UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL EN MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

Modelado y simulación dinámica de bicicletas de montaña

ALUMNO: Daniel Estévez Fernández
DIRECTORES: D. Javier López Martínez
Dr. D. Alejandro López Martínez

Almería, Marzo de 2012.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTERÉS Y OBJETIVOS
CAPÍTULO 1: Motivación y objetivos 1

1.1 Motivación 2
1.2 Objetivos 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA
CAPÍTULO 2: Introducción a la bicicleta de montaña de doble suspensión 4

2.1 Introducción histórica a la bicicleta de montaña 5
2.2 Componentes de una bicicleta de montaña de doble suspensión 9
2.2.1 Componentes de la bicicleta 9
2.2.2 Componentes del cuadro 13
2.3 Geometría del cuadro de una bicicleta de montaña de doble suspensión 14
2.4 Tipos de bicicleta de montaña según su funcionalidad 17

CAPÍTULO 3: Sistemas de suspensión trasera de una bicicleta 22

3.1 Funcionamiento de las suspensiones 23
3.2 Tipos de suspensiones traseras 24
3.2.1 Punto de Pivote Virtual 24
3.2.2 Monopivote 26
3.2.3 Monopivote articulado 28
3.2.4 Horst Link 29
3.2.5 Amortiguador flotante 30
3.2.6 Active Bracking Pivot (ABP) 32
3.3 Conceptos de una suspensión trasera 33
3.3.1 Pedal Kick Back y Pedal Kick Forward 33
3.3.2 Respuesta cinemática 34
3.3.3 Compresión por frenado (Brake Dive) 35
3.3.4 Interacción con la pedalada 36
3.3.5 Curva de progresividad 37
3.3.6 Ratio de acción 37
3.3.7 Variación del centro de masa 37
3.3.8 Efectos anti-dive y anti-squat 38
3.4 El diagrama de Bode 38

MATERIAL Y MÉTODOS

CAPÍTULO 4: Modelado en SolidWorks 2012 41

4.1 Introducción 42
4.2 Modelado de las bicicletas de doble suspensión 42
4.2.1 Monopivote articulado 45
4.2.2 Horst link 49
4.2.3 Active Bracking Pivot (ABP) 51
4.3 Modelado del ciclista 52
4.3.1 Modelado de las partes del ciclista 52
4.3.2 Ensamblaje de las partes del ciclista 55

CAPÍTULO 5: Simulación en SimMechanics 2011 59

5.1 Introducción 60
5.2 Conexión SolidWorks 2012 – SimMechanics 61
5.3 Configuración de los modelos exportados 61
5.3.1 Configuración de parámetros de los bloques 66
5.3.2 Configuración del subsistema cuerpo del ciclista 66

CAPÍTULO 6: Modelado en SimMechanics 2011 70

6.1 Modelado del perfil de la carretera 71
6.1.1 Subsistema desplazamiento perfil neumático delantero 71
6.1.2 Subsistema fuerza carretera 73
6.1.3 Subsistema desplazamiento perfil neumático trasero 75
6.1.4 Subsistema superficie carretera 76
6.2 Modelado del subsistema desplazamiento de la suspensión delantera 77
6.3 Modelado del subsistema desplazamiento de la suspensión trasera 80
6.4 Modelado del subsistema variación de longitud de la cadena 82
6.5 Modelado del bloqueo de suspensiones de la bicicleta (bicicleta rígida) 85
6.6 Visualización de la simulación 86
6.7 Modelos finales 88
6.8 Modelado para el cálculo del ratio de acción 93

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 7: Análisis dinámico y cinemáttico de los distintos tipos de bicicleta 97

7.1 Análisis dinámico en SimMechanics 98
7.2 Variación del centro de gravedad del ciclista 99
7.3 Variación de la longitud de la cadena 103
7.4 Desplazamiento de la suspensión trasera 104
7.5 Desplazamiento de la suspensión delantera 105

7.6 Desplazamiento del centro de la rueda trasera 106
7.7 Diagrama de bode 107
7.8 Análisis cinemático en SimMechanics 112
7.8.1 Ratio de acción 112
7.8.2 Extensión de la cadena 113

CONCLUSIONES
CAPÍTULO 8: Conclusiones y desarrollos futuros 115

8.1 Conclusiones 116
8.2 Valoración final del interés del trabajo 117
8.3 Desarrollos futuros 118

BIBLIOGRAFÍA 119

ANEXO: Archivos M-File de Matlab 121

CAPÍTULO 1

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

La principal motivación de las personas para la elección de la bicicleta como medio de transporte es su bajo coste, su efecto favorable sobre la salud y sostenibilidad ambiental. Además, la bicicleta es un modo de transporte eficiente que evita problemas de tráfico y permite el transporte puerta a puerta con menos problemas de aparcamiento. Pero la bicicleta de montaña va más allá y en ella se busca también un hobby en el que desconectar en la naturaleza. En ella se presentan terrenos sinuosos, desniveles, saltos, baches, etc. que implican que cada vez se innove más en los sistemas de suspensiones de bicicleta tanto para la comodidad del ciclista que lo tiene como hobby, como para los que se lo toman como competición y así poder mejorar su rendimiento en los descensos. También se busca mejorar la seguridad del ciclista.

En el mercado se encuentran distintas marcas y tipos suspensiones, cada una con sus ventajas e inconvenientes y siempre se busca la suspensión que satisfaga mejor las necesidades del consumidor. Por ello, este proyecto se dedicará a modelar y simular la dinámica de distintos tipos suspensiones de bicicleta de montaña, a causa de un perfil de carretera accidentado, para obtener conclusiones del efecto que causan en el ciclista. Con esto se analizaran las ventajas e inconvenientes de cada tipo de suspensión trasera y así poder ver más fácilmente el tipo de bicicleta que se adapta mejor a las necesidades del usuario.

1.2 Objetivos

El objetivo principal que se pretende conseguir con este Proyecto Fin de Carrera es el estudio del comportamiento de la suspensión trasera de una bicicleta. Para ello, se van a utilizar distintos modelos de bicicleta de doble suspensión y simular el comportamiento de las suspensiones ante excitaciones externas. Esto es, ante los distintos terrenos que puede afrontar una bicicleta (llano, relieve, saltos, etc.). A su vez, se usarán distintos tipos de suspensión trasera para comparar los resultados obtenidos del comportamiento de cada tipo, determinándose así la adecuación de su utilización en el estudio del grado de confort para el ciclista.

Los objetivos que desea cumplir este trabajo son:

1. Modelado de las bicicletas con doble suspensión y del ciclista.

2. Creación de un modelo de perfil de carretera para poder simular el comportamiento de las suspensiones.

3. Simulación de la dinámica de los tipos de bicicleta de doble suspensión y de bicicleta rígida, para los distintos tipos de terrenos mediante el subsistema perfil de carretera.

4. Evaluación de los resultados obtenidos, para así poder tener las ventajas e inconvenientes de cada tipo de suspensión trasera y de la rígida.

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN A LA BICICLETA DE MONTAÑA DE DOBLE SUSPENSIÓN

2.1 Introducción histórica a la bicicleta de montaña

Sobre el año 1930 en U.S.A, que entonces estaba a punto de entrar en guerra, se inventó la llanta ancha para las bicicletas (26 X 2.125 pulgadas) y esto trajo consigo muchas posibilidades de utilizar la bicicleta todo terreno. En el año 1933 Ignaz Schwinn construyó, en Estados Unidos, una bicicleta de gran robustez, la Schwinn Excelsior, que muy pronto se hizo popular entre los repartidores de periódicos a domicilio.

Pero no fue hasta principios de la década de los 70 fue cuando inició la moda de utilizar la bicicleta en caminos de tierra. Surgieron entonces varios grupos de ciclistas que practicaban esta nueva modalidad entre ellos los llamados "The Canyon Gang", lo que traducido sería, la Pandilla del Cañón, representados por John York, Tom Slifka, Robert y Kim Kraft, que se dedicaban a realizar carreras montaña abajo en el estado de California, pero las bicicletas que utilizaban eran de bicicross (con llanta muy delgada) que eran muy comunes encontrarlas en Europa en aquella época. Fue entonces que se les ocurrió a Joe Breeze, Charlie Kelly, Gary Fisher y Tom Ritchey el colocarle llantas anchas a sus viejas bicis de marca Schwinn Excelsiors (Figura 1) que pesaban por lo menos 18 kg y así obtuvieron más control y velocidad.

Figura 1. Schwinn Excelsiors

Hacia mediados de la década de los setenta, justamente cuando nacían

las primeras BMX (bicicletas para adolescentes, ideadas para practicar el cross), algunos aficionados crearon competiciones en descenso, sobre todo en el condado de Marin, al norte de San Francisco. Y fue entonces cuando se "redescubrieron" las viejas Schwinn Excelsior, que probaron su perfecta utilidad para las competiciones de este tipo.

Gary Fisher, uno de los pioneros del MTB, modificó su Schwinn, aplicándole los cambios de velocidad, para poder utilizarla también en subidas y no sólo en descensos.

Muy pronto, Joe Breeze compendió que el secreto de las viejas Schwinn no dependía del grosor de los tubos, sino de la geometría del cuadro. Estas consideraciones le impulsaron a construir bicicletas nuevas con bastidores de una geometría similar, pero equipadas con grupos más eficientes: había nacido la MTB.

En la historia de las MTB, además de Fisher y Breeze, ocupan lugares destacados los nombres de otros pioneros, como Charlie Cunningham y Tom Ritchey; Mike Sinyard y Tim Neenan, que crearon el Stumpjumper, uno de los modelos más famosos; y otros nombres como Murray y Ross, que saltaron a la fama gracias a las competiciones. Había comenzado la gran difusión de estas bicicletas en Estados Unidos, donde también reciben el nombre de "all terrain bikes" (ATB, que significa bicicletas todo terreno) o "fat tire bikes" (bicicletas de ruedas anchas).

Llegando el año de 1977 el todavía adolescente Breez montó diez cuadros de Cromoly utilizando los mismos principios de la geometría de sus bicis Schwinn Excelsior. Este nuevo tipo de cuadros de bicicleta inspiró a Fisher a conseguir uno igual y le pidió a Ritchey que le construyera para él. De ahí que estas nuevas bicicletas se les llamó Mountain Bike o Bicicleta de Montaña.

En 1974 Russ Mahon, Carter Cox y Bernie Mahon fueron los primeros ciclomontañistas en participar en una carrera con un desviador trasero (derailleurs) que fue inventado en 1958 por un italiano de nombre Campagñolo para las bicicletas de ruta, esto llamó mucho la atención al resto de los corredores y para 1975 todos los participantes de carreras ya contaban con uno. Esta bicicleta con los nuevos componentes pesaba poco más de 20 kg.

Ya moldeada la bicicleta de montaña como hoy en día la conocemos los precursores fundaron sus propias marcas que fueron vendidas al cabo de una década a los emporios industriales del ramo.

Después de inventada la bicicleta de montaña, tomo un nuevo aire cuando se introdujo comercialmente la primera suspensión delantera en 1987

por la compañía Trek y con la guerra de tecnología y comercialización se presentó en 1990 la primera bicicleta con doble suspensión de la misma marca con un peso similar a aquella de 1974.

A partir de 1985 el 60 % de las bicicletas vendidas en el mundo pertenecen a esta modalidad y de todas las bicicletas de montaña adquiridas, solo la mitad llegan a rodar por caminos y montaña, según las estadísticas.

En cuanto a los materiales utilizados en la fabricación, el acero prevaleció en bicicletas con peso por encima de los 15 kg. y no fue hasta 1986 cuando los primeros cuadros de aluminio fueron apareciendo con la marca Gary Fisher y de ahí su popularidad creció por costo y ligereza, ganando el mercado. Más adelante apareció en el año de 1991 bicicletas con cuadros hechos de titanio marca Yeti (Figura 2) que es un material utilizado para la aeronáutica pero su precio hasta hoy en día es muy elevado pero sin la menor duda este material es más resistente y ligero para la Bicicleta de Montaña que el aluminio. Actualmente están en auge los cuadros de carbono (Figura 3) debido a su ligereza y rigidez, aunque su mayor inconveniente es su elevado coste.

Figura 2. Bicicleta Yeti

En cuanto a componentes la marca Shimano desarrollo la tecnología para esta modalidad y superó a varios entre los que destaca la marca Campagñolo que inventó el sistema de tensor de la cadena.

Figura 3. Bicicleta carbono

Figura 4. Bicicleta de descenso

Pocas veces se ha visto que un producto evolucione tan rápido desde su creación como la Bicicleta de Montaña que en tan solo 20 años ganó popularidad mundial y se practica en más de 200 países.

Las suspensiones delanteras de las bicicletas han pasado de tener recorridos de entre tres y cinco centímetros, a tener entre quince y veinticinco. Los frenos son de disco (desde los antiguos cantilevers), se han cambiado

geometrías, materiales, y una larga lista que hacen la bici de un descendedor un parentesco a las motos de cross (MMX) actuales (Figura 4).

2.2 Componentes de una bicicleta de montaña de doble suspensión

En este apartado se ven las distintas partes y componentes que constituyen una bicicleta de doble suspensión, que ayudarán a entender mejor el funcionamiento de la bicicleta.

2.2.1 Componentes de la bicicleta

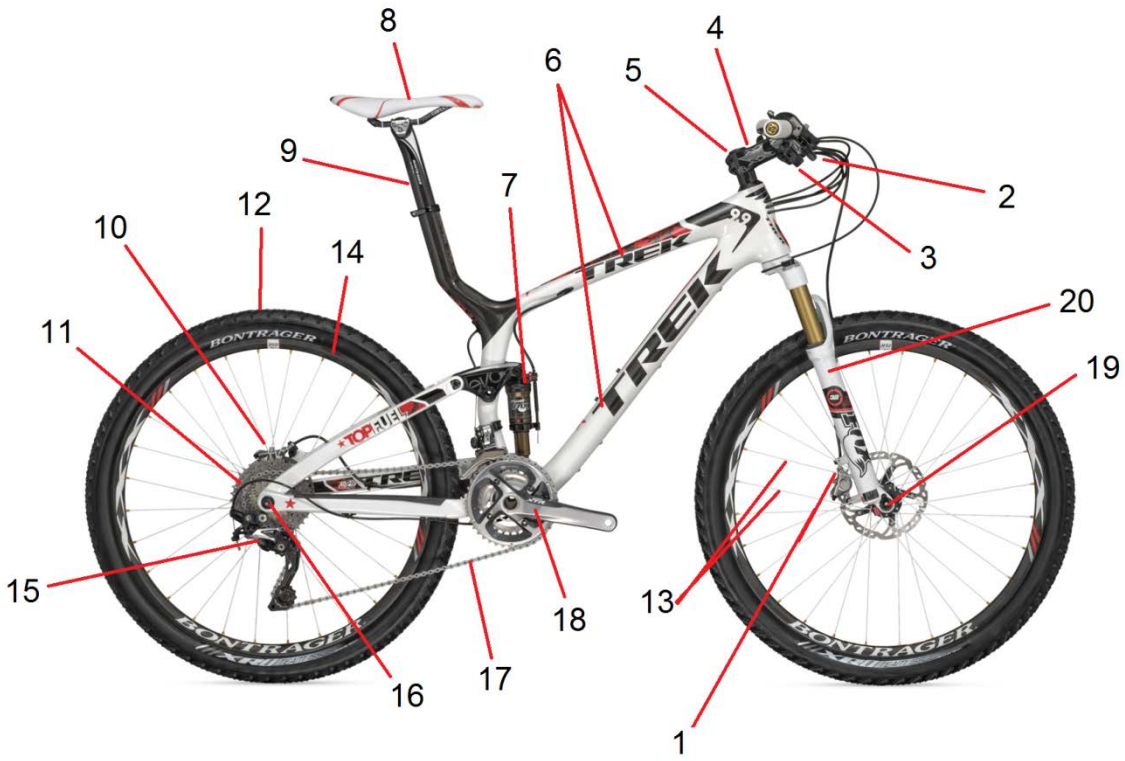

Figura 5. Componentes bicicleta de doble suspensión

- **Freno delantero y trasero (1 y 10 de la Figura 5)**:

Los hay de zapata, que crean fricción contra la llanta para frenar, así como de disco. Hay frenos de discos hidráulicos y mecánicos. Los de rin se conocen como “V Brakes”. Actualmente se están perdiendo los “V Brakes” dando paso a los frenos de disco hidráulicos dado que tienen una mayor capacidad de frenada en un menor tiempo, aunque necesitan un mayor

mantenimiento.

- **Manetas de freno (2):**

Usadas para aplicar los frenos. Para frenos de zapata y de disco mecánicos normalmente sirven las mismas. Los frenos hidráulicos traen sus propias palancas ya que son especiales.

- **Cambios (3):**

Son los mecanismos con los que cambias velocidades. Hay dos marcas reconocidas: Shimano que usa las palancas tipo gatillo y SRAM (Gripshift) que usa las de tipo puño giratorio.

- **Potencia (4):**

Los hay planos y los denominados de doble altura, que se levantan por encima del poste de manubrio. Los primeros dan una posición más aerodinámica usada en las carreras y los segundos dan una posición alta que mejoran el manejo y en una posición más cómoda.

- **Dirección (5):**

Es la unión de la potencia con la tijera para la dirección. Casi todos actualmente usan el sistema “Aheadset” (sistema de dirección que prescinde de rosca en el tubo de dirección, esta se sujeta gracias a la potencia) aunque en bicicletas más económicas es posible encontrar los modelos de tuerca. Es más fácil ajustar el primero pero no ofrece la opción de cambiar la altura del manubrio. Vienen en diferentes longitudes y ángulos para obtener una posición adecuada del ciclista en la bici.

- **Cuadro (6):**

Es el alma de la bici. El componente más importante ya que debe ser del tamaño correcto para tu estatura. Los hay de Aluminio y deben ser de las series 6000 o 7000 para garantizar la calidad. Los de acero son cuadros muy resistentes, aunque no son ligeros. Los de titanio son una mezcla de propiedades entre el acero y el aluminio y tienden a ser caros. Por último, los de fibra de carbonos, muy ligeros y caros. Más usados en bicis diseñadas para carreras. Este es el material que se utiliza en los modelos de bicicletas que se modelaran posteriormente.

- **Amortiguador trasero (7):**

Los hay de cuatro tipos. De aire son muy ligeros pero tienden a ser poco sensibles a obstáculos pequeños. Los de resorte, muy sensibles a cualquier

tipo de obstáculo y además muy resistentes a golpes fuertes, aunque son considerablemente más pesados que los de aire. Hidráulicos compuesto por aceite. Por último y ya casi desaparecidos, los de elastómeros que son una especie de goma.

- **Sillín (8):**

El sillín debe permitir deslizarse al ciclista hacia atrás sin obstaculizarle, para poder echar el cuerpo hacia atrás en bajadas empinadas y terreno técnico.

- **Tija (9):**

Normalmente son de aluminio y los más ligeros pueden ser de fibra de carbono. Tienen en diferentes diámetros según el modelo del cuadro de la bicicleta.

- **Cassette (11):**

Es el conjunto de piñones trasero para cambios de velocidades. Mientras más grande el piñón más fácil es el pedaleo. Los más reconocidos son Shimano y SRAM pero no son necesariamente compatibles el uno con el otro.

- **Neumático (12):**

Las hay de varios anchos, desde 1.8 pulg hasta 2.4 para Cross Country. También hay modelos específicos para ser delanteras, traseras o mixtas. Los últimos que han salido al mercado los modelos sin cámara llamado tubeless, que contienen un líquido que tapona el pinchazo.

- **Radios (13):**

Unen la llanta con el eje de la rueda y son los responsables del correcto alineamiento de una rueda. Están hechos de acero y los niples (tuercas con que se tensionan) suelen ser de bronce o aluminio. Se miden por calibres y algunos tienen espesor variable para reducir peso.

- **Llanta (14):**

Son de aluminio. Los hay de diferentes anchos. Algunos tienen un recubrimiento cerámico en los bordes usado para mejorar la eficiencia de los frenos de zapata.

- **Desviador trasero o cambio trasero (15):**

Es el responsable de hacer los cambios de velocidades en la parte trasera. Los más reconocidos son Shimano y SRAM los cuales no son

necesariamente compatibles entre sí. En los platos también se encuentra el cambio delantero.

- **Eje rueda trasera (16):**

Es el conjunto de rodamientos y eje sobre los que gira la rueda. En ella se coloca el Cassette y llegan los radios.

- **Cadena (17):**

Encargada de transmitir la potencia de los pedales a la rueda. Los sistemas de 21 y 24 velocidades usan el mismo tipo de cadena. Los de 27 velocidades usan una más angosta y no es compatible con los anteriores.

- **Platos y bielas (18):**

Está integrada por las palancas de pedales, los platos (3 en el caso de bicis de montaña) y el eje de los pedales. Los platos más pequeños son de 20 dientes y las más grades de 48 para Cross Country. Puede haber más grandes para Downhill. Mientras más chico el plato más fácil pedalear.

Se pueden encontrar pedales de contacto o calas, que son en los que te “engrapas” al pedal con la placa que se coloca en el zapato; los hay de plataforma que no tiene ningún tipo de sujeción del pie.

- **Eje rueda delantera (19):**

Es el conjunto de rodamientos y eje sobre los que gira la rueda. A el llegan los radios.

- **La horquilla de suspensión (20):**

Es responsable de la dirección y la suspensión delanteras. Ya son muy raras las rígidas. En cuanto a suspensiones hay varias marcas reconocidas como RockShox, Fox, Marzocchi, etc. Los recorridos de la suspensión varían de los 80 a los 130 mm. Son regulables, es decir se pueden bloquear para que no amortigüen o regular para que amortigüen más o menos.

2.2.2 Componentes del cuadro

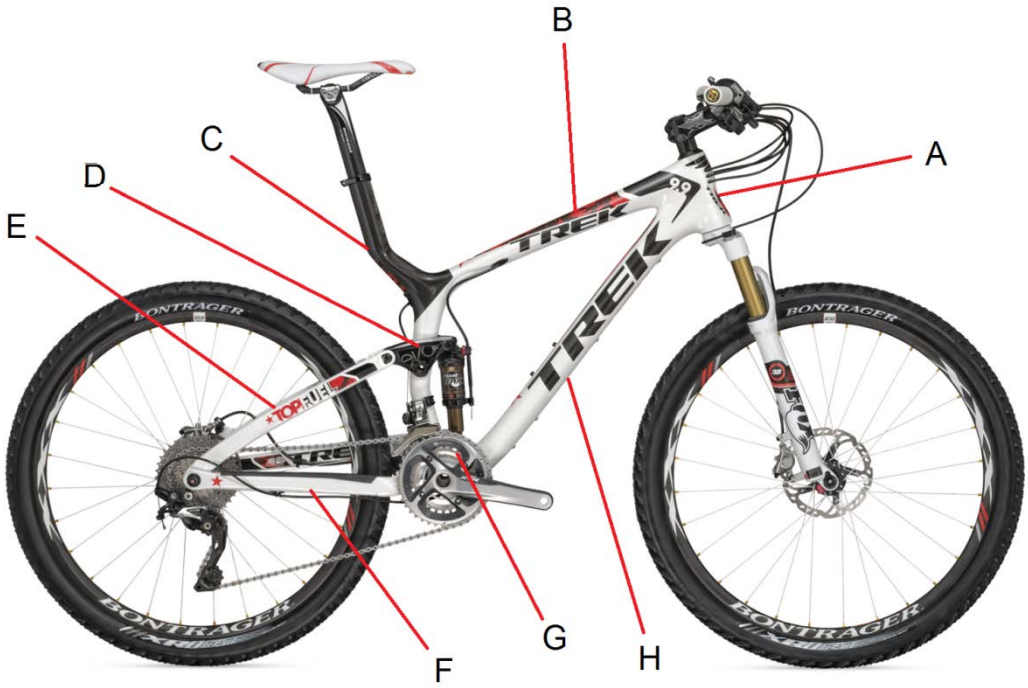

Figura 6. Componentes del cuadro de una bicicleta de doble suspensión

- **Tubo frontal o de dirección (A de la Figura 6):**

En este se colocan las tazas de dirección que son la articulación sobre la que gira la dirección. La gran mayoría de bicis actuales tienen tazas que usan el sistema Aheadset y ya muy pocas el de tuerca. Las tazas deben ser compatibles con la dirección.

- **Tubo superior (B):**

Es la parte superior del cuadro. Es el que se usa para medir el tamaño correcto del cuadro**.**

- **Tubo de sillín (C):**

Es sobre el que entra la tija del sillín. Hay que asegurar de que la tija entre a la profundidad mínima especificada marcada en él. De no ser así se puede romper el cuadro.

- **Brazo suspensión (D):**

Son los basculantes que se usan para conectar el amortiguador a la parte trasera de la bici.

- **Tirantes (E):**

Los tubos que van de la zona del sillín (brazo suspensión) a las punteras traseras.

- **Vaina (F):**

Es la que va del eje de los pedales al centro rueda trasera. Es rígido en las bicis que no tienen suspensión

- **Soporte del amortiguador (G):**

Diversos soportes que se usan para fijar el amortiguador al cuadro.

- **Tubo oblicuo (H):**

Une el tubo frontal con la caja de pedalier.

2.3 Geometría del cuadro de una bicicleta de montaña de doble suspensión

A continuación se explican brevemente la importancia de cada uno de los elementos que definen la geometría de un cuadro. Esto es muy importante ya la geometría del cuadro debe ser acorde a las dimensiones del ciclista para el confort de este, y poder tener un mayor rendimiento sobre la bicicleta.

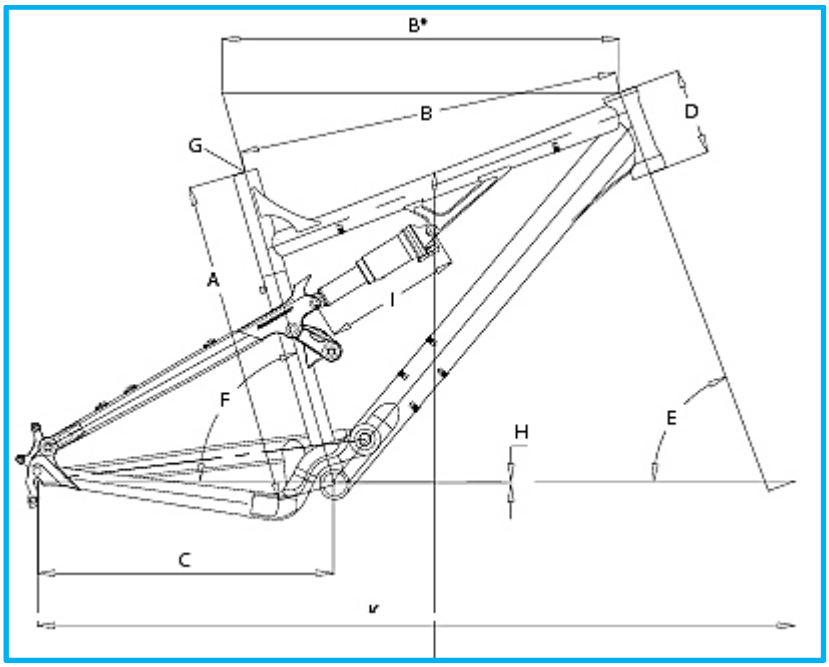

Figura 7. Medidas del cuadro de una bicicleta de doble suspensión

- **Longitud del tubo del sillín (A de la Figura 7).** Se mide desde el centro del pedalier hasta el punto de corte del propio tubo del sillín con la prolongación, en un plano horizontal, del centro del tubo horizontal a partir de su unión con el tubo de dirección. Define la talla de la bicicleta, en relación con la longitud de la entrepierna y suele estar expresada en pulgadas: talla 15, talla 20, talla 22,... (la conversión a centímetros se hace multiplicando cada pulgada por 2,54 cm.). Aunque en las bicicletas de carretera y en las de montaña destinadas a un uso “tranquilo” o de paseo es fácil comprender dicha función, ya que el tubo horizontal es paralelo al suelo, en las bicicletas de montaña destinadas a un uso más deportivo el tubo horizontal presenta una caída (o slooping) más o menos acusada hacia atrás, y el tallaje se complica.

- **Longitud del tubo horizontal (B).** Se mide entre los puntos de corte del tubo horizontal con los ejes longitudinales de los tubos de dirección y del sillín respectivamente. En las bicicletas de carretera suele corresponderse con la longitud del tronco, aunque en las de montaña es unos centímetros más largo (mayor distancia entre ejes, mayor confortabilidad en el manejo); además, en las bicicletas de montaña el pedalier también está unos 3 cm más alto (de media) que en las de carretera, aunque las Mountain Bike destinadas a descenso o freeride lo tienen todavía más alto, hasta estar a la misma altura que los ejes de los bujes (vainas inferiores paralelas al suelo), de forma que puedan sortearse obstáculos mayores.

La inclinación hacia atrás (o slooping) antes mencionada permite una mayor facilidad para poner pie a tierra en cualquier momento y para tomar impulso en el campo, compensándose la diferencia de altura del tubo del sillín con una mayor distancia de la tija por encima del mismo.

- **Distancia entre ejes traseros (C)**. Se mide desde el punto central del eje del buje de la rueda trasera hasta el punto central del eje del pedalier. En las bicicletas de montaña dicho valor siempre ha sido superior al de las bicicletas destinadas a la carretera (42-44 cm por 39-42 cm, respectivamente), pero en la actualidad tiende a acortarse: una distancia más corta es menos cómoda, pero aumenta la velocidad de reacción y mejora la capacidad d e escalada.

Cuanto menor sea este soporte, mejor. Porque cuanto más rueda trasera quede bajo su cuerpo, mejor es la tracción en las subidas, mejor es en las curvas y también es un factor que facilita el efecto para levantar la rueda delantera.

- **Longitud pipa dirección (D).** Es la distancia que va desde el anclaje de la horquilla con el cuadro, hasta la potencia.

- **Ángulo de dirección o de ataque (E).** Sobre un suelo completamente plano, representa el ángulo que forma la prolongación del eje longitudinal del tubo de dirección con el eje longitudinal del tubo horizontal (tomado precisamente desde su punto de corte con el tubo de dirección y en prolongación horizontal hacia el tubo del sillín). El ángulo debe tomarse hacia la parte trasera y superior de la bicicleta.

En las bicicletas de montaña oscila entre los 68 y los 72 grados, y junto con el avance de la horquilla influye decisivamente en el avance efectivo de la rueda, del cual depende la característica de guiado: con un ángulo de dirección más vertical (cercano a los 71 grados) y una horquilla de curvatura media se obtiene un control más directo de la dirección (comportamiento más sensible), mientras que un ángulo más plano (cercano a los 68 grados) proporciona un control “amortiguado” (comportamiento menos sensible).

El ángulo que la rueda delantera tiene en relación a la bicicleta es uno de los mayores efectos en la pedaleada. Cuanto mayor sea este ángulo, más inmanejable queda la bici; cuanto menor, más perezosos serán los efectos de la bicicleta para las curvas.

Las bicicletas que poseen un acentuado declive son ágiles. Estas son fáciles de conducir y fáciles de mantener en una senda en subida. No así en los descensos, ya que se comportan de manera imprecisa e inestable.

La bicicleta con un ángulo de ataque menor es más lenta para tomar las curvas, aunque son más estables en velocidades mayores, así como en caminos de tierra. El lado negativo, es que poseen más resistencia al viraje. Son conocidas como “camiones”, y precisan de más espacio para maniobrar.

- **Ángulo del sillín (F).** Sobre un suelo completamente plano, representa el ángulo que forma el plano del sillín (en condiciones normales debería ser paralelo al suelo) con la prolongación del eje longitudinal del tubo del sillín (el ángulo debe tomarse hacia la parte trasera y superior de la bicicleta). Oscila entre los 69 y los 74 grados y resulta determinante en el comportamiento de la bicicleta: un ángulo más plano (69 á 71 grados) proporciona un comportamiento más cómodo (echado hacia atrás), mientras que uno más vertical (cercano a los 74 grados) beneficia la escalada (al adelantar la posición). En relación con la ergonomía, un usuario con muslos cortos se beneficiará de un ángulo más vertical, mientras que un usuario con los muslos más largos estará más cómodo con un ángulo más plano.

- **Altura del pedalier (G)**. Sobre un suelo completamente plano, se mide la distancia desde el centro del eje del pedalier hasta el suelo, como se puede ver en la imagen (en la primera imagen H es la diferencia de altura entre

eje de rueda trasera y eje pedalier). Una menor altura hace la bicicleta más manejable, mientras que una mayor altura produce estabilidad en línea recta, con una rodadura más tranquila sin manos y un aumento de la capacidad para franquear obstáculos sin golpearlos con el cuadro.

Esta altura determina la distancia entre el centro de la caja de pedaleo y el piso (despegue), fundamental para calcular el trabajo en terrenos accidentados. Determina también a que distancia su cuerpo va a quedar del piso. Cuanto más bajo, mejor es el centro de gravedad y eso facilita el tratamiento de las curvas.

Si esta altura es muy pequeña, el pedal comienza a golpear en las piedras. Si el uso fuese solamente en terrenos lisos, tener el cuadro más bajo ayuda a tomar las curvas más rápidas, como las de slalon y bikecross. Intente quedarse con la bicicleta que posea el menor “despegue” posible para el uso que piensa darle; tratando de ubicar, claro, la que tenga la posibilidad de que no pegue el pedal en el piso en los giros de pedaleo más comprometidos.

- **Distancia entre ruedas (H).** Se mide desde el punto central del eje del buje de la rueda delantera hasta el punto central del eje del buje de la rueda trasera. Una mayor distancia proporciona una conducción más relajada pero con menor manejabilidad, mientras que una distancia menor aumenta la manejabilidad pero conlleva un comportamiento más “nervioso” de la bicicleta.

2.4 Tipos de bicicleta de montaña según su funcionalidad

Existen varios tipos de geometría de bicicletas, del arquetipo clásico de las bicicletas han ido surgiendo variaciones, incluyendo las bicicletas de BMX (bicicross) y sus variantes Freestyle, la bicicleta de montaña (extraordinariamente extendida por todo el mundo, desde su aparición en 1980) en sus distintas modalidades o la Citybike (bicicleta híbrida). Desde un punto de vista global, las bicicletas pueden clasificarse en bicicletas de carretera, bicicletas de montaña y bicicletas "especiales". Las bicicletas de montaña, en particular, se han especializado hasta distinguirse tres grupos [3]:

- Bicicletas de montaña para el ámbito deportivo (bicicletas de alta tecnol ogia y de carreras: cross-country, enduro, freeride y descenso).

- Bicicletas para el ocio y el esparcimiento (bicicletas de entretenimi ento y todoterreno: all-terrain).

- Bicicletas para todo uso (bicicletas para la ciudad: city-bike).

- **Campo a través (Cross country XC)**

Figura 8. Bicicletas de XC

Esta compuesta con ruedas de 26 ó 29 pulgadas. El cuadro es resistente y con una altura de manillar intermedia. La relación de marchas es grande, aunque no con demasiada variación, excelente para un tránsito urbano. Dentro del modelo, hay muchas variaciones.

Suelen incluir también los últimos adelantos técnicos y variaciones en los cuadros (más cortos para mejorar el rendimiento en las subidas, el tubo horizontal curvado, etc.). Últimamente han proliferado los modelos de carbono que rebajan el peso y mantienen o incluso mejoran la rigidez para un uso cross country, a costa de precios normalmente elevados. Normalmente se busca bajar la barrera de los 10 kg, y pueden llegar a ser muy caras. Estas serán el tipo de bicicletas que se modelan y simulan posteriormente.

- **Enduro-All Mountain**

En estas bicicletas, diferenciándose de esta en varios aspectos, prima la búsqueda de bajadas más agresivas y descensos más cercanos al DH, pero aun así teniendo buen comportamiento en subida. Son bicis de 140-180 de recorrido como se ve en la Figura 9.

Figura 9. Bicicleta de Enduro-All mountain

- **Conducción libre (Freeride)**

Figura 10. Bicicleta de Freeride

Esta modalidad se caracteriza por bicicletas con menos énfasis en el peso y mayor en el recorrido de las suspensiones, sin llegar a ser tan robustas, pesadas o con recorridos como las bicicletas de Descenso (competitivas). Estas bicicletas permiten el pedaleo en ascenso, pero no están construidas para recorridos largos.

- **Descenso (Downhill DH)**

Figura 11.Bicicleta DH

Modalidad en la cual se compite en un camino totalmente en bajada, con saltos y obstáculos naturales como artificiales. Las bicicletas llevan suspensiones delantera y trasera con amortiguadores y aceite hidráulico, además de frenos de disco, neumáticos de mayor anchura y protectores de platos o guía cadena. Además de esto, destacan por ser más pesadas que las corrientes debido a los mayores esfuerzos a los que se ve sometido el conjunto de la bici. Los ciclistas llevan además casco integral y protecciones especiales en caso de caídas que van desde trajes completos a solo coderas o rodilleras como se aprecia en la Figura 11.

- **Mountain Bike (MTB ó BTT). All terrain.**

Es la clásica todoterreno y se creó para rodar por el campo, aunque en la actualidad la mayoría la usamos por cualquier sitio, tal es su versatilidad. Sigue caracterizándose por sus gruesas ruedas con tacos, un conjunto de tres platos y hasta nueve piñones, frenos potentes (en la actualidad casi todas montan como mínimo VBrake) y cuadros con slooping que presentan una gran parte de la tija fuera del tubo vertical. Pueden presentarse sin suspensión, con suspensión delantera o con suspensión total, incluyendo en este último caso alguna variante con la suspensión trasera en el sillín. También están llegando al público general los frenos de disco, tanto mecánicos como hidráulicos.

- **Bicicleta HÍBRIDA (o City-Bike)**

Figura 12. Bicicleta Híbrida

Es una mezcla de bicicleta de carretera y de montaña (Figura 12), en lo que podríamos considerar la evolución de las clásicas bicicletas "de paseo" a las que se han añadido las innovaciones de carretera y montaña. En la actualidad, presentan manillares de doble altura, sillines más anchos y cómodos, múltiples relaciones de cambios indexados (aunque últimamente se escogen sistemas de transmisión integrados en el propio buje, con un solo piñón exterior), guardabarros, parrillas portabultos, una ausencia casi absoluta de mantenimiento, etc.

Se usan como medio de desplazamiento en la ciudad y/o en distancias cortas, sin mayores pretensiones. Muchos fabricantes suelen presentar modelos "de hombre" y modelos "de mujer", diferenciándose estos últimos en el tamaño y mullido del sillín, así como en el tubo horizontal, que tiende a seguir la trayectoria del tubo oblicuo (para facilitar el bajar y subir de la bici).

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE SUSPENSIÓN TRASERA DE UNA BICICLETA

3.1 Funcionamiento de las suspensiones

Básicamente una suspensión tiene dos misiones principales:

1. Mantener las ruedas en contacto con el suelo en todo momento.
2. Procurar que las partes de la bici que están ancladas a las ruedas, es decir, todo aquello que no son las ruedas y la parte fija a ellas, (que se denomina masa no suspendida) se mantenga en una trayectoria rectilínea con respecto al suelo.

Figura 13. Suspensión trasera

Para lograrlo las suspensiones disponen de dos sistemas, el resorte y el amortiguador. El resorte tiene como función absorber la energía que se produce durante el desplazamiento de la masa suspendida (ruedas y la parte de la suspensión fija a ellas), para devolverla a su posición inicial una vez que ha cesado la causa que produce el desplazamiento (baches, inercia al acelerar o frenar). Y el amortiguador evita que las suspensiones vayan extendiéndose y comprimiéndose constantemente mientras la bici circula actuando como un freno.

Mientras el recorrido del muelle depende de la fuerza que se le aplique, el amortiguador depende de la velocidad del desplazamiento. Un resorte se comprime más conforme aumenta la carga sobre el, un amortiguador se endurece cuando aumenta la velocidad del desplazamiento. Esto es muy importante, porque separa la regulación de ambos sistemas dependiendo del problema. Si este está causado por la fuerza que provoca el movimiento (topes o falta de recorrido en la suspensión), es el resorte el factor a considerar. Si, por el contrario, el problema es la velocidad de trabajo (oscilaciones, rebotes,

movimientos parásitos, etc.) es el amortiguador el sistema a regular.

Es importante que la suspensión disponga de un cierto hundimiento con el piloto (SAG) para evitar despegues de las ruedas en agujeros o cambios de rasante, pero la medida varía dependiendo del tipo de bici, de su peso y del que tenga el ciclista.

El SAG es el prehundimiento de la suspensión provocado por el peso del ciclista, es decir cuando nos subimos a la bici las suspensiones de estas se hunden (más o menos dependiendo de la configuración, pero algo deberían hundirse) este prehundimiento es el SAG y se usa como parámetro para configurar las suspensiones.

