

Proyecto Fin de Carrera

***ACONDICIONAMIENTO DE  
PLATAFORMA STEWART PARA  
SIMULADOR DE MOTOCICLETA***

Dirigido por:  
D. Santiago Baselga Ariño  
D. Javier Abad Blasco

Realizado por:  
Andrés Romea Torralba  
Jorge Puértolas Bueno

Septiembre 2010

El presente Proyecto Final de Carrera ha sido realizado en colaboración con Andrés Romea Torralba.

---

*Agradecimientos:*

---

*A D. Santiago Baselga y D. Javier Abad, por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo este proyecto.*

---

*A D. Jesús María de Velasco, D. Pablo Bosque, D. Pedro Soler y D. Alfredo Lop, por la ayuda prestada a lo largo de estos últimos diez meses.*

---

*A nuestros familiares y amigos, por su apoyo incondicional en todo momento.*

*Gracias a todos.*

Firmado: Jorge Puértolas Bueno



## **ÍNDICE**

### **MEMORIA**

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 Objetivos.....	8
2.- ESTADO INICIAL DEL SIMULADOR .....	10
2.1 Introducción .....	10
2.2 Plataforma y cabina .....	10
2.3 Motocicleta .....	11
2.4 Ordenador y joystick.....	13
2.5 Equipo de sonido y audio.....	13
2.6 Entorno de realidad virtual .....	14
3.- PLATAFORMA STEWART DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD .....	15
3.1 Generalidades.....	15
3.2 Uso y limitaciones .....	17
4.- ESTABILIDAD DE LA MOTO SOBRE LA CABINA .....	20
4.1 Funciones del soporte entre la cabina y la moto .....	20
4.2 Diferentes diseños de estabilidad:.....	22
4.2.1 Primer diseño: .....	23
4.2.2 Segundo diseño: .....	26
4.2.3 Tercer diseño: .....	28
4.2.4 Diseño final:.....	31



<b>5.- FRENO DE COMPRESIÓN EXTERNA .....</b>	<b>35</b>
5.1 Introducción .....	35
5.2 Componentes .....	37
5.2.1 Pletina base: .....	37
5.2.2 Pletina inferior: .....	38
5.2.3 Zapata: .....	39
5.2.3 Pletina superior .....	40
5.2.4 Material de fricción.....	40
5.2. Tornillos.....	42
5.3 Planos.....	43
5.4 Cálculos .....	44
5.4.1 Presión sobre el eje .....	45
5.4.3 Fuerza axial máxima transmisible por la unión.....	45
5.4.5 Resultados del COSMOS.....	45
<b>6.- ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>54</b>
6.1 Introducción .....	54
6.2 Interfaz PC – usuario .....	55
6.3 Entorno gráfico .....	56
6.4 Código del programa principal .....	57
6.4.1 Cálculo de “dt#” .....	59
6.4.2 Final de programa .....	60
6.4.3 Activación del MDA.....	61
6.4.4 Contador de tiempo para el fichero.....	63
6.5 Filtrado de los datos egresados del simulador .....	64
6.5.1 Filtrado de aceleraciones .....	66



6.5.1.1 Filtrado de las aceleraciones longitudinales .....	66
6.5.1.2 Filtrado de las aceleraciones laterales.....	69
6.5.1.3 Filtrado de las aceleraciones verticales.....	73
6.5.2 Filtrado del cabeceo .....	76
6.5.3 Filtrado del balanceo.....	78
6.5.4 Filtrado de la velocidad angular.....	81
6.5.5 Filtrado de la velocidad angular de guiñado.....	83
6.6 Interfaz PC – Plataforma Stewart .....	86
6.6.1 Adaptación de las aceleraciones .....	88
6.6.1.1 Aceleración longitudinal.....	89
6.6.1.2 Aceleración lateral .....	89
6.6.1.3 Aceleración vertical .....	89
6.6.2 Adaptación del cabeceo .....	90
6.6.3 Adaptación del balanceo.....	93
6.6.4 Adaptación de la velocidad angular de guiñado .....	97
7.- INSTALACIÓN MECÁNICA DE LOS SENSORES .....	98
7.1 Introducción.....	98
7.2 Sensores empleados .....	99
7.2.1 Potenciómetros.....	99
7.2.1.1 Potenciómetros rotatorios .....	99
7.2.1.2 Potenciómetros deslizantes .....	100
7.2.2 Interruptores finales de carrera .....	100
7.2.3 Sensores de presión.....	101
7.3 Aplicación de los sensores.....	103
7.3.1 Simulación cambio de marchas .....	103



