

$$\text{Coste por hora} = \frac{1.408,82 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot 12 \text{ meses}}{1.767 \text{ horas}} = 9,57 \text{ €/hora}$$

ECUACIÓN 10: 'COSTE POR HORA TRABAJADA SEGÚN EL BOE'

También hay que tener en cuenta los pagos a la Seguridad Social por la labor del proyectista. Consultando la web de la Seguridad Social, se establece una base de cotización mínima para el grupo 2 de 994,20 €/mes. Calculando de manera análoga al punto anterior, el coste por hora de la Seguridad Social es de:

$$\text{Coste Seguridad Social} = \frac{994,20 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot 12 \text{ meses}}{1.767 \text{ horas}} = 6,75 \text{ €/hora}$$

ECUACIÓN 11: 'COSTE DE LA SEGURIDAD SOCIAL'

Por último, el BOE añade que se establecen dos pagas extra anuales para el Convenio de Oficinas y Despachos. Por lo tanto, cada una de esas pagas será de 1.408,82 €, lo que se traduce en un coste por hora de:

$$\text{Coste pagas extra} = \frac{1.408,82 \frac{\text{€}}{\text{paga}} \cdot 2 \text{ pagas}}{1.767 \text{ horas}} = 1,59 \text{ €/hora}$$

ECUACIÓN 12: 'COSTE PAGAS EXTRA'

Por lo tanto, el coste de la mano de obra directa será:

Concepto	Cantidad	Unidades	Precio unidad (€)	Importe neto (€)
Realización del proyecto	300	h	9,57	2.871,00
Seguridad Social	300	h	6,75	2.025,00
Pagas extra	300	h	1,59	477,00
Total	-	-	-	5.373,00

TABLA 11: 'PRESUPUESTO MANO DE OBRA DIRECTA'

Como en el proyecto solo ha participado el ingeniero, no existen costes por mano de obra indirecta, por lo que el coste total de la mano de obra es el establecido en la tabla anterior.

1.2. Gastos generales y derivados

En la parte de gastos generales y derivados se incluyen aquellos gastos que no vengan directamente de la mano de obra ni de la amortización. Por lo tanto, incluye gastos de mantenimiento (luz consumida por los equipos, agua, etc.) y gastos de consumibles, que en este caso son simplemente material de oficina. Los gastos de mantenimiento pueden calcularse como una parte porcentual de la mano de obra del proyecto, que puede establecerse como un 2% de la misma. En cuanto a los consumibles, se tendrá en cuenta el precio establecido por el comerciante que venda cada uno de ellos.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estas aclaraciones, los gastos generales del proyecto quedan de la siguiente manera:

Concepto	Cantidad	Unidades	Precio unidad (€)	Importe neto (€)
Impresión en color y encuadernado	1	documento	23,14	23,14
DVD	1	disco	2,07	2,07
Luz, agua y derivados	2	% de mano de obra	53,73	107,46
Total	-	-	-	132,67

TABLA 12: 'PRESUPUESTO GASTOS GENERALES'

1.3. Software, hardware y amortizaciones

Para la realización de este proyecto se han utilizado dos programas diferentes: MSC Adams View 2017.2 (versión estudiante) para el desarrollo completo del proyecto y MSC Adams View 2018 (versión completa) para su posterior análisis, y SolidWorks 2018, utilizado para elaborar los planos. Consultando las páginas web de ambos programas, se puede encontrar el precio de una licencia:

- MSC Adams View 2017.2 (estudiante): 0,00 €
- MSC Adams View 2018 (completo): 1.652,89 € (IVA no inc.) (1 año vida útil)
- SolidWorks 2018: 5.454,54 € + 1.239,69 €/año (IVA no inc.) (3 años vida útil)

Considerando la vida útil del software antes de quedar desfasado, y teniendo en cuenta las horas de utilización durante este proyecto, se calcula la parte proporcional de la amortización de ambos programas. A pesar de que el proyecto ha costado unas 300 horas de realizar, Adams en versión completa se ha utilizado durante 50 horas (2,08 días), mientras que SolidWorks se ha utilizado durante 30 horas (1,25 días). Como la versión estudiante de Adams no tiene coste, no se calcula. Así:

$$Amort. Adams = \frac{1.652,89 \text{ €}}{1 \text{ años} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot \frac{2,08 \text{ días}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} = 9,55 \text{ €}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Amort. SolidWorks} &= \frac{5.454,54 \text{ €}}{3 \text{ años} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot \frac{1,25 \text{ días}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} + \frac{1.239,69 \text{ €}}{1 \text{ año} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot \frac{1,25 \text{ días}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} \\
 &= 10,62 \text{ €}
 \end{aligned}$$

ECUACIÓN 13: CÁLCULO AMORTIZACIÓN SOFTWARE'

Por lo tanto, la tabla de costes del software será:

Concepto	Cantidad	Unidades	Precio unidad (€)	Importe neto (€)
Amortización MSC Adams View 2017.2 (estudiante)	0,00	días	0,00	0,00
Amortización MSC Adams View 2018 (completo)	2,08	días	4,59	9,55
Amortización SolidWorks 2018	1,25	días	8,50	10,62
Total	-	-	-	20,17

TABLA 13: 'AMORTIZACIÓN DEL SOFTWARE'

Por otro lado, el equipo personal utilizado para la realización del proyecto incluye el paquete de Microsoft Office con todos los programas de ofimática utilizados, así como el sistema operativo Windows. Considerando que el equipo costó 550,41 € (IVA no inc.) y que la vida útil del hardware es de 5 años, y teniendo en cuenta que se ha utilizado durante 220 horas (9,17 días):

$$\text{Amort. equipo personal} = \frac{550,41 \text{ €}}{5 \text{ años} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot \frac{9,17 \text{ días}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} = 2,80 \text{ €}$$

ECUACIÓN 14: 'CÁLCULO AMORTIZACIÓN EQUIPO PERSONAL'

Por otra parte, el equipo utilizado en la ETSID tiene un coste de 748,07 € y se ha utilizado durante 80 horas (3,33 días):

$$\text{Amort. equipo ETSID} = \frac{748,07 \text{ €}}{5 \text{ años} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}} \cdot \frac{3,33 \text{ días}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} = 1,38 \text{ €}$$

ECUACIÓN 15: 'CÁLCULO AMORTIZACIÓN EQUIPO ETSID'

Por lo tanto, en resumen:

Concepto	Cantidad	Unidades	Precio unidad (€)	Importe neto (€)
Amortización ordenador Asus K55VM	9,17	días	0,306	2,80
Amortización ordenador HP ProDesk 490 G3 MT	3,33	días	0,414	1,38
Total	-	-	-	4,18

TABLA 14: 'AMORTIZACIÓN HARDWARE'

1.4. Resumen de costes totales

Teniendo en cuenta todos los gastos desglosados en los apéndices anteriores, ya se puede proceder a calcular el presupuesto total del proyecto.