3.2 Tipos de suspensiones traseras

Los sistemas de suspensión trasera de una bicicleta de montaña pueden ser diversos, según el mecanismo que se utilice para el amortiguador trasero. Con esto se pueden distinguir los siguientes tipos de suspensiones traseras que se pueden ver actualmente en el mercado [15] [2]: Punto de Pivote Virtual, Monopivote, Monopivote articulado, Horst Link, amortiguador flotante y Active Bracking Pivot.

En la simulación se estudian los modelos Monopivote articulado y Horst Link para poder ver las diferencias entre dos tipos de sistemas de suspensión trasera totalmente diferentes. Y también se simula el sistema de suspensión trasera Active Bracking Pivote (similar al Horst Link) para ver como influye el cambio de la articulación en del centro de la vaina (en Horst Link) al centro del eje de la rueda trasera.

3.2.1 Punto de Pivote Virtual

Este sistema de suspensión, también comúnmente llamado Virtual Pivot Point (VPP) que se muestra en la Figura 14, ha sido uno de los últimas en popularizarse y lo ha hecho de la mano de marcas bastante exclusivas como son Santa Cruz e Intense.

Funcionamiento: Las vainas y los tirantes forman una estructura triangular rígida que se conecta a través de dos bieletas a la mitad delantera del cuadro (triángulo principal). El punto de pivote virtual se halla en la intersección formada por los ejes de los dos bieletas y se desplaza con el tiempo. No existe un pivote principal (fijo en el cuadro) sobre el que articula el basculante, sino que éste resulta flotar en el aire y cambia de lugar en función

de la compresión de la suspensión. El sistema se basa en equilibrar el movimiento descendente de la suspensión al pedalear con un movimiento opuesto ascendente de la misma fuerza e intensidad, de tal modo que la suspensión quedaría neutralizada.

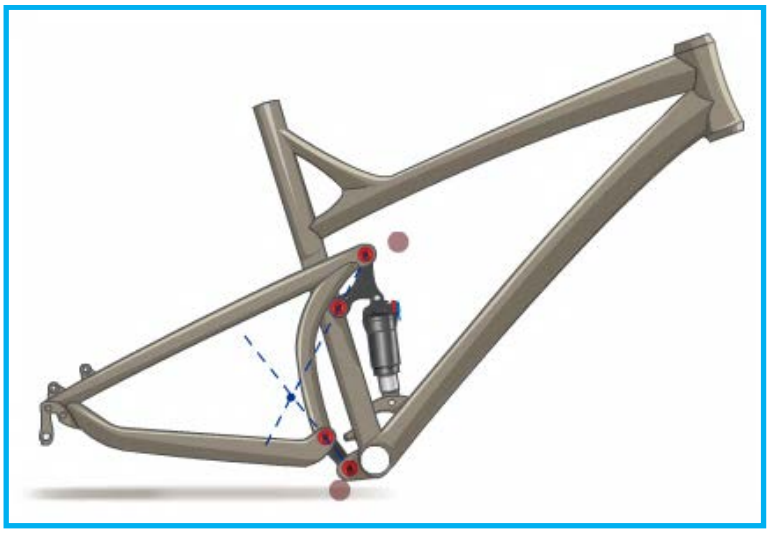

Figura 14. Suspensión trasera Punto Pivote Virtual

Trayectoria de la rueda: Las posibilidades son muchas: En el VPP de Santa Cruz, Intense o Lapierre FPS2 la rueda describe una S como se ve en la Figura 15 (primero se desplaza hacia atrás, luego hacia delante -posición de equilibrio y sag, y de nuevo hacia atrás). En el caso del sistema Maestro de Giant la rueda describe una trayectoria más recta, y en el caso del sistema Zero de Mondraker la trayectoria es un arco.

Figura 15. Trayectoria rueda en suspensión VPP

Comportamiento: variable según el sistema.

Ventajas: Mínima interacción con la pedalada y la frenada, proporcionando además buena sensibilidad. Una de las ventajas de este sistema es que logra esto manteniendo el tarado de la amortiguación blando. Asimismo cuanto más fuerte se pise el pedal más dura estará la suspensión. Y evitan el llamado bobbing, hundimiento de la suspensión al pedalear.

Inconvenientes: Implica muchos rodamientos y bieletas que puede aumentar la fricción del sistema, posibles averías u holguras y tiene mayor mantenimiento. Por ello, uno de los hándicaps de este sistema, es que para que funcione debe estar perfectamente puesto a punto. Asimismo frecuentemente presentan un gran "back pedal", esto es, que si no hay un ajuste muy fino la eficacia al pedalear se ve ligeramente reducida por un pequeño retroceso o avance de los pedales dependiendo de la posición del recorrido de la rueda trasera. Esto no es fácil de percibir y hay que ser muy fino para apreciarlo. Teóricamente no asimila pequeños baches o salientes del terreno.

Este sistema es actualmente uno de los más admirados y elogiados, es técnicamente complejo y al tener bastantes ejes y balancines origina un mayor peso, todo esto queda compensado por la calidad de las bicis y amortiguadores en que está presente.

3.2.2 Monopivote

Figura 16. Suspensión trasera Monopivote

El sistema de suspensión trasera Monopivote es uno de los sistemas más sencillos, dado sus pocas articulaciones y elementos que posee para el sistema de amortiguación trasera.

Funcionamiento: El basculante (de una pieza) pivota alrededor de una única articulación y ataca directamente el amortiguador (Figura 16).

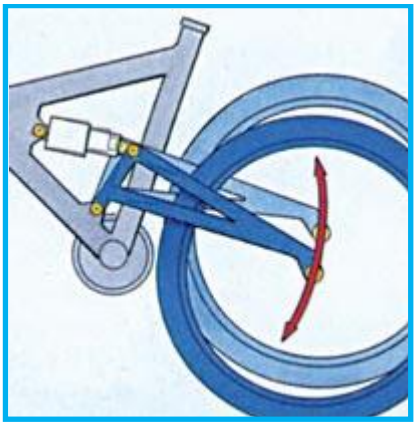

Figura 17. Trayectoria de la rueda en suspensión Monopivote

Trayectoria de la rueda: Describe un arco de radio constante como se ilustra en la Figura 17.

Comportamiento: Regresivo en la mayoría de los casos. La suspensión se hace más blanda a medida a medida que se agota el recorrido. Normalmente se utilizan amortiguadores de aire con este sistema para que la progresividad del aire compense la linealidad del sistema.

Ventajas: Diseño compacto con un solo juego de rodamientos, y ligero. Si el pivote se ubica próximo al plato mediano su comportamiento es bastante equilibrado. Si el pivote está alto, por encima de los platos, la suspensión será muy sensible, pero tendrá a extenderse en platos menores. Si el pivote está bajo, a la altura del plato pequeño, tendrá a comprimirse con platos mayores.

Inconvenientes: Eventualmente fuertes interacciones causadas por el pedaleo (tirones de cadena) y la frenada (endurecimiento de la suspensión y balanceo).

3.2.3 Monopivote articulado

Figura 18. Bicicleta con suspensión trasera monopivote articulado

El sistema de suspensión trasera Monopivote articulado se basa en el mismo funcionamiento del sistema Monopivote pero añadiéndole más articulaciones.

Funcionamiento: El basculante gira alrededor de un único pivote y ataca indirectamente el amortiguador, a través de unas bieletas. Puede tener 4 ó 5 pivotes de giro (Figura 18).

Trayectoria de la rueda: Describe un arco de radio constante (véase Figura 19).

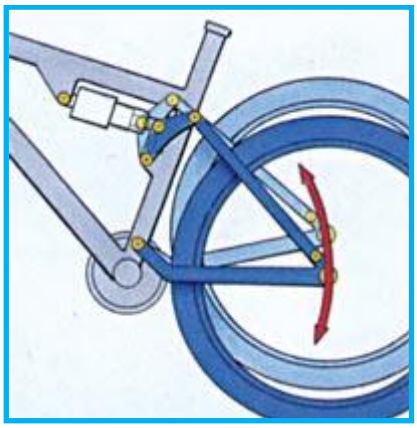

Figura 19. Trayectoria de la rueda en suspensión Monopivote articulado

Comportamiento: Según el sistema la progresividad puede ser variable a lo largo de su recorrido.

Ventajas: Las bieletas permiten variar la progresividad a la suspensión, según su tamaño y la forma de empujar el amortiguador, pero no repercute en la trayectoria de la rueda trasera. Si el pivote se ubica óptimamente, su comportamiento respecto a la pedalada es muy neutral.

Inconvenientes: Semejantes a las de un monopivote; interferencias con la pedaleada y la frenada aunque de manera menos ostensible, según la ubicación de la articulación principal y el resto de pivotes.

3.2.4 Horst Link

En este sistema de suspensión trasera el amortiguador está en posición vertical y se tienen más articulaciones.

Funcionamiento: El basculante varias articulaciones (4 ó 5). La clave del sistema es el pivote ubicado en la vaina, por delante de la puntera, denominado Horst Link (diseñado por Horst Leitner y patentado por Specialized). Éste "rompe" la vaina y por tanto ya no existe un brazo rígido entre el pivote principal y eje de la rueda trasera, otorgando movilidad e independencia a la rueda trasera, sobre todo del freno (ver Figura 20).

Figura 20.Bicicleta con suspensión trasera Horst Link

Trayectoria de la rueda: Arco muy abierto, casi vertical al suelo (Figura 21).

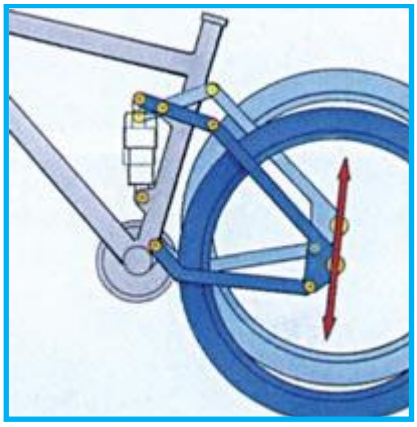

Figura 21.Trayectoria de la rueda en suspensión Horst Link

Comportamiento: Generalmente progresivo. La suspensión se endurece a medida que se comprime.

Ventajas: Una correcta ubicación de los pivotes minimiza las posibles interacciones con la pedaleada y la frenada.

Inconvenientes: Puede existir más fricción u holguras al existir más articulaciones. También puede requerir más mantenimiento.

3.2.5 Amortiguador flotante

Figura 22. Suspensión trasera de amortiguador flotante

El sistema de suspensión trasera de amortiguador flotante se basa como su propio nombre indica en un sistema en el que el amortiguador no está fijo. Lo utilizan marcas como la Giant maestro.

Funcionamiento: El amortiguador no está fijado al cuadro por ninguno de sus dos extremos, sino que bascula con el propio sistema, ya que está ubicado entre dos bieletas como se ve en la Figura 22. El amortiguador puede comprimirse a la vez por ambos extremos o comprimirse por uno y extenderse por el otro.

Figura 23. Trayectoria de la rueda en suspensión con amortiguador flotante

Trayectoria de la rueda: Dependerá del diseño del basculante y no de la ubicación del amortiguador. Normalmente es un arco como se puede ver en la Figura 23.

Comportamiento: Muy personalizable. La compresión del amortiguador desde ambos ejes le otorga una sensibilidad enorme. Si el amortiguador se comprime por un extremo y se extiende por el contrario, será muy progresiva.

Ventajas: Semejantes a las de un Horst Link y además el diseñador tiene otro factor cinemático más con el que trabajar.

Inconvenientes: Semejantes a las de un Horst Link y mayores ya que se suman más pivotes (articulaciones).

3.2.6 Active Bracking Pivot (ABP)

Figura 24. Suspensión trasera ABP

El sistema de suspensión trasera Active Bracking Pivot también llamado ABP, se basa en el mismo funcionamiento del sistema Horst Link con la diferencia de que sitúa la articulación el eje de la rueda trasera en vez de en mitad de la vaina.

Funcionamiento: La articulación trasera se sitúa concéntrica al eje de la rueda trasera (Figura 24). Se trata por tanto de un tipo de monopivote articulado dado que no hay articulación entre el eje de la rueda trasera al pivote principal.

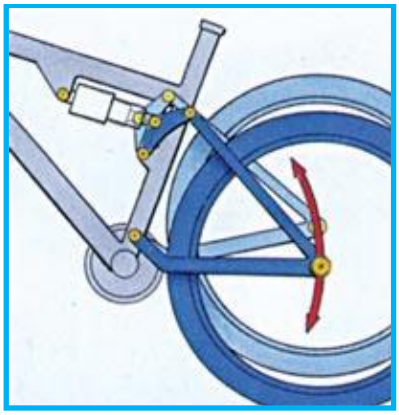

Figura 25. Trayectoria de la rueda en suspensión ABP

Trayectoria de la rueda: Describe un arco de radio constante como el de la Figura 25 .

Comportamiento: Según el sistema la progresividad puede ser variable a lo largo de su recorrido.

Ventajas: El pivote concéntrico con el eje de la rueda trasera minimiza la interacción con la frenada y la pedalada, con respecto a un sistema monopivote o monopivote articulado.

Inconvenientes: Es necesario extraer por completo el cierre rápido para desmontar la rueda trasera.

3.3 Conceptos de una suspensión trasera

Las distintas variables que afectan al funcionamiento de una suspensión trasera de una bicicleta de montaña son las siguientes [15]: el Pedal Kick Back y Pedal Kick Forward, la respuesta cinemática, la compresión por frenado (Brake Dive), la interacción con la pedalada, la curva de progresividad, el ratio de acción, la variación del centro de masa y los efectos anti-squat y anti-dive.

En las simulaciones se estudiarán el Pedal Kick Back (variación de longitud de la cadena), el ratio de acción y la variación del centro de masa del ciclista, dado que con esto se podrá ver la influencia de la suspensión en el confort y seguridad del ciclista.

3.3.1 Pedal Kick Back y Pedal Kick Forward

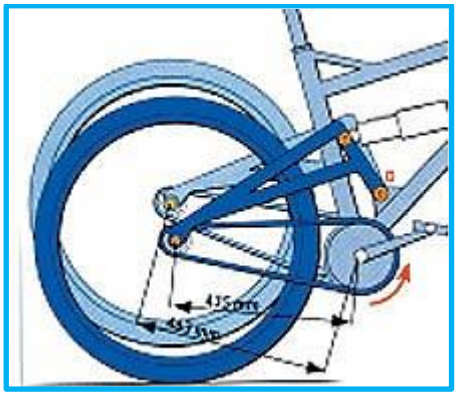

Figura 26. Variación de longitud de la cadena

La compresión de la suspensión produce un alargamiento (o acortamiento) de la longitud de cadena (distancia entre el pivote principal y el eje de la rueda trasera), generando indeseables tirones de cadena hacia atrás, lo cual hace que los pedales tiendan a retroceder.

Un punto importante a la hora de diseñar un sistema de suspensión eficaz es la minimización del Back Pedal. El eje de pedalier y el pivote principal normalmente no están a la misma altura. Por eso la cadena se alarga o se acorta durante la compresión de la suspensión. Si la cadena se alarga (ver Figura 26), ésta hace rotar las bielas bruscamente hacia atrás, y a esto se le llama Pedal Kick Back o Back Pedal.

Si al contrario, la longitud de cadena se reduce, la cadena pierde su tensión y causa un pedaleo en vacío. Este efecto, del que muy pocas veces se habla, se denomina Pedal Kick Forward o Forward Peda**l**, y también produce un brusco movimiento de las bielas, hacia delante, que interrumpe el ritmo del pedaleo. Este efecto sólo es apreciable a partir de 4º ó 5º (ángulo de desplazamiento de las bielas).

La fuerza del Pedal Kick Back/Forward también depende del recorrido trasero, cuanto más se comprima la suspensión mayor será este efecto. Pedaleando normalmente, los actuales diseños de suspensión trasera, habitualmente ofrecen poca diferencia en la longitud de cadena, así que el efecto negativo resulta inapreciable.

3.3.2 Respuesta cinemática

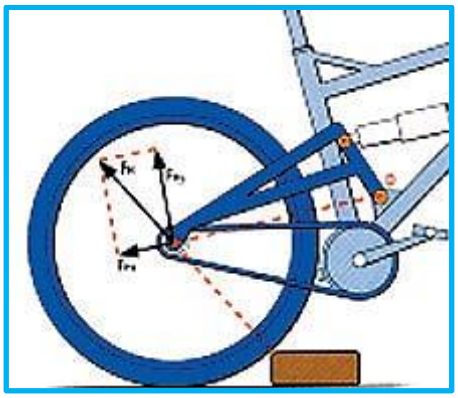

Figura 27. Reacciones del basculante

La reacción del basculante no sólo depende del comportamiento del amortiguador, del sistema (monopivote, VPP, etc.) o su fricción, también está

influido por la trayectoria de la rueda trasera, es decir, el ángulo entre la dirección de avance de la rueda trasera y la que describe al absorber impactos. Si la rueda trasera impacta con un obstáculo, surge la fuerza FB, que se inicia en el buje trasero de la Figura 27 . Si la dirección de esta fuerza FB coincide con la trayectoria descrita por la rueda trasera, la cinemática del basculante es perfecta, y la absorción será máxima. Si la fuerza actúa indirectamente respecto a la dirección de compresión del basculante (no del amortiguador), sólo una parte de la fuerza es absorbida por el sistema de suspensión.

Matemáticamente, la fuerza FB se divide en dos abscisas, FBX y FBY. Sólo la fuerza FBY actúa en la misma dirección que la trayectoria de la rueda trasera y compresión del basculante. La fuerza FBX actúa perpendicularmente a la trayectoria de la rueda trasera y del basculante, e indirectamente hacia atrás. Esta brusca fuerza disminuye la velocidad y sobrecarga los pivotes.

3.3.3 Compresión por frenado (Brake Dive)

Al frenar, se produce un cambio dinámico en el peso existente sobre las suspensiones, que dependiendo del diseño, comprime o extiende la suspensión. Si una bici rueda a velocidad constante sobre un terreno llano, la rueda delantera (FV) soporta un 40% del peso total, y la rueda trasera (FT) un 60%. Al frenar, el peso total (mountain biker y bici) mantiene su velocidad y surge una inercia (FI) que tiene el origen en el centro de gravedad (CG). La inercia genera un desplazamiento del centro de gravedad y la rueda delantera llega a soportar un 90%, que resulta en la compresión de la horquilla. Al mismo tiempo la carga sobre la rueda trasera desciende hasta un 10%, resultando en una extensión de la suspensión trasera. Este efecto se llama Brake Dive o compresión por frenado (Figura 28).

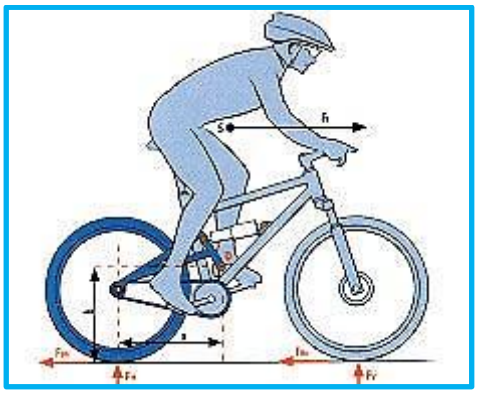

Figura 28. Brake Dive

Además interviene la fuerza de frenado (FBH) entre la cubierta trasera y el suelo. Debido al brazo de palanca (b) esta fuerza genera un momento en la

dirección contraria a la que se comprime el basculante. Si el pivote principal (D) estuviese perfectamente ubicado, estos dos momentos se anularían y el basculante quedaría en la posición que le correspondiese. Este efecto sólo funciona si la fuerza de frenado se distribuye por igual entre el freno trasero y delantero. Pero la realidad es que la fuerza ejercida sobre los frenos es desigual, y por consiguiente el Brake Dive se minimiza pero nunca desaparece por completo.

3.3.4 Interacción con la pedalada

La fuerza de tracción generada al pedalear se transmite al basculante, haciendo que éste se comprima o extienda el amortiguador. Al pedalear, surge la fuerza de cadena Fk, que se transmite al cassette (r) situado en la rueda trasera. La cubierta, apoyada en el suelo, contrarresta ésta con la fuerza de fricción (Ff) en la dirección opuesta y sobre el radio de la rueda (R). Sin esta fuerza de fricción, la rueda trasera giraría en vacío. La suma de la fuerza de cadena y fricción (Fsum) se transfiere directamente al basculante a través de la rueda trasera (desde el eje) como se ve en la Figura 29.

Si la línea de cadena coincide exactamente con el pivote principal D no puede surgir un momento de fuerza, y el basculante quedará exento de interacciones por la pedaleada. Esta condición, teóricamente perfecta, es irreal porque el pedalier suele poseer tres platos, y cada uno tiene poseerá una línea de cadena diferente.

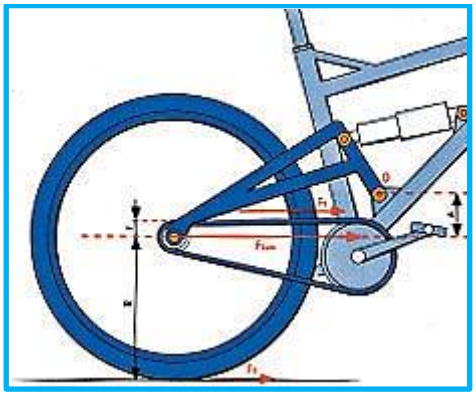

Figura 29.Fuerzas en el pedaleo

Si la línea de cadena se encuentra por encima o por debajo del pivote principal (D), el brazo de palanca (a) provocará que la suspensión se comprima o extienda, dependiendo de la ubicación del pivote principal. Cuanto mayor sea

la distancia del pivote principal a la línea de cadena, mayor será el momento de fuerza. Como compromiso, los diseñadores suelen ubican el pivote principal (D) entre el plato pequeño y el mediano. El famoso balanceo surge por la pedalada ovalada porque en ello actúa una vez más otra vez menos fuerza, que el amortiguador compensa con una compresión y descomprensión constante.

3.3.5 Curva de progresividad

En un sistema de comportamiento lineal, la fuerza de la suspensión crece homogéneamente a medida que se comprime (sería el caso de la suspensión delantera).

Un comportamiento progresivo, la fuerza de compresión aumenta exponencialmente a medida que se agota el recorrido de la suspensión; se necesita más fuerza para comprimir el mismo recorrido.

En un sistema regresivo, el gradiente de la curva es negativo porque la suspensión requiere cada vez menos fuerza para comprimirse; la suspensión tiene tendencia a comprimirse.

3.3.6 Ratio de acción

Se define como la relación entre la compresión del amortiguador y la del basculante, y varía conforme aumenta la compresión del amortiguador**.** El ratio de acción de una suspensión expresa cuánto se mueve la rueda respecto a la carrera del amortiguador. Ejemplo: En una suspensión con un ratio 1:3, por cada milímetro que se comprime el amortiguador, la rueda lo hace tres milímetros. Por lo tanto, si la carrera de nuestro amortiguador es de 45 mm, el recorrido de nuestra suspensión será de 135 mm. (45x3). En una horquilla de suspensión el ratio es de 1:1, absolutamente directo, pero esto es imposible con un sistema de suspensión trasera, cuyo ratio más idóneo se aproxima a 1:2. Como norma la suspensión trasera debe seguir los parámetros de la delantera.

3.3.7 Variación del centro de masa

Sobre un tramo llano y a velocidad constante, la rueda delantera soporta un 40% del peso y la rueda trasera el 60% restante. Al frenar, la inercia provocan que el centro de gravedad se adelante; la rueda delantera recibe aún más carga y la trasera se descargada. Al contrario, si se pedalea con fuerza, la

aceleración desplaza el centro de gravedad hacia atrás; La carga sobre la rueda trasera aumenta y la carga en la delantera disminuye.

3.3.8 Efectos anti-dive y anti-squat

En el efecto anti-dive la suspensión trasera no se ve influenciada por el cambio de pesos que se produce al frenar.

En el efecto anti-squat la suspensión trasera no se ve afectada por el cambio de pesos que se produce al pedalear ni por las fuerzas de tracción que se generan a través de la cadena.

3.4 El diagrama de Bode

El diagrama de Bode o también llamado respuesta en frecuencia, es un diagrama asintótico que se puede aproximar fácilmente trazando líneas rectas (asíntotas). Presenta la respuesta de magnitud y fase con la variación de la frecuencia de una función de transferencia. Tanto las escalas abscisas como la magnitud misma se representa en unidades logarítmicas.

Los dos diagramas representan las frecuencias de forma logarítmica en el eje de abscisas empleando rad/s. El diagrama de ganancias representa en el eje de ordenadas la amplitud de la señal de salida transformados a decibelios.

$$20log|G(j\omega)|$$

En realidad, el uso de los decibelios como unidad de medida es una forma solapada de representar la amplitud de salida en escala logarítmica. Conviene resaltar que los logaritmos son siempre decimales, no neperianos. El factor 20 de la ecuación se debe en parte al uso de la fracción del belio y en parte al empleo de la potencia de la señal, lo que hace que haya que elevar al cuadrado la amplitud dentro del logaritmo y salga fuera de él como un factor de dos. En el eje logarítmico de frecuencias se denomina década a cualquier intervalo que va desde una determinada frecuencia hasta otra diez veces mayor. Se denomina octava a cualquier intervalo que va desde una frecuencia hasta su doble.

Si |G(jw)| tiene un valor pico en alguna frecuencia, a ésta se la llama frecuencia de resonancia.

El diagrama de Bode para la bicicleta de doble suspensión es del tipo de Polo Doble**.** El diagrama de Bode de la Figura 30 muestra el comportamiento

en ganancias.

En un rango de frecuencias próximo a la frecuencia natural, el diagrama de Bode se comporta de forma distinta en función del amortiguamiento. En la Figura 30 se observa cómo aparece un máximo en el diagrama de ganancias.

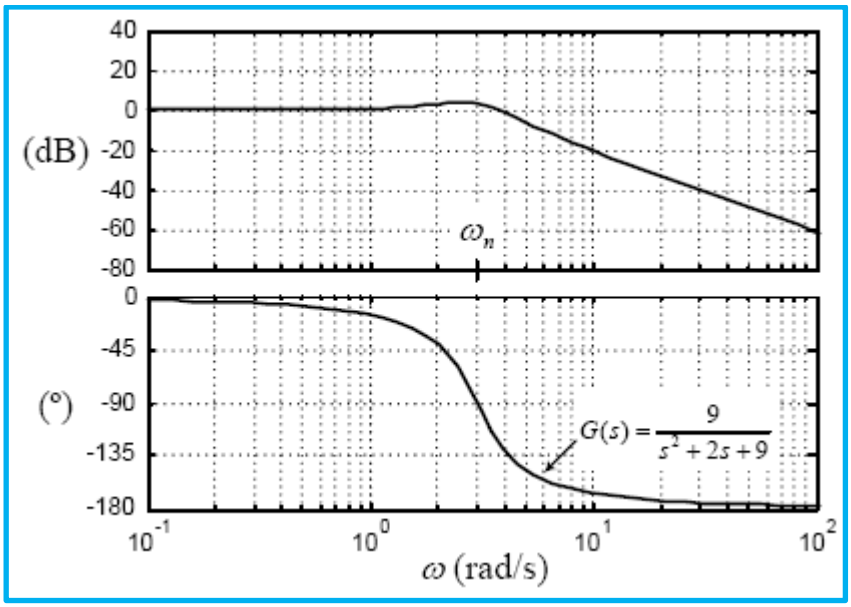

Figura 30. Diagrama de Bode de un polo doble

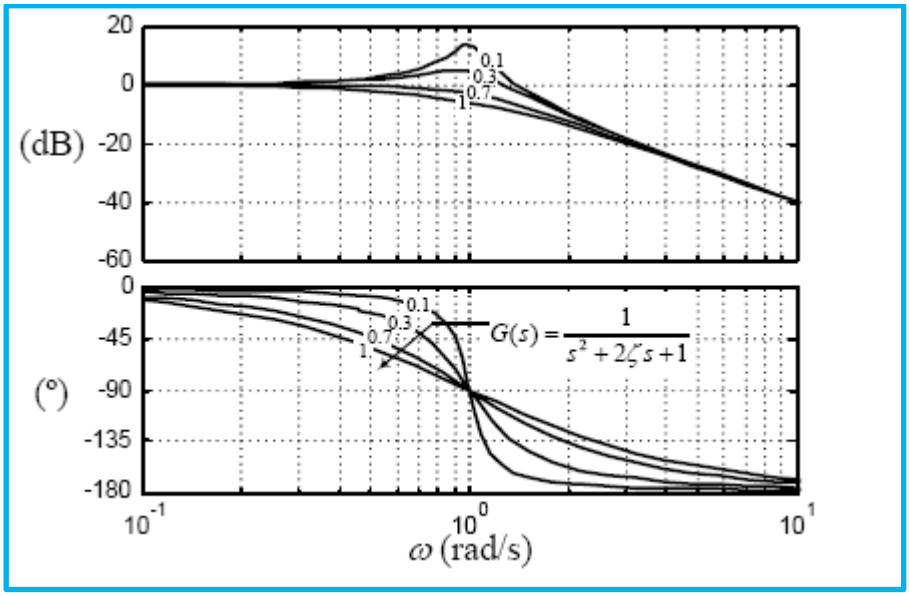

Figura 31. Diagrama de Bode de un polo doble variando el amortiguamiento

La llamada frecuencia de resonancia, es el máximo del diagrama de Bode que se había observado. El fenómeno de la resonancia no siempre existe. Sólo se da para un determinado rango de amortiguamientos. Se trata siempre de sistemas subamortiguados, aunque no todos los sistemas subamortiguados poseen pico de resonancia. En la Figura 31 se muestra cómo varía el diagrama de Bode con el amortiguamiento. Cuanto menor es el amortiguamiento mayor es el pico de resonancia y más próximo está a la frecuencia natural. También cuanto menor es el amortiguamiento más brusco es el cambio de fases en torno a la frecuencia natural [6].

CAPÍTULO 4

MODELADO EN SOLIDWORKS 2012

4.1 Introducción

SolidWorks es un programa de diseño asistido por ordenador para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

Se realiza el diseño de las bicicletas de doble suspensión y el ciclista en 3D en SolidWorks por las siguientes razones:

- Poder asignarles las masas, y por lo tanto obtener los momentos de inercia (que los calcula SolidWorks con el comando de propiedades físicas) y centros de gravedad de cada pieza, que posteriormente serán necesarios en SimMechanics.
- Obtener directamente el modelo con los bloques de SimMechanics exportando el modelo CAD mediante SimMechanics Link.
- Tener una simulación más real, ya que SimMechanics simula mediante elipsoides, pero si se exporta el modelo CAD simula con el modelo de SolidWorks.

4.2 Modelado de las bicicletas de doble suspensión

Para el modelado de la bicicleta se dibujan las piezas de la bicicleta y luego se ensamblan. Las piezas genéricas que llevaran los distintos modelos de suspensión son: el cuadro (en el que se incluirán manillar sillín, y bielas con sus respectivos pedales), las ruedas, la horquilla de suspensión, y el amortiguador trasero (compuesto por cilindro y pistón). Y cada tipo de suspensión trasera lleva sus respectivas piezas. Indicar también que solo se modela un plano de la bicicleta ya que la simulación posterior será en 2D, esto es que solo se ha modelado por ejemplo un tirante, al cual le indicaremos el doble de masa.

El proceso seguido para el diseño de piezas en SolidWorks 2012 de la bicicleta de doble suspensión es el siguiente:

1) Seleccionar el tipo de diseño.

2) Dibujar el croquis.

3) Indicar las dimensiones deseadas.

4) Extruir.

Para simplificar el diseño del modelo se han diseñado los tubos del cuadro de las bicicletas macizos ya que el peso dela bicicleta será despreciable frente al peso del ciclista para la simulación, además de que a la hora de extruir los tubos se e a dado un menor espesor para asemejarlos masa un peso real.

5) Asignar propiedades físicas.

En la pestaña editar material se elige el material de la bicicleta y el material utilizado en el cuadro ha sido la fibra de carbono. La densidad de la fibra de carbono Zoltek Panex 33 elegida, es de 1.810 kg/m^3, dato que se utiliza a la hora de definir las propiedades del cuadro de la bici para que SolidWorks calcule el resto de propiedades que se necesitan en SimMechanics.

Una vez se tienen todas las piezas, se ensamblan para obtener la bicicleta completa. Los pasos seguidos para ensamblarlo han sido los siguientes:

1) Selección del tipo de diseño.

2) Inserción de componentes.

3) Indicación de las relaciones de posición.

Ésta última es la parte más importantes del diseño, puesto que las propiedades del modelo que se construyen posteriormente en SimMechanics dependen de como se han relacionado las piezas.

Excepto las suspensiones delantera y trasera, que poseen un movimiento relativo de traslación, el resto de elementos tienen un movimiento relativo únicamente de rotación entre ellos, que se ha conseguido asignando la opción de coincidente dos caras de dos piezas y la opción de concéntrica entre las dos circunferencias de las dos piezas (Figura 32). Las relaciones de posición se realizan única y exclusivamente entre piezas que estén en contacto superficial, para su correcto funcionamiento en SimMechanics.

Figura 32. Detalle de unión entre dos piezas

Para obtener el movimiento de traslación de la suspensión delantera se deben de hacer coincidentes dos caras de la horquilla con el cuadro de la bicicleta. Al tener que coincidir en dos planos, el único movimiento relativo que se permite es el de traslación. Para facilitar el ensamblaje se utiliza la opción de fijar una pieza para que no se mueva durante el ensamblaje. También se ha utilizado la relación de posición distancia entre horquilla y cuadro para dejar un espacio de 120mm que simulara el recorrido de la suspensión delantera (ver Figura 33).

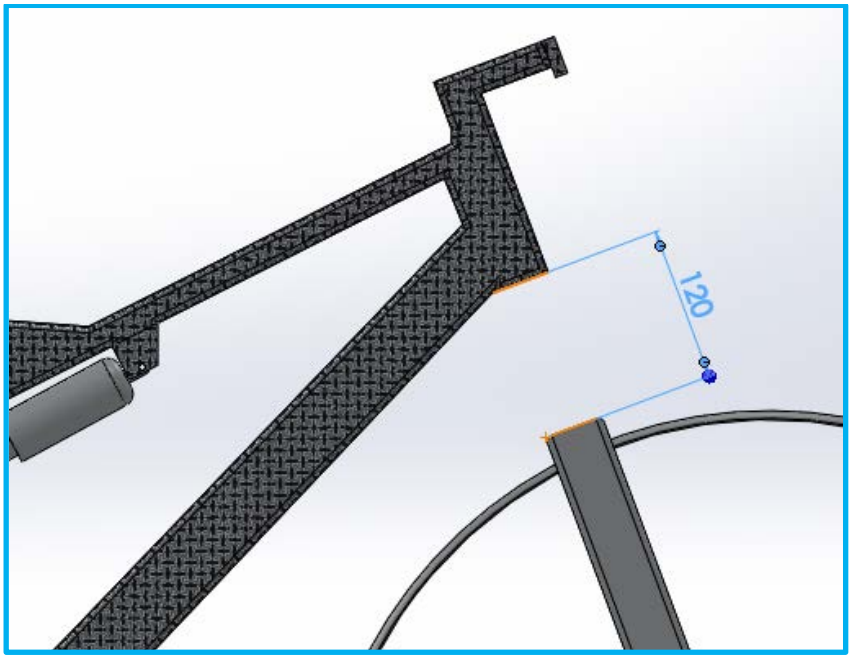

Figura 33. Modelado de la horquilla

En cuanto a la suspensión trasera (Figura 34), como se ha modelado

como cilindros basta con indicar la relación de posición concéntrica. La máxima compresión de la suspensión trasera es de 61 mm.

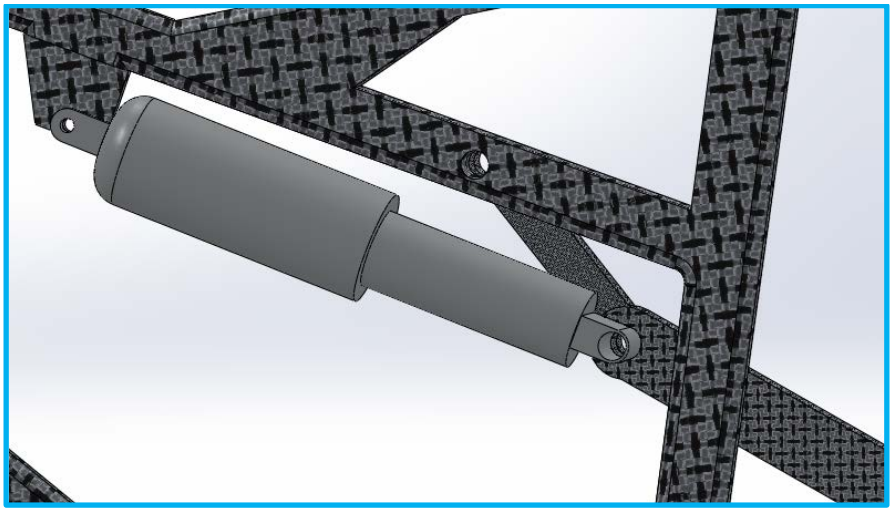

Figura 34. Modelado de la suspensión trasera

Con el objetivo de que la bicicleta tenga una correcta orientación en el espacio se hacen tangentes el plano Planta y las dos plantas de las ruedas, y posteriormente se borra esta relación para que el modelo tenga libertad de movimiento.

4.2.1 Monopivote articulado

Figura 35. Orbea Occam S10

Para el modelado de la bicicleta con suspensión trasera Monopivote articulado se utilizan como referencia las medidas de la bicicleta Orbea Occam S10 (Figura 35).

De la propia página de la bicicleta [7] se obtienen las especificaciones con las tallas de bicicleta según altura, que se muestran en la Tabla 1, y la geometría de la bicicleta (Tabla 2).

Tabla 1. Tallas de bicicleta en función de la altura del ciclista

Altura	Talla
< 165cm.	XS
160-175 cm.	S
175-185 cm.	M
<18 cm.	L

Puesto que nuestro ciclista mide 170 cm, según la Tabla 1 le corresponde una talla S, por tanto se cogerán las medidas de bicicleta para esta talla.

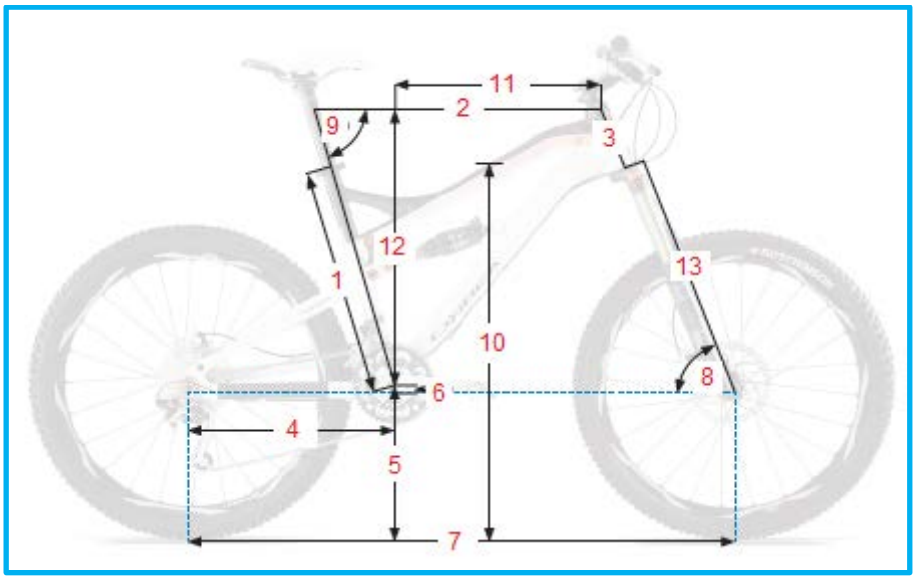

Figura 36. Geometría de la bicicleta Orbea Occam S10

Tabla 2. Geometría de la bicicleta para la talla S

Talla	S
1) Tubo del asiento	432 mm
2) Tubo horizontal	585 mm
3) Tubo frontal	120 mm
4) Vaina	420 mm
5) Altura eje pedalier	354 mm (26x2.2)
6) Caída eje pedalier	12 mm
7) Distancia entre ejes	1108 mm
8) Ángulo frontal	69.5º
9) Ángulo del sillín	74.5º
10) Altura base	775 mm
11) Largo del cuadro	428 mm
12) Altura del cuadro	568 mm
13) Longitud horquilla	493 mm (120 mm recorrido)

Con las dimensiones de la Tabla 2 se dibuja el cuadro en SolidWorks, este cuadro será genérico para todos los sistemas de suspensión que se modelan (véase Figura 37).