Es importante tener en cuenta que ahora debe aplicarse el 21% de IVA, ya que todos los precios comentados anteriormente excluían los impuestos. Por lo tanto, tras hacer el desglose de costes, el presupuesto total del proyecto emitido por el proyectista ascenderá a:

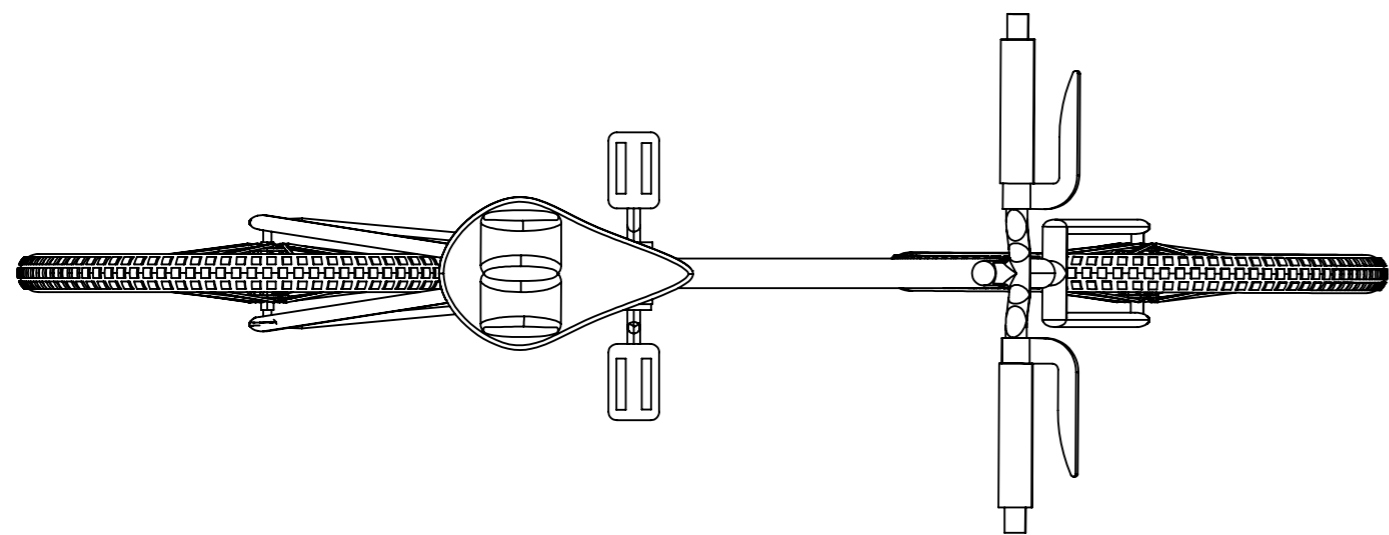
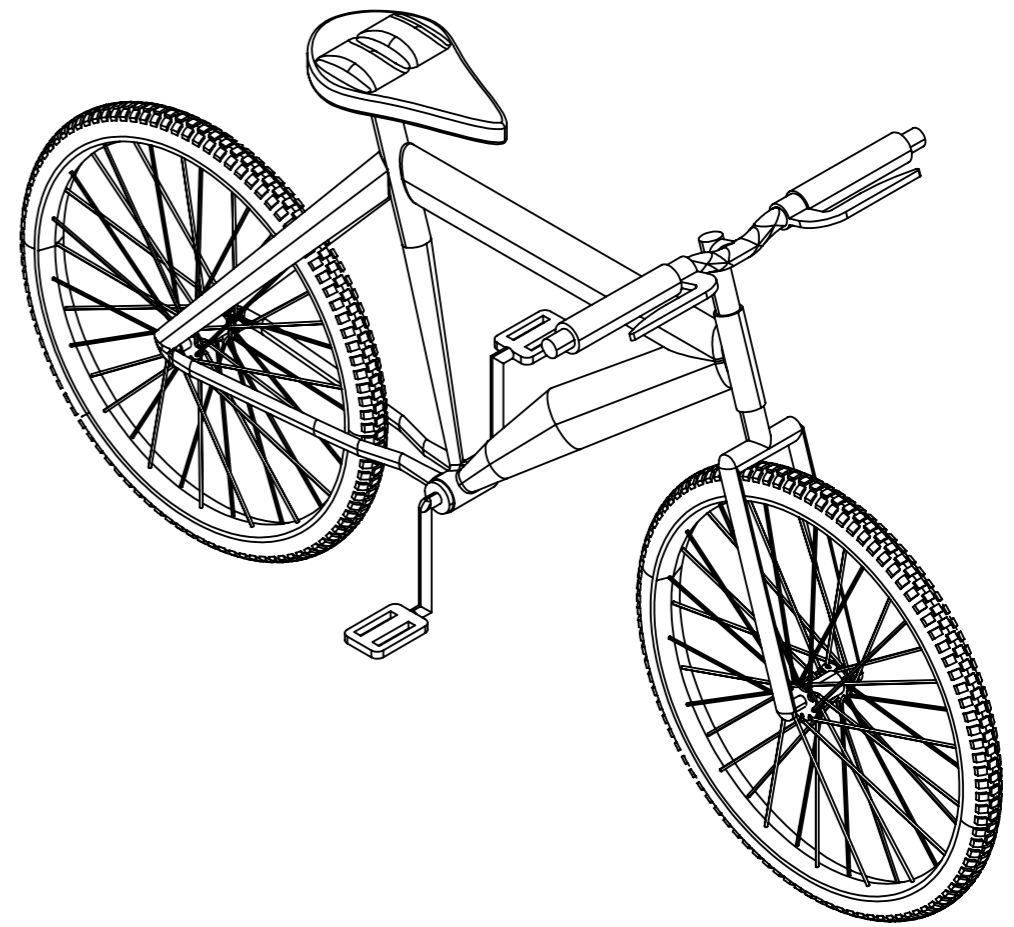
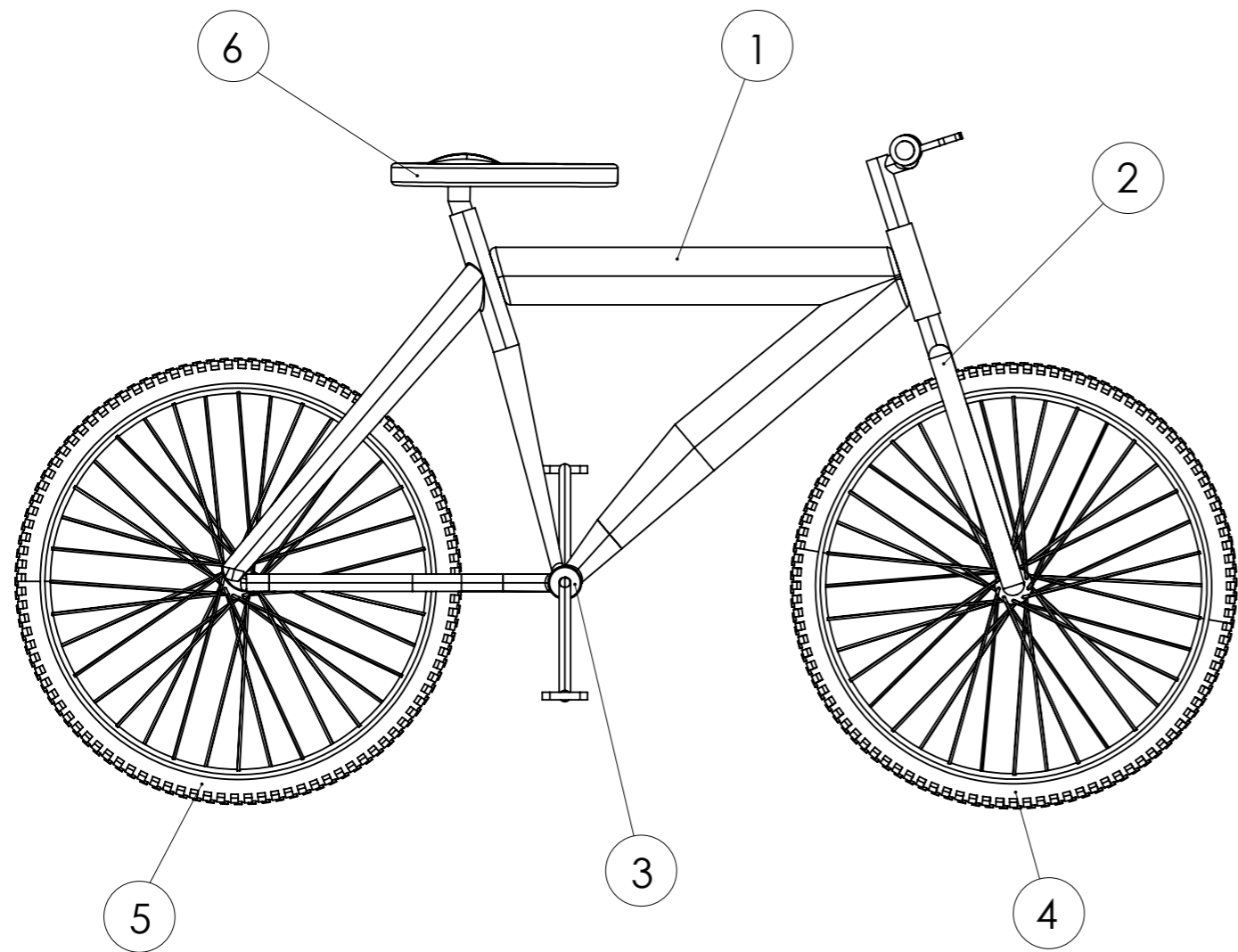
Concepto	Coste total (€)
Mano de obra	5.373,00
Gastos generales	132,67
Amortización software	20,17
Amortización hardware	4,18
<i>Subtotal</i>	5.530,02
<i>Impuestos (IVA 21%)</i>	1.161,30
Total	6.691,32 €