La altura de tija de sillín medido desde eje de pedalier, se obtiene mediante la altura de entrepierna del ciclista en cm (obtenida mediante la figura de Contini que se explicara más adelante) multiplicada por un valor de 0.885.

Posteriormente tras extruir el cuadro se le añade el sillín y las bielas con los pedales. También se le añade un manillar para posteriormente poder anclar la mano del ciclista al manillar.

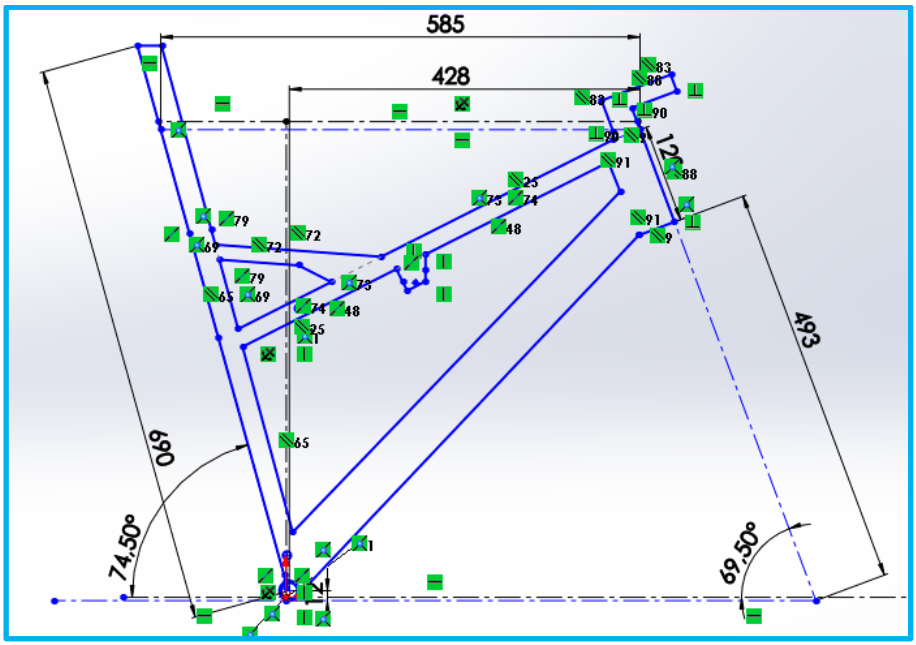

Figura 37.Modelado del cuadro de la bicicleta en SolidWorks

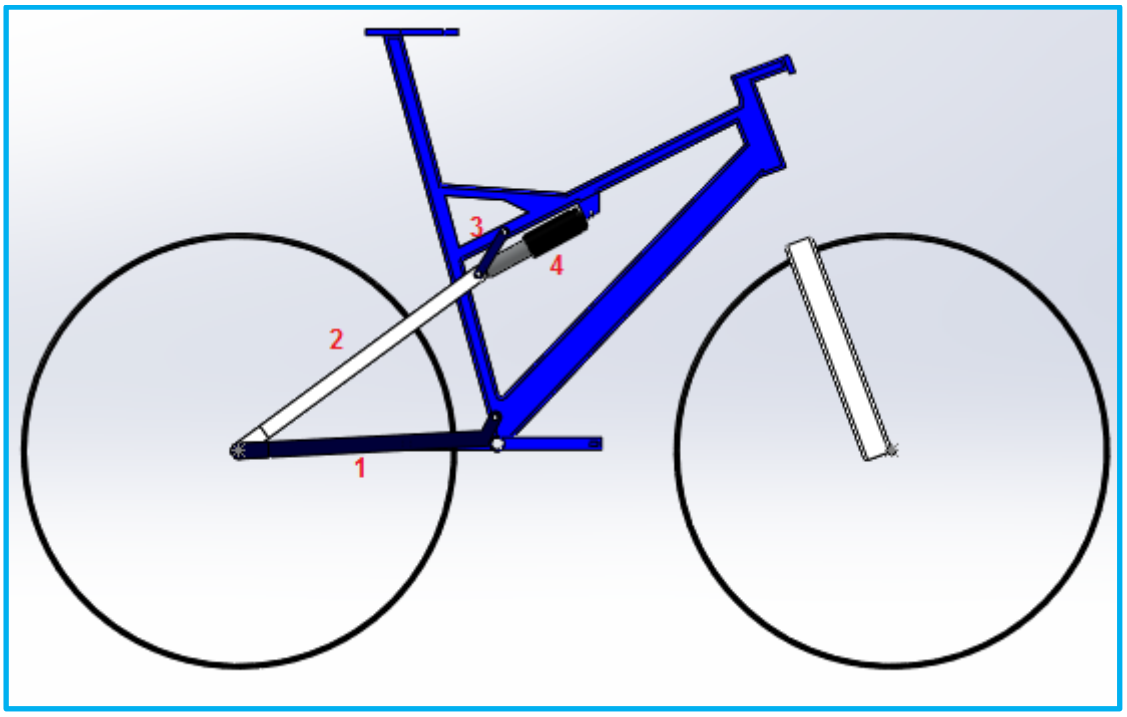

Figura 38. Modelo final de bicicleta con suspensión Monopivote articulado

Una vez modeladas todas las piezas de la bicicleta se procede al ensamblaje de ellas como se ha explicado anteriormente obteniendo el modelo final de la Figura 38. En esta se observa como el mecanismo de la suspensión Monopivote está formado por cuatro barras, donde una de ellas es el amortiguador trasero.

4.2.2 Horst link

Para el modelado de la bicicleta con suspensión trasera Horst Link se usa el modelo de suspensión de la bicicleta Ghost Lector Pro Team [4] de la Figura 39. En este modelo a diferencia del anterior, la suspensión está en posición horizontal y la vaina está dividida en dos piezas.

Figura 39. Bicicleta Ghost Lector Pro Team

Como se ha citado anteriormente, se mantienen las medidas del cuadro anterior aunque se cambian los acoples de la amortiguación al cuadro (ver Figura 40) adaptándose al nuevo sistema de suspensión.

Las medidas de las piezas del mecanismo de cuatro barras de la suspensión (Figura 41) se cogen de la Figura 39 a escala.

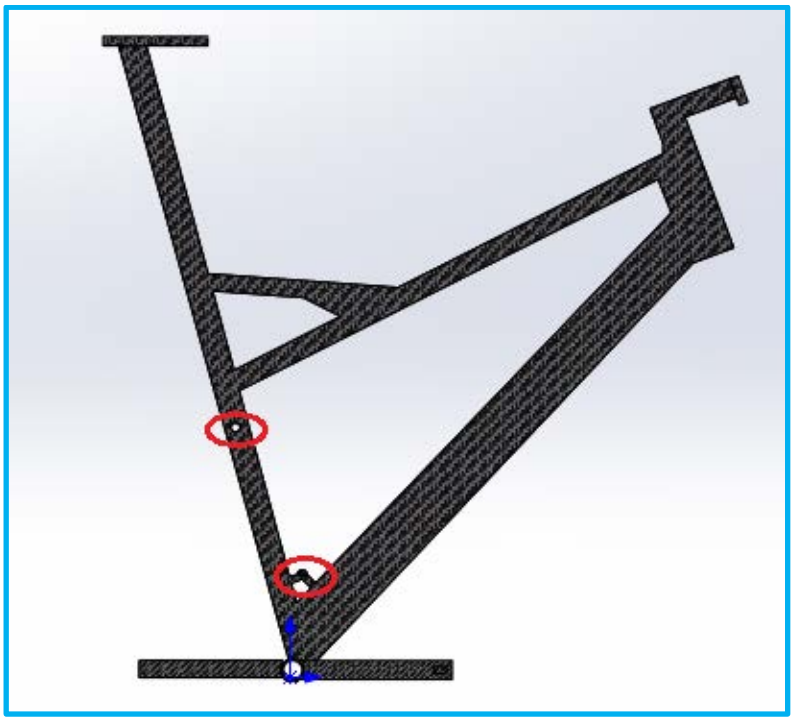

Figura 40. Acoples de la suspensión Horst Link

Este sistema de suspensión tiene como piezas características: una pieza triangular que conecta el amortiguador trasero con el tirante y el cuadro; el tirante; y la vaina. En este tipo de suspensión la vaina se “rompe”, es decir la articulación entre tirante y vaina no está en el centro de la rueda sino que se sitúa en la vaina como se puede apreciar en la figura Figura 41.

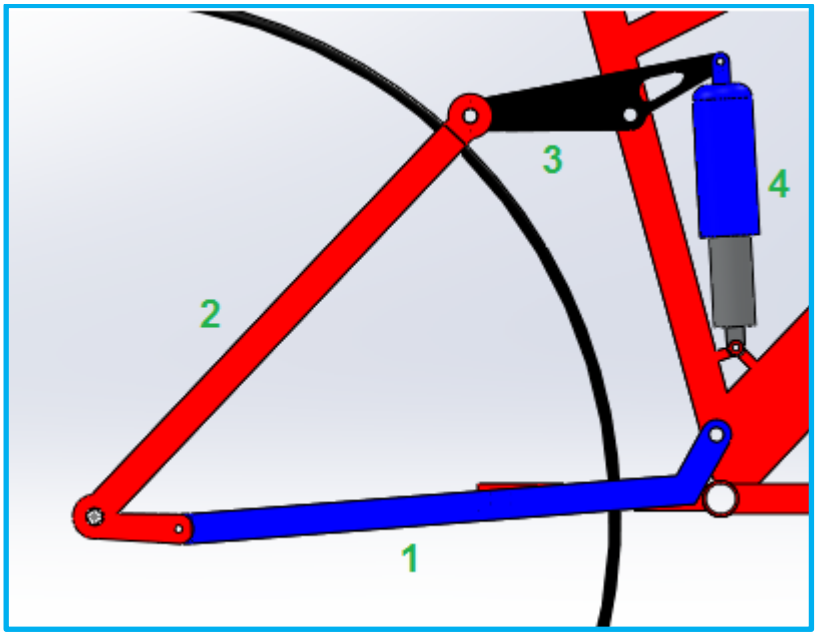

Figura 41. Detalle de la articulación de la vaina

El modelo final se ve en la Figura 42:

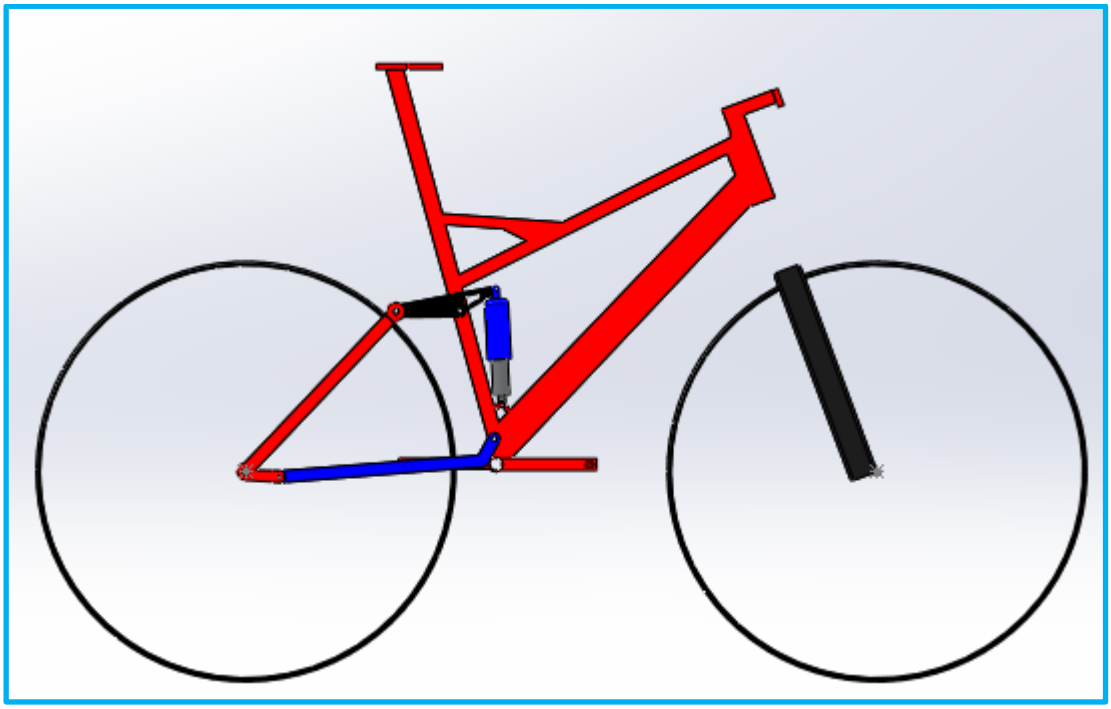

Figura 42. Modelo final de la bicicleta con suspensión Horst Link

4.2.3 Active Bracking Pivot (ABP)

Para el modelado de la bicicleta con suspensión trasera ABP lo único que se hace es cambiar la articulación entre vaina y tirante, situándola en el centro de la rueda trasera como se puede ver en la Figura 43 (al igual que en la suspensión monopivote articulado), el resto es igual que el modelo horst link.

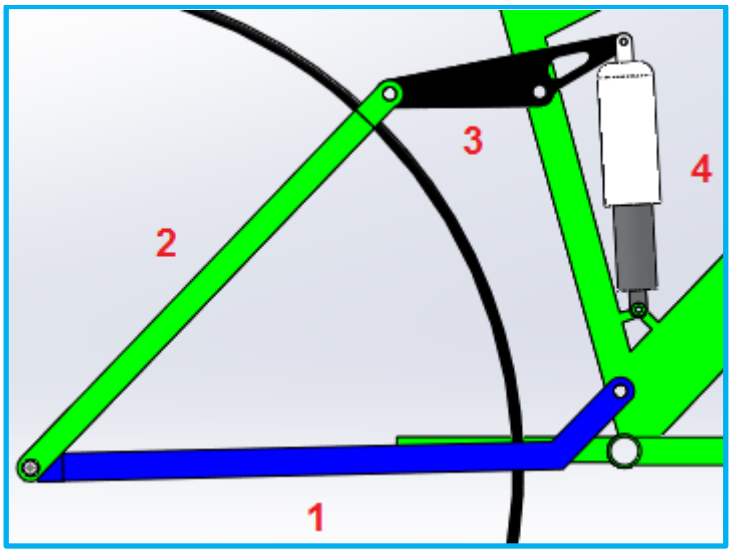

Figura 43. Detalle de la articulación en el centro de la rueda trasera

El modelo final es el de la Figura 44:

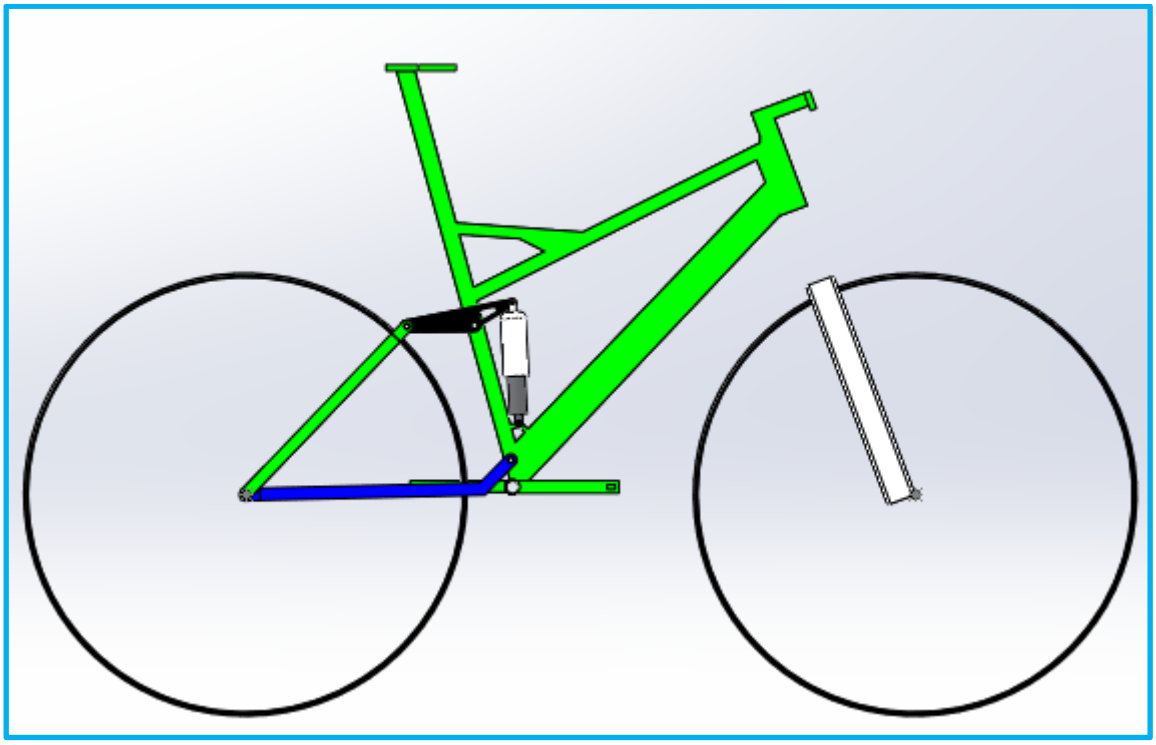

Figura 44. Modelo final de la bicicleta con suspensión trasera ABP

4.3 Modelado del ciclista

Tras el diseño de los modelos de bicicletas de doble suspensión se diseña el cuerpo del ciclista que va subido en los distintos tipos de bicicletas que se han diseñado. Este tiene una masa de 70 kg y una altura de 170cm.

4.3.1 Modelado de las partes del ciclista

Para el diseño del ciclista, se dibujan primero cada una de las partes del cuerpo. Para obtener las medidas correctas de cada parte según la altura del cuerpo, se utiliza la Figura 45 con los parámetros de los segmentos corporales [9].

Para obtener las dimensiones de cada segmento corporal se multiplica el valor de cada segmento que se ve en la figura, por la altura de nuestro ciclista (170 cm).

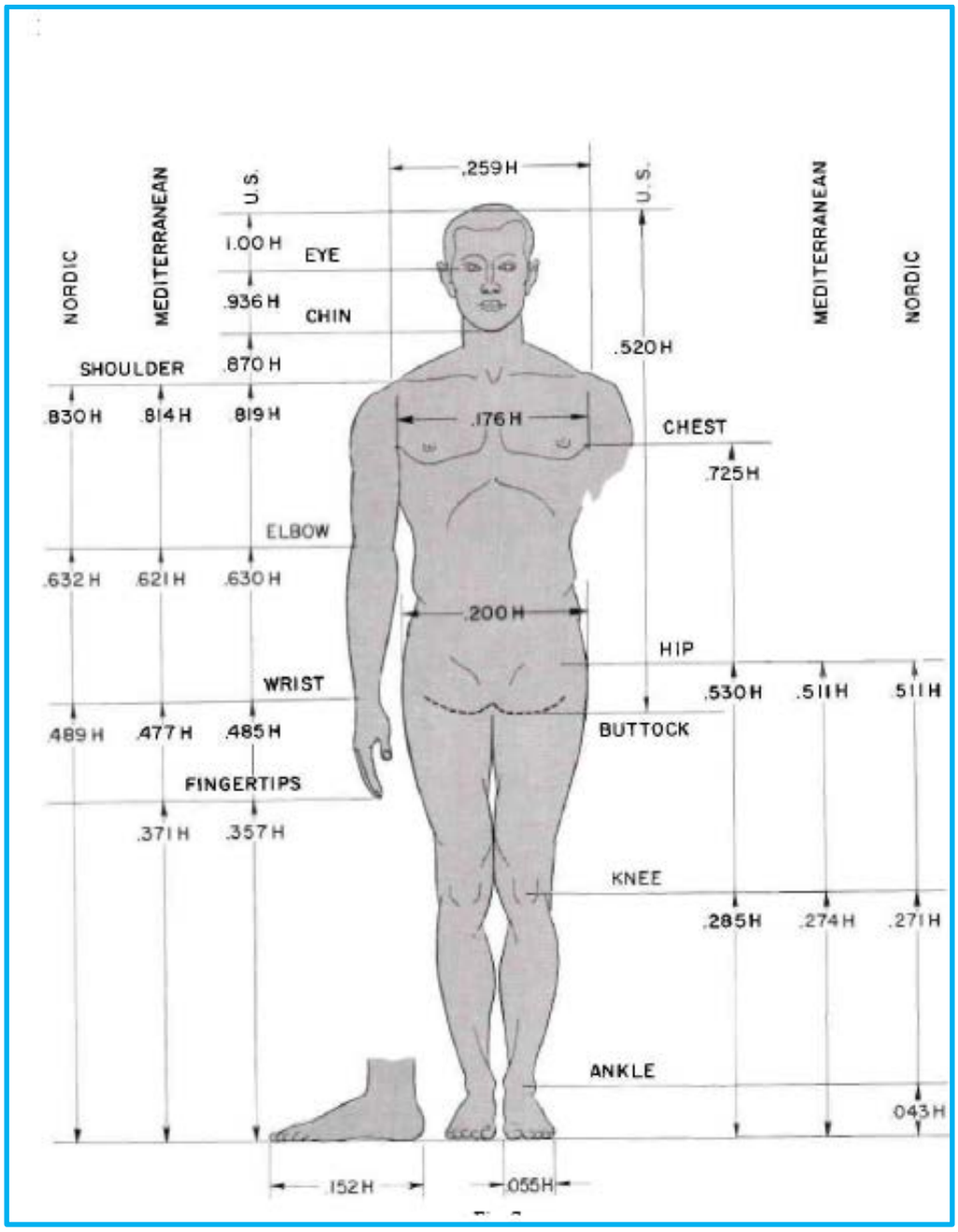

Figura 45. Parámetros de segmentos corporales de un hombre según su altura[9]

Posteriormente, para obtener las masas y centros de gravedad (que se necesitan luego en la simulación en SimMechanics) de cada parte del cuerpo según su altura, se utiliza la Tabla 3 [1].

Tabla 3. Parámetros de los segmentos del cuerpo humano [1]

Nombre segmento	Puntos finales	Masa segmento/masa total	Centro de masa/longitud segmento	
		(P)	*(distancia cercano a cabeza)*	*(distancia lejano a cabeza)*
Mano	Muñeca a metacarpiano III	0.0065	0.1802	0.8198
Antebrazo	Codo a muñeca	0.0161	0.3896	0.6104
Brazo	Hombro a muñeca	0.0263	0.5130	0.4870
Antebrazo y brazo	Hombro a muñeca	0.0227	0.6258	0.3742
Pie	Talón a punta del dedo más largo	0.0147	0.4485	0.5515
Pie	Tobillo a planta del pie	0.0147	0.4622	0.5378
Pierna	Rodilla a tobillo	0.0435	0.3705	0.695
Muslo	Cadera a rodilla	0.1027	0.3719	0.6281
Pierna y pie	Rodilla a planta del pie	0.0582	0.4747	0.5253
Extremidad inferior	Cadera a planta del pie	0.1610	0.3821	0.6179
Tronco	Cuello a cadera	0.5070	0.3803	0.6197
Tronco y cabeza	Parte superior cabeza a cadera	0.5801	0.5921	0.4079

Para obtener la masa de cada parte del cuerpo, se utiliza la masa del segmento del cuerpo dividido entre la masa total del cuerpo columna (masa segmento/masa total); por tanto, se multiplica la masa del ciclista (70 kg) por este valor y se obtiene la masa de la parte del cuerpo correspondiente.

Y para obtener el centro de gravedad de cada parte del cuerpo, se utiliza el centro de masas dividido por la longitud del segmento de la articulación próxima al centro del cuerpo; con esto, se multiplica la longitud de la parte del cuerpo del ciclista (anteriormente calculada mediante la Figura 45) por este valor y se obtiene el centro de masas del segmento del cuerpo.

Una vez obtenidas las dimensiones de cada parte del cuerpo se dibujan en SolidWorks: el tronco (que incluye la cabeza), un antebrazo, un brazo, una mano, dos muslos, dos gemelos y dos pies. La razón por la cual solo se ha dibujado un brazo, es que como se simula el modelo en 2D y las manos tienen las mismas coordenadas x e y, basta con dibujar solo un brazo que tenga luego el doble de masa.

Sin embargo, en cuanto a los pies, como no estarán apoyados en los pedales en la misma posición, si se dibujan los dos. Se podría haber optado por dibujar solo un pie apoyado en el centro de pedalier, pero para generar un modelo más real (ya que el pedal nunca estaría en el centro de pedalier) se ha elegido dibujar los dos pies.

4.3.2 Ensamblaje de las partes del ciclista

Para el ensamblaje de piezas se realizan las mismas operaciones realizadas anteriormente para el ensamblaje de la bicicleta. Mediante relaciones de posición se hace concéntrica y coincidente cada extremidad, obteniendo el modelo final del ciclista de la Figura 46.

Figura 46. Modelo final del cuerpo del ciclista en SolidWorks

Para finalizar, se realiza el anclaje del ciclista a la bicicleta. Para ello se ha utilizado la operación relaciones de posición. El ciclista ira de pie en la bici (lo cual quiere decir que no ira apoyado en el sillín de la bicicleta), por tanto los apoyos serán la mano al manillar, y los pies a los pedales.

Para el anclaje de la mano al manillar (Figura 47), se hace coincidente la mano a la base del manillar (para anclarlo en el eje y) y a una arista del manillar (para anclarlo en el eje x).

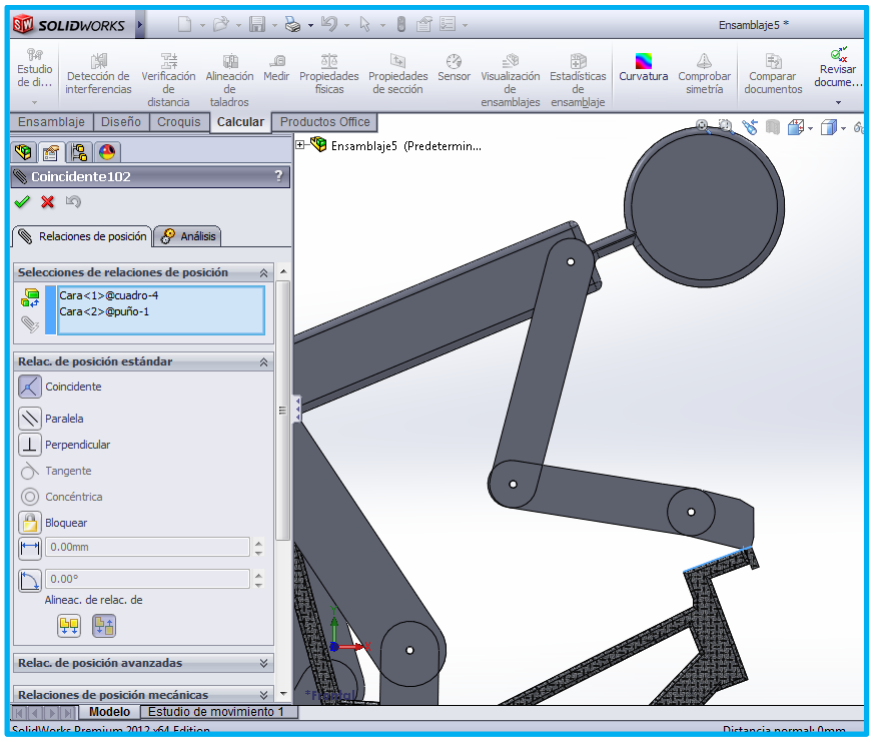

Figura 47. Anclaje de la mano al manillar

Y para el anclaje de los pies (Figura 48), la cala de cada pie (al dibujar el pie, se le dibujo un rectángulo que representa el anclaje que se utiliza actualmente a los pedales) se hace coincidente al pedal por tres caras para restringir el movimiento en los tres planos.

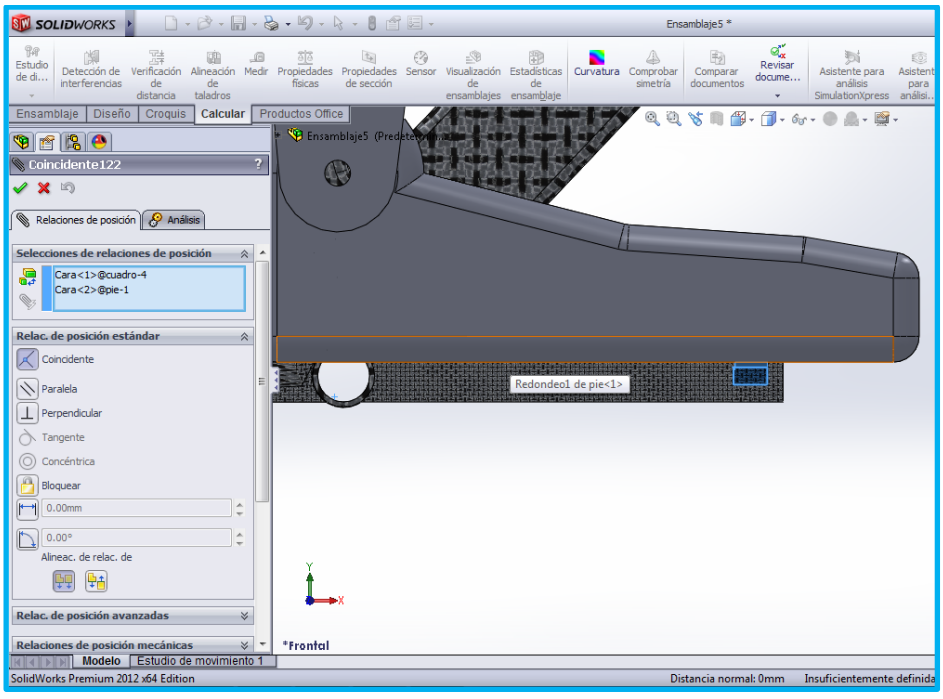

Figura 48. Anclaje del pie al pedal

Así, se obtiene el modelo final como el de la Figura 49, del ciclista subido en la bicicleta para cada una de los distintos modelos de suspensión modelados.

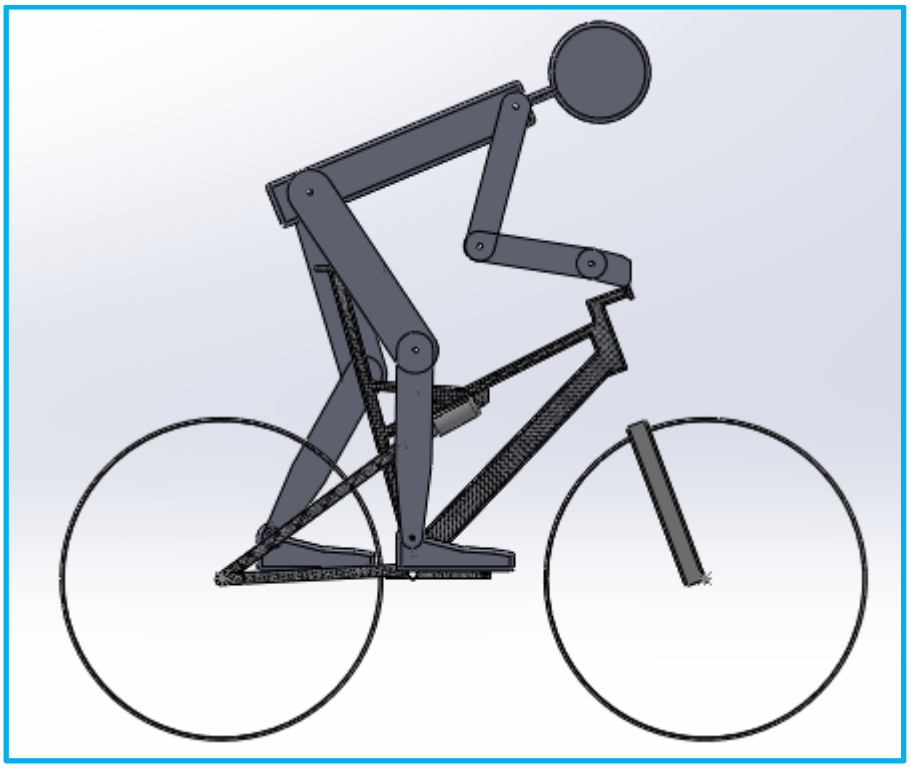

Figura 49. Modelo final del ciclista anclado a la bicicleta con suspensión trasera Monopivote

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN EN SIMMECHANICS 2011

5.1 Introducción

El programa que se ha utilizado para el modelado y simulación de la bicicleta ha sido Simulink (Figura 50). Simulink es una plataforma para simulación multidominio y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos y embebidos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de librerías de bloques personalizables que permiten diseñar, simular, implementar y probar una gran variedad de sistemas con variación temporal, entre los que se incluyen sistemas de comunicaciones, control, procesado de señales, vídeo e imagen.

Figura 50. Icono Simulink

SimMechanics contiene herramientas para el modelado tridimensional de los sistemas mecánicos en el entorno Simulink. En lugar de derivar ecuaciones y programación, puede utilizar esta herramienta de simulación de sistemas multicuerpo para construir un modelo compuesto de cuerpo, las articulaciones, limitaciones, y los elementos de fuerza que refleja la estructura del sistema. Genera automáticamente una animación 3-D le permite visualizar la dinámica del sistema. Puede importar modelos completos con masa, la inercia, la restricción, y la geometría en 3-D a partir de varios sistemas CAD.

La ventaja de utilizar este software de simulación es que permite realizar el análisis matemático y, en la mayoría de los casos, poder obtener importantes deducciones de una forma eficaz y rápida. Otra ventaja de este programa de simulación es que su complejidad no aumenta a medida que se añaden más grados de libertad, cosa que no sucede con el análisis matemático.

SimMechanics simula la acción dela gravedad por defeco sobre los cuerpos que forman el sistema mecánico, el cual es representado en esta herramienta mediante bloques

Utilizamos SimMechanics para modelar los bloques mecánicos, y luego los bloques de Simulink, para modelar acciones sobre estos bloques mecánicos (como por ejemplo el perfil de la carretera).

5.2 Conexión SolidWorks 2012 – SimMechanics

SimMechanics puede generar un diagrama de bloques que simule un sistema mecánica a partir de un ensamblaje realizado con un software CAD.

Para simular en SimMechanics el sistema mecánico que forma la bicicleta se ha utilizado el ensamblaje diseñado con el software SolidWorks 2012. Para ello se ha utilizado un complemento de SimMechanics llamado SimMechanics Link que permite crear archivos de extensión XML para el modelado físico y STL para la visualización a través de un ensamblaje realizado con un software CAD. XML es un metalenguaje (lenguaje que se utiliza para hacer referencia a otros lenguajes) que se utiliza como un estándar para el intercambio de información estructurada entre diferentes plataformas.

STL es un tipo de archivo que utiliza una malla de pequeños triángulos sobre las superficies para definir la forma de un objeto.

A partir de estos archivos SimMechanics genera un modelo que simula físicamente el sistema mecánico mediante un diagrama de bloques, y visualmente mediante Machine for model, con el cual se observa el ensamblaje inicial del cual se ha partido.

5.3 Configuración de los modelos exportados

Una vez que se ha exportado el modelo de SolidWorks a SimMechanics hay que revisarlo de posibles errores o bloques que sobren ya que suelen aparecer bloques Cylindrical que hay que cambiar por Revolute.

Se añaden en los dos Prismatic de las suspensiones el bloque Joint Spring & Damper para simular la rigidez y amortiguación de las suspensiones. La Tabla 4 contiene los valores de rigidez y amortiguación de las suspensiones [10].

Tabla 4. Valores de rigidez y amortiguación de las suspensiones [10]

	Rigidez (N/m)	C (N*s/m)
Suspensión delantera	6740	581
Suspensión trasera	47358	2191

El otro parámetro que se indica en el bloque Joint Spring & Damper es el Spring Offset (longitud natural del muelle) que en este caso es cero tanto como la suspensión delantera como trasera, ya que está modelada la longitud

previamente en SolidWorks (Figura 51).

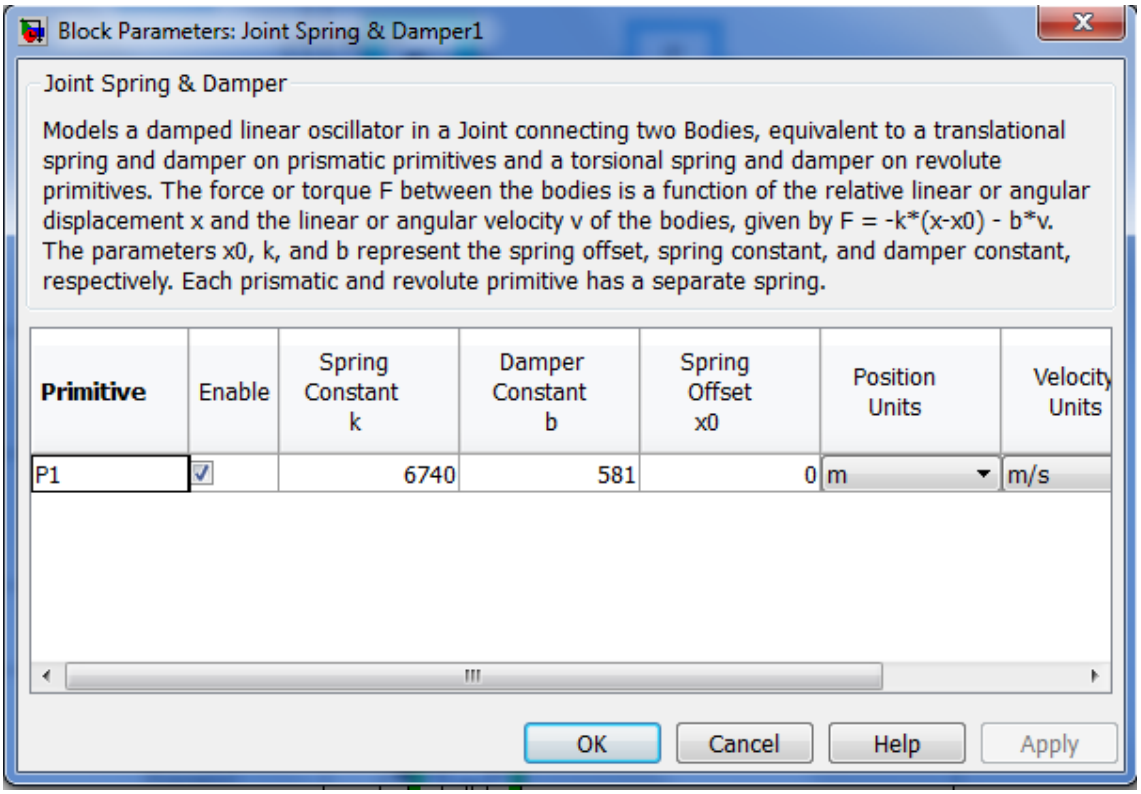

Figura 51. Parámetros del bloque Joint Spring & Damper para la suspensión delantera

Otro aspecto que se modifica es que, como en el modelado de SolidWorks la bicicleta se dejo libre en el espacio (explicado en el apartado 4.2), al exportar el modelo no aparece anclada. Por tanto hay que elegir el anclaje a tierra (con el bloque Ground) que es el perfil del neumático de las dos ruedas, que está en contacto con el suelo. Esto se hará después en el modelado del subsistema del desplazamiento del neumático (tanto trasero como delantero) y por eso se deja en los bloques Body de ambas rudas el CSs (correspondiente al centro de ambas ruedas) preparado para conectarle después el perfil de la carretera. Por tanto los modelos de los tres tipos de bicicletas que quedan por el momento son:

- **Monopivote articulado:**

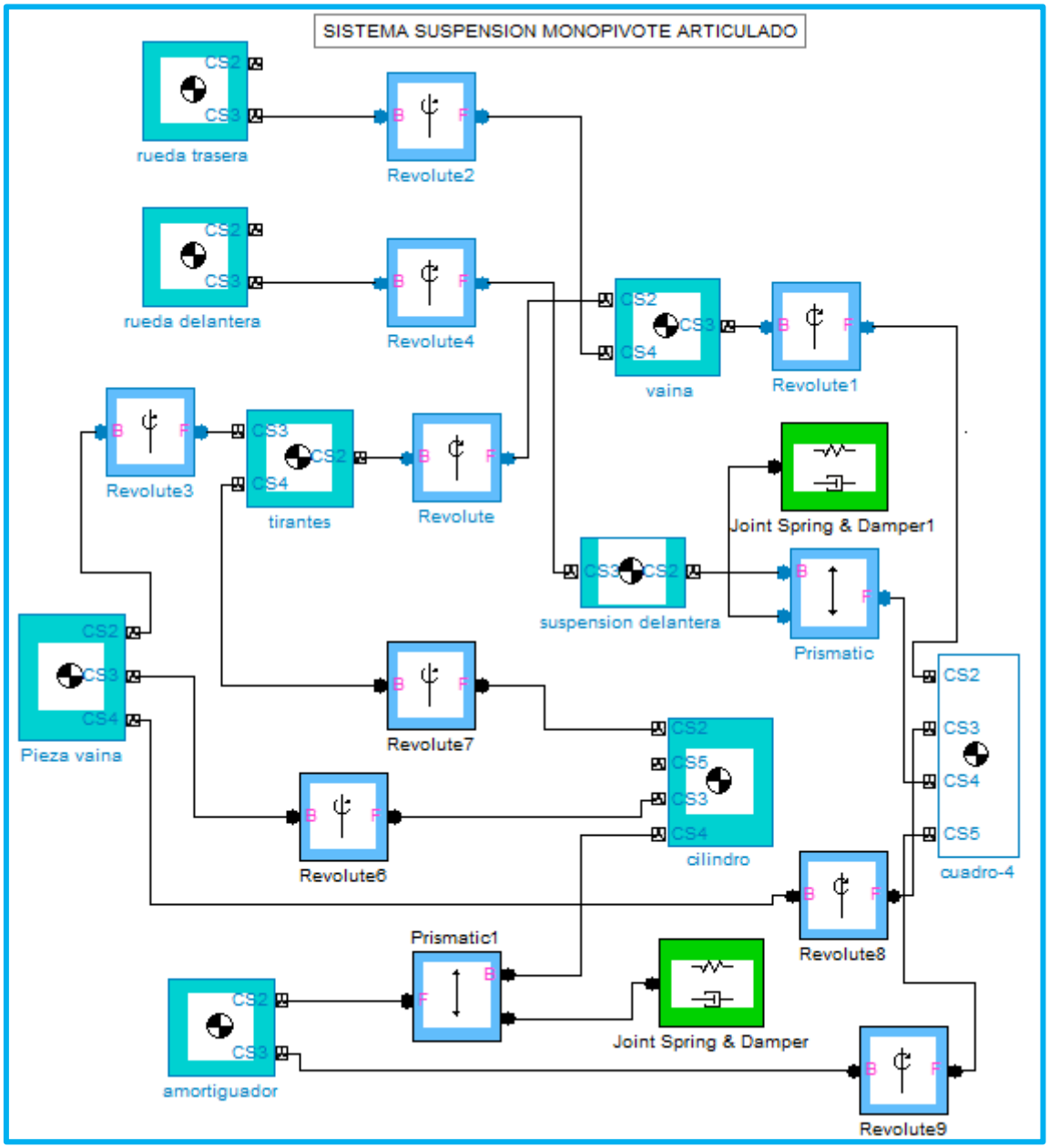

Figura 52. Bloques del modelo de bicicleta Monopivote articulado

- **Horst Link:**

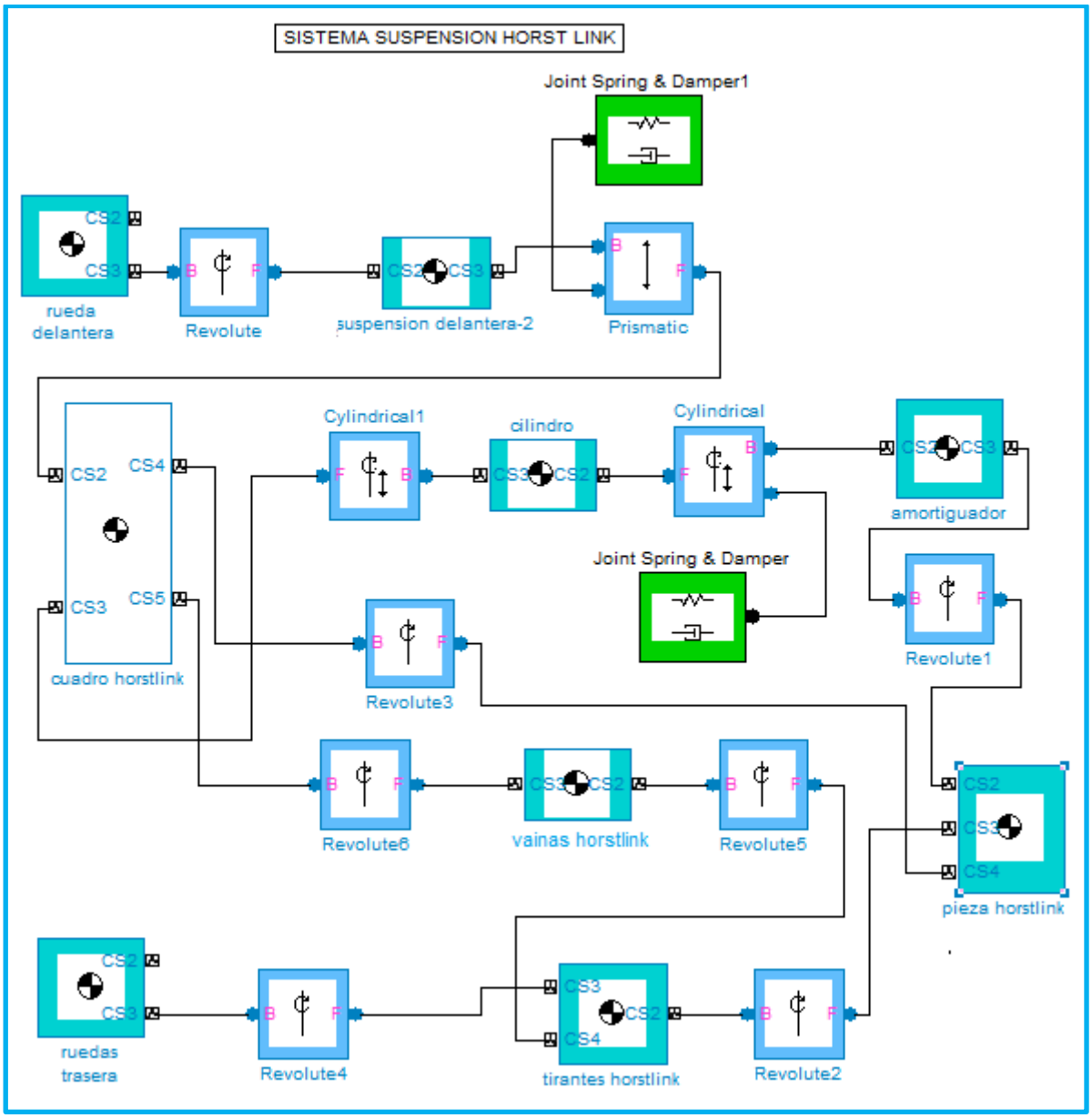

Figura 53. Bloques del modelo de bicicleta Horst Link

- **Active Bracking Pivot (ABP):**

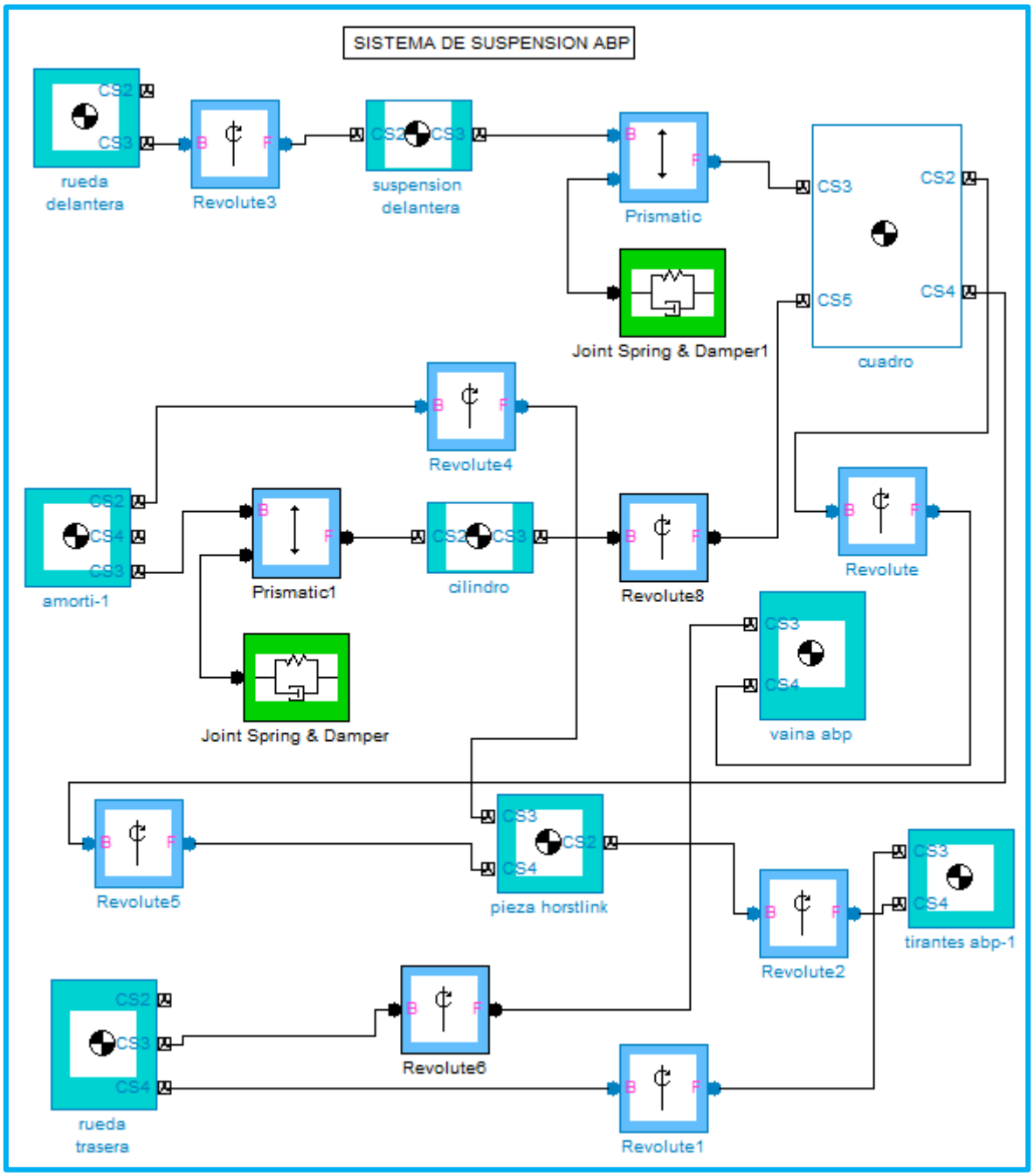

Figura 54. Bloques del modelo de bicicleta ABP

5.3.1 Configuración de parámetros de los bloques

Los parámetros de los bloques Body (masa, inercia, CG, CSs y Orientation vector) se establecen en SimMechanics como variables que se definen en un archivo m-file de Matlab. También el eje de acción de las dos prismáticas de las suspensiones (delantera y trasera) se establece como variables definida en el m-file.

Para establecer el Orientation vector (vector de orientación) se hace mediante el cambio de matriz de orientación:

World = [cos(a) sin(a) 0; -sin(a) cos(a) 0; 0 0 1]

siendo a, el ángulo de cambio de la matriz de orientación en rad.

Para indicar que dos cuerpos están unidos por un mismo punto, una vez definimos ese punto (CSs) en un cuerpo (Body), no hace falta volver a definirlo en el otro cuerpo sino que se selecciona Adjoining (en Translated from origen of) y la posición del vector [0 0 0]. Con esto se le indica a SimMechanics que traslade el origen de coordenadas del punto (CSs) al origen del sistema de coordenada del cuerpo al que está unido (por una junta) [12].

5.3.2 Configuración del subsistema cuerpo del ciclista

Una vez exportado el modelo de SolidWorks a SimMechanics y revisado de posibles errores o bloques que sobren, se procede a la incorporación de nuevos bloques para terminar de definir el modelo del cuerpo del ciclista.

Se añaden en rodillas, cadera, hombro, codo y muñeca, el bloque Joint Spring & Damper para simular la rigidez y amortiguación de las articulaciones del ciclista (ver Figura 55). Los valores de rigidez y amortiguación [10] se representan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de rigidez y amortiguación para las articulaciones del ciclista [10]

	K (N*m/rad)	C (N*m*s/rad)
Rodilla izquierda	273.5	5.47
Rodilla derecha	273.5	5.47
Codo derecho	117.5	9.58
Codo izquierdo	117.5	9.58

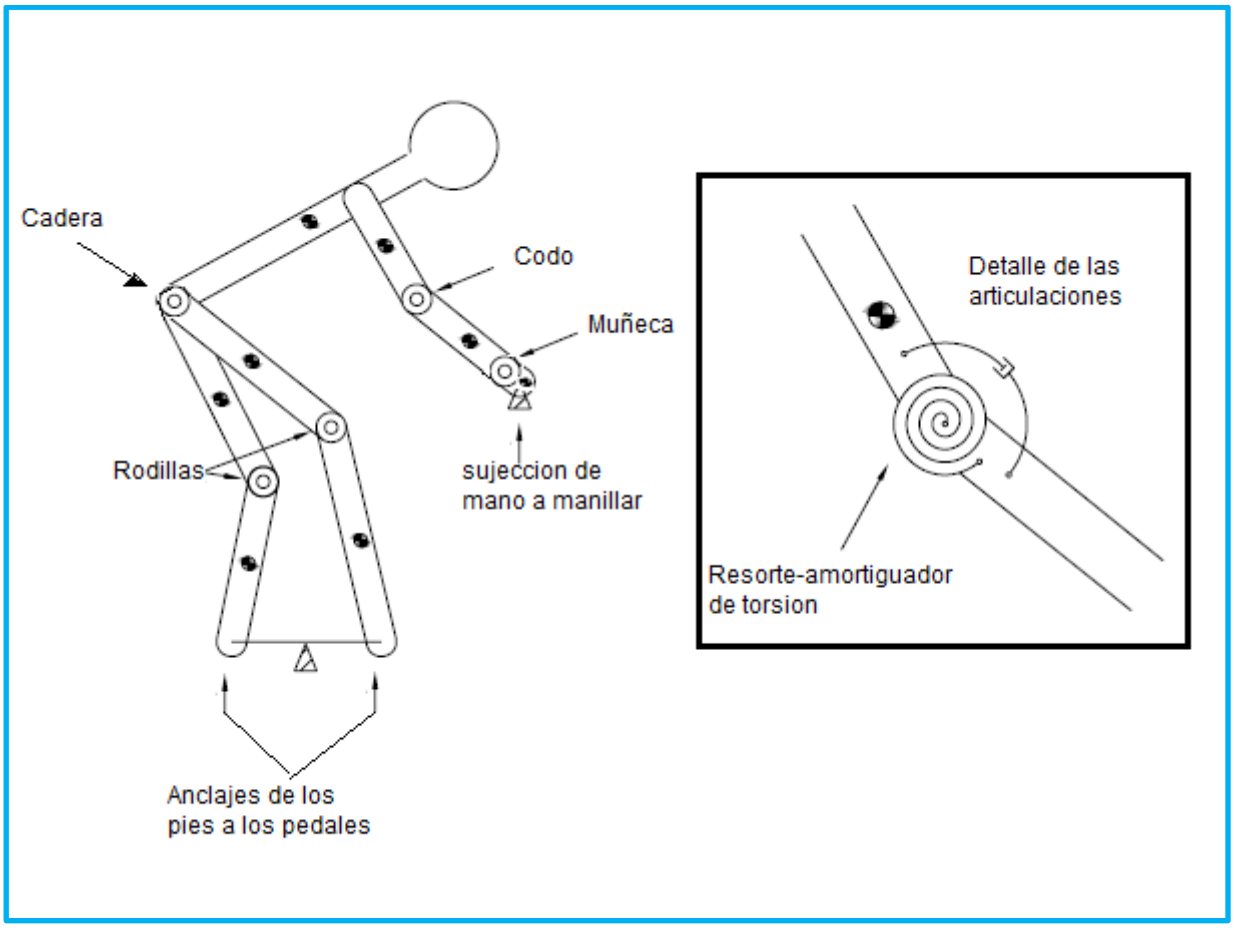

Figura 55. Articulaciones y anclajes del ciclista

La rigidez y amortiguación de los tobillos se desprecia al tomarse como un apoyo y no una articulación, ya que se mantienen rígidos cuando el ciclista va subido en la bicicleta.

Se añaden también al modelo un Body sensor (conectado al centro de gravedad del bloque tronco y cabeza) junto a un scope para poder representar la variación de posición del centro de gravedad del cuerpo del ciclista frente al perfil de la carretera (véase en la Figura 57).

Y por último se conectan los pies y la mano del ciclista al cuadro de la bicicleta (ver Figura 56) mediantes boques soldadura (Weld) para simular los apoyos del ciclista en la bicicleta. Las posiciones de los CSs (CS7, CS8 Y CS9) de los puntos de apoyo las obtenemos de SolidWorks. Una vez hecho esto se señala todos los bloques pertenecientes al cuerpo del ciclista y se crea el subsistema final de la Figura 57.

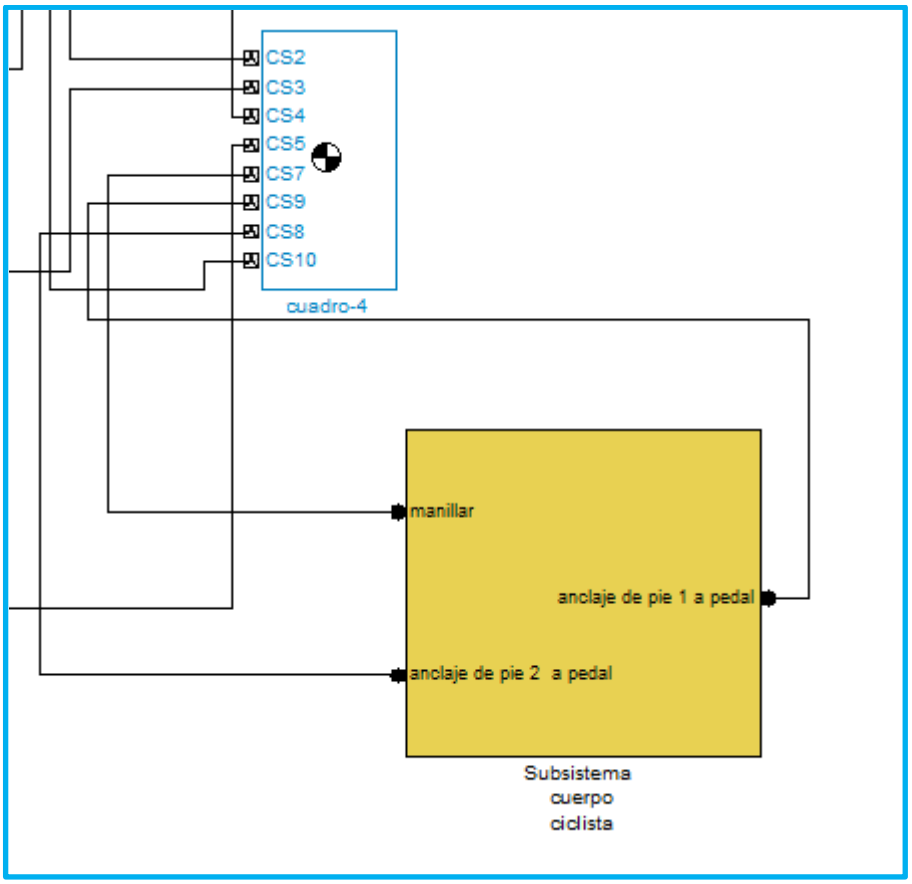

Figura 56. Conexión del subsistema cuerpo del ciclista a la bicicleta

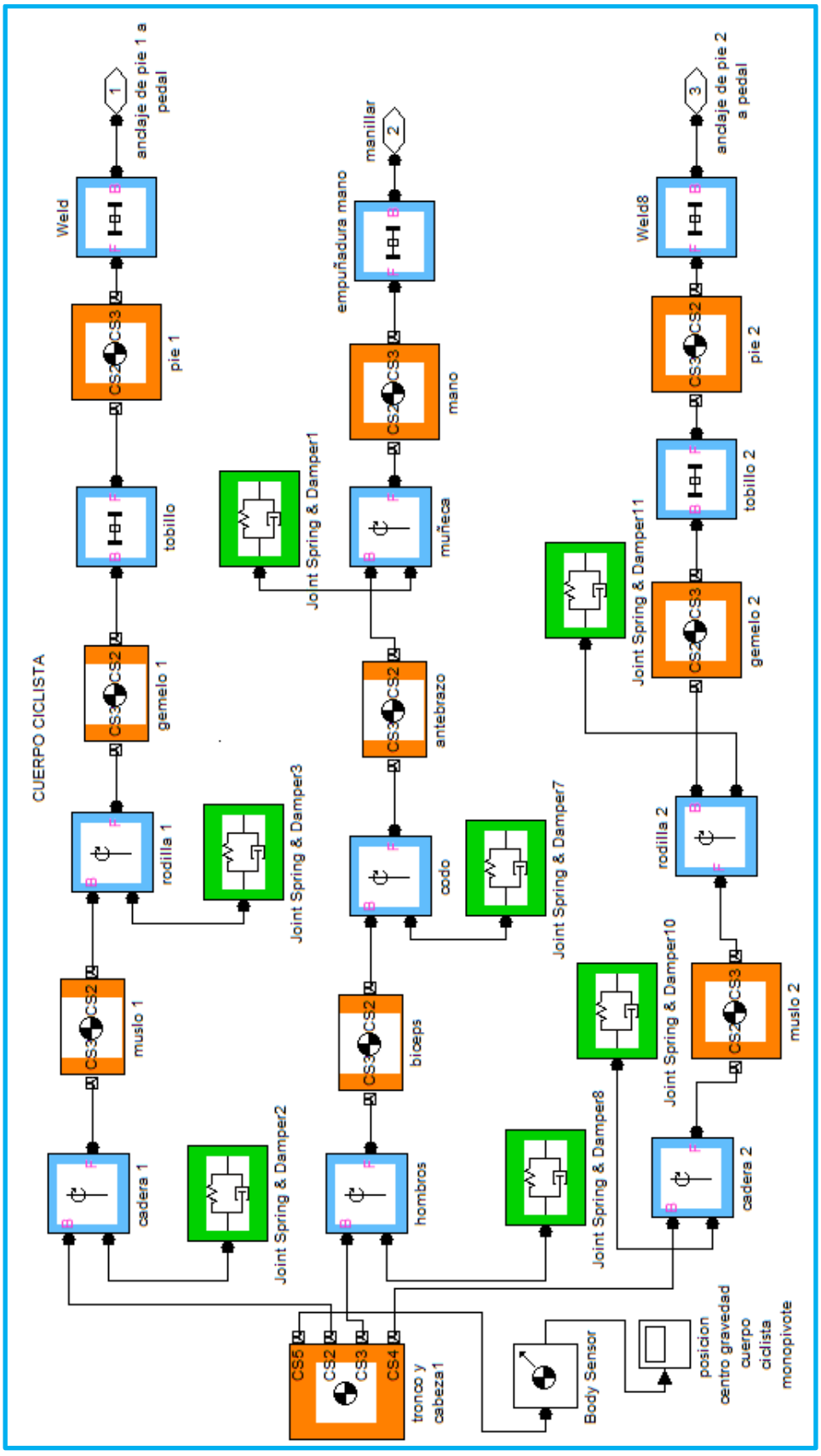

Figura 57. Subsistema cuerpo del ciclista

CAPÍTULO 6

MODELADO EN SIMMECHANICS 2011

6.1 Modelado del perfil de la carretera

El modelado del perfil de la carretera se realiza mediante dos subsistemas que simulan el desplazamiento vertical del perfil del neumático delantero y trasero de la bicicleta, y un subsistema con el desplazamiento del perfil de la carretera, como se observa en la Figura 58.

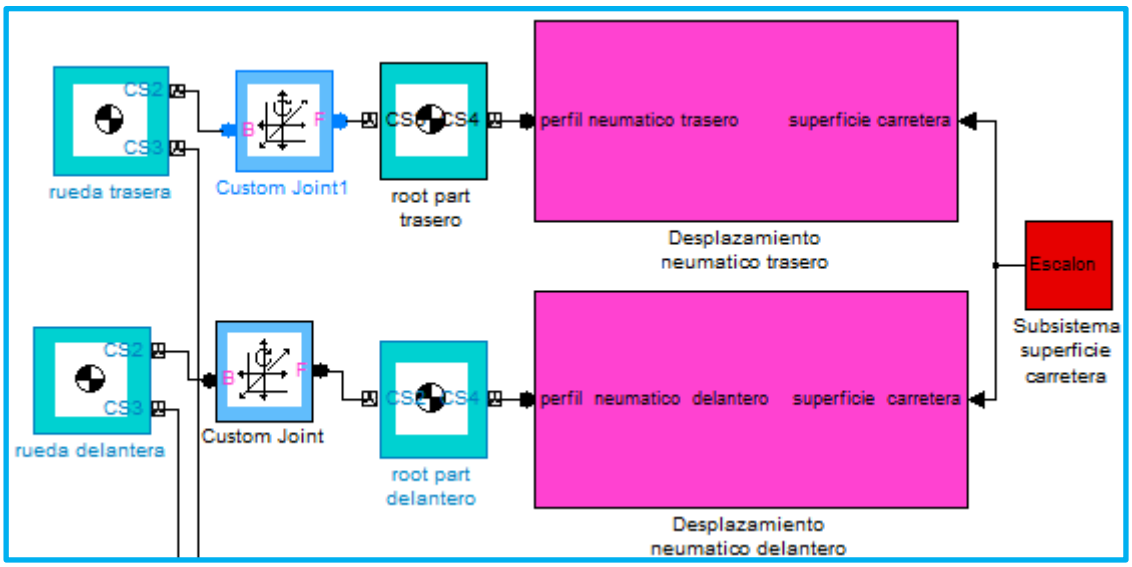

Figura 58. Bloques para la simulación del efecto de un perfil de carretera en la bicicleta

6.1.1 Subsistema desplazamiento perfil neumático delantero

En este subsistema se representa, a partir de la llanta del neumático de la bici, todos los elementos de unión de la suspensión hasta la superficie de la carretera (ver Figura 59).

Primeramente, se ha situado una unión universal (centro rueda) junto a un cuerpo ficticio de masa cero que representa la llanta (root part delantero), y tras la llanta una unión prismática que representa el perfil del neumático. Es necesario en SimMechanics dividir en dos las unión es para permitir el libre movimiento de la suspensión. A la unión universal se conecta un sensor para obtener la carga sobre a rueda en una gráfica mediante el scope.

Por un lado el movimiento horizontal y lateral de la suspensión se permite con la unión universal mientras que, por otro lado, el movimiento vertical de la suspensión es permitido por la junta prismática.

La unión prismática es la encargada tanto de proporcionar los datos para simular el comportamiento del neumático por medio del bloque sensor, como

de recibir el valor de fuerza obtenido en la simulación del resorte que simula el neumático mediante un actuador.

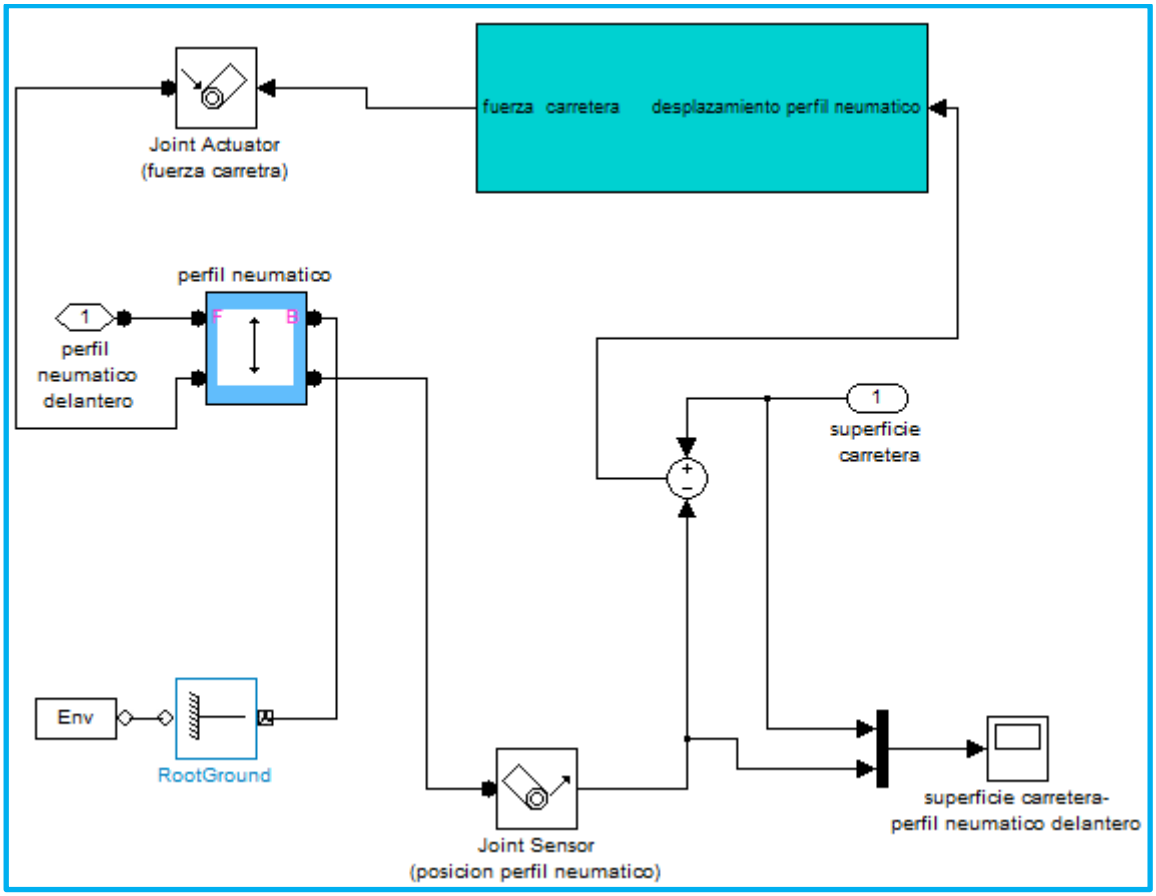

Figura 59. Subsistema desplazamiento del perfil del neumático delantero

Por medio de un selector, se tienen los posibles perfiles de carretera y será el usuario el que elija uno de ellos para realizar la simulación. Una vez seleccionado el perfil de la carretera deseado, se tendrá a la salida del selector una señal que modelará la superficie de la carretera. Por otro lado, mediante un sensor se obtienen los datos de a posición en coordenadas relativas del neumático en cada instante de tiempo.

La diferencia entre la señal que simula la superficie de la carretera y, la señal obtenida mediante el sensor de la unión, es el desplazamiento del perfil neumático.

Por tanto, para simular el comportamiento del neumático, se simula un resorte que, siguiendo la ley $F = K * X$, usara este desplazamiento del perfil neumático como X y se multiplica por la constante de rigidez del neumático. Así

se obtiene un valor de fuera que se aplica en la junta prismática por medio de un actuador.[8]

Se han despreciado para la simulación los efectos de amortiguamiento del neumático por ser estos muy pequeños en comparación con los efectos elásticos.

Se representa en una gráfica, la posición de la superficie de la carretera frente a la posición del perfil del neumático, conectando ambas salidas a un scope, para visualizar el hundimiento del neumático sobre el terreno (debido a la rigidez de este). Esto simula como de inflado estaría el neumático, y poder ver si se producirá la colisión de la llanta con el terreno, si el neumático tiene poca rigidez (el conocido “llantazo” que produce el pinchazo de la rueda). Esto es muy útil ya que se podrá jugar con la rigidez del neumático para conseguir un mayor amortiguamiento de este sin que se produzca el “llantazo”. Para este caso se toma como máximo hundimiento del neumático 1 cm debido al peso del ciclista, ya que si nuestra rueda es de 26x2, tendremos un perfil de neumático de 2 pulgadas equivalente a 5.08 cm, por tanto tomando 1 cm de hundimiento nos aseguramos evitar el “llantazo” y tener un aceptable amortiguamiento del neumático (lo que hará que bote menos la bicicleta frente a los obstáculos).

6.1.2 Subsistema fuerza carretera

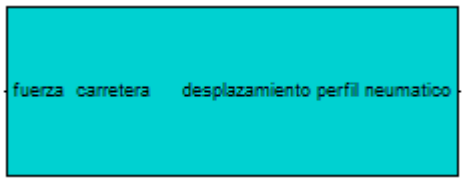

Figura 60. Boque del subsistema fuerza de la carretera

Dado que, cuando el desplazamiento del neumático sea menor o igual que cero no habrá fuerza de la carretera, se crea el subsistema de la Figura 61. En este se indica mediante bloques de Simulink, que si el desplazamiento del neumático es mayor de cero se ejerza la fuerza (multiplicando este por la rigidez del neumático) y sino se ejerza fuerza cero y por tanto la bici caiga libremente por efecto de la gravedad.

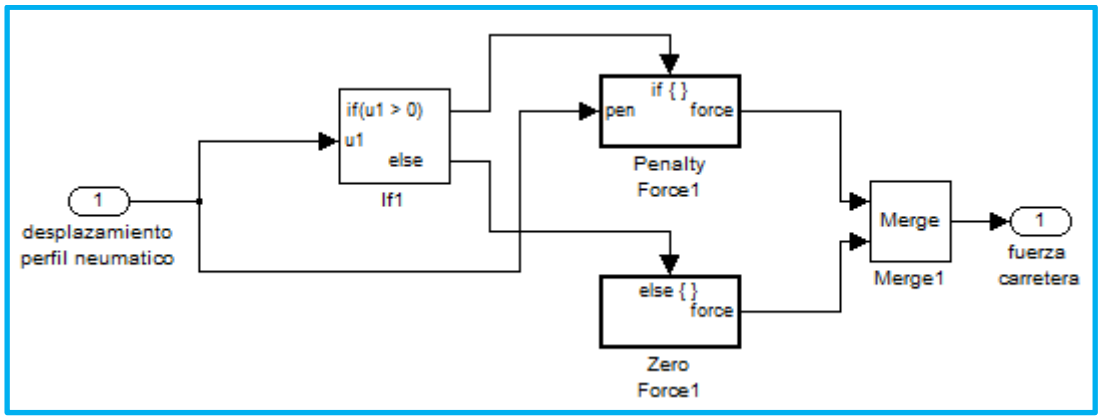

Figura 61. Subsistema fuerza carretera

El valor de rigidez del neumático se indica dentro del bloque fuerza (Figura 62), para el que he elegido 36000 N/m. este valor lo tomamos por lo indicado anteriormente, ya que así conseguiremos que el hundimiento del neumático no sobrepase los 2.5 cm y evitar el "llantazo".

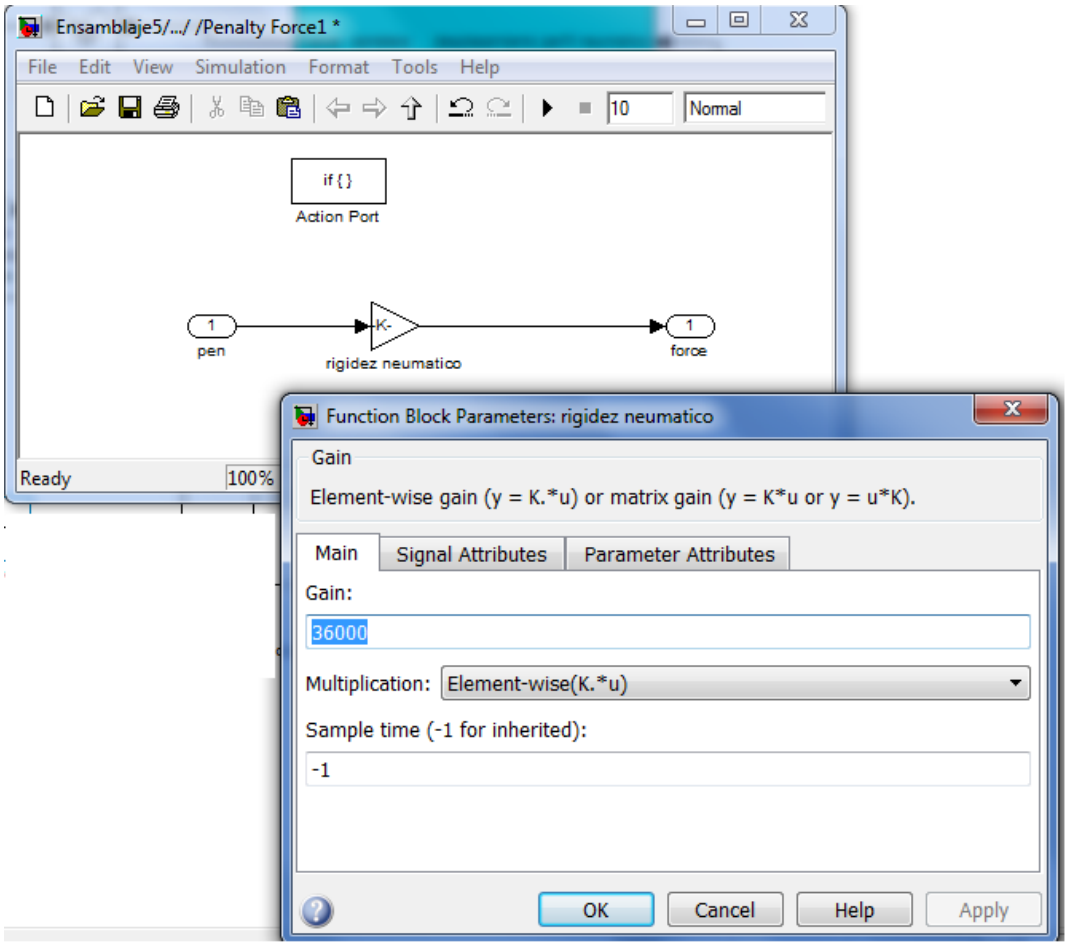

Figura 62.Bloque de Simulink rigidez del neumático

6.1.3 Subsistema desplazamiento perfil neumático trasero

Para el desplazamiento del perfil del neumático trasero se utiliza el mismo subsistema que para el delantero, solo que el neumático trasero cogerá la superficie de la carretera un tiempo después que el delantero según la velocidad a la que vaya la bicicleta.