TABLA 15: 'RESUMEN PRESUPUESTO TOTAL'

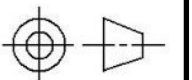
El coste total del proyecto asciende a seis mil seiscientos noventa y un euros con treinta y dos céntimos.

Planos

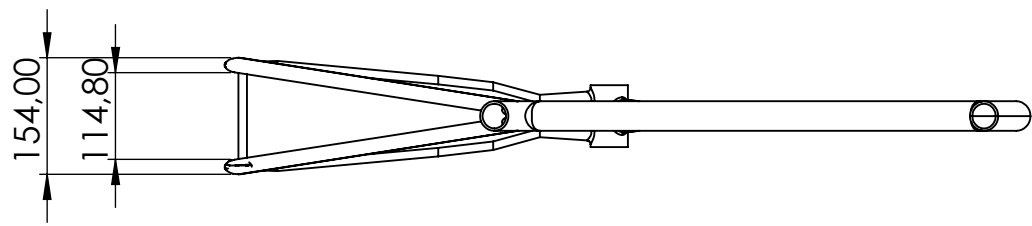
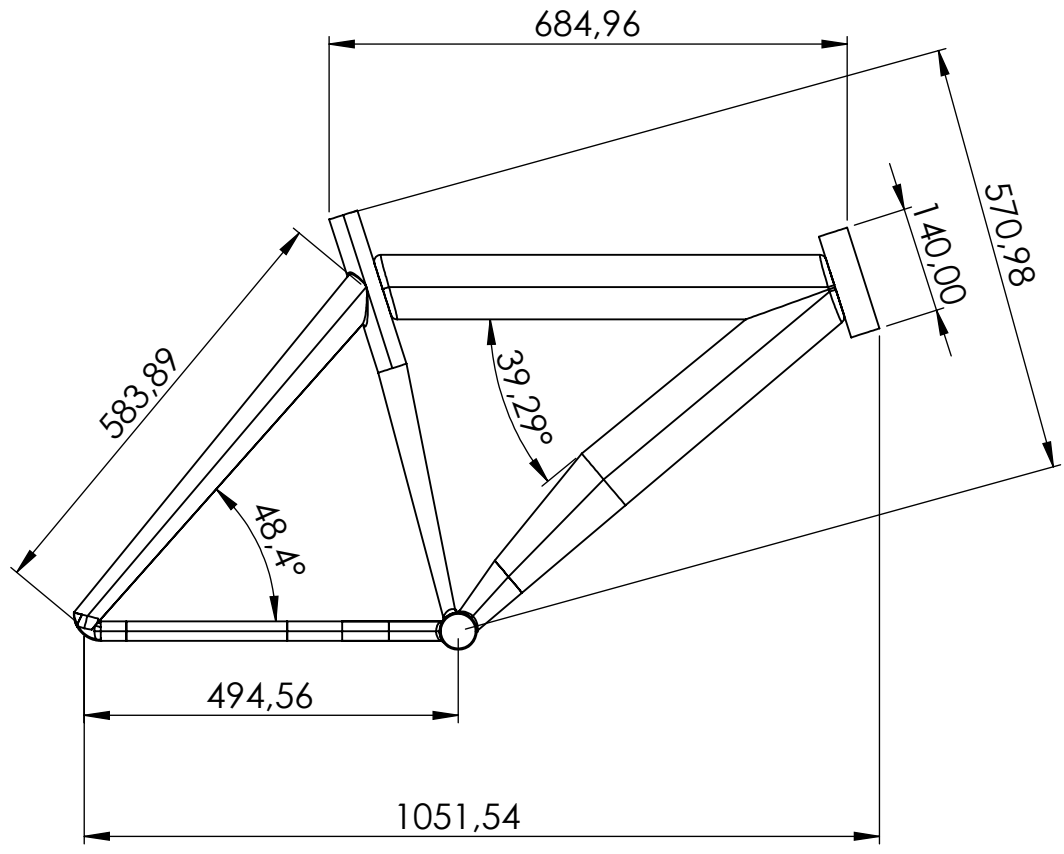
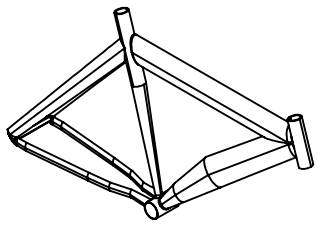
4