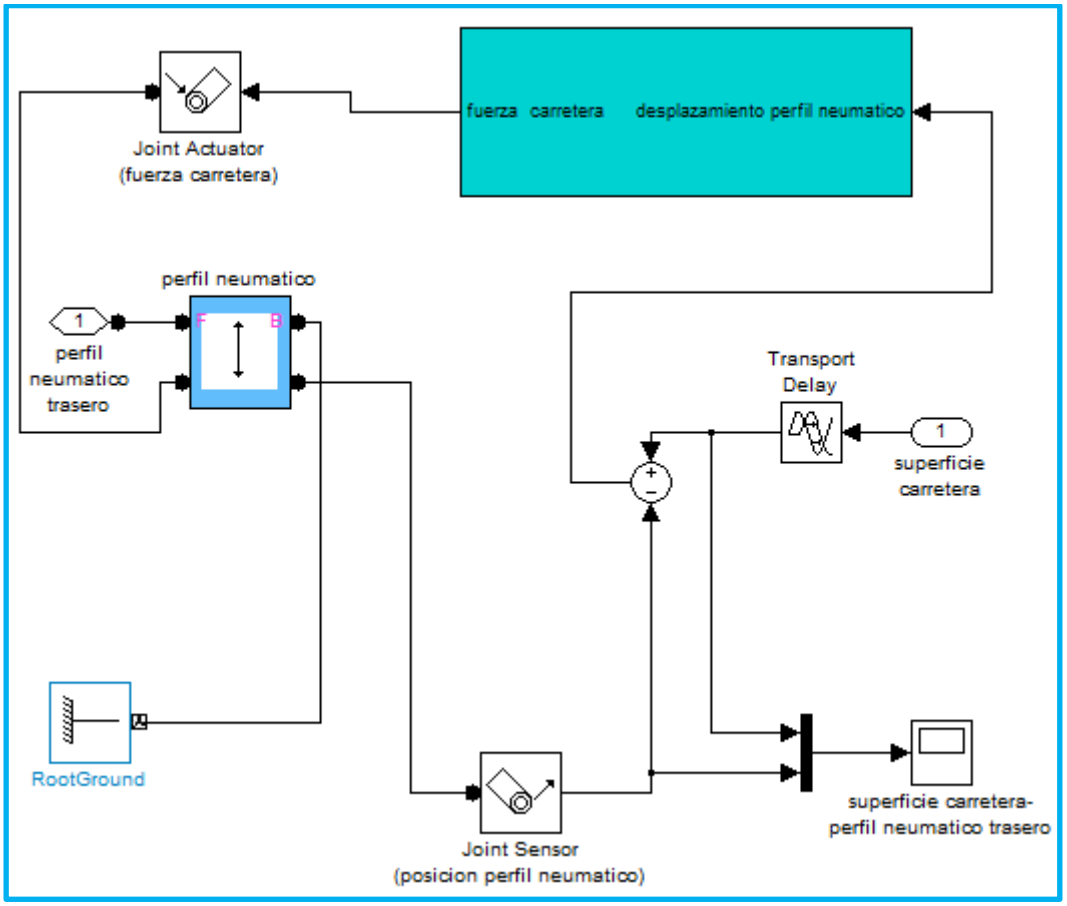

Figura 63. Subsistema desplazamiento del perfil del neumático trasero

Para ello se conecta el bloque de Simulink Transport Delay a la salida de la superficie de la carretera como se puede ver en la Figura 63, con el que se consigue que el neumático trasero coja la superficie de la carretera un tiempo más tarde (que se indicara dentro del bloque) respecto al neumático delantero. Con esto se consigue darle más realidad a la simulación y lo más importante, introducir la velocidad (constante) del ciclista. Para ello mediante la distancia entre ejes de las ruedas de cada bicicleta, y la velocidad (se toma una velocidad constante de 40 km/h en bajada) se calcula el tiempo de retardo de la rueda trasera respecto de la delantera. Por tanto el tiempo de retardo de la rueda trasera respecto de la delantera, para cada modelo de bicicleta a indicar

en el Transport Delay es:

- Monopivote y rígida: para estas dos es el mismo tiempo, al ser el mismo modelo de bicicleta y tener una distancia entre ejes de ruedas de 1.06326 m.

$$Tiempo = \frac{espacio}{velocidad} = \frac{1.06326\ m * (\frac{1km}{1000\ m})}{40\frac{km}{h} * (\frac{1h}{3600\ s})} = \mathbf{0.0957\ s}$$

- Horst Link: este modelo tiene una distancia entre ejes de ruedas de 1.0641351166 m.

$$Tiempo = \frac{espacio}{velocidad} = \frac{1.0641351166\ m * (\frac{1km}{1000\ m})}{40\frac{km}{h} * (\frac{1h}{3600\ s})} = \mathbf{0.0958\ s}$$

- Active Bracking Pivot (ABP): este modelo tiene una distancia entre ejes de ruedas de 1.0641351166 m.

$$Tiempo = \frac{espacio}{velocidad} = \frac{1.06929286\ m * (\frac{1km}{1000\ m})}{40\frac{km}{h} * (\frac{1h}{3600\ s})} = \mathbf{0.096\ s}$$

También indicar que el root part trasero (que representaría el radio de la llanta como se dijo anteriormente) tendrá una masa unidad.

6.1.4 Subsistema superficie carretera

Para simular la superficie de la carretera se utilizan bloques de Simulink con diferentes perfiles con los cuales simularemos el terreno [8]. Mediante un selector (Multiport switch) se puede elegir el tipo de superficie que se necesite. En este caso se ha elegido una secuencia saltos, una superficie ondulada, un escalón, una secuencia de escalones y un terreno abrupto, en los cuales se pueden modificar los valores para variar el terreno. Para esta simulación se utiliza la superficie de carretera salto con un salto de 0.1m, para ver como se comporta la suspensión de nuestra bicicleta.

Este subsistema (Figura 64) se conecta a ambos subsistemas de desplazamiento perfil de los neumáticos de la bicicleta.

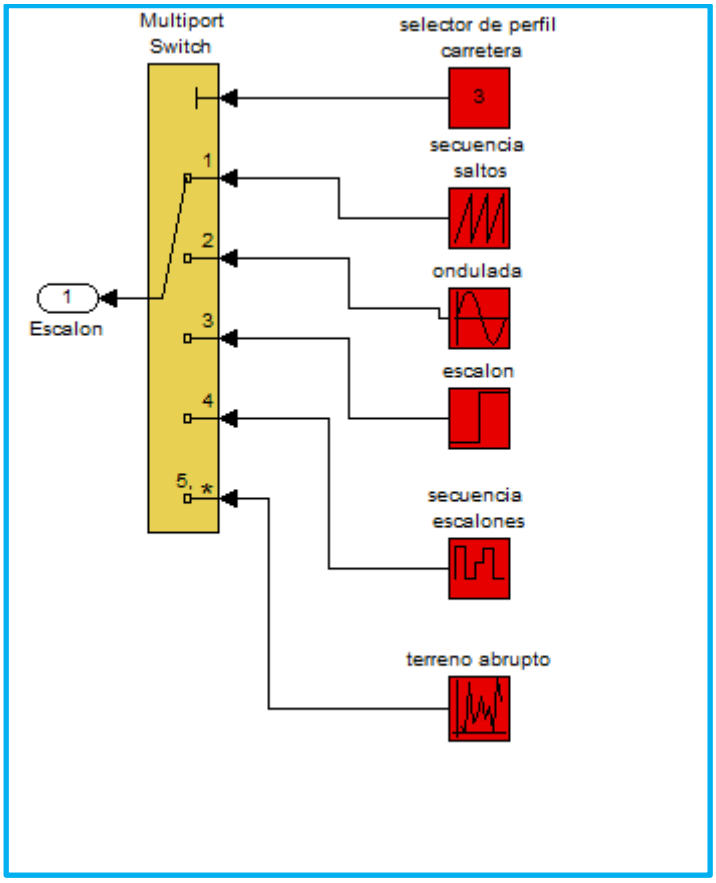

Figura 64. Subsistema superficie carretera

6.2 Modelado del subsistema desplazamiento de la suspensión delantera

Uno de los aspectos a analizar en la simulación es cuanto se comprime la suspensión delantera frente a los distintos perfiles de carretera. Para ello se conecta un sensor de cuerpo (Body sensor) a la pieza suspensión delantera en el punto donde une con el cuadro (CS4). Después en el bloque del sensor de cuerpo, en With respect to CS señalo To Body CS (ver Figura 65). Esto quiere decir medirá respecto al sistema de coordenadas del bloque suspensión delantera (el cual tiene el ángulo de inclinación de la suspensión delantera).

También se desactiva la opción Output selected parameters as one signal (como se indica en la Figura 65) que está activa por defecto, para poder obtener datos de las distancias x, y, z separados, ya que solo interesa la distancia y.

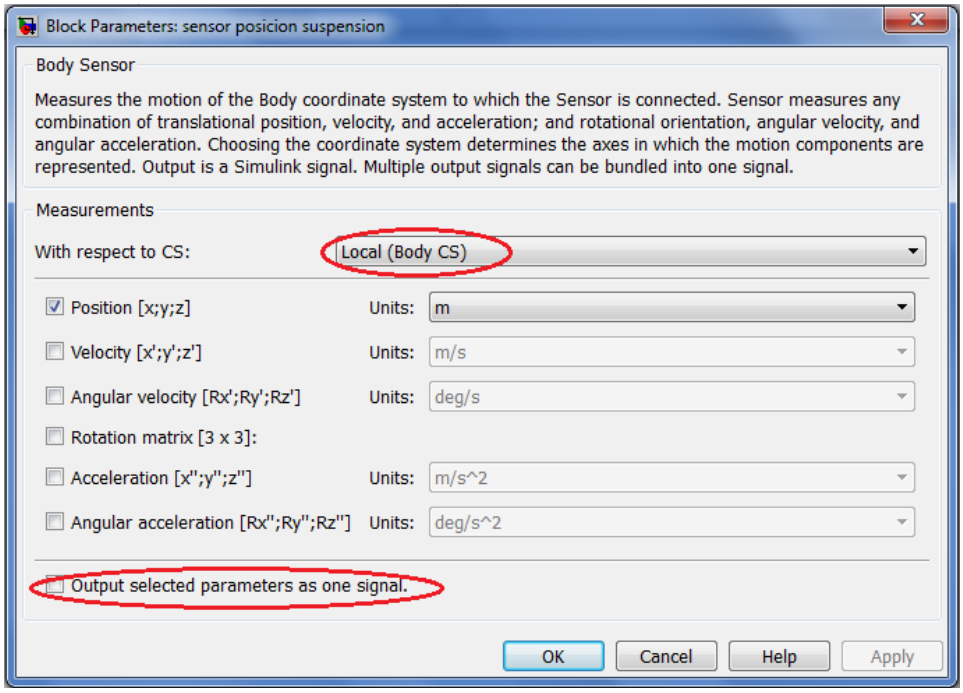

Figura 65. Parámetros del bloque Body Sensor

Con esto se está midiendo la distancia normal al origen del World, del punto de la suspensión delantera (CS4) con la inclinación de la suspensión como se ve en la Figura 66.

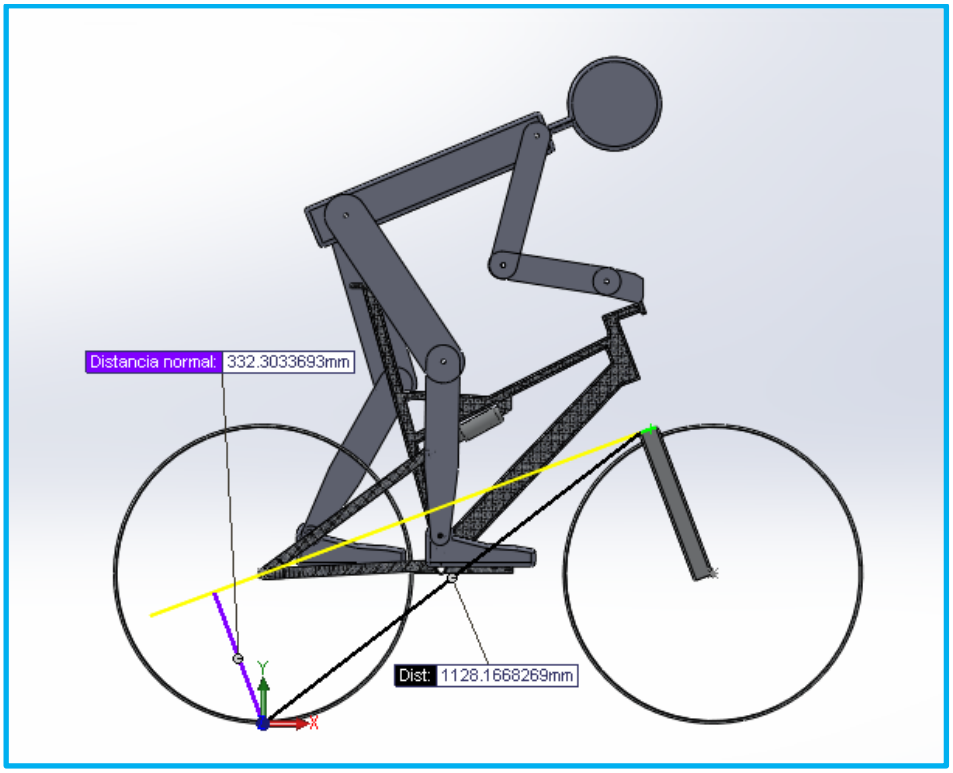

Figura 66. Distancia normal de la horquilla al origen

Una vez hecho esto, en la Figura 67, se conecta el bloque Mux de Simulink para dividir la señal del sensor de cuerpo (x, y, z) señalando en este que tenga 3 salidas (outputs). A continuación se ha conectado otro sensor de cuerpo al punto del cuadro que conecta con la suspensión delantera (CS6), señalando las mismas opciones que antes en el bloque sensor de cuerpo para medir la distancia normal desde el origen del World al CS6 con la inclinación de la suspensión delantera, y conectando otro bloque Mux para obtener las tres señales (x, y, z).

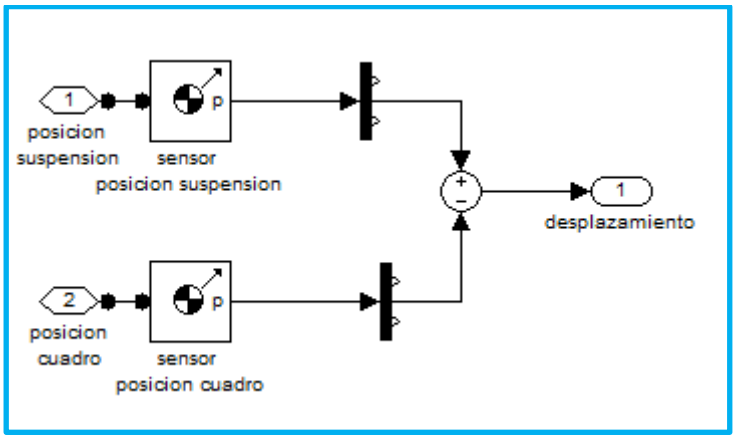

Figura 67. Bloques del subsistema desplazamiento suspensión delantera

Se cogen de ambos bloques Mux las señales del eje (y), que es la segunda salida, y se restan (la distancia del punto del punto de la suspensión delantera menos la del punto del cuadro) para ya así obtener la distancia que se comprime la suspensión delantera. Esta inicialmente será cero ya que los dos puntos al principio de la simulación coinciden.

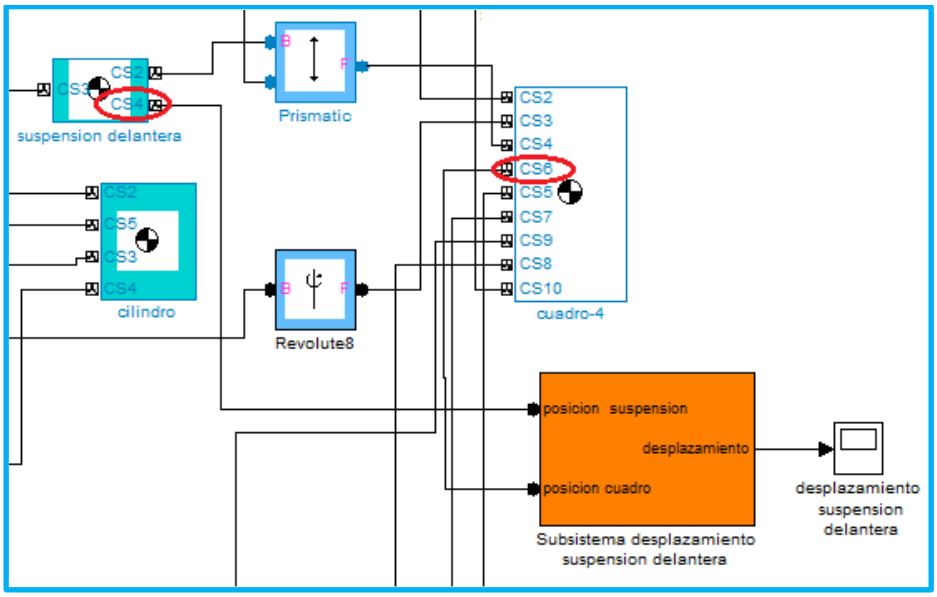

Figura 68. Conexión del subsistema desplazamiento suspensión delantera

Por último se crea el subsistema de la Figura 68 con los bloques creados y se conecta el scope para generar una gráfica con el desplazamiento de la suspensión delantera. Este subsistema es el mismo para los tres tipos de bicicletas de doble suspensión modeladas, ya que las tres tienen la misma horquilla.

6.3 Modelado del subsistema desplazamiento de la suspensión trasera

También se analiza cuanto se comprime la suspensión trasera frente a los distintos perfiles de carretera. Para ello se procede de la misma forma que para el desplazamiento de la suspensión delantera, conectando un sensor de cuerpo (Body sensor) a la pieza cilindro en el punto donde une con el amortiguador (CS5), y otro en la pieza amortiguador en el punto que coincide con el cilindro (CS4), como se puede ver en la Figura 71. Después en el bloque del sensor de cuerpo, en With respect to CS señalo To Body CS, y se desactiva la opción Output selected parameters as one signal que está activa por defecto, para poder obtener datos de las distancias x, y, z separados, ya que ahora la distancia que nos interesa es la el eje (x).

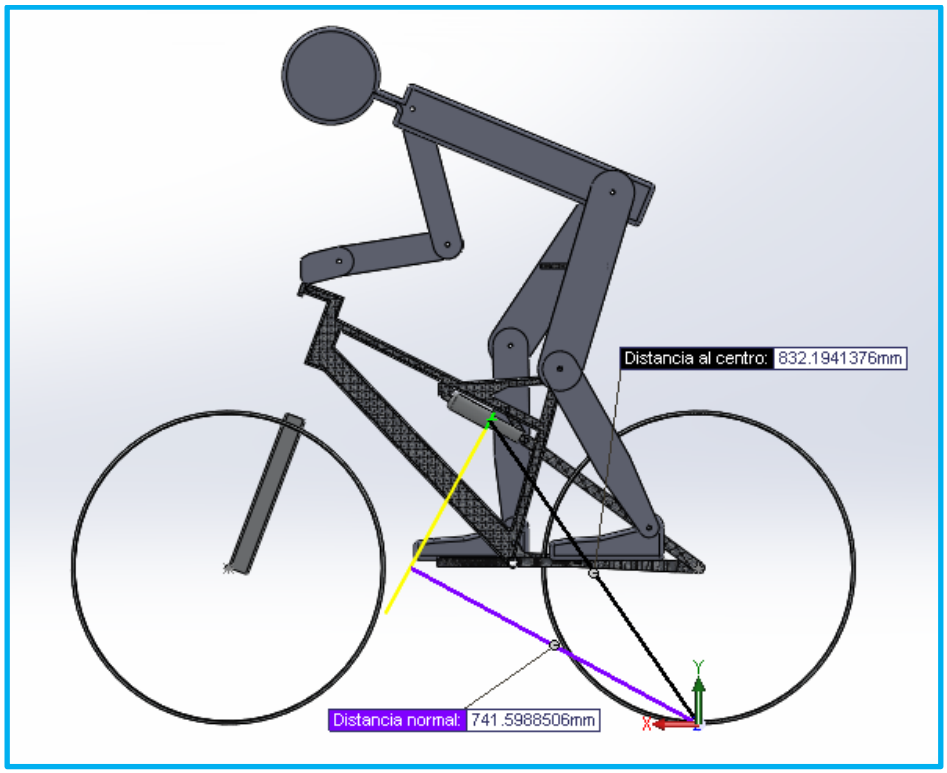

Figura 69. Distancia normal del amortiguador trasero Monopivote al origen

Con esto se está midiendo la distancia normal al origen del World, del

punto de conexión entre cilindro y amortiguador con la inclinación del amortiguador trasero como se ve en la imagen de SolidWorks (ver Figura 69).

Una vez hecho esto, en la Figura 70, se conecta el bloque Mux de Simulink para dividir la señal del sensor de cuerpo (x, y, z) señalando en este que tenga 3 salidas (outputs). Se cogen de ambos bloques Mux las señales del eje (x), que es la primera salida, y se restan (la distancia del punto del punto del pistón (pieza cilindro) menos la del punto del cilindro (pieza amortiguador) para ya así obtener la distancia que se comprime la suspensión trasera. Esta inicialmente será cero ya que los dos puntos al principio de la simulación coinciden.

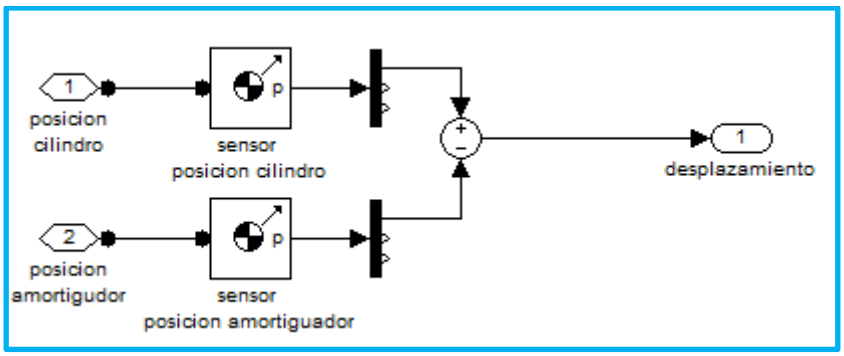

Figura 70. Bloques del subsistema desplazamiento suspensión trasera

Por último, en la Figura 71, se crea un subsistema con los bloques creados y se conecta el scope para generar una gráfica con el desplazamiento de la suspensión trasera.

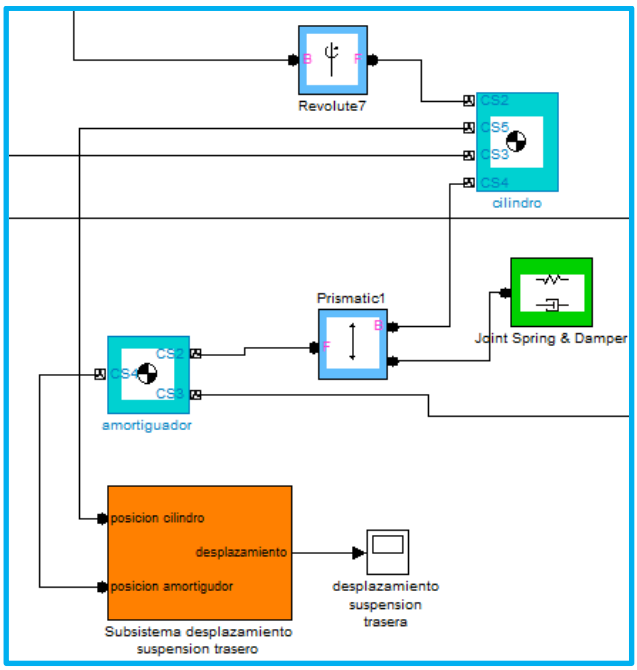

Figura 71. Conexión del subsistema desplazamiento suspensión trasera

Este subsistema sería para el tipo de bicicleta de doble suspensión monopivote. Para los otros dos tipos (horst link y ABP) sería también el mismo subsistema con la única variante de que el bloque de Simulink suma se le cambia el orden de los signos.

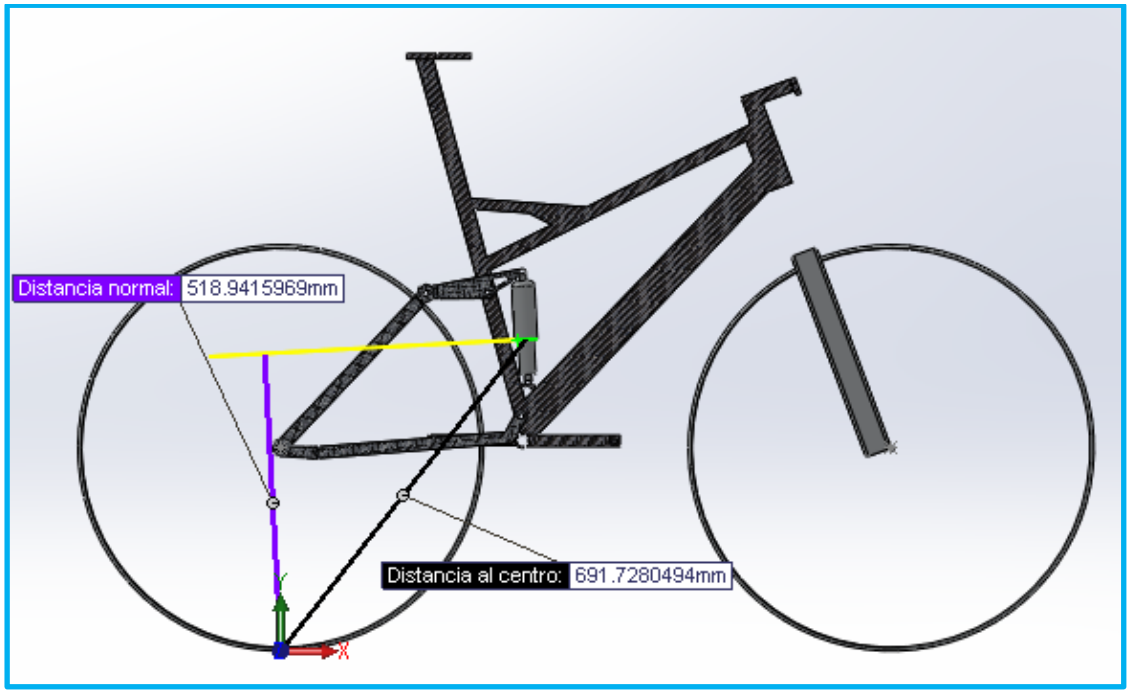

Figura 72. Distancia normal del amortiguador trasero (Horst Link y ABP) al origen

Esto es debido a que como en estos dos tipos de suspensiones el amortiguador trasero está en posición vertical, se gira el sistema de coordenadas (en SimMechanics) el eje (x) que estaría en el lugar del eje (y) del World y con sentido contrario, como se ve en la Figura 72. Con lo cual a la distancia normal de la posición del amortiguador con respecto al origen del World, se le resta la distancia normal del cilindro, y como ambas distancias son negativas (al estar el eje x del amortiguador en sentido contrario al del origen del World) se obtiene la distancia que se comprime el amortiguador trasero.

6.4 Modelado del subsistema variación de longitud de la cadena

Como se explico en el capítulo 3.3.1, la compresión de la suspensión trasera produce un alargamiento (o acortamiento) de la longitud de cadena. Esta longitud de cadena se define como distancia entre el centro del eje de pedalier y el centro del eje de la rueda trasera.

Con esto se hace lo siguiente para obtenerlo del modelo de

SimMechanics:

- Mediante dos Body sensor se obtienen los puntos P1 y P2 de la Figura 73, correspondientes a los centro de rueda trasera y centro de eje de pedalier (este punto lo medimos en el modelo de SolidWorks para cada tipo de bicicleta, y se indica mediante el CS10 en el bloque del cuadro de la bicicleta) y se sacan las coordenadas (x, y) de estos puntos.

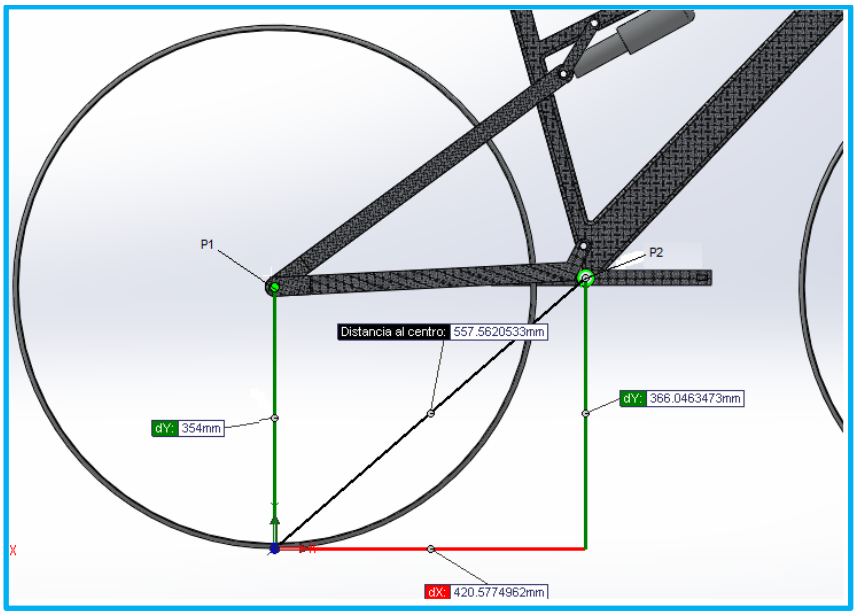

Figura 73. Coordenadas del centro de la rueda traerá y del eje de pedalier en SolidWorks

- Se restan las coordenadas (x, y) de los puntos P1 y P2 para obtener las coordenadas de la longitud de cadena en cada instante de tiempo.

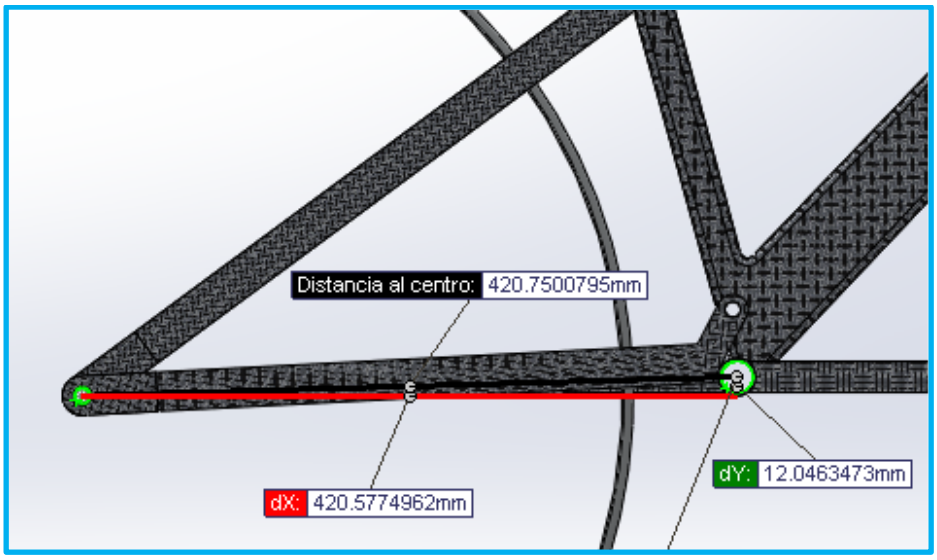

Figura 74. Longitud inicial de la cadena

- Se obtiene el ángulo de inclinación del eje de pedalier respecto al centro

de rueda, mediante el bloque de Simulink atan (arco tangente) de la coordenada (y) entre la coordenada (x).

- Ya con el ángulo se obtiene la distancia entre el eje de pedalier y centro de rueda trasera (lo que corresponde a la longitud de cadena), dividiendo la coordenada (x) entre el coseno del ángulo.

Por último, en la Figura 74, para obtener el alargamiento o acortamiento de cadena se mide en SolidWorks la longitud inicial de cadena para cada tipo de bicicleta, y se le resta a la longitud de cadena calculada para cada instante de tiempo.

El subsistema final que resulta es el de la Figura 75, donde las longitudes iniciales de cadena se indican en el bloque de Simulink constante mediante variables definidas en los m-file de cada tipo de bicicleta.

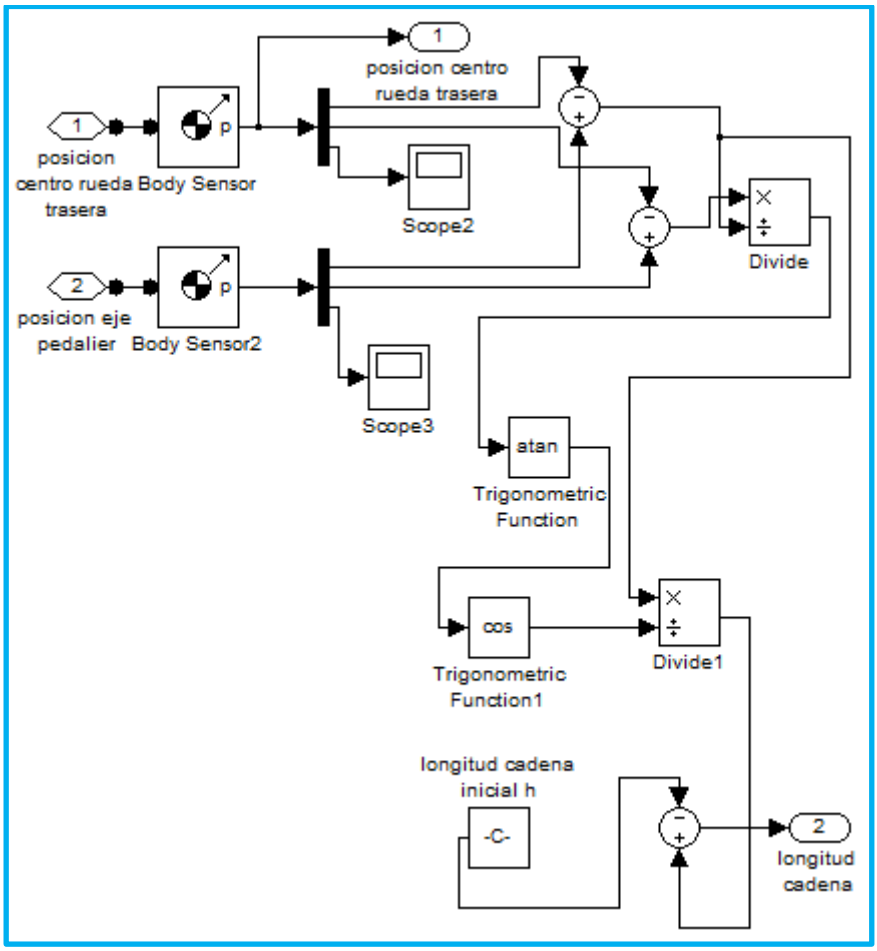

Figura 75. Bloques del subsistema variación de longitud de la cadena

Para representar estos valores de variación de longitud de la cadena, en la Figura 76 se conecta a la salida del subsistema un scope, y a su vez el

bloque de Simulink to Workspace para obtener todos estos valores en el Workspace de Matlab y poder representarlos luego en una gráfica de Matlab con los distintos tipos de suspensión trasera modelados. A su vez también se conecta otro scope a la salida del subsistema para representar la variación de posición del centro de la rueda trasera.

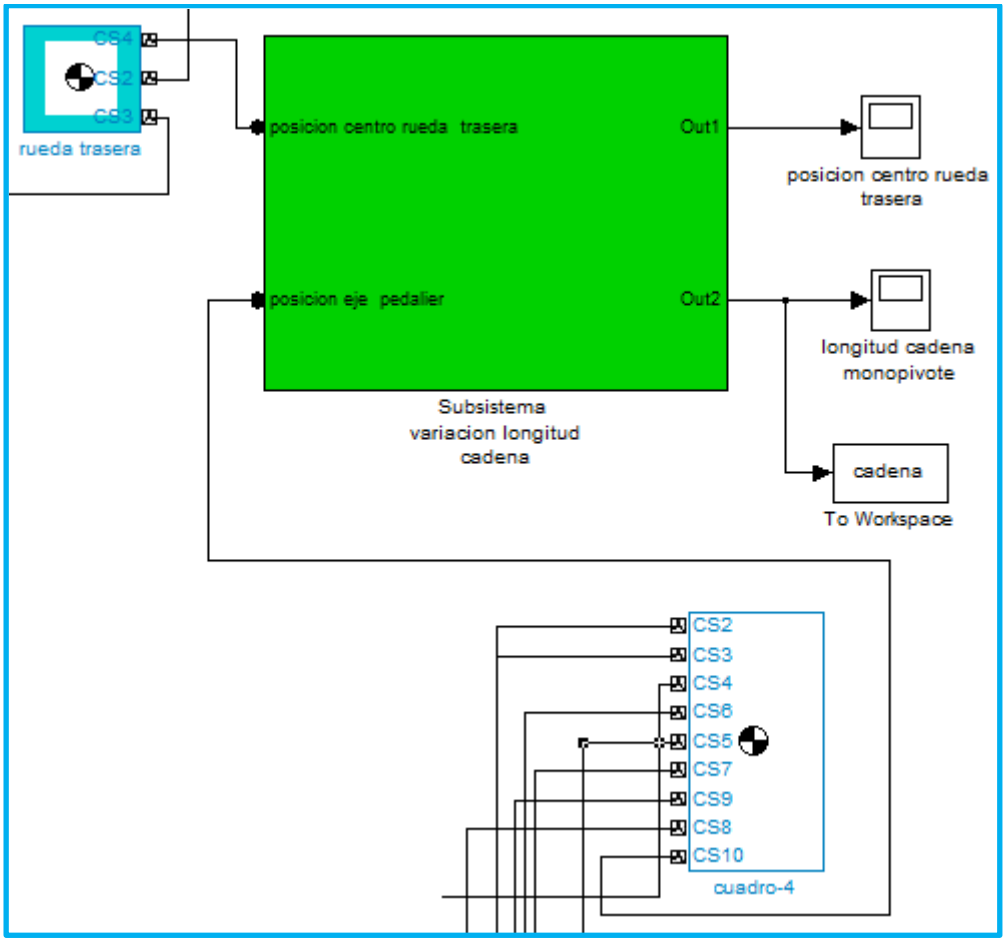

Figura 76. Subsistema variación longitud cadena

6.5 Modelado del bloqueo de suspensiones de la bicicleta (bicicleta rígida)

Para simular la bicicleta rígida se coge el modelo de bicicleta con suspensión trasera Monopivote y se le bloquean las suspensiones delantera y trasera, quitando el bloque Joint Spring & Damper, y sustituyendo la prismática de la suspensión por un bloque soldadura (Weld). Con esto se consigue que la bicicleta se comporte como si no tuviera suspensión alguna y se pueda ver su comportamiento frente al mismo perfil de carretera.

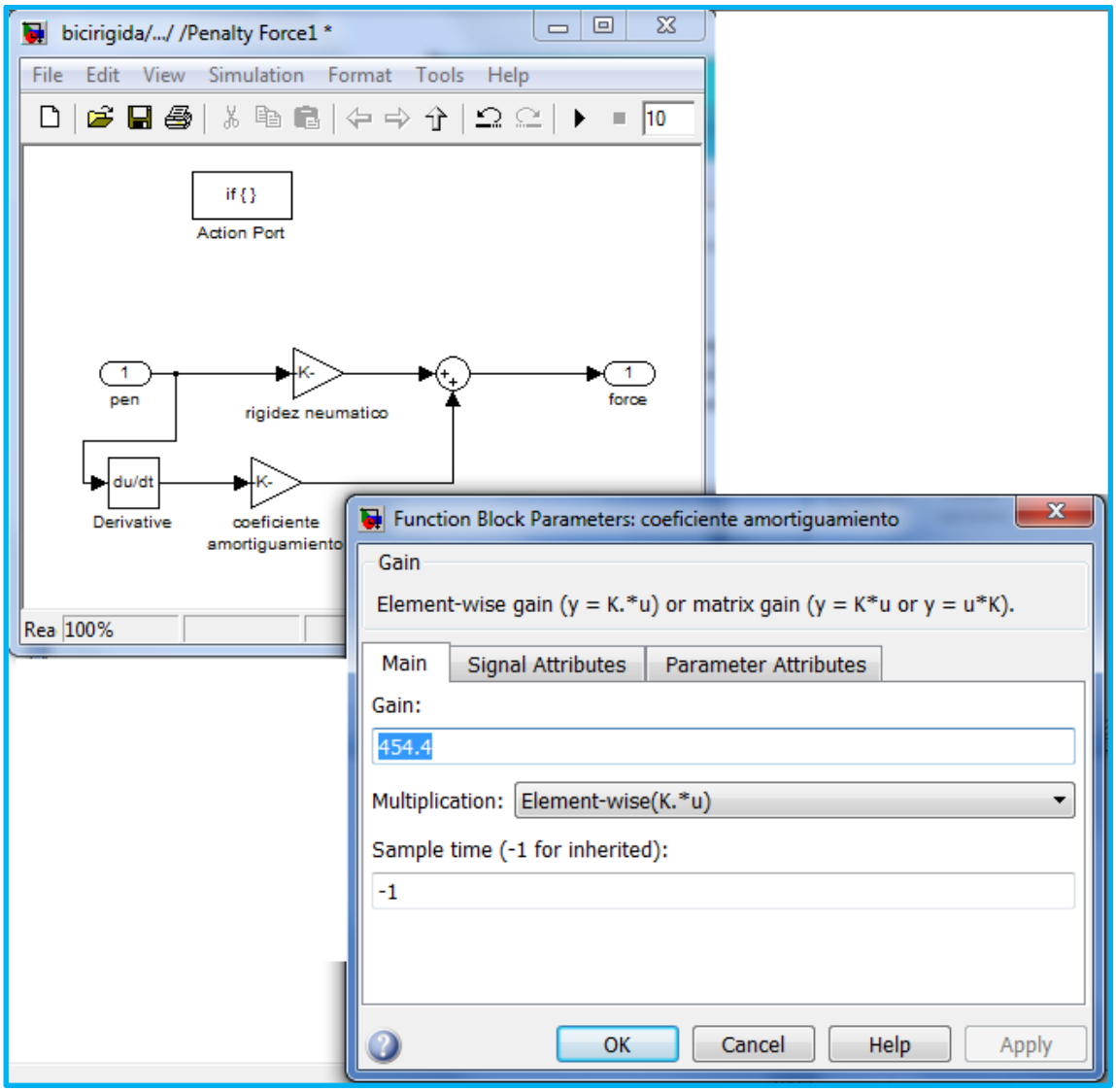

Figura 77. Amortiguación del neumático en la bicicleta rígida

Para simular el comportamiento del neumático, en la Figura 77 se simula un resorte que, siguiendo la ley $F = K * X + C * \dot{X}$, usa este desplazamiento del perfil neumático como X y se multiplica por la constante de rigidez del neumático, se le suma la derivada del desplazamiento del perfil neumático por el coeficiente de amortiguamiento (de valor 454.4 N*m/s) [10]. Se obtiene así un valor de fuerza que se aplica en la junta prismática por medio de un actuador.

6.6 Visualización de la simulación

Para visualizar el movimiento de la bicicleta de doble suspensión se realiza mediante una simulación en 3D de ésta. Por defecto, al iniciar la simulación con el botón play, debe de aparecer la ventana Machine for model

[12]. En caso de que no aparezca automáticamente durante la simulación se debe de comprobar que las siguientes casillas se encuentren activas:

- Al abrir Machine Enviroment hay una pestaña llamada Visualization. La casilla visualiza machine debe de encontrarse activa, si no lo eta debe de ser activada.
- En la misma pestaña anterior pulsar Configuration parameters y comprobar que se encuentran activas:

  - Display machine after updating diagram.
  - Show animation during simulation.

Con estas casillas activadas, al iniciar la simulación podremos observar una animación mecanismo en 3D hecha con el ensamblaje de SolidWorks (como la dela Figura 78).

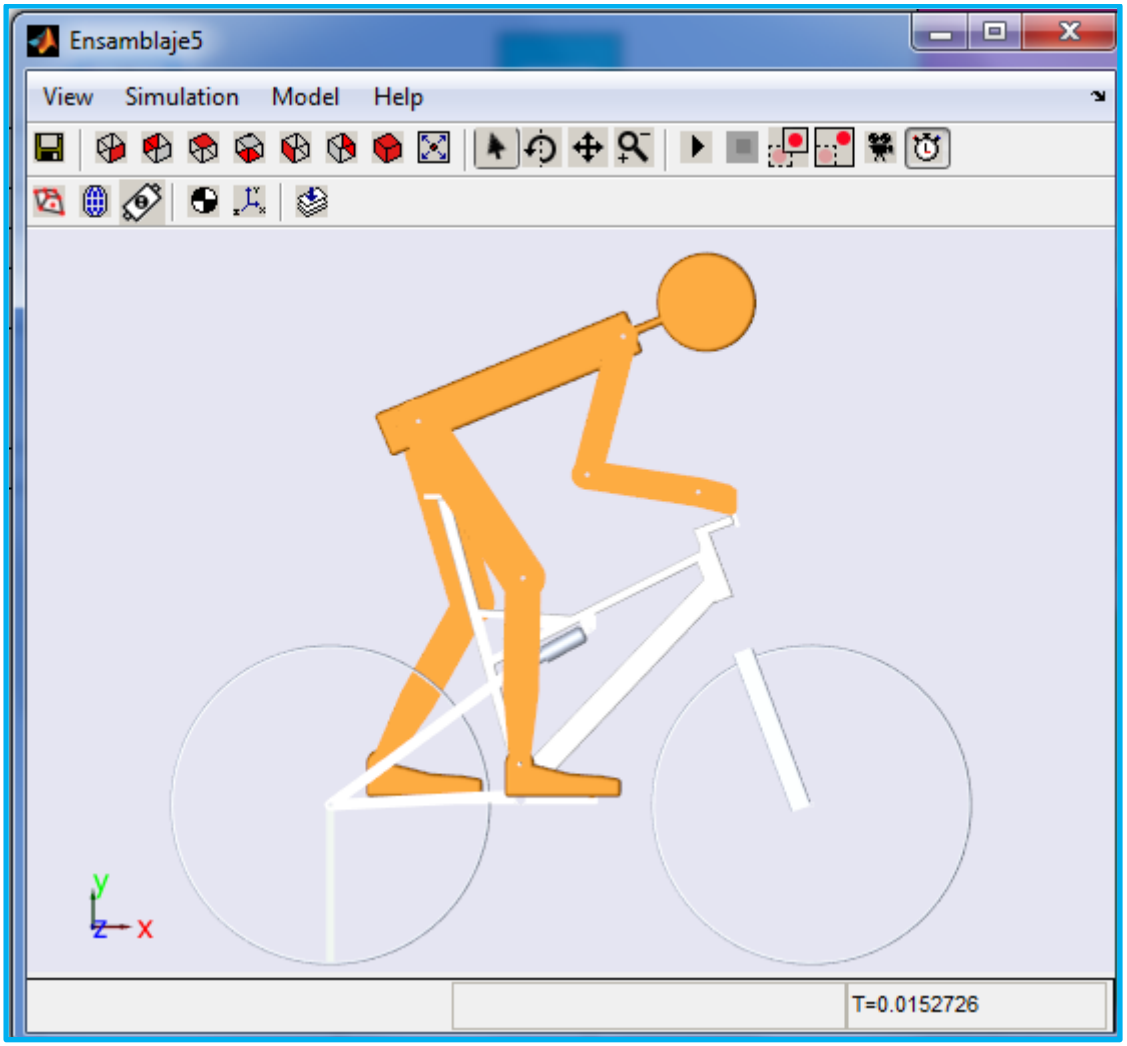

Figura 78. Visualización de la simulación para la bicicleta con suspensión Monopivote

Si la imagen que muestra la máquina de visualización no es la que aparece en la Figura se debe a que en Current Directory no está seleccionado el directorio donde se encuentra guardado el archivo y os archivos de extensión stl. Seleccionando el directorio adecuado el problema se solventa.

Esta herramienta de SimMechanics posee varias opciones como la visualización de los centros de gravedad o los ejes de coordenadas de cada eslabón. Se puede observar el mecanismo desde cualquier ángulo y realizar una grabación de este, en formato AVI.

6.7 Modelos finales

Tras el modelado de los distintos subsistemas y configuración de los bloques de SimMechanics y Simulink, se obtienen los siguientes modelos finales para los que se realizan las simulaciones: bicicleta con sistema de suspensión trasera Monopivote (Figura 79), bicicleta con suspensión trasera Horst Link (Figura 80), bicicleta con suspensión trasera Active Bracking Pivot (Figura 81) y bicicleta rígida (Figura 82).

- **Monopivote**

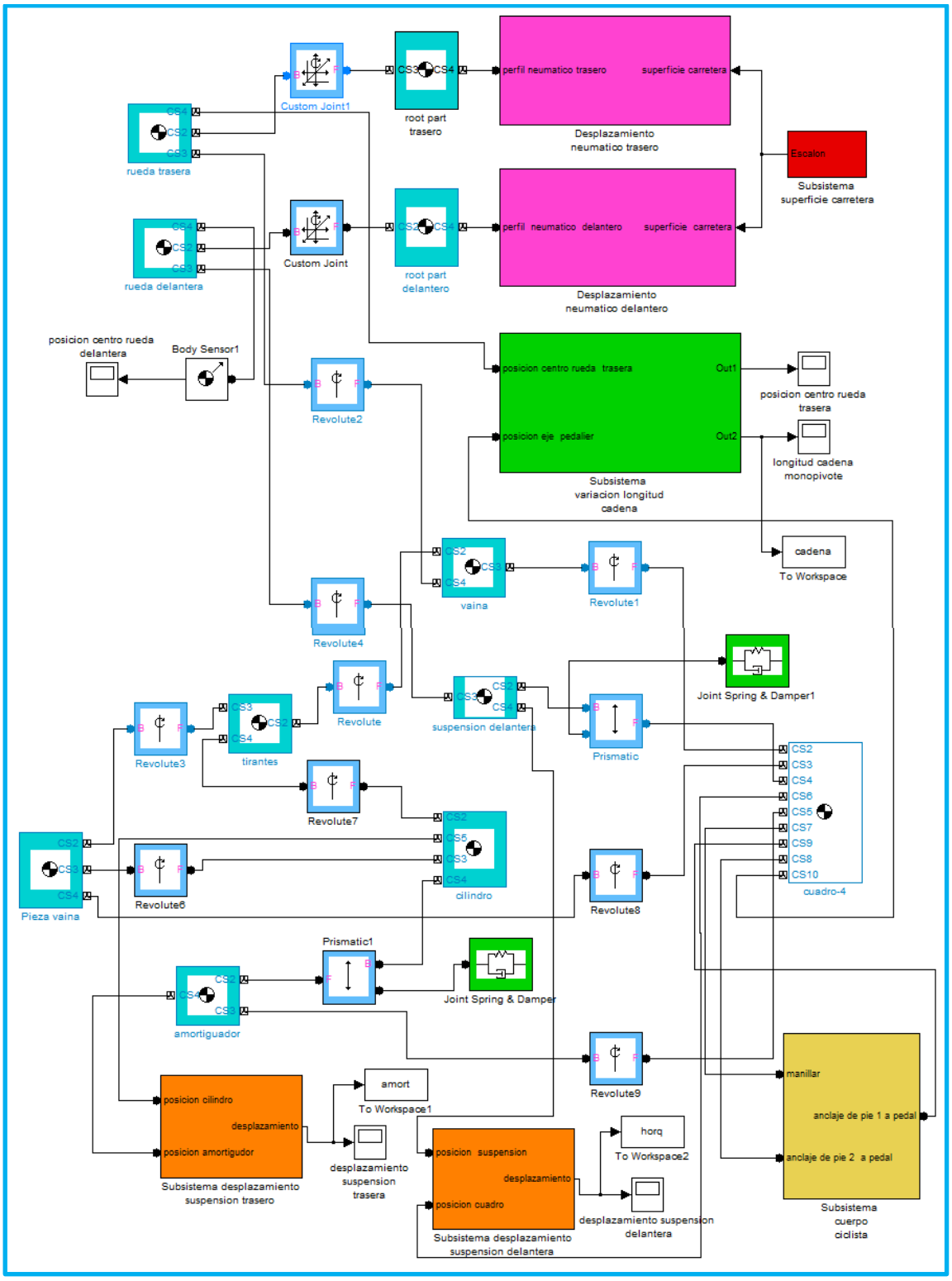

Figura 79. Modelo final Monopivote

- **Horst Link**

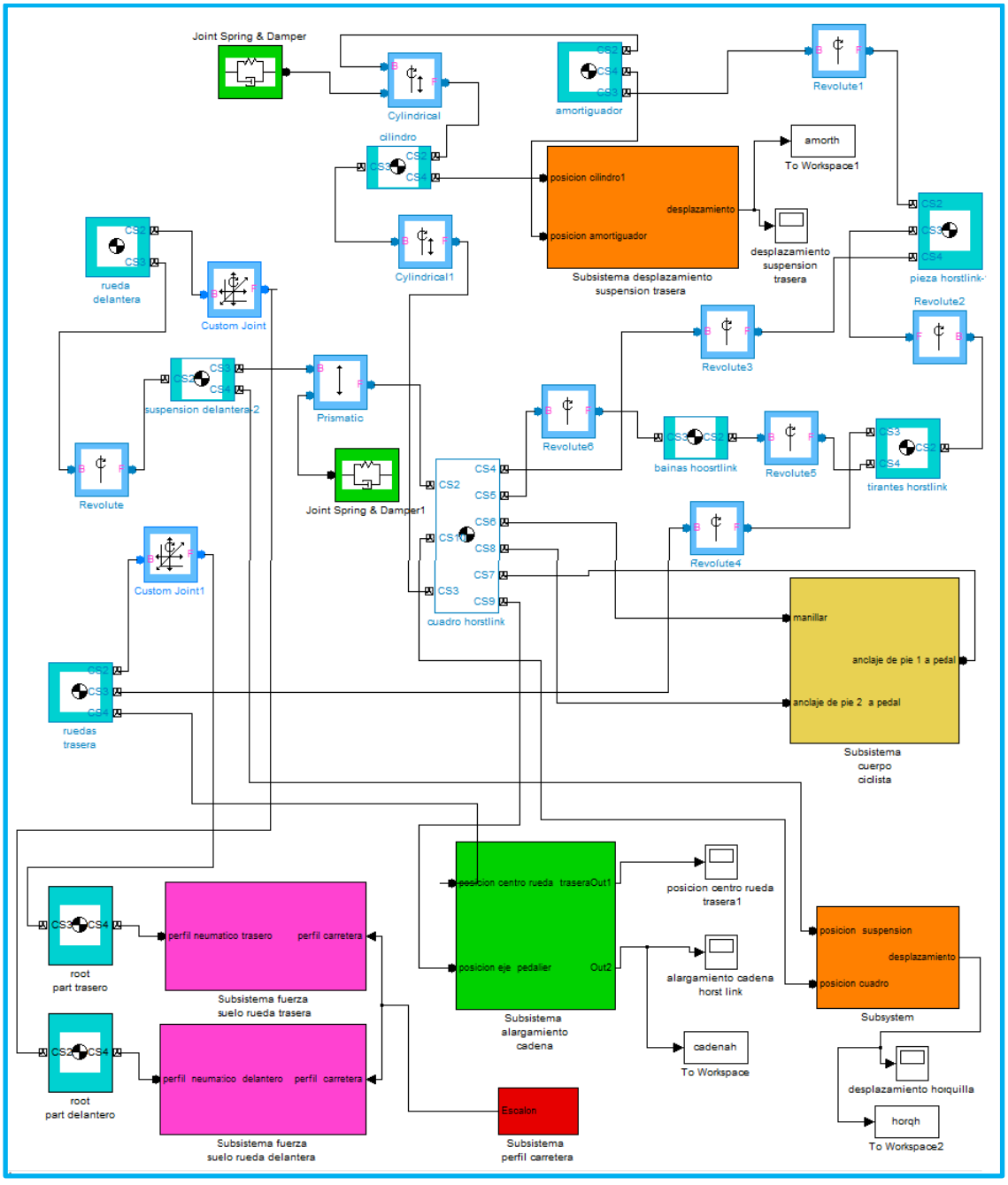

Figura 80. Modelo final Horst Link

- **Active Bracking Pivot (ABP)**

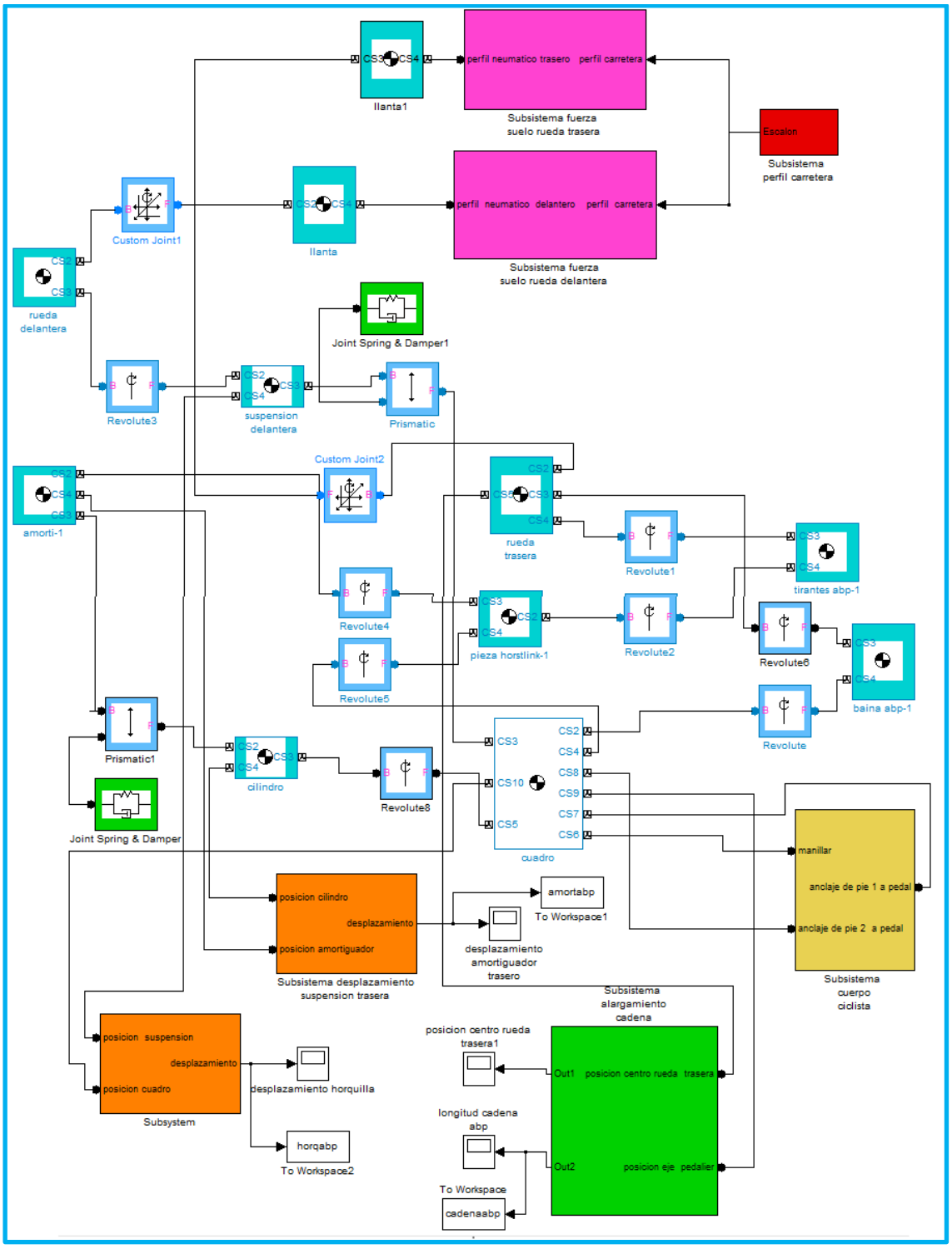

Figura 81. Modelo final ABP

- **Rígida**

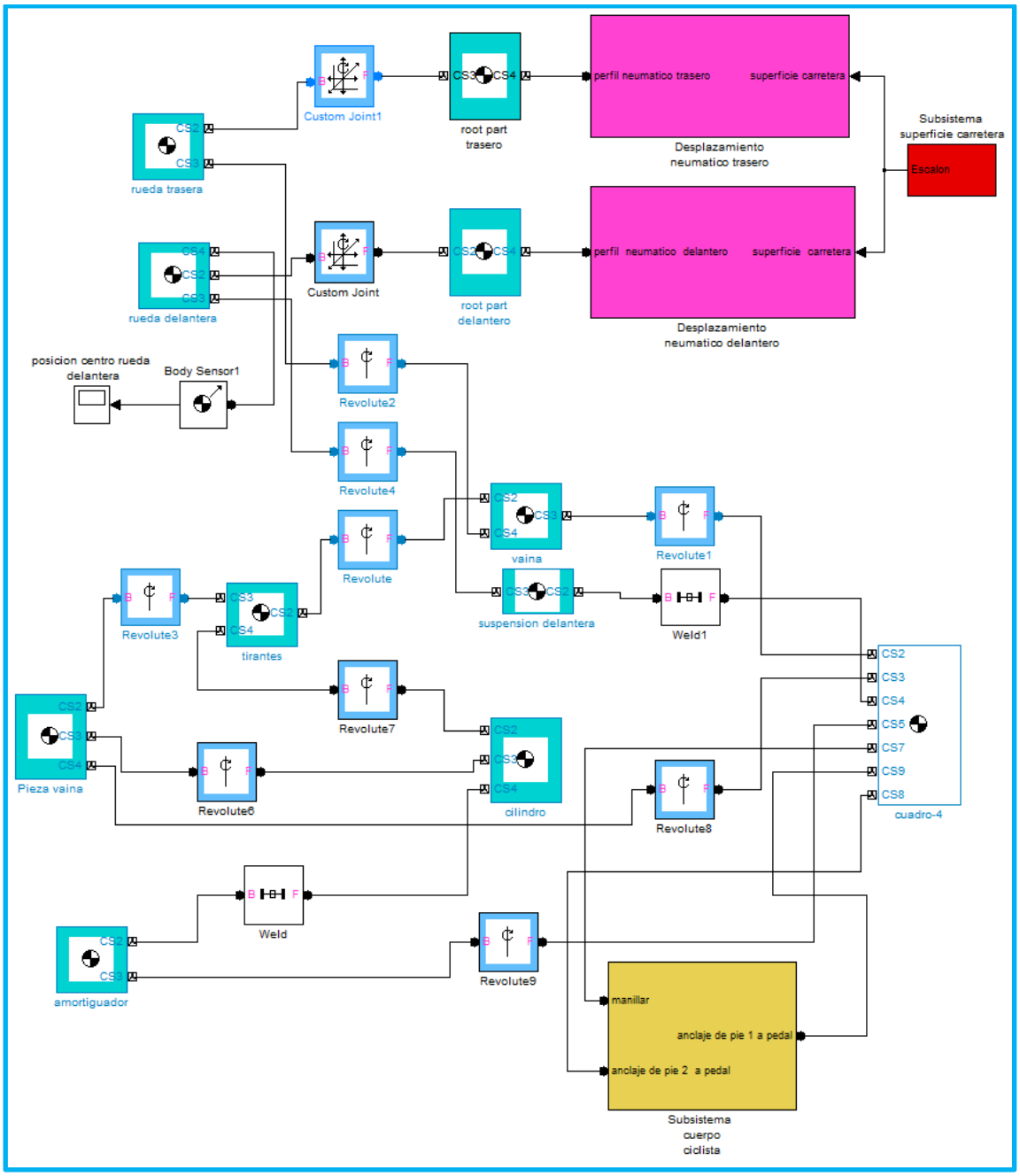

Figura 82. Modelo final de la bicicleta rígida

6.8 Modelado para el cálculo del ratio de acción

Otro aspecto que se estudia en las suspensiones traseras es el ratio de acción que se explico en el apartado 3.3.6. para calcular el ratio de las suspensiones se simula el movimiento del mecanismo de las suspensión trasera.

Para simular el movimiento del mecanismo de la suspensión trasera, de los modelos finales anteriores, primero se ancla la rueda delantera al suelo mediante el subsistema de la Figura 84.

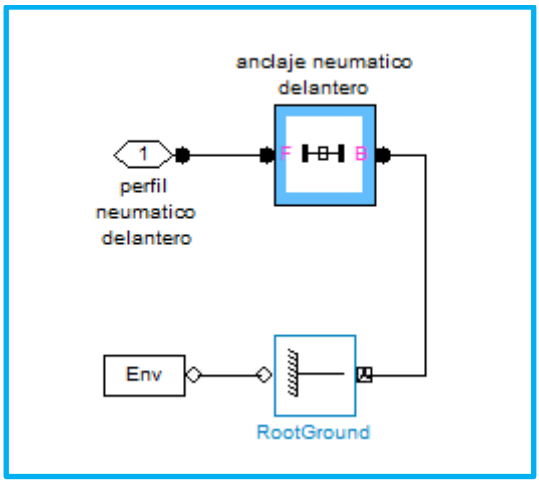

Figura 83. Subsistema anclaje de la rueda delantera al suelo

Y también se ancla el centro de gravedad del cuadro para que solo se pueda mover el mecanismo de la suspensión trasera.

Para simular el movimiento del mecanismo dela suspensión trasera se modifica el subsistema desplazamiento del neumático trasero como se ve en la Figura 84. Se cambia el Joint Actuator para que genere un movimiento en vez de una fuerza, señalando en este la casilla Motion. Y para generar el movimiento se insertan los bloques de Simulink con aceleración cero, velocidad de un metro por segundo y la derivada de esta para obtener la posición.

A la hora de simular se reduce el tiempo de simulación para que solo se desplace el recorrido de la suspensión y poder ver el ratio de acción.

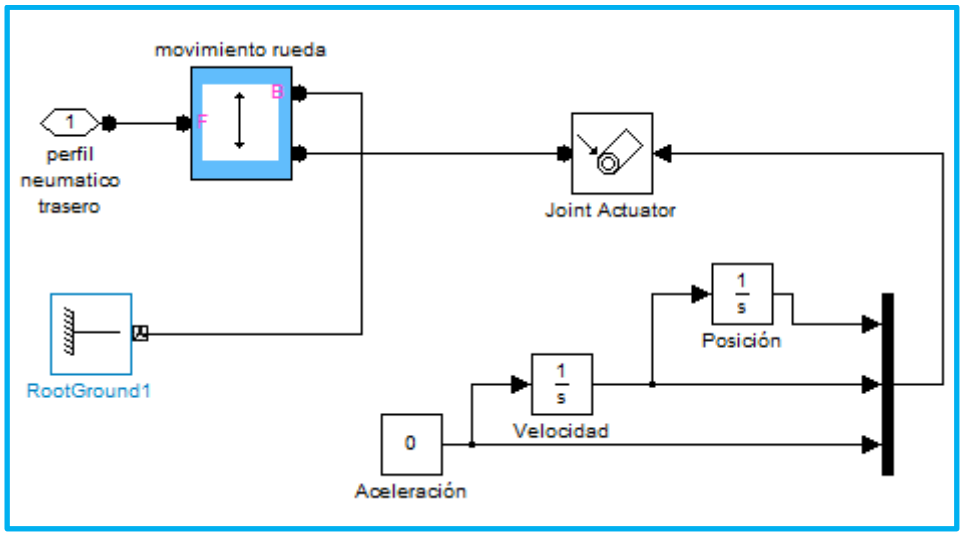

Figura 84. Subsistema desplazamiento neumático trasero

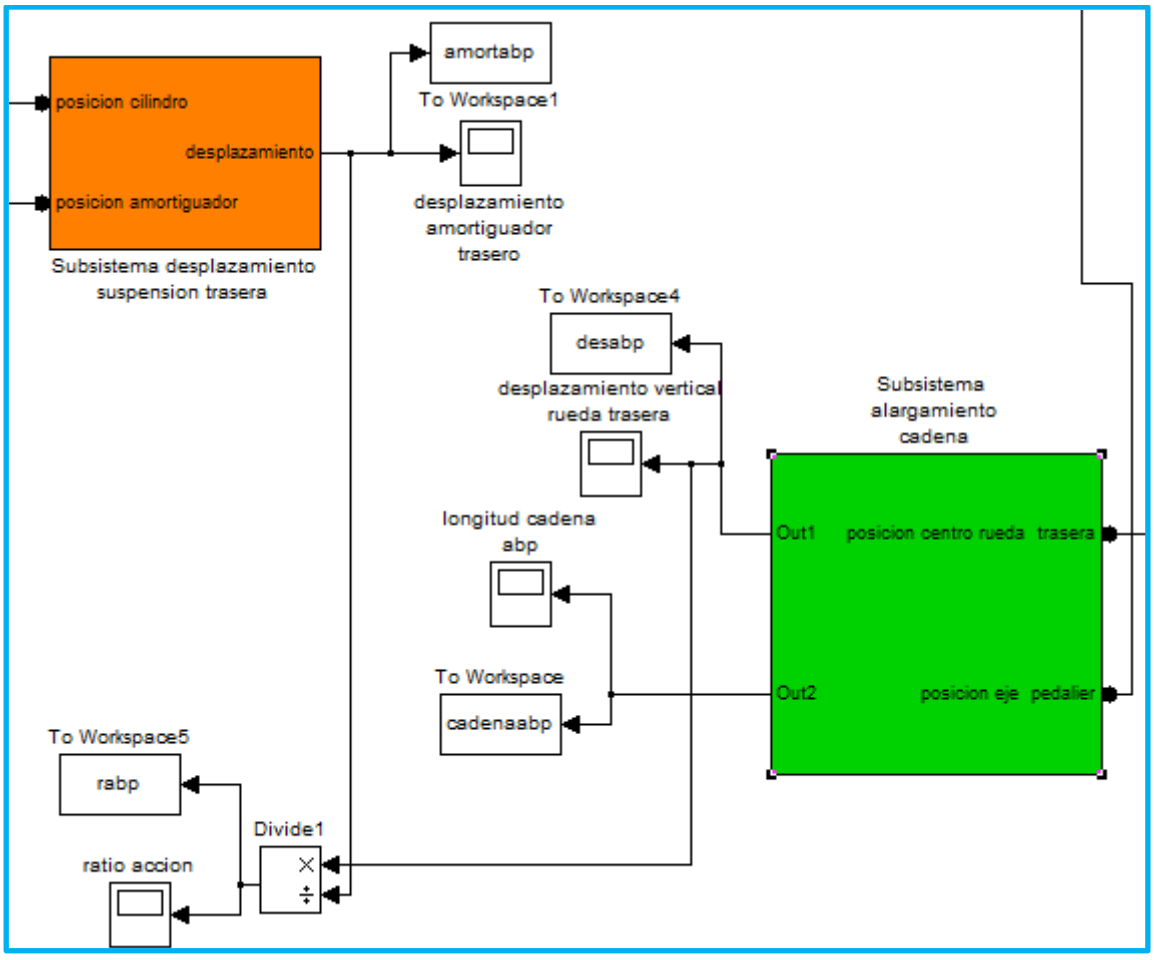

Figura 85. Calculo del ratio de acción

Una vez se tiene el movimiento del mecanismo, se obtiene el ratio de acción, dividiendo el desplazamiento vertical de la rueda trasera entre el desplazamiento del amortiguador trasero como se ve en la Figura 85.

Mediante el bloque de Simulink to Workspace se envían los datos del ratio de acción en cada instante de tiempo al Workspace de Matlab para posteriormente representar los ratios de acción de los distintos modelos de suspensión trasera.

En la Figura 86 se observa el modelo final para el cálculo del ratio de acción para la suspensión trasera ABP. Se ha retirado el cuerpo del ciclista ya que no hará falta. Los cambios realizados serán igual para los otros dos modelos de suspensión trasera, para calcular el ratio de acción.

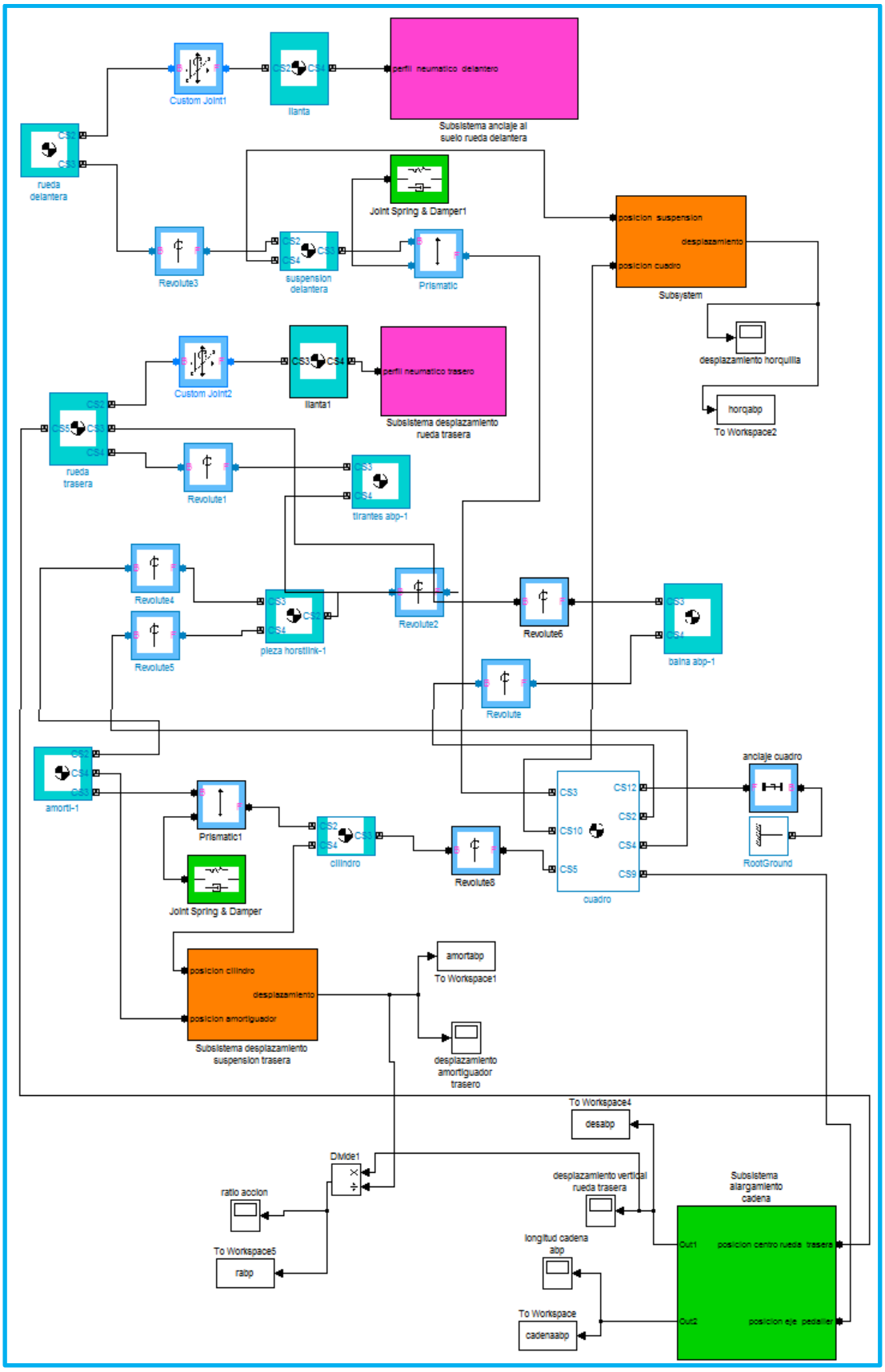

Figura 86. Modelo ABP para el cálculo de ratio de acción

CAPÍTULO 7

Análisis dinámico y cinemático de los distintos tipos de bicicleta

7.1 Análisis dinámico en SimMechanics

En este capítulo se presentan los resultados que han ofrecido las simulaciones realizadas con el programa SimMechanics para los diferentes tipos de suspensión trasera modelados en las bicicletas.

Se analizaran realizando una comparación entre los distintos resultados obtenidos con cada tipo de suspensión trasera para poder observar mejor las diferencias entre ellos.

La superficie de la carretera que se usara en la simulación de los diferentes tipos de bicicletas será un escalón de 0.1 m de altura.

Los aspectos a analizar en la simulación serán: los diagramas de bode, el desplazamiento de cadena, el amortiguamiento trasero, el amortiguamiento delantero, el desplazamiento del ciclista y el ratio de acción.

SimMechanics permite, a través de la simulación, obtener la posición, velocidad y aceleración de cualquier punto del mecanismo tanto de forma gráfica como numérica. Los datos numéricos pueden ser almacenados en archivos, con forma de matriz, para poder trabajar con ellos. Con Matlab se pueden representar gráficas personalizadas a partir de estos datos y realizar cualquier tipo de operación matemática entre ellos.

El método de obtención de datos se realiza con el bloque Body Sensor de la librería de SimMechanics. Con este bloque se puede almacenar: posición, velocidad linear y angular, y aceleración lineal y angular.

Para almacenar los datos en archivos se conecta el bloque Body Sensor a un bloque To Workspace. Los archivos se guardaran en formato Structure With time, en la carpeta donde esté trabajando Matlab.

Los archivos generados contienen una variable donde se encuentran los datos almacenados. Para que la variable aparezca en Workspace, que indica las variables que han sido ejecutadas en Matlab, hay que ejecutar el archivo que debe de aparecer en Current Directory. Esta variable está estructurada en varias filas, y cada una de ella representa a cada una de las tres componentes espaciales de: posición, velocidad y aceleración [14].

El procedimiento para tratar los datos obtenidos es el siguiente:

- Para indicar los datos que van a ser representados en el eje (y) gráficamente se teclea en Command Window:

valor = nombre_archivo.signals.values

Donde:

valor es la variable generada.

nombre_archivo es el nombre del archivo que se ha generado

- Para indicar los datos que van a ser representados en el eje (x) gráficamente se teclea en Command Window:

t=nombre_archivo.time

Una vez se tienen dos variables, tiempo (x) y posición (y), se teclea en Command Window:

plot (x,y)

Aparece una ventana donde se representa la gráfica y donde se puede modificar el aspecto de ésta. Para representar varios bloques de datos en la misma gráfica se teclea el comando hold on en Command Window.

7.2 Variación del centro de gravedad del ciclista

Para la variación del centro de gravedad del ciclista ya se utilizan los modelos de bicicleta con el ciclista. Primero se compara la variación del centro de gravedad del ciclista en las bicicletas de doble suspensión.

En la Figura 87, al principio de la simulación la posición del centro de gravedad cae debido a la amortiguación de las suspensiones por el peso del ciclista (SAG) hasta que se estabiliza. Una vez esto a los 3 segundos entra un salto 0.1 m que hace que se eleve el centro de gravedad del ciclista y vuelva a caer hasta que las suspensiones amortiguan el salto.

Se observa que la suspensión monopivote es la que hace que el ciclista se desplace menos frente a las otras dos suspensiones y se mantenga más estable. El peso de las bicicletas es prácticamente el mismo por lo que tenemos prácticamente el mismo SAG para todas las simulaciones.

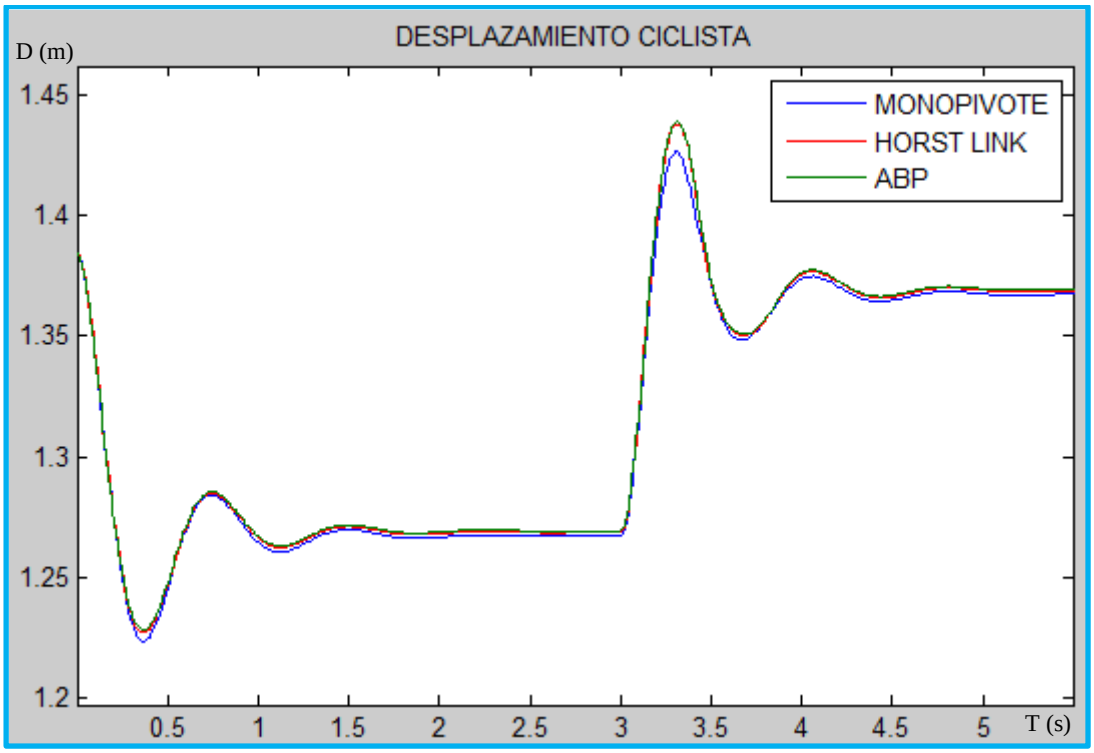

Figura 87. Variación del centro de gravedad del ciclista

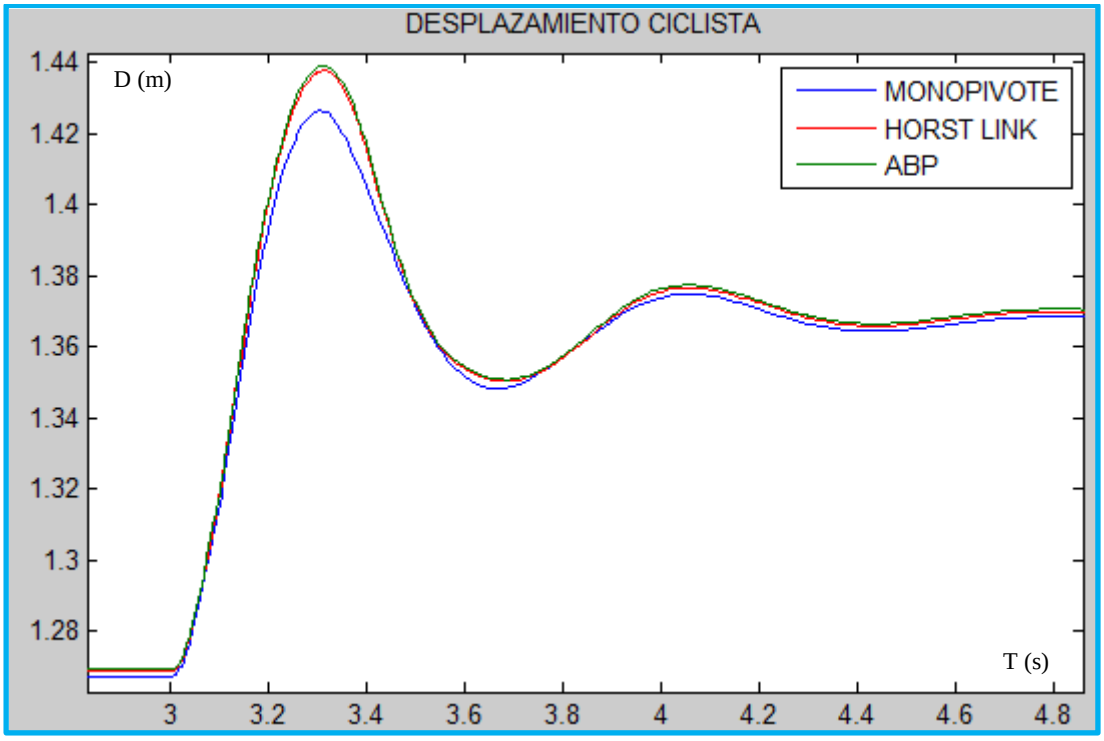

Figura 88. Detalle de la variación del centro de gravedad del ciclista

Realizando un zoom en la Figura 88, se puede ver como las suspensiones Horst Link y ABP provocan prácticamente el mismo desplazamiento, la suspensión ABP tiene algo más de desplazamiento, pero se estaría hablando de milímetros cosa que el ciclista apenas notaria. Por tanto, la suspensión trasera Monopivote es más confortable y segura al tener menor movimiento.