6	Sillín	1	1.6.	Caucho
5	Rueda trasera	1	1.5.	Caucho y aluminio
4	Rueda delantera	1	1.4.	Caucho y aluminio
3	Pedales	1	1.3.	Acero
2	Horquilla y manillar	1	1.2.	Aluminio
1	Cuadro	1	1.1.	Aluminio
Marca	Descripción	Nº de piezas	Nº de plano	Material
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA 	Proyecto: MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO	Escala: 1:10		Número: 1.01.
	Plano: CONJUNTO	Fecha: 20/08/2018	Nombre: Darío Ramos	
		Dibujado:		
		Compr.:		



4 3 2



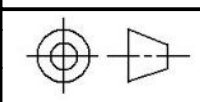
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

Escala: 1:10

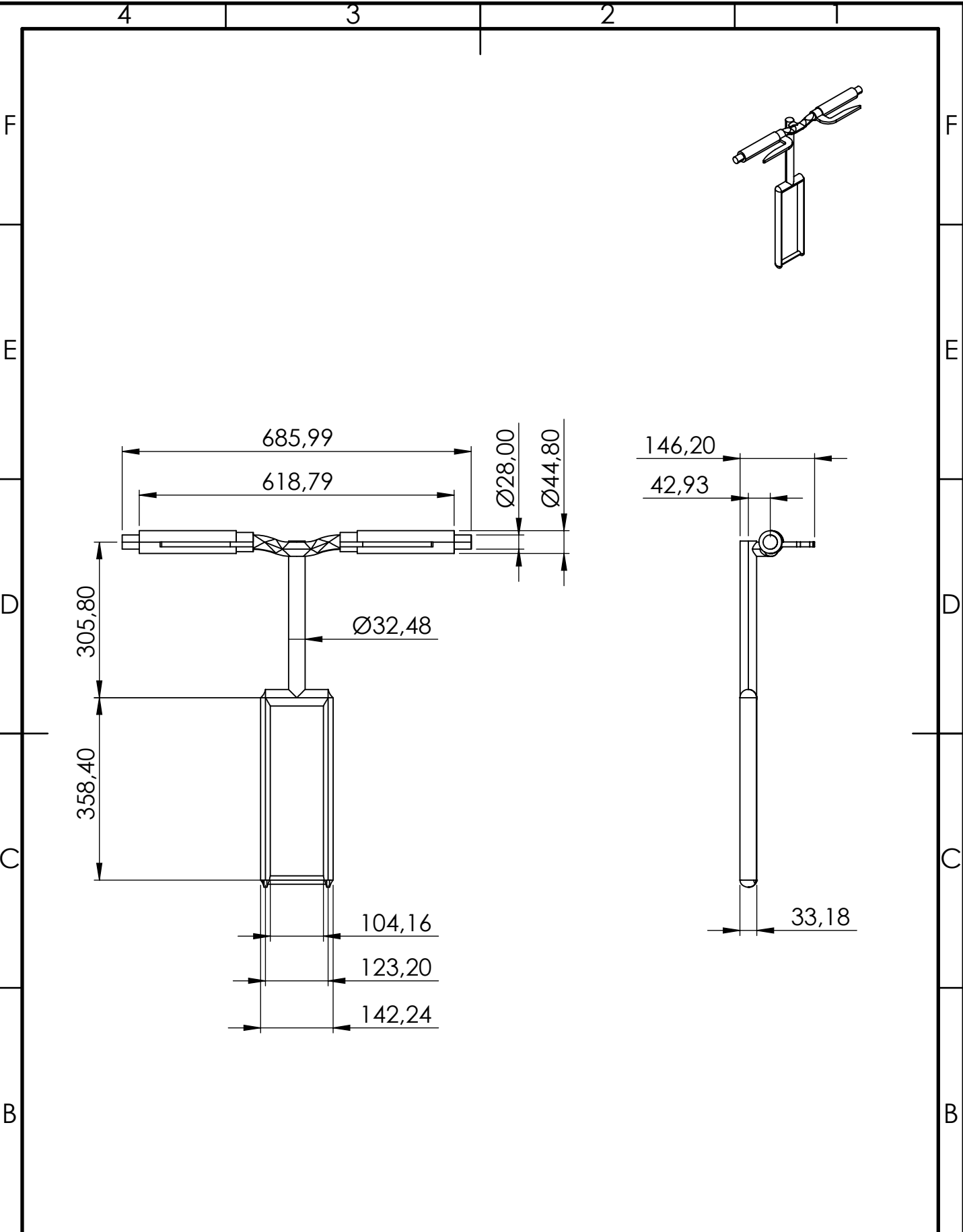
Número: 1.1.

Plano: **CUADRO**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Darío Ramos	
Compr.			



4 3 2 1



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escala Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

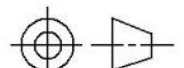
Proyecto: MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE
UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU
SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

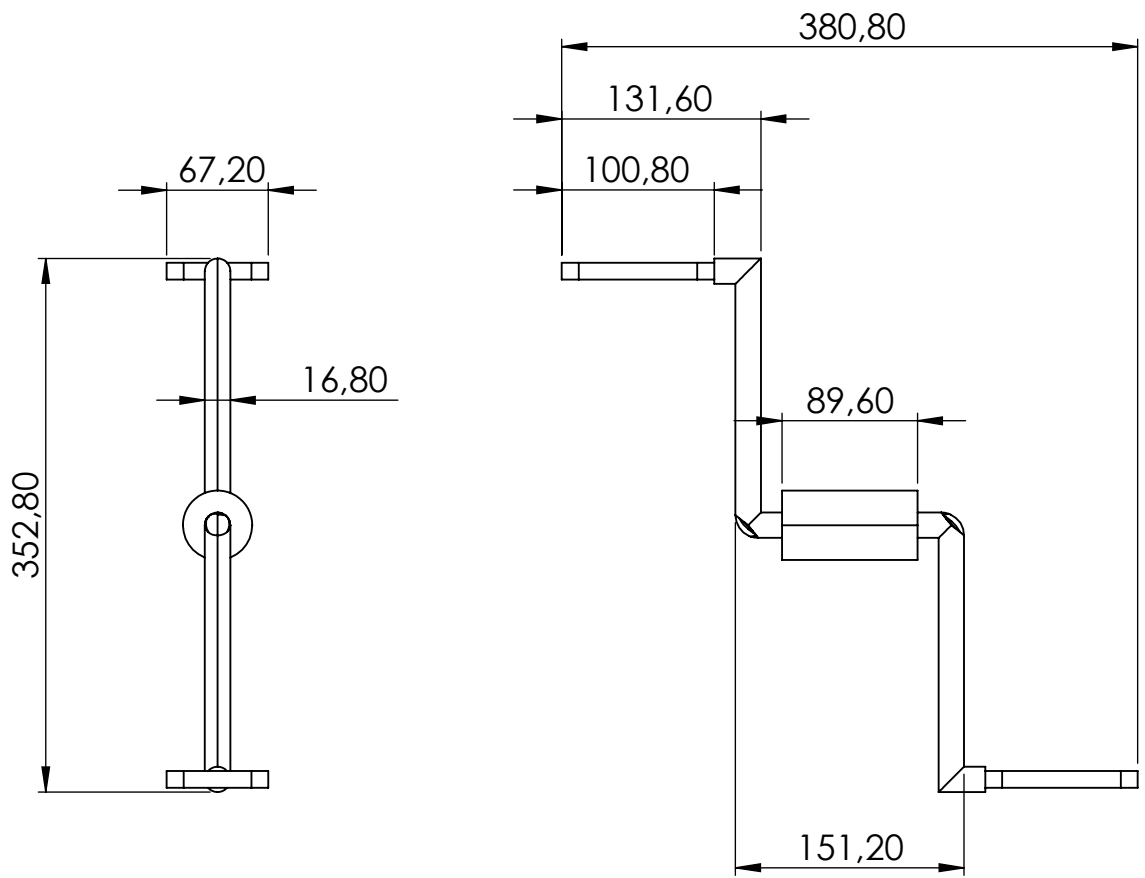
Escala: 1:10

Número:
1.2.