En la Figura 89, se incluye el desplazamiento del centro de gravedad del ciclista en la bicicleta rígida, y se observa como al no tener suspensiones, el ciclista sufre más en comparación con las bicicletas.

Indicar también que la diferencia que se aprecia al principio es debido a que en las bicicletas con suspensión se produce un hundimiento de las suspensiones debido al SAG y en la rígida al no tener suspensión ese hundimiento es mucho menor (producido por el amortiguamiento del neumático). Para ver esto se realizan dos zoom en la gráfica, uno al principio cuando no hay excitación del terreno (ver Figura 90) y se ve el desplazamiento del ciclista debido al SAG en las suspensiones; y otra cuando se produce el salto en el terreno (ver Figura 91).

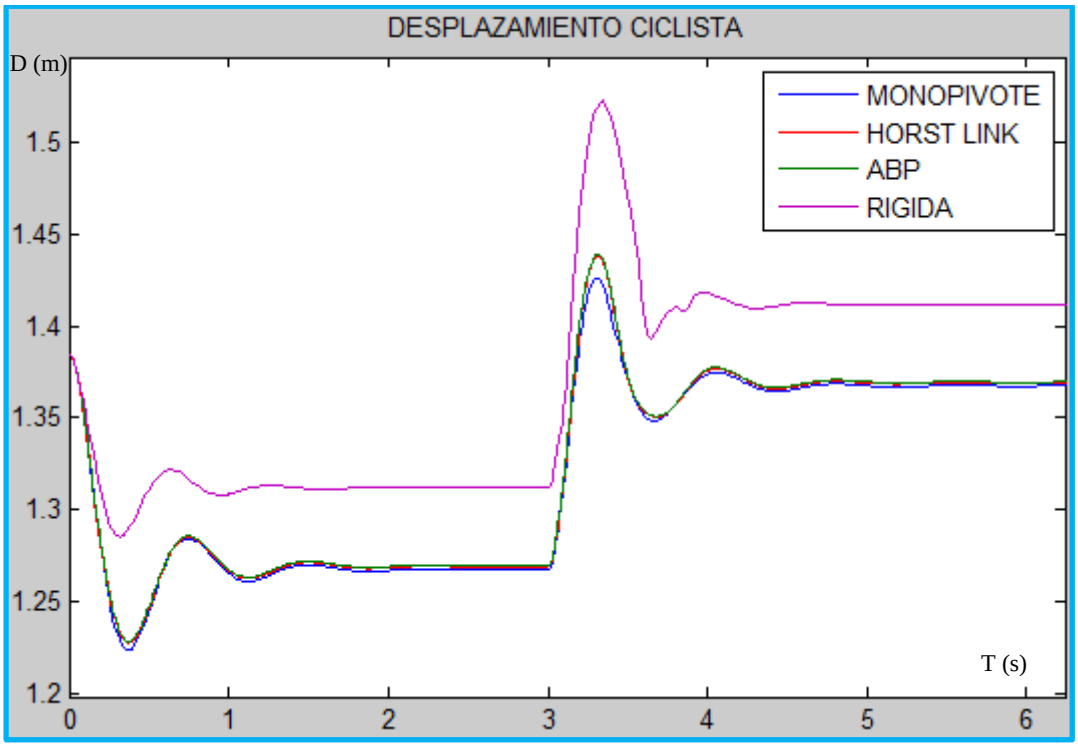

Figura 89. Variación del centro de gravedad del ciclista con la rígida

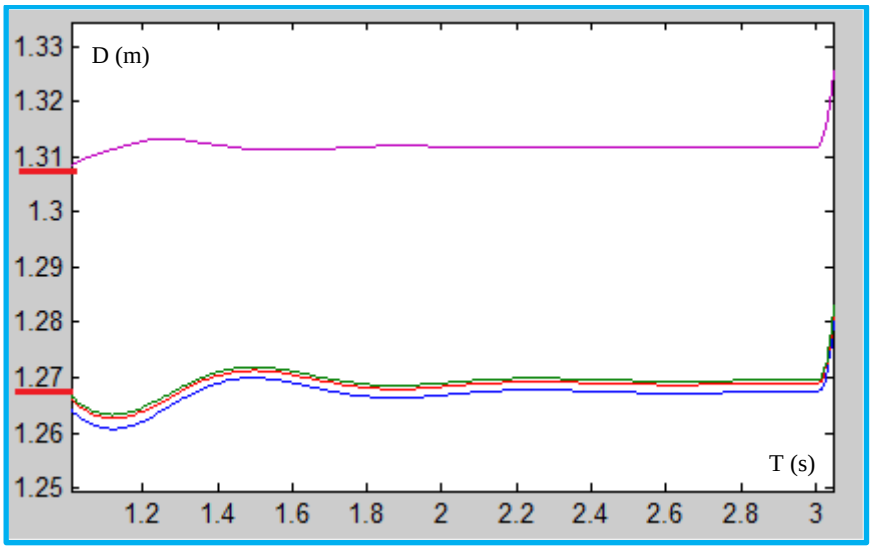

Figura 90. Detalle 1 de la variación del centro de gravedad del ciclista con la rígida

Comparando la rígida con bicicleta con suspensión trasera ABP (que es la que tiene mayor desplazamiento del ciclista) en la Figura 90, vemos que hay una diferencia de unos 4 cm debido al hundimiento de las suspensiones en la bicicleta doble.

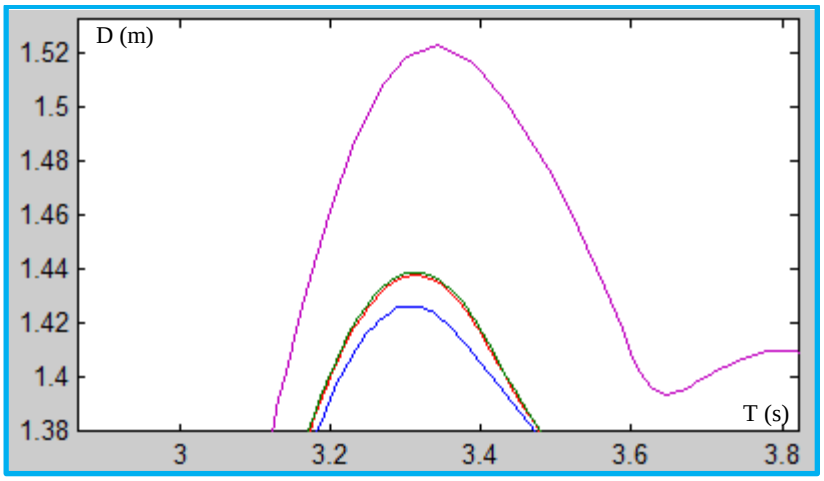

Figura 91. Detalle 2 de la variación del centro de gravedad del ciclista con la rígida

Ahora en el desplazamiento producido por el salto del terreno (Figura 91) vemos que hay una diferencia de 8 cm, por lo cual con la rígida tenemos un desplazamiento del centro de gravedad del ciclista de 4 cm mayor que en la bicicleta doble (la que peor se comporta de las tres simuladas) y por tanto es menor confortable para el ciclista.

7.3 Variación de la longitud de la cadena

En este caso se analiza la variación de la longitud de la cadena para los modelos de bicicleta con suspensión trasera con el ciclista en movimiento.

En la Figura 92, se ve como la longitud de la cadena aumenta en el momento de coger el salto y aumenta la compresión de la suspensión trasera. Las vainas van creciendo a medida que se comprime la suspensión, al crecer la longitud de vainas, la cadena se tensa y evita que la suspensión trabaje libremente. Mientras mayor sea el crecimiento de la cadena mayor inactividad de la suspensión.

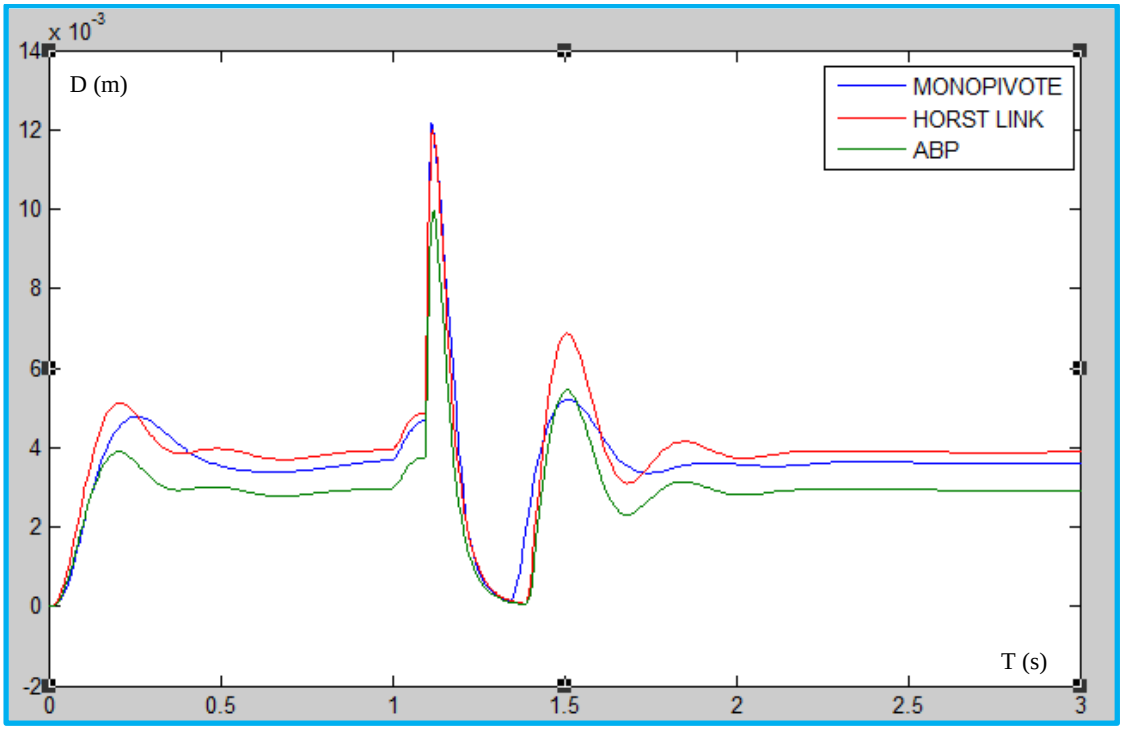

Figura 92. Variación de la longitud de la cadena

Ene este caso el salto se produce al primer segundo, y se observa a simple vista como las suspensiones Monopivote y Horst link tienen un mayor desplazamiento de cadena frente a la suspensión ABP.

Aunque la suspensión Monopivote es la que tiene el aumento más grande de cadena, estabiliza antes el aumento de la cadena que la suspensión Horst Link, por lo que tendrá más eficacia la suspensión al pasar el salto, pero será menos eficaz y segura en el momento de coger el salto, al producir un mayor tirón de los pedales. Esto también puede llevar mayores problemas mecánicos.

La suspensión ABP tiene un menor desplazamiento de cadena, produciendo un menor Back Pedal, y se estabiliza bien por lo cual será la más eficaz de las tres y tendrá un mayor confort para el ciclista al tener menos tirones de los pedales producidos por el aumento de cadena.

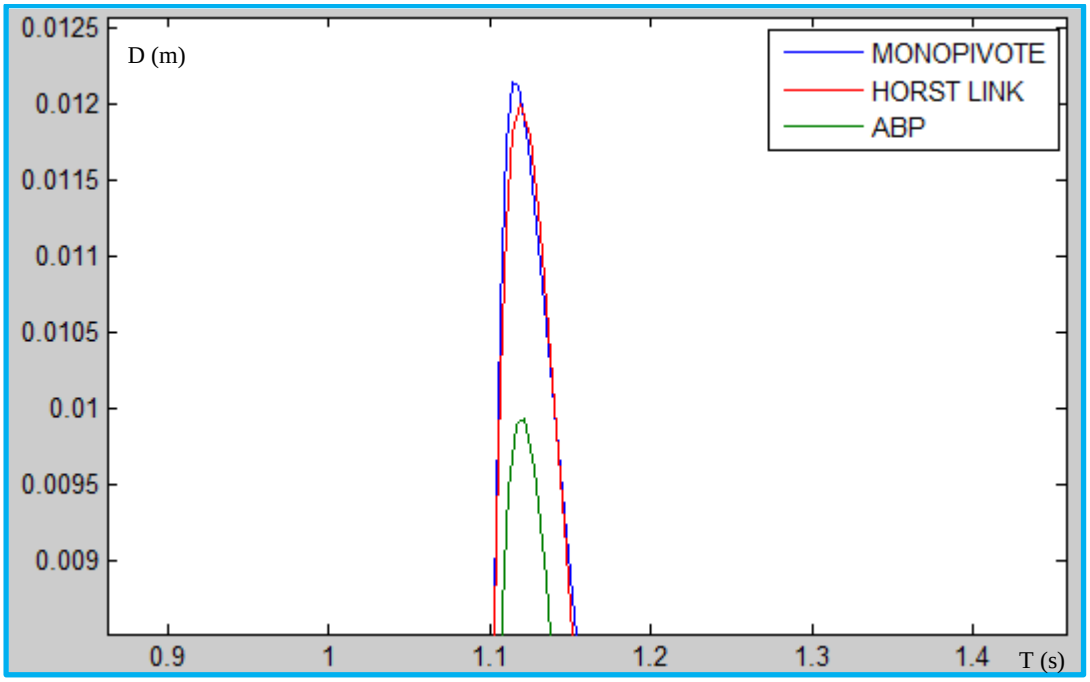

Figura 93. Detalle de la variación de la longitud de cadena

Realizando un zoom, en la Figura 93 la suspensión Monopivote es la que tiene un mayor aumento máximo de la cadena produciendo el mayor Back Pedal.

7.4 Desplazamiento de la suspensión trasera

En la Figura 94, se observa como la suspensión monopivote requiere una mayor compresión del amortiguador trasero frente a las suspensiones Horst Link y ABP. La suspensión trasera ABP sería la que menos se comprime aunque se comporte de manera muy similar la Horst Link.

Por tanto, al ser menor el movimiento de la suspensión ABP será menor el recorrido que necesitaremos dela suspensión y por tanto requerirá una menor rigidez, abaratando costes. Aunque se ve también como la suspensión Monopivote estabiliza antes el movimiento de la suspensión lo cual mayor seguridad para el ciclista al durar menos la oscilación.

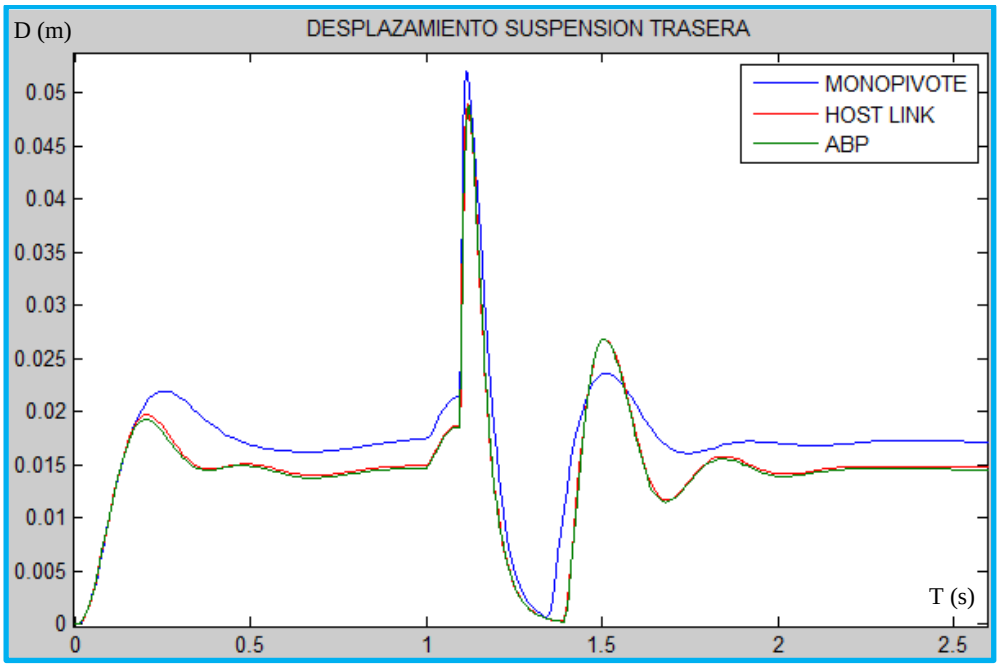

Figura 94. Desplazamiento de la suspensión trasera

7.5 Desplazamiento de la suspensión delantera

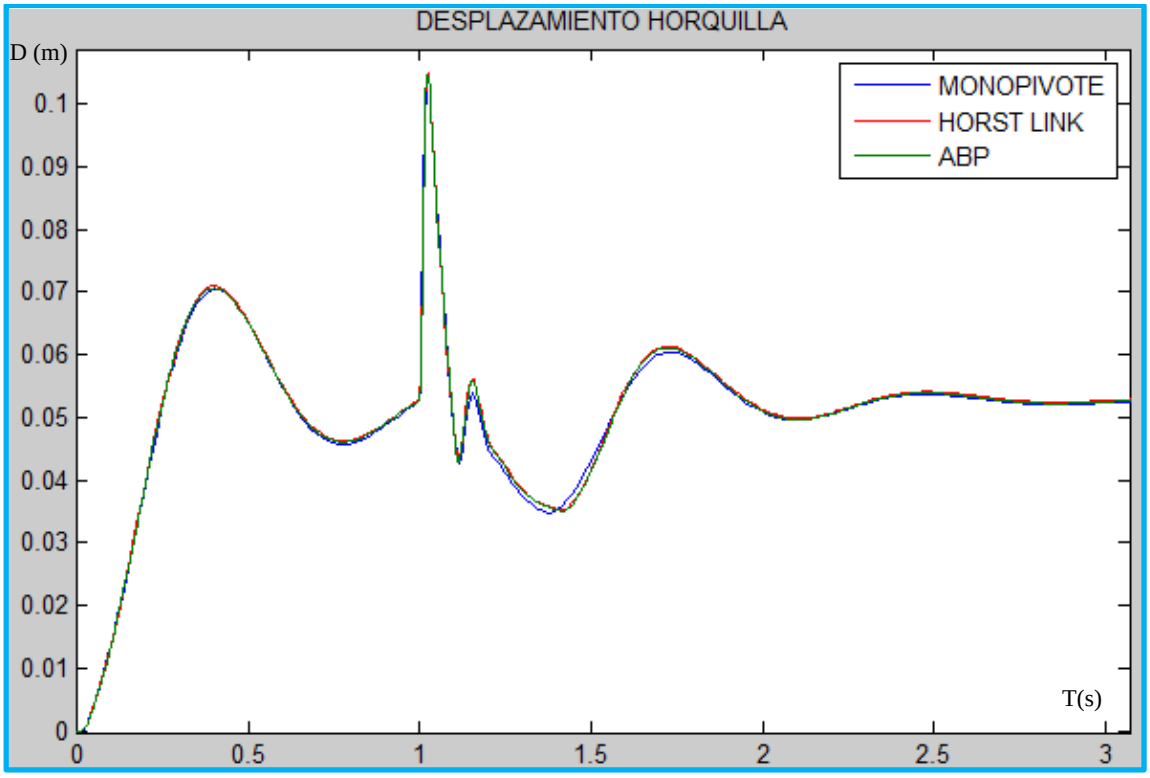

Figura 95. Desplazamiento de la suspensión delantera

A simple vista en la Figura 95, se verifica como la compresión de la horquilla es la misma para los tres tipos de bicicleta, ya que tienen la misma horquilla.

Se puede observar que el tipo de suspensión trasera no tiene influencia en la compresión de la horquilla, aunque en la Monopivote se diferencia un poco de las otras dos, esta diferencia al ser tan mínima no afecta a ciclista.

7.6 Desplazamiento del centro de la rueda trasera

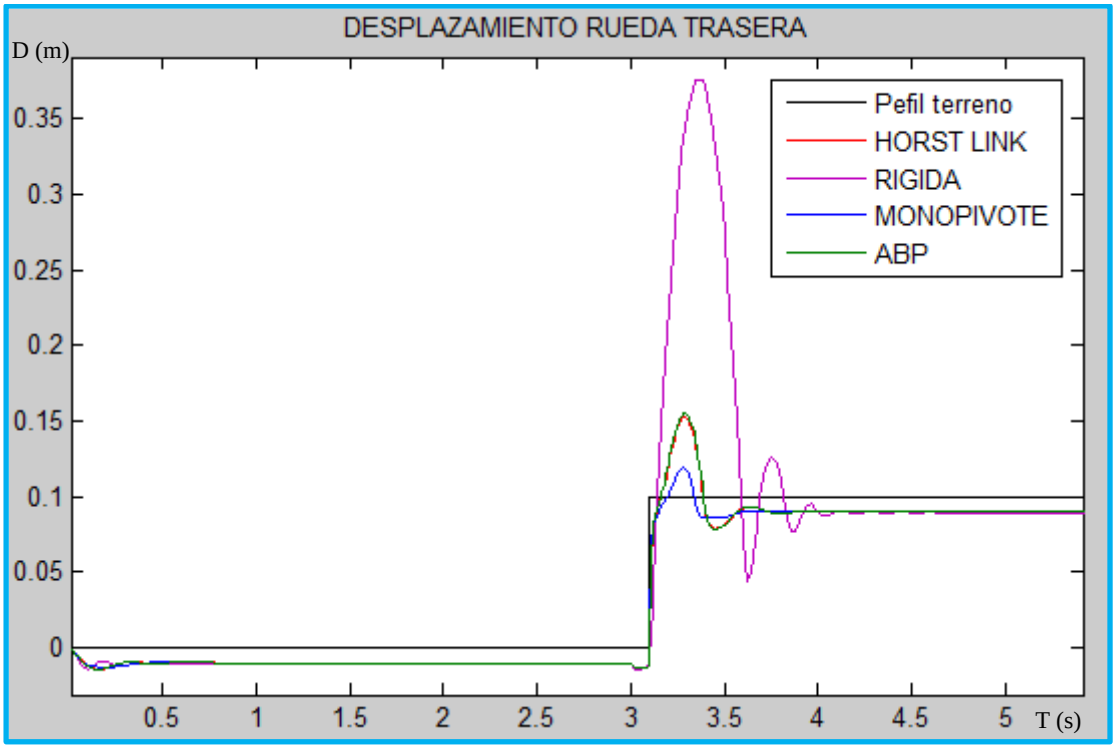

Figura 96. Desplazamiento del centro de la rueda trasera para todos los modelos simulados

En la Figura 96 se observa mejor como la rígida se comporta mucho peor que las dobles en cuanto al desplazamiento vertical que sufre la rueda y que se transmite al ciclista siendo esto muy incomodo para el ciclista, además de que tarda mucho más en estabilizar el movimiento comprometiendo la seguridad del ciclista.

Por tanto se advierte como tanto en confort como en seguridad las bicicletas dobles son mejor que las rígidas a la hora de enfrentarnos con terrenos sinuosos.

Comparando ahora de nuevo las dobles, se observa también como la bicicleta con suspensión trasera Monopivote tiene un menor desplazamiento y se estabiliza antes del salto producido. Esto conlleva a que tener un mayor confort para el ciclista.

También al estar la rueda un mayor tiempo en contacto con el terreno, conlleva un aumento de la seguridad.

7.7 Diagrama de bode

Mediante el diagrama de Bode se puede ver a que frecuencia del terreno se amplifica el movimiento del centro de gravedad del ciclista (es decir la frecuencia crítica).

Para realizar el diagrama de Bode se realizan simulaciones para los distintos tipos de bicicleta para un perfil de terreno ondulado. A este perfil se le irá variando la frecuencia de onda (con una amplitud de onda fija de 0.01m) y midiendo la variación de posición del centro de gravedad del ciclista (para medir la longitud de onda del centro de gravedad del ciclista). Con esto se calcula la ganancia y se representa (en el eje y) en una gráfica junto con la frecuencia en escala logarítmica (eje x).

- **Diagrama de Bode en el centro de gravedad del ciclista:**

En la Figura 97 se representan juntos los diagramas de Bode de los distintos tipos de bicicleta con suspensión trasera simulados y la bicicleta rígida. A simple vista parecen tener las bicicletas con suspensión trasera, la misma ganancia a la frecuencia de resonancia y la rígida tiene una frecuencia de resonancia más alta con menor ganancia.

Los tipos de suspensión Horst Link y ABP tienen una perdida de ganancia mayor (traspasar la frecuencia de resonancia) que la suspensión Monopivote. Esto implica que absorberá mejor el impacto del terreno, y por ello por lo que la rígida tiene la menor perdida de ganancia al no tener suspensiones.

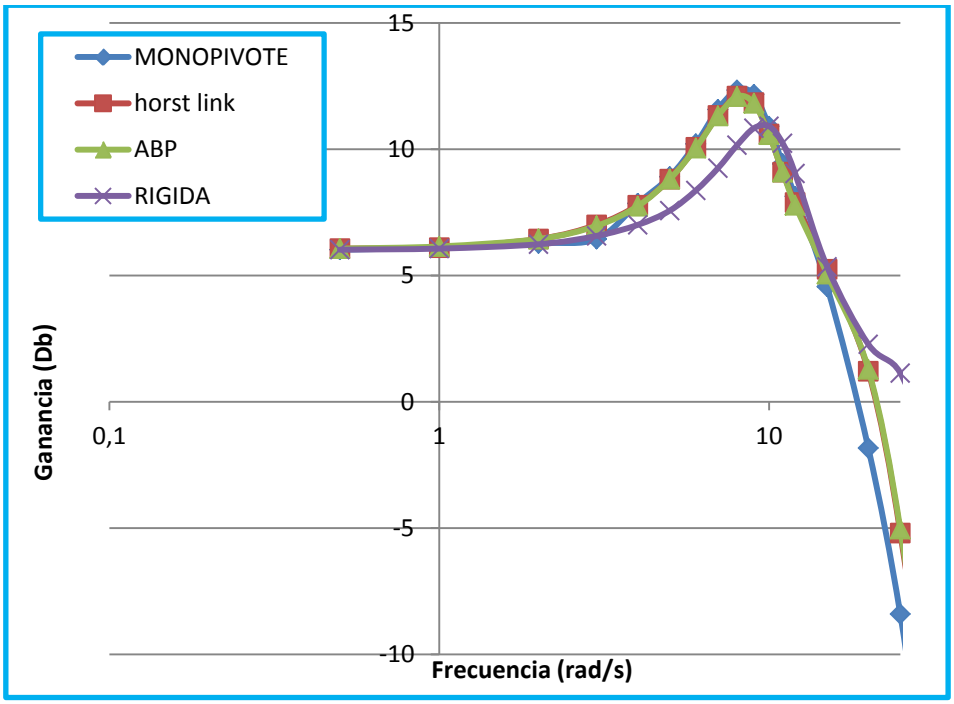

Figura 97. Diagrama de Bode en el centro de gravedad del ciclista

En la Figura 98, se ha aumentado el gráfico en la zona de la frecuencia de resonancia y se puede ver como la suspensión Monopivote tiene una mayor ganancia a la frecuencia crítica, que los otros dos tipos de suspensión trasera, con lo que la suspensión Monopivote se comportara menos estable a la frecuencia de resonancia.

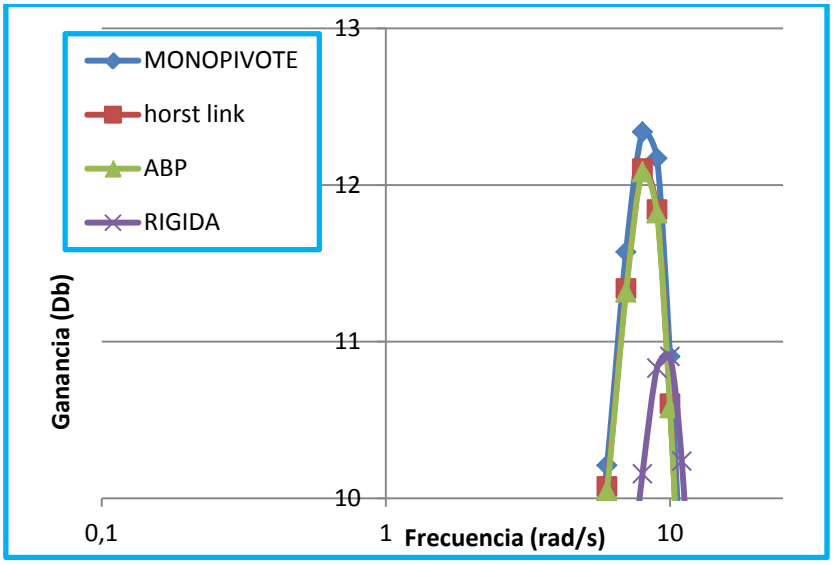

Figura 98. Detalle del diagrama de Bode en el centro de gravedad del ciclista

- **Diagrama de Bode en el sillín:**

Dado que el ciclista se ha simulado con amortiguación en sus articulaciones para simular un modelo más real, esto influye a la hora de obtener el diagrama de bode para las suspensiones, por lo que se realiza un diagrama de bode en el sillín para todos los modelos de bicicleta. Con esto se visualiza de forma más directa la respuesta en frecuencia de las suspensiones.

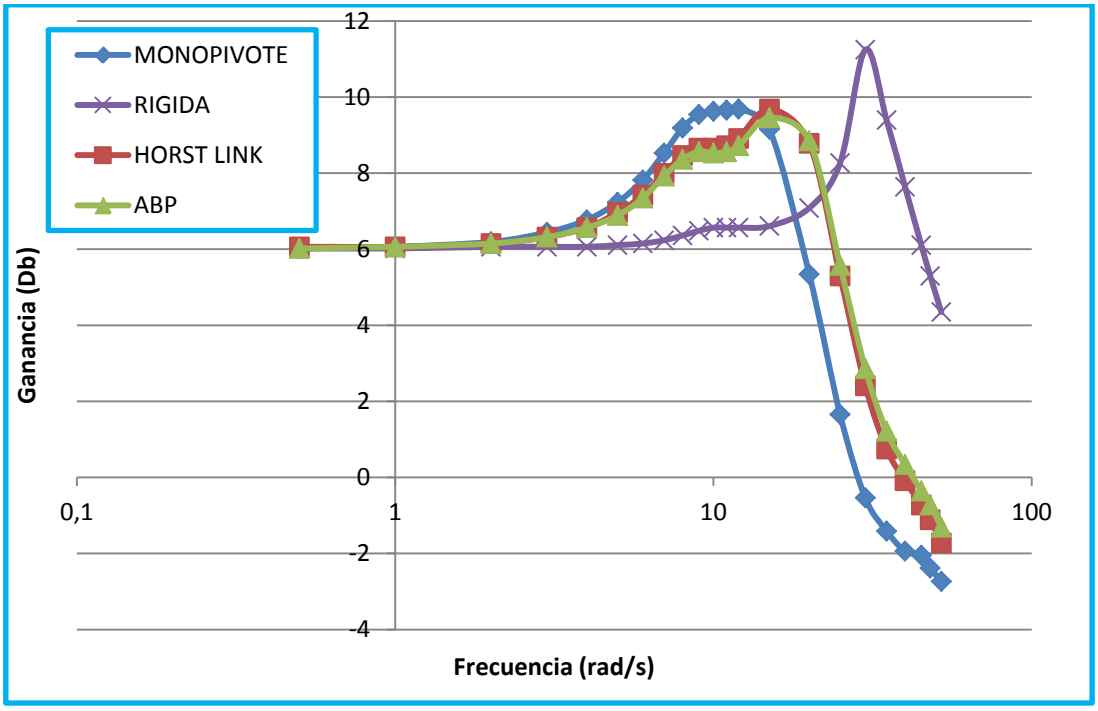

Figura 99. Diagrama de Bode en el sillín

Observando la Figura 99, se obtienen las siguientes conclusiones:

A frecuencias bajas, se está simulando un perfil más llano como se ve en la Figura 100, y es por ello por lo que se comporta mejor la rígida con menor ganancia (al no tener perturbaciones que hagan variar la posición de la bicicleta respecto del suelo). Sin embargo, en las bicicletas de doble suspensión si se tiene una mayor ganancia debido al peso del ciclista, que hace actuar las suspensiones de la bici y así variar la posición de la bicicleta con respecto al suelo. Por ello cuando se circula en llano o subida es mejor bloquear la suspensión para que no tener perdida de energía. Es en este tramo donde se da lugar a la frecuencia crítica de las bicicletas de doble suspensión.

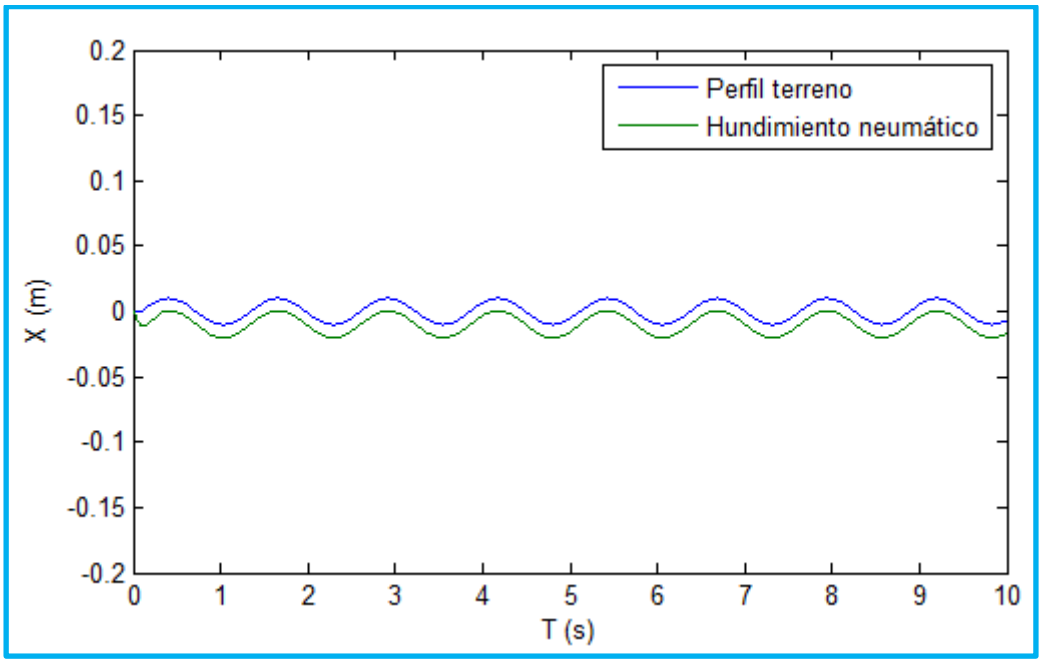

Figura 100. Perfil del terreno frente al perfil del neumático a frecuencias bajas

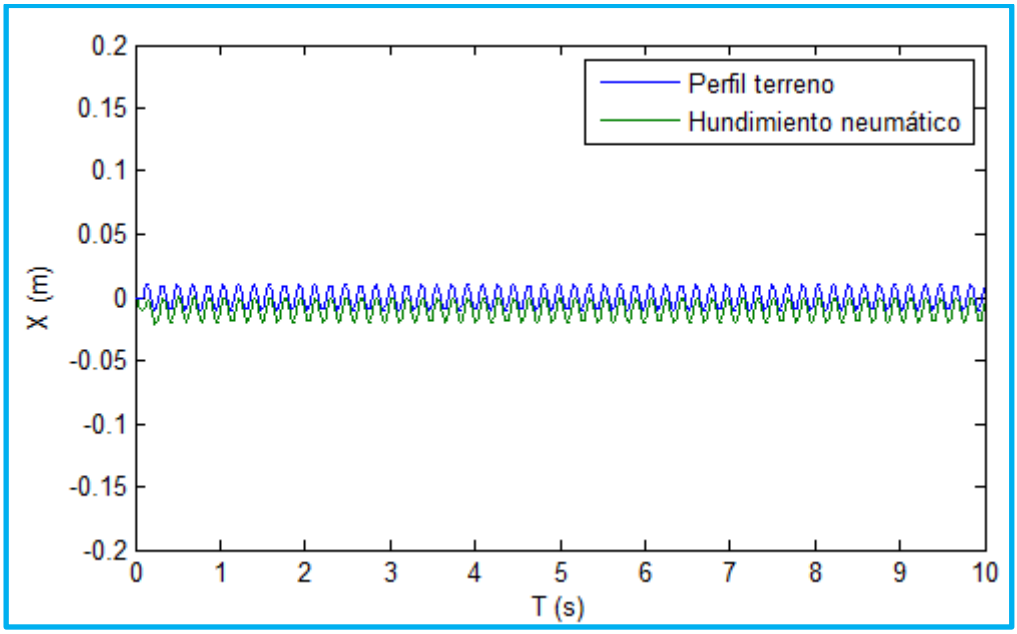

Figura 101. Perfil del terreno frente al perfil del neumático a frecuencias altas

- Al aumentar las frecuencias (y ya el perfil de carretera ondulado sea más pronunciados) como se ve en la Figura 101, la bicicleta rígida empieza a comportarse más inestable (bota más) y tener su frecuencia critica. Esto es debido a que al encontrarse las perturbaciones del terreno tan

pronunciadas y carecer de suspensiones, dichas perturbaciones van directamente a la bicicleta dando lugar a que rebote mucho más y esto se transmita al ciclista. Y en las bicicletas de doble suspensión, actúan las suspensiones amortiguando el terreno y por tanto, reduciendo el rebote tanto de la bicicleta como del ciclista. Es por ello por lo que tienen un descenso de la ganancia.

En el anterior diagrama de Bode que se hacia con respecto al centro de gravedad del ciclista, se observaba que al amortiguar también el ciclista no se acentuaban tanto estas diferencias, pero también se observaba como al aumentar la frecuencia (y tener el perfil ondulado más accidentado) la rígida se comportaba más inestable que las bicicletas dobles al tener un incremento dela ganancia.