Plano:
HORQUILLA Y
MANILLAR

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

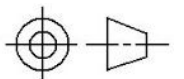
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

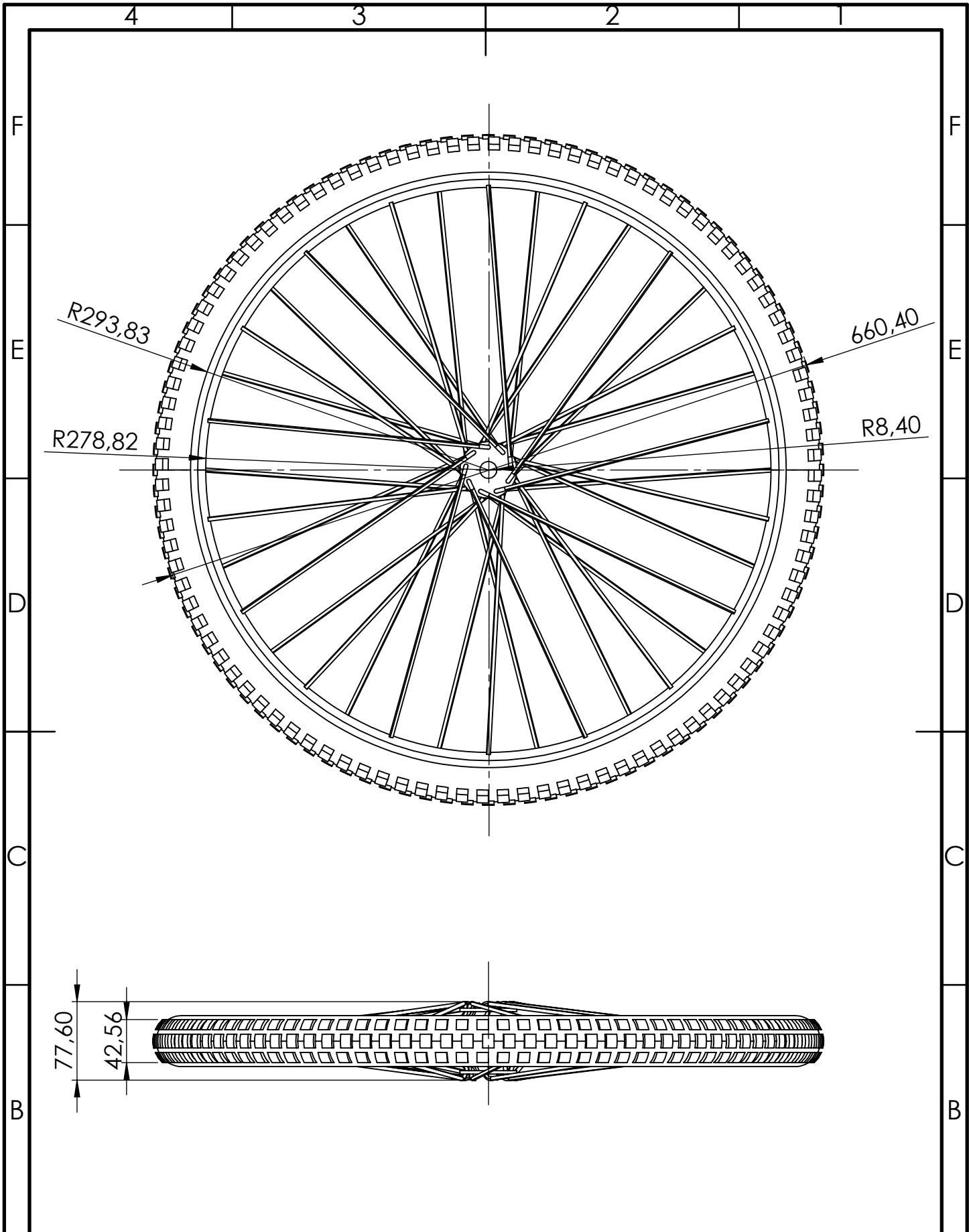
Escala: 1:5

Número: 1.3.

Plano: **PEDALES**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			





UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

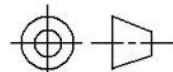
Escala: 1:5

Número:

1.4.