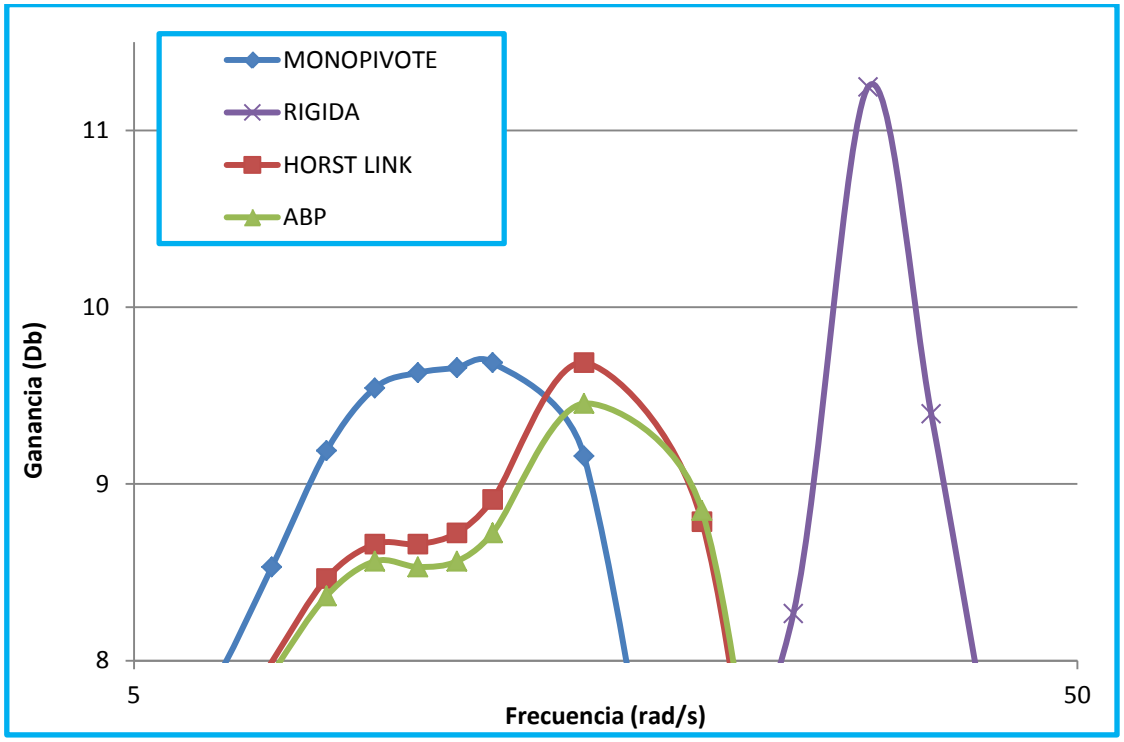

Figura 102. Detalle del diagrama de Bode en el sillín

En la Figura 102, se aumenta el gráfico en la zona de la frecuencia de resonancia y se puede ver como las suspensiones Monopivote y Horst Link tienen una mayor ganancia a la frecuencia crítica, que la suspensión trasera ABP. También se advierte como la rígida tiene a frecuencia crítica mayor, con una mayor ganancia.

7.8 Análisis cinemático en SimMechanics

El análisis cinemático se realiza con el objetivo de obtener valores de posición de distintos puntos de la bicicleta durante el movimiento del sistema de suspensión trasera, y con esto obtener el ratio de acción de los tipos de suspensiones traseras simuladas y la extensión de cadena. Para el análisis cinemático se utiliza el modelado del apartado 6.8.

7.8.1 Ratio de acción

El ratio de acción de una suspensión expresa cuánto se desplaza la rueda respecto a la carrera del amortiguador como se explico en el capítulo 3.3.6.

Por ello, para calcular el ratio de acción de los tres tipos de bicicletas con suspensión trasera, se calcula la relación entre la compresión del amortiguador y la del basculante. Para esto se utiliza el modelo para el cálculo del ratio acción, extrayendo los ratios de acción para cada modelo de suspensión trasera y comparándolo en una única gráfica.

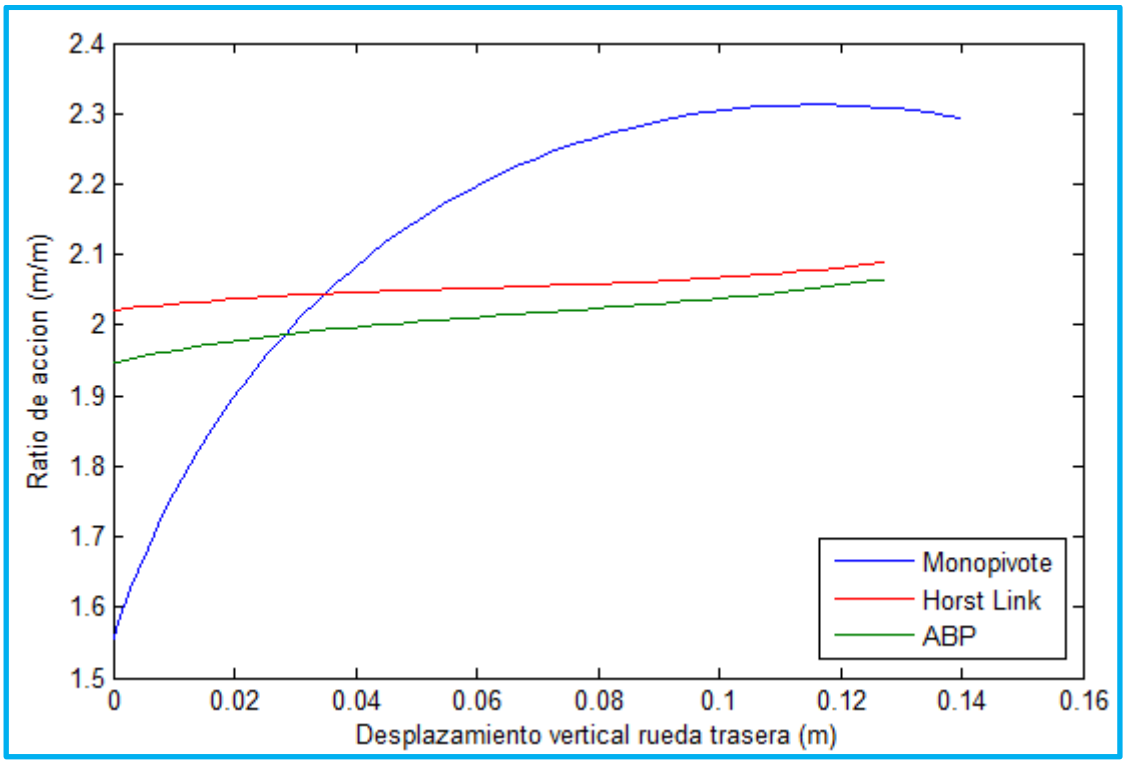

Figura 103. Ratio de acción de los distintos modelos de bicicleta de doble suspensión

En la Figura 103, se observa como la suspensión Monopivote tiene un mayor ratio de acción, y las suspensiones Horst Link y ABP tienen menor ratio de acción, siendo la suspensión ABP la que tiene el menor ratio de acción. Esto implica que, con un bajo ratio se consigue un comportamiento de la amortiguación mucho más suave, y el paso de la compresión a la extensión se realiza más rápido ya que el amortiguador trabaja con menor desmultiplicación.

También se observa como la suspensión Monopivote tiene al principio un menor ratio acción pero que conforme aumenta el desplazamiento de la rueda trasera se incrementa rápidamente el ratio de acción. Esto significa que para pequeñas amortiguaciones la suspensión Monopivote tiene un mejor ratio.

Sin embargo las suspensiones Horst Link y ABP se mantienen más constantes manteniendo el bajo ratio de acción pese al aumento del desplazamiento de la rueda trasera.

7.8.2 Extensión de la cadena

Mediante el modelo para el cálculo del ratio de acción también se obtiene la extensión de cadena producida por el aumento de las vainas al producirse la amortiguación. Del subsistema alargamiento de la cadena se obtienen en los datos que se almacenan en el Workspace y se reprendan en una gráfica.

En la Figura 104 se aprecia como la longitud de vainas va creciendo a medida que se comprime la suspensión, al crecer la longitud de vainas, la cadena se tensa y evita que la suspensión trabaje libremente. Mientras mayor sea el crecimiento de la cadena mayor inactividad de la suspensión.

Como se ve en el gráfico las vainas de la Monopivote (Línea Azul) se estiran unos 14.1 mm, las de la Horst Link 14.7 mm y las de la Active Bracking Pivot (ABP) 12.7 mm. Esto quiere decir que la Monopivote y Horst Link son bastante parecidos entre sí y que la ABP va a ser la más activa de las tres con una gran diferencia de comportamiento, se puede decir que la ABP es la que tiene una menor extensión de la cadena.

Todo coincide con el apartado 7.3, donde también se estudiaba la variación de la longitud de la cadena con la bicicleta y el ciclista en movimiento.

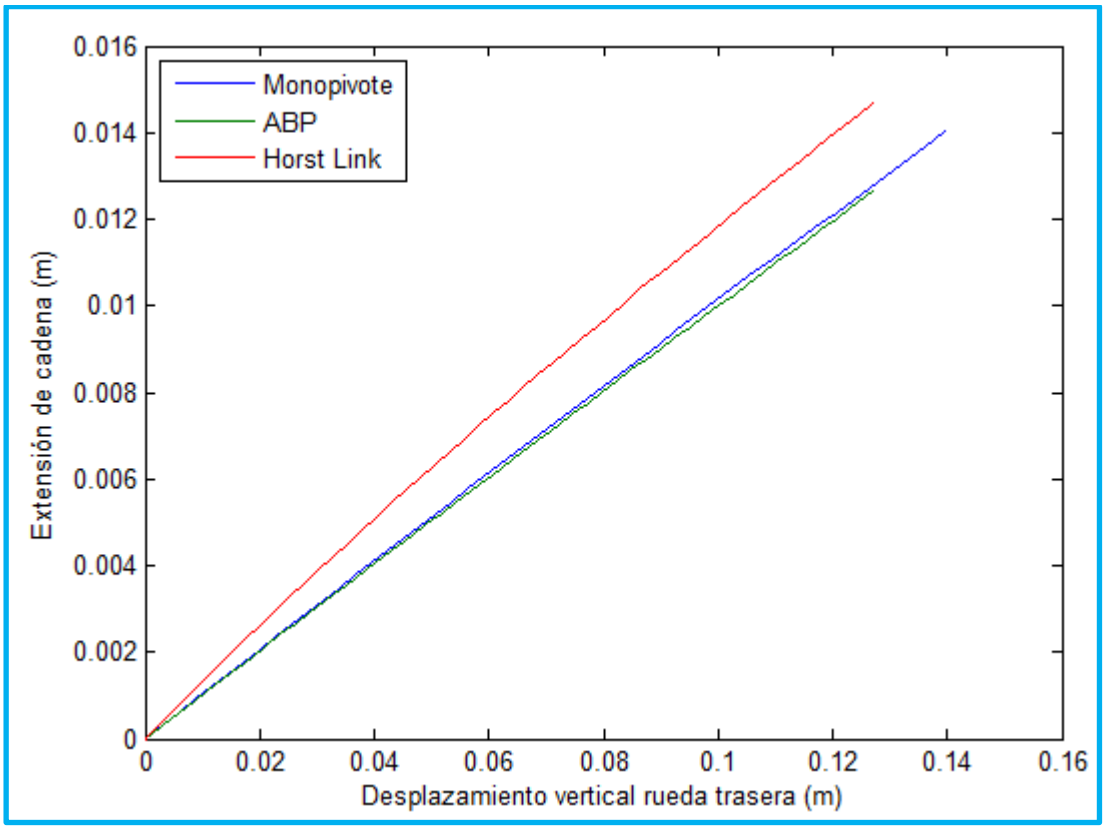

Figura 104. Extensión de la cadena para los distintos modelos de suspensión trasera

CAPÍTULO 8

Conclusiones y desarrollos futuros

8.1 Conclusiones

Con este proyecto se ha desarrollado un modelo válido para la simulación del comportamiento de distintos tipos de suspensiones traseras para bicicleta de montaña, mediante la herramienta SimMechanics de Matlab.

Se ha conseguido también simular el movimiento de las suspensiones debido al efecto de perturbaciones de un perfil de carretera.

Tras la obtención del modelo completo de la bicicleta con el ciclista, se han realizado análisis de distintos aspectos dinámicos y cinemáticos para ver el comportamiento de las distintas suspensiones y se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La suspensión trasera Monopivote produce un mayor alargamiento de la cadena y por lo cual tiene un mayor Back Pedal (tirón de los pedales), aunque se estabiliza mejor que la Horst Link. Esto lleva a que la suspensión Horst Link también es menos eficaz a la hora de amortiguar el salto y la monopivote es menos eficaz a la hora de coger el salto. La suspensión que mejor se comporta en este aspecto en la ABP coincidiendo con lo explicado en la teoría del Capítulo 3.2, teniendo el menor Back Pedal y por lo cual es la suspensión más eficaz, y más cómoda para el ciclista a la hora de pedalear. También al tener menos tirones de pedal conllevara a tener menores problemas mecánicos.

- El desplazamiento del centro de gravedad del ciclista es menor en la suspensión trasera monopivote, por lo cual es la suspensión que más confort producirá en el ciclista. Y la suspensión ABP sería la que menos confort tendría para el ciclista, muy seguida de la Horst Link. En cuanto a la bicicleta rígida el desplazamiento del ciclista es mucho mayor poniendo en compromiso el confort del ciclista.

- El desplazamiento de la suspensión trasera es menor en la suspensión ABP muy seguida de la Horst Link, esto quiere decir que requieren un menor recorrido de la suspensión para amortiguar.

- El tipo de suspensión trasera no influye en el desplazamiento de la suspensión delantera.

- Con respecto al desplazamiento del centro de la rueda trasera, este es mucho menor en la suspensión Monopivote lo cual hace que la oscilación dure menos y se mantenga más tiempo pegada al terreno con lo cual la seguridad es mayor. En la Horst Link y ABP se tiene un desplazamiento más oscilado lo que llevara a un mayor confort en el ciclista. También se observa el comportamiento de una bicicleta rígida,

que sería mucho menos confortable para el ciclista y menos seguro al estar mucho más tiempo despegada del suelo, y rebotar más contra el suelo.

- El ratio de acción de la suspensión ABP es el mejor al ser el más cercano a 1:2, ya que esta es la relación idónea al tener un desplazamiento de la rueda más lineal con el desplazamiento del amortiguador trasero, lo cual mejorara el confort y la seguridad del ciclista.

- En el diagrama de Bode de los distintos tipos de suspensión trasera simulados, se advierte una menor ganancia de la suspensión ABP a la frecuencia de resonancia, lo que implica que se comporte más estable que las otras dos suspensiones y el ciclista tenga un mayor confort y seguridad con un perfil de terreno ondulado a la frecuencia crítica. Con respecto a la bicicleta rígida se observa como frente a un perfil ondulado con frecuencias altas (simulando un perfil de carretera pronunciado) se tiene un mayor aumento de ganancia frente a las bicicletas de doble suspensión, con lo que se pone en compromiso la seguridad y confort del ciclista en este terreno. Sin embargo en perfiles de terreno sin perturbaciones, la bicicleta rígida tiene menor ganancia en el diagrama de Bode, lo que implica un menor desplazamiento del ciclista siendo mejor el confort de este.

Por tanto se llega a la conclusión final de que el sistema de suspensión ABP se comporta en todos los aspectos mejor que el sistema Horst Link, y por tanto el cambio de la articulación del centro dela vaina, al centro de la rueda trasera es un acierto. Y al compararlas con el sistema de suspensión Monopivote no hay suspensión trasera ideal, sino que cada una tiene sus ventajas e inconvenientes y es ya el propio ciclista quien viendo esto, debe elegir que suspensión se adapta mejor a sus necesidades. También se demuestra como una bicicleta rígida es más estable para terreno más llanos y, sin embargo, en terrenos abruptos se comporta muy inestable, lo cual perjudica tanto al confort como a la seguridad del ciclista.

8.2 Valoración final del interés del trabajo

Mediante el estudio realizado en este Proyecto Final de Carrera se ha conseguido explicar el funcionamiento de las aplicaciones de SimMechanics y Simulink de Matlab, para realizar el diseño de bicicletas de montaña de doble suspensión. Además, de obtener una predicción del comportamiento que tendrán las suspensiones de bicicleta de montaña en diferentes situaciones y

compararlas.

Los resultados obtenidos son de gran utilidad para comprender el funcionamiento de las suspensiones de bicicletas de montaña, viendo cuales se comportan mejor, entender lo que nos aportan frente a una bicicleta sin suspensiones (rígida) y poder realizar futuras mejoras en estas.

8.3 Desarrollos futuros

Tras concluir el proyecto fin de carrera de la simulación y estudio de distintas bicicletas de montaña de doble suspensión se proponen los siguientes desarrollos para mejorar y ampliar dicho proyecto:

1. Estudiar y comparar otros tipos de suspensiones traseras para bicicletas de montaña.
2. Realizar un estudio de la interferencia de la suspensión con la pedalada.
3. Estudiar el comportamiento de las suspensiones en situaciones de aceleración y frenada.
4. Realizar un modelo de suspensión trasera mejorado, a partir del modelo de suspensión que mejor se comporta de los analizados en este proyecto.
5. Realizar ensayos experimentales para comparar y validar los resultados obtenidos en la simulación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Clauser, McConville and Young, *"Volume and centre of mass of segments of the human body"*, AMRL-TR-69-70, 1969 and Chandler, Clauser, McConville, Reynolds and Young, *"Investigation of inertial properties of the human body"*, AMRL-TR-74-137, both Wright-Patterson Air Force Base, 1975.

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_suspension

[3] http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclismo_de_monta%C3%B1a

[4] http://www.ghost-bikes.com/bikes-2012/bike-detail/rt-lector-pro-team/

[5] http://www.mathworks.es/products/simmechanics/

[6] http://www.monografias.com/trabajos46/sistemas-lineales/sistemas-lineales.shtml#bode

[7] http://www.orbea.com/pt-es/bicis/modelos/occam_s10/#presentacion

[8] I. Mula, "*Estudio del comportamiento dinámico de un vehículo utilizando la herramienta SimMechanics de Matlab"*, 2009. pp. 67-79.

[9] R. Contini, "*Body Segments Parameters", Part II*, Artificial Limbs No. 1, spring 1972, pp. 14.

[10] R. Jáuregui, L. A. Aguilera, y E. R. Ledesma, "*Modelado y simulación de una bicicleta doble suspensión en ADAMS"*, Universidad de Guanajuato, 2007.

[11] The MathworksTM: "SimMechanicsTM Link User's Guide"

[12] The MathworksTM: "SimMechanicsTM User's Guide"

[13] The MathworksTM: "Simulink® User's Guide"

[14] The MathworksTM: MATLAB® User's Guide"

[15] www.mountainbike.es/

ANEXO

Archivos M-File de Matlab

Archivo suspensión Monopivote

```
%BICICLETA SUSPENSION MONOPIVOTE:

%Rueda trasera (r1):

mr1=0.998124;

Ir1= [0.0608952, 0, 0; 0, 0.0608952, 0; 0, 0, 0.121688];

r=0.354 ;%( radio rueda)

%Vaina (b):

mb=0.377233;

Ib=[4.53067e-005,-0.000102802, 2.57967e-005;-0.000102802, 0.00546082, 1.80107e-007; 2.57967e-005,1.80107e-007,0.00548106];

cgb=[0.225368 0.367018 0];%(centro gravedad vaina)

lb=0.421345; %(longitud vaina)

b=-7.52*PI/180;%(ángulo de la vaina)

a1= [cos (b) sin (b) 0;-sin (b) cos (b) 0;0 0 1]; %(Matriz de giro para el ángulo de la vaina)

%Tirantes (t):

mt=0.240845;

It=[0.00124869,-0.00213784,-2.5214e-006;-0.00213784,0.00371748,-1.4567e-006;-2.5214e-006,-1.4567e-006,0.00496139];

lt=0.485;

a=-36.37*PI/180;%(ángulo tirante radianes)

a2= [cos(a) sin(a) 0;-sin(a) cos(a) 0; 0 0 1];

%Pieza tirante (p):

mp=0.0222084;

Ip=[6.22024e-007,0,0;0,1.34055e-005,0;0,0,1.36574e-005];

lp=0.08049;

c=-58.69*PI/180;%(ángulo de la pieza)
```

```
a3= [cos(c) sin(c) 0;-sin(c) cos(c) 0; 0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo del tirante)

%Cilindro(c):

mc=0.149114;

Ic= [1.42719e-005, 0,0; 0,0.000110869, 0; 0, 0,0.000110547];

d=-28.54*PI/180;%(ángulo amortiguador radianes)

lc=0.092165543;%(longitud cilindro amortiguador)

a4= [cos(d) sin(d) 0;-sin(d) cos(d) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo del amortiguador)

dcgc=0.0529;%(centro de gravedad del cilindro)

%Amortiguador(a):

ma=0.225754;

Ia=[5.58331e-005,0,0;0,0.000235014,0;0,0,0.000235044];

la=0.1175785563;

dcga=0.058978553;%(distancia del centro de gravedad del amortiguador en el eje x a cS2)

%Rueda delantera (r2):

dcentros=1.06326;%(distancia entre centros ruedas)

%Suspensión delantera (e):

me=0.953162;

Ie=      [0.0110327,-4.79804e-006,-3.78158e-011;-4.79804e-006,0.000197136,
3.70044e-010;-3.78158e-011,3.70044e-010,0.0111683];

ls=0.373;

e=-20.5*PI/180;%(ángulo suspensión delantera)

a5= [cos(e) sin(e) 0;-sin(e) cos(e) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de la suspensión delantera)

cgs=[-0.023 0.18674 0];%(posición centro gravedad suspensión delantera respecto a5)
```

```
%Cuadro (cu):

mcu=2.47982;

Icu= [0.105273,-0.0234776,-0.000844562;-0.0234776, 0.111744, 5.63008e-005;-0.000844562, 5.63008e-005,0.211112];

cgcu=[0.56345 0.72895 0];%(centro gravedad cuadro)


%CICLISTA:

%Tronco (tr):

mtr=40.607;

Itr= [0.310916, 0.00910486, 2.64229e-008; 0.00910486, 3.15632, 2.85981e-009; 2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

%Pie (pi);

mpi=1.029;

Ipi= [0.0056979,-0.000789977, 1.06442e-006;-0.000789977, 0.000746211, 2.1433e-006; 1.06442e-006,2.1433e-006,0.00618438];

cgpi=[0.50071373364 0.413475081 0];

%Gemelo (ge):

mge=3.045; %(masa gemelo)

Ige=[0.00234939,0,0;0,0.049657,0;0,0,0.0501169]; %(inercia gemelo)

lge=0.4114; %(longitud gemelo)

g=(90-89.011)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge=[cos(g) sin(g) 0;-sin(g) cos(g) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del gemelo)

cgge=0.2589763; %(posición centro gravedad gemelo)

%Muslo (mu);

mmu=7.189;

Imu=[0.00765594,0,0;0,0.149102,0;0,0,0.152992];

lmu=0.4165;%(longitud muslo)
```

```
cgmu=0.26160365;

mu=-33.627*3.14159265358979323846264338327795/180;%(ángulo muslo)

mgmu=[cos(mu) sin(mu) 0;-sin(mu) cos(mu) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del muslo)

%Tronco y cabeza (tyc):

mtyc=40.607;

Ityc= [0.310916, 0.00910486, 2.64229e-008; 0.00910486, 3.15632, 2.85981e-009; 2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

lh=0.4896;%(longitud hombro respecto cadera eje x)

cgtyc=0.4730879;%(posición centro gravedad cuerpo y cabeza eje x)

tyc=-22.564*PI/180;%(ángulo tronco y cabeza)

mgtyc=[cos(tyc) sin(tyc) 0;-sin(tyc) cos(tyc) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de tyc)

%Bíceps (bi):

mbi=3.682;

Ibi=[0.00208136,0,0;0,0.0420622,0;0,0,0.0424998];

lbi=0.3162;%(longitud bíceps)

cgbi=0.1622106;%(posición centro gravedad bíceps eje x)

bi=(-75.457+180)*PI/180;%(ángulo bíceps)

mgbi=[cos(bi) sin(bi) 0;-sin(bi) cos(bi) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de bíceps)

%Antebrazo (an):

man=2.254;

Ian= [0.00124187,-1.24998e-005,0;-1.24998e-005,0.0176048, 0; 0, 0,0.0178983];

lan=0.2482;%(longitud antebrazo)

cgan=0.09669872;%(posición centro gravedad antebrazo eje x)

an=8.915*PI/180;%(ángulo antebrazo)

mgan=[cos(an) sin(an) 0;-sin(an) cos(an) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de an)
```

```
%Mano (ma):

mma=0.91;

Ima= [0.000527033, 3.58728e-005,0; 3.58728e-005,0.00122201, 0; 0, 0,0.00129769];

cgma=[0.842162 1.03814 0];%(posición centro gravedad mano)

%Muslo2 (mu2);

cgmu2=0.15489635;

mu2=73.463*PI/180;%(ángulo muslo2)

mgmu2= [cos(mu2) sin(mu2) 0;-sin(mu2) cos(mu2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del muslo2)

%Gemelo2 (ge2):

g2=(90-60.74+90)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge2= [cos(g2) sin(g2) 0;-sin(g2) cos(g2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del gemelo)

cgge2=0.1524237; %(posición centro gravedad gemelo)

%Pie2 (pi2);

cgpi2=[0.1946072481 0.4107514303 0];

%Anclajes del ciclista a la bici monopivote:

manom=[0.8955153459 0.9988052618 0];% (anclaje de la mano al manillar)

pie1m= [0.271823878 0.3694250444 0];%( anclaje del pie1 al pedal)

pie2m= [0.5782881587 0.369402959 0];%( anclaje del pie2al pedal)

%posición del centro del eje pedalier:

pedalier=[0.42057749620 0.3660463473 0];

% longitud cadena inicial:

lcadenam=0.42075;
```

Archivo suspensión Horst Link

```
%BICICLETA SUSPENSION HORST LINK:

%Rueda trasera (r1):

mr1=0.998124;

Ir1=[0.0608952,0,0;0,0.0608952,0;0,0,0.121688];

r=0.354 ;%( radio rueda)

%Vaina (bh):

mbh=0.140475;

Ibh=[2.47026e-005,-0.00014605,-1.345e-006;-0.00014605,0.00170546,-
8.61149e-008;-1.345e-006,-8.61149e-008,0.00172782];

cgbh=[0.24953 0.362676 0];%(centro gravedad vaina)

lbh=0.3677035143; %(longitud vaina)

bh=-9.958*PI/180;%(ángulo de la vaina)

b1= [cos(bh) sin(bh) 0;-sin(bh) cos(bh) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo
de la vaina)

%Tirantes (th):

mth=0.161132;

Ith=[0.000933096,-0.00106008,-1.74674e-006;-0.00106008,0.00124941,-
9.9013e-007;-1.74674e-006,-9.9013e-007,0.00217983];

lts=0.3696119593;

ts=-46.85*PI/180;%(ángulo tirantes radianes)

b2=[cos(ts) sin(ts) 0;-sin(ts) cos(ts) 0;0 0 1];

cgth=[0.113742 0.47144 0];

cs4th=[0.0564493 0.345615 0];

%Pieza horst link (ph):

mph=0.0737596;

Iph=[1.24081e-005,-2.49856e-005,-8.79563e-007;-2.49856e-
```

```
005,0.000132624,-1.16863e-007;-8.79563e-007,-1.16863e-007,0.000143807];

lph1=0.10764;

lph2=0.07043;

ph1=-0.426*PI/180;%(ángulo de la pieza1)

ph2=-30.456*PI/180;%(ángulo de la pieza2)

b3=[cos(ph1) sin(ph1) 0;-sin(ph1) cos(ph1) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo de pieza1)

b4=[cos(ph2) sin(ph2) 0;-sin(ph2) cos(ph2) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo del pieza2)

cgph=[0.334356 0.634501 0];

%Cilindro (ch):

mc=0.149114;

Ic=[1.42719e-005,0,0;0,0.000110869,0;0,0,0.000110547];

lch=0.075218582;%(longitud cilindro amortiguador)

cgch=[0.428814 0.520653 0];%(centro de gravedad del cilindro)

%Amortiguador (ah):

ma=0.225754;

Ia=[5.58331e-005,0,0;0,0.000235014,0;0,0,0.000235044];

lah=0.11737;

dcgah=0.0586;%(distancia del centro de gravedad del amortiguador en el eje x a cS2)

ahh=(3.11)*PI/180;%(ángulo amortiguador radianes)

ah=(90-3.11)*PI/180;%(ángulo amortiguador radianes girado)

b5=[cos(ah) sin(ah) 0;-sin(ah) cos(ah) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para el ángulo del amortiguador)

%Rueda delantera (r2h):

dcentrosh=1.0641351166;%(distancia entre centros ruedas)
```

```
%Suspensión delantera (e):

me=0.953162;

Ie=[0.0110327,-4.79804e-006,-3.78158e-011;-4.79804e-
006,0.000197136,3.70044e-010;-3.78158e-011,3.70044e-010,0.0111683];

ls=0.373;

e=-20.5*PI/180;%(ángulo suspensión delantera)

a5=[cos(e) sin(e) 0;-sin(e) cos(e) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de la suspensión
delantera)

cgs=[-0.023 0.18674 0];%(posición centro gravedad suspensión delantera
respecto a5)

%Cuadro (cuh):

mcuh=2.76877;

Icuh=[0.113905,-0.0300604,-0.000882601;-0.0300604,0.122611,0.00011647;-
0.000882601,0.00011647,0.230025];

cgcuh=[0.568698 0.724318 0];%(centro gravedad cuh)


%CICLISTA:

%Tronco (tr):

mtr=40.607;

Itr=[0.310916,0.00910486,2.64229e-008;0.00910486,3.15632,2.85981e-
009;2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

%Pie (pi);

mpi=1.029;

Ipi=[0.0056979,-0.000789977,1.06442e-006;-
0.000789977,0.000746211,2.1433e-006;1.06442e-006,2.1433e-
006,0.00618438];

cgpi=[0.50071373364 0.413475081 0];

%Gemelo (ge):
```

```
mge=3.045; %(masa gemelo)

Ige=[0.00234939,0,0;0,0.049657,0;0,0,0.0501169]; %(inercia gemelo)

lge=0.4114; %(longitud gemelo)

g=(90-89.011)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge=[cos(g) sin(g) 0;-sin(g) cos(g) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del gemelo)

cgge=0.2589763; %(posición centro gravedad gemelo)

%Muslo (mu);

mmu=7.189;

Imu=[0.00765594,0,0;0,0.149102,0;0,0,0.152992];

lmu=0.4165;%(longitud muslo)

cgmu=0.26160365;

mu=-33.627*PI/180;%(ángulo muslo)

mgmu=[cos(mu) sin(mu) 0;-sin(mu) cos(mu) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del
muslo)

%Tronco y cabeza (tyc):

mtyc=40.607;

Ityc=[0.310916,0.00910486,2.64229e-008;0.00910486,3.15632,2.85981e-
009;2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

lh=0.4896;%(longitud hombro respecto cadera eje x)

cgtyc=0.4730879;%(posición centro gravedad cuerpo y cabeza eje x)

tyc=-22.564*PI/180;%(ángulo tronco y cabeza)

mgtyc=[cos(tyc) sin(tyc) 0;-sin(tyc) cos(tyc) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de tyc)


%Bíceps (bi):

mbi=3.682;

Ibi=[0.00208136,0,0;0,0.0420622,0;0,0,0.0424998];
```

```
lbi=0.3162;%(longitud bíceps)

cgbi=0.1622106; %(posición centro gravedad bíceps eje x)

bi=(-75.457+180)*PI/180;%(ángulo bíceps)

mgbi=[cos(bi) sin(bi) 0;-sin(bi) cos(bi) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de bíceps)

%Antebrazo (an):

man=2.254;

Ian=[0.00124187,-1.24998e-005,0;-1.24998e-005,0.0176048,0;0,0,0.0178983];

lan=0.2482;%(longitud antebrazo)

cgan=0.09669872;%(posición centro gravedad antebrazo eje x)

an=8.915*PI/180;%(ángulo antebrazo)

mgan=[cos(an) sin(an) 0;-sin(an) cos(an) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de
antebrazo)

%Mano (ma):

mma=0.91;

Ima=[0.000527033,3.58728e-005,0;3.58728e-
005,0.00122201,0;0,0,0.00129769];

cgma=[0.842162 1.03814 0];%(posición centro gravedad mano)

%Muslo2 (mu2);

cgmu2=0.15489635;

mu2=73.463*PI/180;%(ángulo muslo2)

mgmu2=[cos(mu2) sin(mu2) 0;-sin(mu2) cos(mu2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo
del muslo2)

%Gemelo2 (ge2):

g2=(90-60.74+90)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge2=[cos(g2) sin(g2) 0;-sin(g2) cos(g2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del
gemelo)

cgge2=0.1524237; %(posición centro gravedad gemelo)
```

```
%Pie2 (pi2);
cgpi2=[0.1946072481 0.4107514303 0];
%Anclajes del ciclista a la bici Horst Link:
manoh=[0.8967837248 0.9988052618 0];% (anclaje de la mano al manillar)
pie1h=[0.5791490777 0.3694029842 0];%( anclaje del pie1 al pedal)
pie2h=[0.272929479 0.3694250193 0];%( anclaje del pie2al pedal)
%posición del centro del eje pedalier:
pedalierh=[0.4214 0.3661 0];
% longitud cadena inicial:
lcadenah=0.42158;
```

Archivo suspensión Active Bracking Pivot (ABP)

```
%BICICLETA SUSPENSION Active Bracking Pivot:
%Rueda trasera (r1):
mr1=0.998124;
Ir1=[0.0608952,0,0;0,0.0608952,0;0,0,0.121688];
r=0.354;%(radio rueda)
%Vaina (babp):
mbabp=0.157645;
Ibabp=[2.3462e-005,-0.000108378,-2.51229e-006;-0.000108378,0.00242676,-
4.2936e-008;-2.51229e-006,-4.2936e-008,0.0024476];
cgbabp=[0.226578 0.363056 0];%(centro gravedad vaina)
lbabp=0.4273324482; %(longitud vaina)
babp=-7.42*PI/180;%(ángulo de la vaina)
c2=[cos(babp) sin(babp) 0;-sin(babp) cos(babp) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro para
el angulo de la vaina)
```

```
%Tirantes (tabp):

mtabp=0.114784;

Itabp=[0.000289551,-0.000494067,1.48719e-006;-
0.000494067,0.000860251,8.59614e-007;1.48719e-006,8.59614e-
007,0.00114791];

ltabp=0.37271571;

tabp=-46.192*PI/180;%(ángulo tirantes radianes)

c1=[cos(tabp) sin(tabp) 0;-sin(tabp) cos(tabp) 0;0 0 1];

cgtabp=[0.133115 0.493334 0];

%Pieza horst link (pabp):

mph=0.0737596;

Iph=[1.24081e-005,-2.49856e-005,-8.79563e-007;-2.49856e-
005,0.000132624,-1.16863e-007;-8.79563e-007,-1.16863e-007,0.000143807];

lph1=0.10764;

lph2=0.07043;

pabp1=-0.7795*PI/180;%(ángulo de la pieza1)

pabp2=-30.81*PI/180;%(ángulo de la pieza2)

c3=[cos(pabp1) sin(pabp1) 0;-sin(pabp1) cos(pabp1) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro
para el ángulo de pieza1)

c4=[cos(pabp2) sin(pabp2) 0;-sin(pabp2) cos(pabp2) 0;0 0 1];  %(Matriz de giro
para el ángulo del pieza2)

cgpabp=[0.339435 0.63434 0]

%Cilindro (cabp):

mc=0.149114;

Ic=[1.42719e-005,0,0;0,0.000110869,0;0,0,0.000110547];

lch=0.075218582;%(longitud cilindro amortiguador)

cgcabp=[0.433877 0.52065 0];%(centro de gravedad del cilindro)
```

```
%Amortiguador (ah):

ma=0.225754;

Ia=[5.58331e-005,0,0;0,0.000235014,0;0,0,0.000235044];

lah=0.11737;

dcgah=0.0586;%(distancia del centro de gravedad del amortiguador en el eje x)

ahh=(3.11)*PI/180;%(ángulo amortiguador radianes)

ah=(90-3.11)*PI/180;%(ángulo amortiguador radianes girado)

b5=[cos(ah) sin(ah) 0;-sin(ah) cos(ah) 0;0 0 1];  %Matriz de giro para el ángulo del amortiguador

%Rueda delantera (r2abp):

dcentrosabp=1.06929286;%(distancia entre centros ruedas)

%Suspensión delantera (e):

me=0.953162;

Ie=[0.0110327,-4.79804e-006,-3.78158e-011;-4.79804e-006,0.000197136,3.70044e-010;-3.78158e-011,3.70044e-010,0.0111683];

ls=0.373;

e=-20.5*PI/180;%(ángulo suspensión delantera)

a5=[cos(e) sin(e) 0;-sin(e) cos(e) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de la suspensión delantera)

cgs=[-0.023 0.18674 0];%(posición centro gravedad suspensión delantera respecto a5)

%Cuadro (cuabp):

mcuh=2.76877;

Icuh=[0.113905,-0.0300604,-0.000882601;-0.0300604,0.122611,0.00011647;-0.000882601,0.00011647,0.230025];

cgcuabp=[0.573874 0.724318 0];%(centro gravedad cuadro ABP)


%CICLISTA:
```

```
%Tronco (tr):

mtr=40.607;

Itr=[0.310916,0.00910486,2.64229e-008;0.00910486,3.15632,2.85981e-
009;2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

%Pie (pi);

mpi=1.029;

Ipi=[0.0056979,-0.000789977,1.06442e-006;-
0.000789977,0.000746211,2.1433e-006;1.06442e-006,2.1433e-
006,0.00618438];

cgpi=[0.50071373364 0.413475081 0];

%Gemelo (ge):

mge=3.045; %(masa gemelo)

Ige=[0.00234939,0,0;0,0.049657,0;0,0,0.0501169]; %(inercia gemelo)

lge=0.4114; %(longitud gemelo)

g=(90-89.011)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge=[cos(g) sin(g) 0;-sin(g) cos(g) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del gemelo)

cgge=0.2589763; %(posición centro gravedad gemelo)

%Muslo (mu);

mmu=7.189;

Imu=[0.00765594,0,0;0,0.149102,0;0,0,0.152992];

lmu=0.4165;%longitud muslo

cgmu=0.26160365;

mu=-33.627*PI/180;%(ángulo muslo)

mgmu=[cos(mu) sin(mu) 0;-sin(mu) cos(mu) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del
muslo)

%Tronco y cabeza (tyc):

mtyc=40.607;

Ityc=[0.310916,0.00910486,2.64229e-008;0.00910486,3.15632,2.85981e-
```

```
009;2.64229e-008,2.85981e-009,2.98198];

lh=0.4896;%(longitud hombro respecto cadera eje x)

cgtyc=0.4730879;%(posición centro gravedad cuerpo y cabeza eje x)

tyc=-22.564*PI/180;%(ángulo tronco y cabeza)

mgtyc=[cos(tyc) sin(tyc) 0;-sin(tyc) cos(tyc) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de tyc)

%Bíceps (bi):

mbi=3.682;

Ibi=[0.00208136,0,0;0,0.0420622,0;0,0,0.0424998];

lbi=0.3162;%(longitud bíceps)

cgbi=0.1622106;%(posición centro gravedad bíceps eje x)

bi=(-75.457+180)*PI/180;%(ángulo bíceps)

mgbi=[cos(bi) sin(bi) 0;-sin(bi) cos(bi) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de bíceps)

%Antebrazo (an):

man=2.254;

Ian=[0.00124187,-1.24998e-005,0;-1.24998e-005,0.0176048,0;0,0,0.0178983];

lan=0.2482;%(longitud antebrazo)

cgan=0.09669872;%posición centro gravedad antebrazo eje x

an=8.915*PI/180;%(ángulo antebrazo)

mgan=[cos(an) sin(an) 0;-sin(an) cos(an) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo de
antebrazo)

%Mano (ma):

mma=0.91;

Ima=[0.000527033,3.58728e-005,0;3.58728e-
005,0.00122201,0;0,0,0.00129769];

cgma=[0.842162 1.03814 0];%(posición centro gravedad mano)

%Muslo2 (mu2);
```

```
cgmu2=0.15489635;

mu2=73.463*PI/180;%(ángulo muslo2)

mgmu2=[cos(mu2) sin(mu2) 0;-sin(mu2) cos(mu2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del muslo2)

%Gemelo2 (ge2):

g2=(90-60.74+90)*PI/180;%(ángulo gemelo)

mgge2=[cos(g2) sin(g2) 0;-sin(g2) cos(g2) 0;0 0 1];%(matriz giro ángulo del gemelo)

cgge2=0.1524237; %(posición centro gravedad gemelo)

%Pie2 (pi2);

cgpi2=[0.1946072481 0.4107514303 0];

%Anclajes del ciclista a la bici ABP:

manoabp=[0.901425478 0.9988052618 0];

pie1abp=[0.5842174453 0.3694029591 0];

pie2abp=[0.2779697788 0.369425444 0];

%Posición eje pedalier ABP:

pejeabp=[0.4266166023 0.3660463473 0];

%longitud cadena inicial:

lcadenaabp=0.426787;
```