Plano: **RUEDA DELANTERA**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			

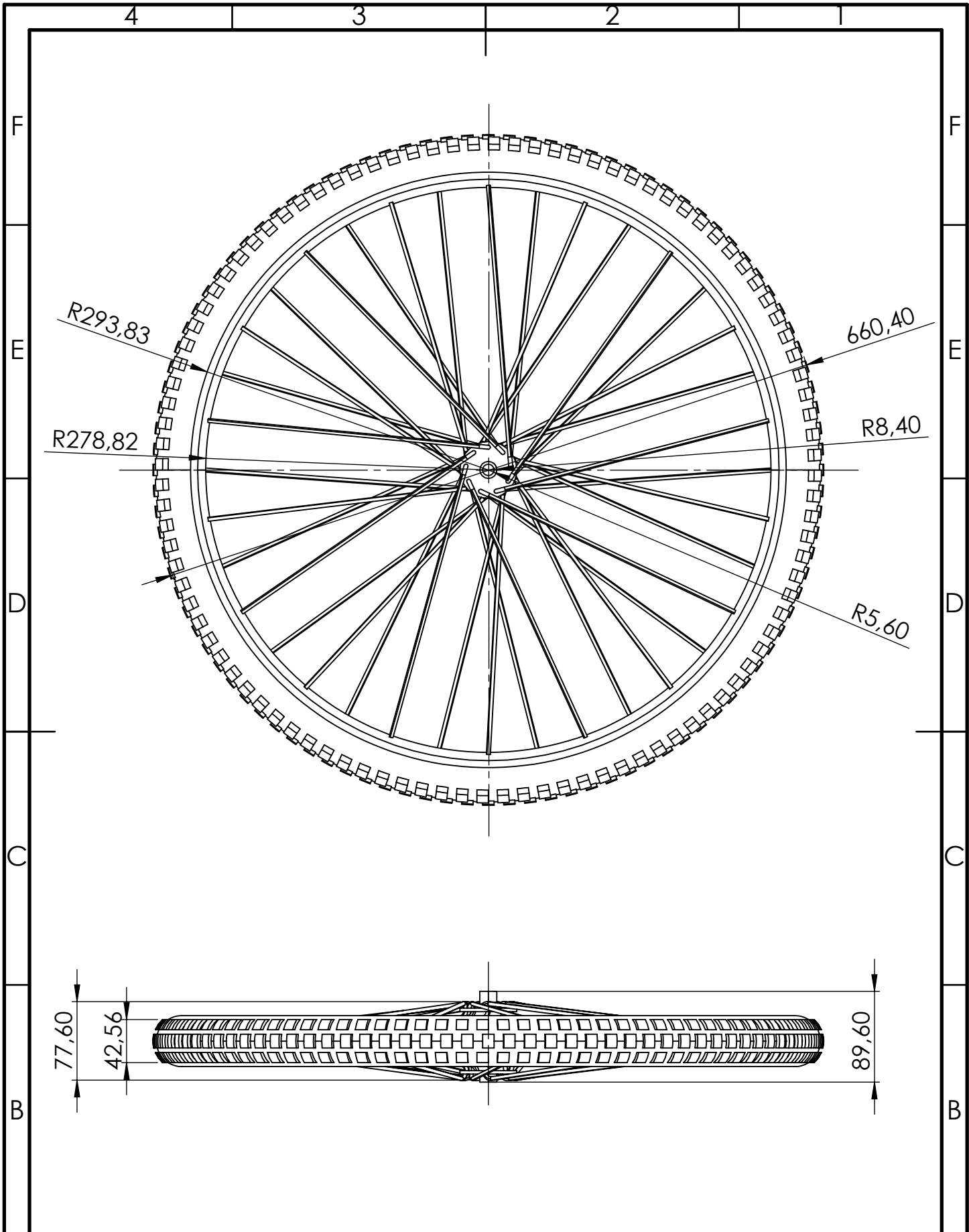


4

3

2

1



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

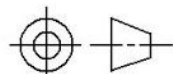
Escala: 1:5

Número:

1.5.

Plano: **RUEDA TRASERA**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Darío Ramos	
Compr.			



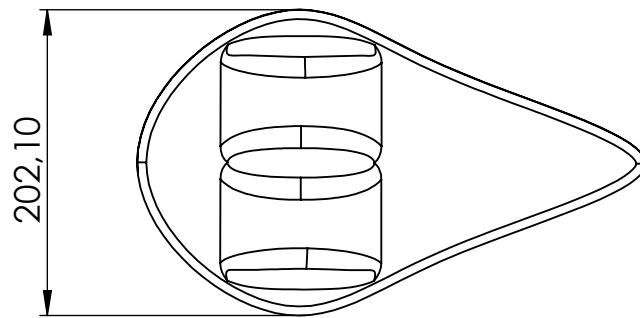
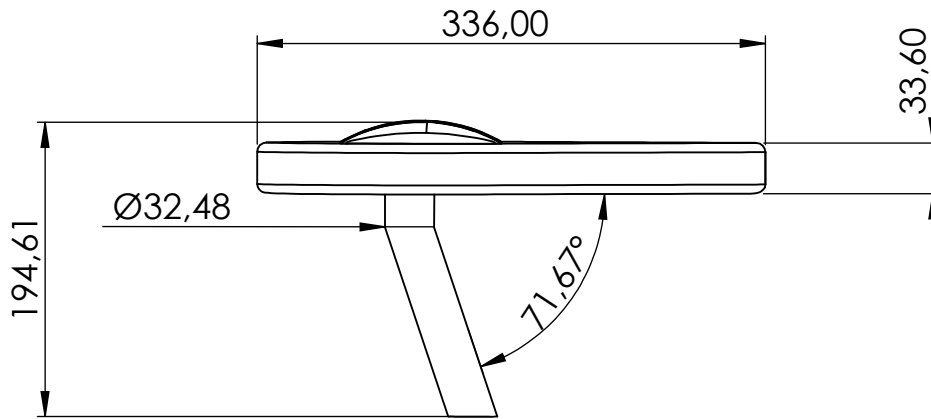
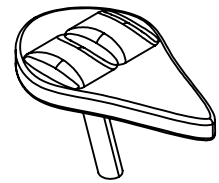
4

3

2

1

A



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria del Disseny

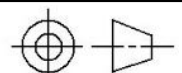
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

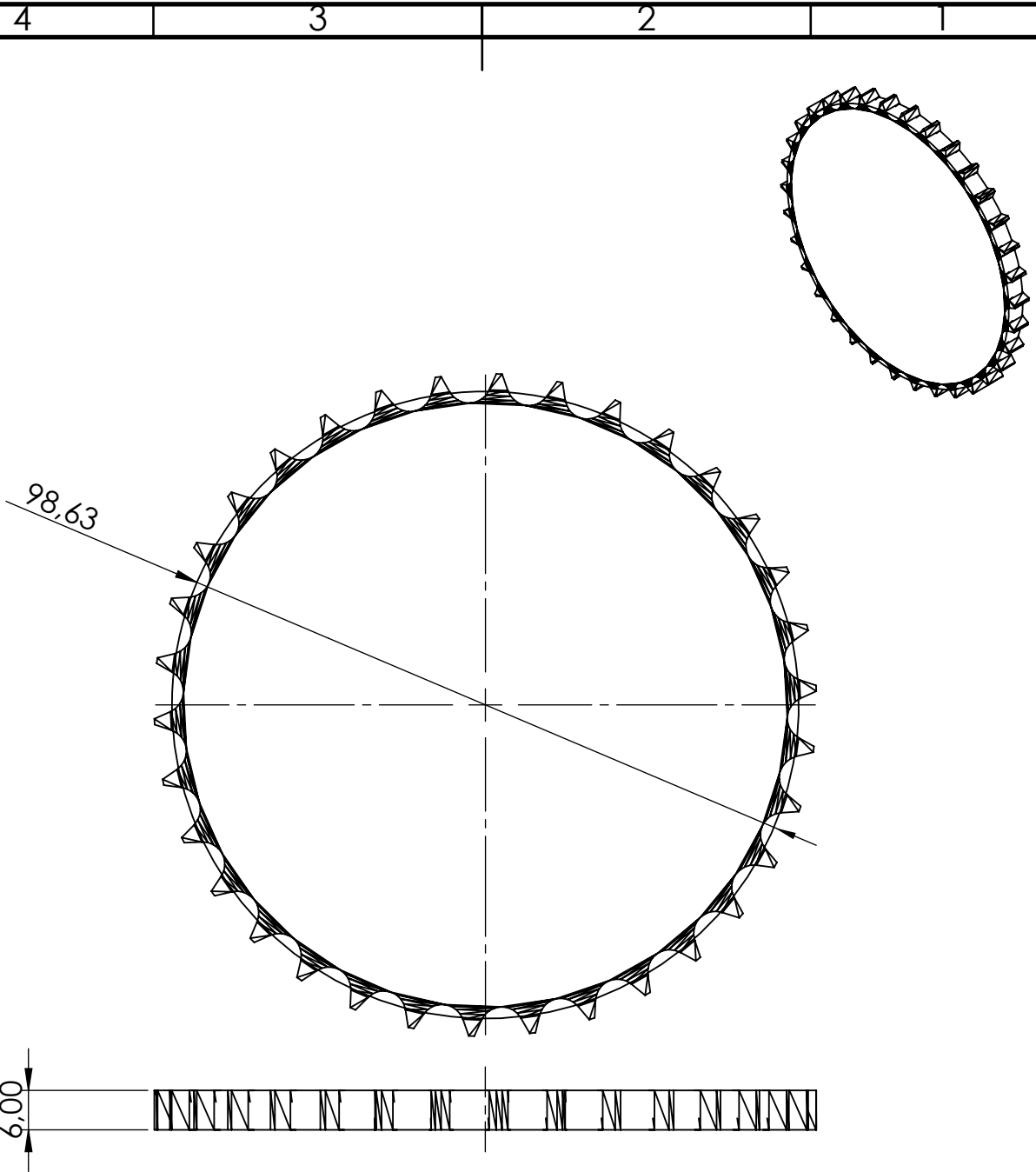
Escala: 1:5

Número: 1.6.

Plano: **SILLÍN**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			





Material	Acero
Radio del diente	48,78
Diámetro de pie	92,13
Diámetro exterior	100,79
Diámetro primitivo	98,63
Módulo	2,81
Número de dientes	34
Datos de la rueda dentada	



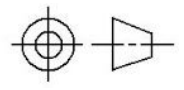
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

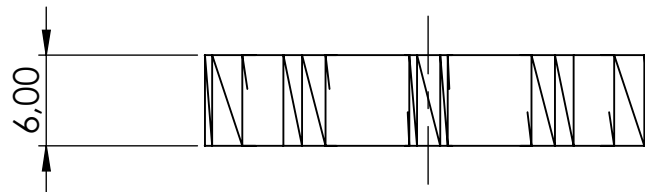
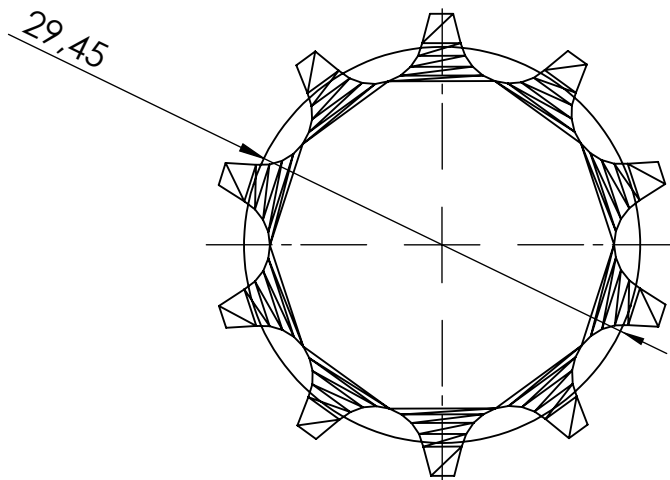
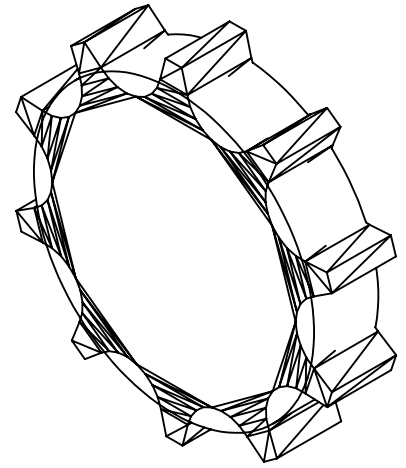
Escala: 1:1

Plano: **PLATO DE 34 DIENTES**

Número: 2.1.

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Darío Ramos	
Compr.			





Material	Acero
Radio del diente	11,96
Diámetro de pie	22,95
Diámetro exterior	30,59
Diámetro primitivo	29,45
Módulo	2,95
Número de dientes	10
Datos de la rueda dentada	



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

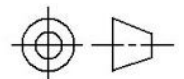
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

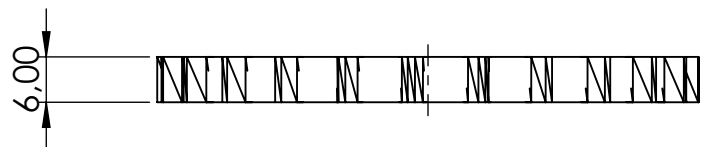
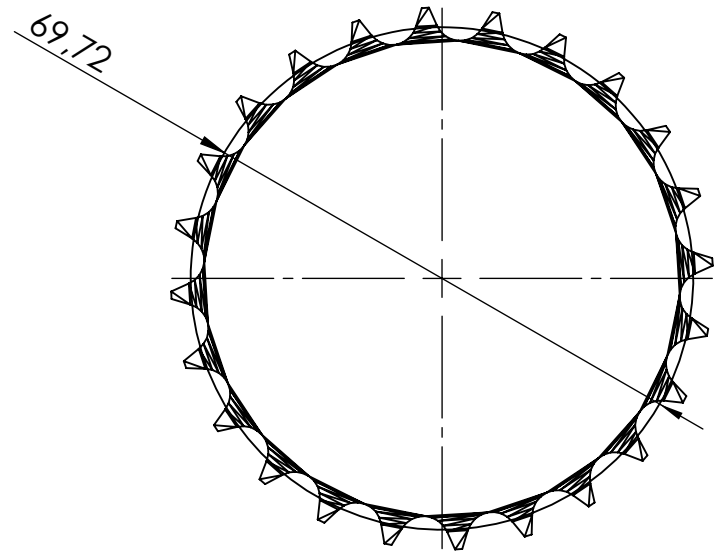
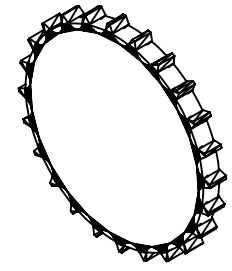
Escala: 2:1

Plano: **PIÑÓN DE 10 DIENTES**

Número: 2.2.

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			





Material	Acero
Radio del diente	29,80
Diámetro de pie	63,22
Diámetro exterior	71,71
Diámetro primitivo	69,72
Módulo	2,91
Número de dientes	24
Datos de la rueda dentada	



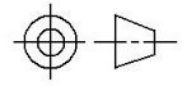
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

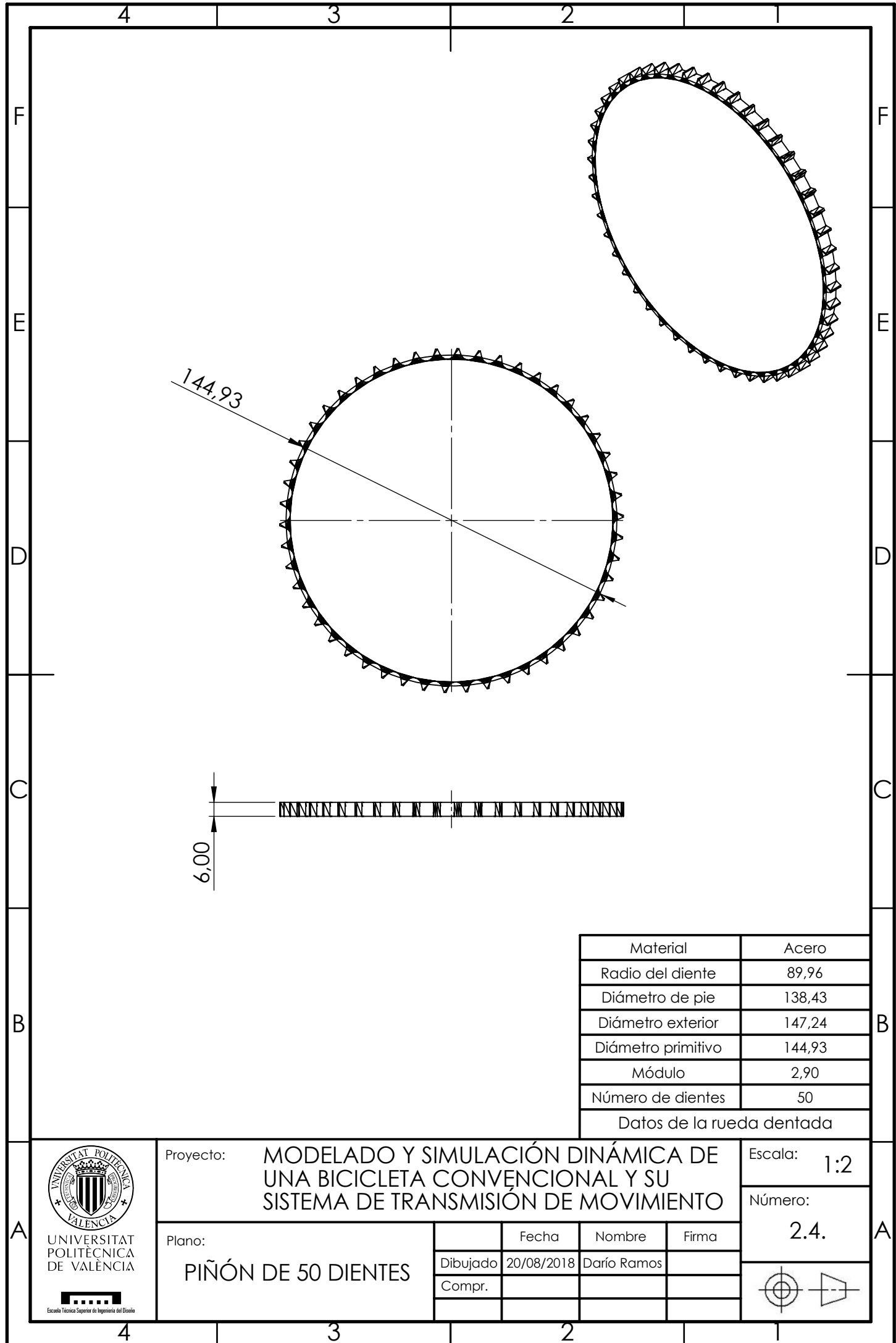
Escala: 1:1

Plano: **PIÑÓN DE 24 DIENTES**

Número: 2.3.

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Daño Ramos	
Compr.			





144,93

6,00

Material	Acero
Radio del diente	89,96
Diámetro de pie	138,43
Diámetro exterior	147,24
Diámetro primitivo	144,93
Módulo	2,90
Número de dientes	50
Datos de la rueda dentada	



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



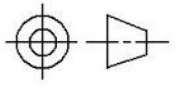
Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

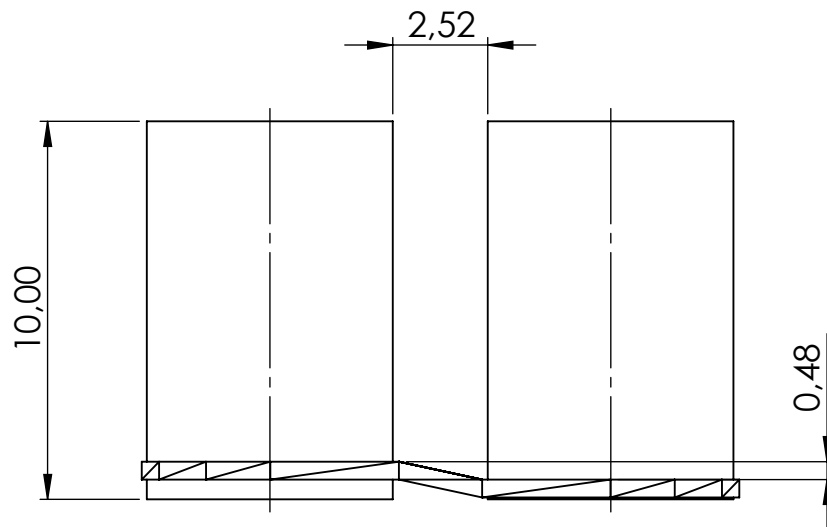
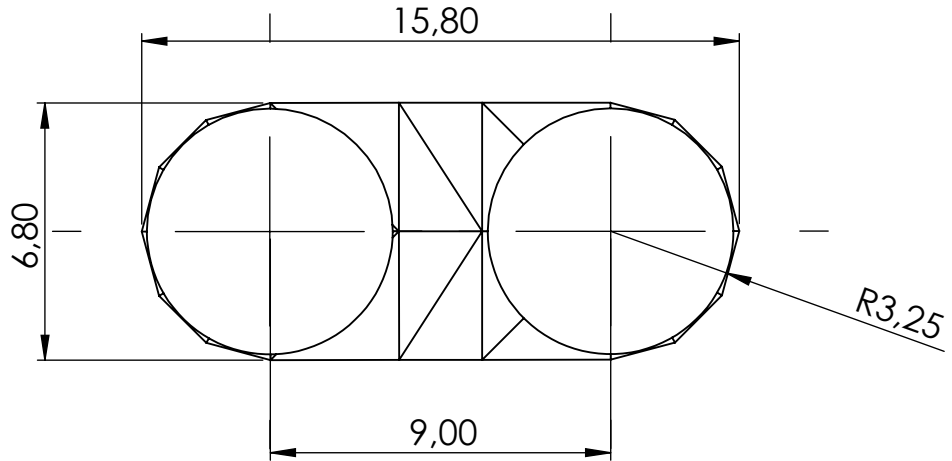
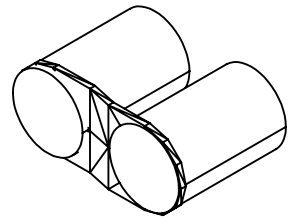
Escala: 1:2

Plano: **PIÑÓN DE 50 DIENTES**

Número: 2.4.

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Darío Ramos	
Compr.			





	34 - 50	150
	34 - 24	137
Acero	34 - 10	130
Material	Desarrollo	Nº eslabones



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



Proyecto: **MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA BICICLETA CONVENCIONAL Y SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO**

Escala: **5:1**

Número: **2.5.**

Plano: **ESLABÓN DE LA CADENA**

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	20/08/2018	Darío Ramos	
Compr.			