7.3.2 Simulación balanceo / inclinación lateral .....	104
7.3.3 Simulación del giro del manillar.....	105
7.3.4 Simulación de frenado .....	106
7.3.4 Simulación aceleración .....	108
7.3.5 Simulación embragado .....	109
<b>8.- LINEAS FUTURAS .....</b>	<b>110</b>
8.1 Manejo del simulador en primera persona.....	110
8.2 Control de estabilidad de la moto en la cabina mediante elementos activos. 111	
8.2.1 Precisión en la posición del vehículo.....	111
8.2.2 Inclinación progresiva.....	111
8.3 Modelo dinámico .....	112
<b>9.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>114</b>
9.1 Freno de fricción.....	114
9.2 Diseño e instalación mecánica de sensores.....	116
9.3 Entorno de realidad virtual .....	115
<b>10.-BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>117</b>

## **ANEXOS**

Anexo A: Plataforma

Anexo B: Ordenador y Joystick

Anexo C: Sensores

Anexo D: Planos



# ***MEMORIA***

---



## **1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1 Introducción**

Este proyecto ha sido elaborado en el departamento de Ingeniería Mecánica (Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes) de la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Zaragoza.

La simulación del comportamiento de los vehículos es un tema de gran interés para los ingenieros y diseñadores que trabajan dentro del campo de la automoción. Ya que con ello se consigue reproducir de forma real situaciones de riesgo, evitando situaciones de peligro para el conductor.

De esta forma, se proporcionan experiencias previas de gran importancia para solventar dichas situaciones en casos reales.

El interés de este proyecto se centra en aplicar estas técnicas a uno de los vehículos menos simulados sobre plataformas móviles, la motocicleta.

La escasa simulación es debida a la dificultad que implica el balanceo de la moto y sus fuerzas laterales durante el trazado de curvas. Esta parte, con gran peso en el proyecto, centrará los capítulos; 4, 5 y algunos apartados del 6.

El objetivo de los simuladores es introducir al usuario en el modelo que tienen programado. Cuanto más variables sea capaz de simular el modelo, mayor será la calidad de la simulación. Lo que se pretende es que la persona perciba el mismo conjunto de sensaciones que le produce la situación real a simular.



El sistema diseñado en este proyecto estará formado por:

- Plataforma Stewart de 6 grados de libertad: es la encargada de generar los movimientos que se sienten en el simulador.
- Puesto de pilotaje, formado por una cabina situada encima de la plataforma, en la cual se aloja la motocicleta con su sistema de sujeción a la base. Es el medio de contacto físico entre el usuario y el simulador.
- Freno de compresión externa para crear estabilidad: proporciona la estabilidad de la moto en el interior del puesto de pilotaje durante los balanceos.
- Sistema audiovisual de realidad virtual, para recibir la información visual y sonora simulada. Consta de un televisor de pantalla plana y unos altavoces situados en el interior de la cabina.
- Tratamiento de datos: parte de la identificación y transformación de movimientos en señales mediante sensores acoplados en la moto.
- Programa principal del simulador: formado por escenarios virtuales sobre los que corren los modelos cinemático-dinámicos desarrollados en proyectos anteriores y mejorados en este.
- Computadoras de procesamiento del programa del simulador y de control de la plataforma.



## **1.2 Objetivos**

A la vista de nuestros conocimientos, como estudiantes de último curso de Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica, y del estado de desarrollo del simulador al comienzo de este proyecto, nos planteamos los siguientes objetivos:

- Diseño de varios sistemas mecánicos, para lograr la estabilidad de la motocicleta dentro de la cabina durante el trazado de curvas.
- Elección del diseño más adecuado, estudio completo, realización de cálculos, dibujado de planos y finalmente, montaje sobre la cabina.
- Mejorar el programa de simulación realizado en el proyecto anterior mediante la herramienta de programación DarkBASIC Professional.
- Adaptar los valores de aceleraciones, cabeceos, balanceos y velocidades angulares de guiñado, a rangos que se producen en situaciones de conducción real.
- Modificar los datos egresados por el simulador para el correcto funcionamiento de la plataforma Stewart.
- El proyecto termina con la instalación mecánica de los sensores encargados de captar los movimientos producidos por el piloto en la moto, necesarios para la conducción y simulación.

El contenido de la memoria del proyecto es el siguiente:

- Capítulo 2: Descripción del estado del simulador al comienzo del proyecto.



- Capítulo 3: Características de la plataforma Stewart usada en este proyecto.
- Capítulo 4: Diferentes diseños mecánicos para la estabilidad de la motocicleta dentro de la cabina.
- Capítulo 5: Desarrollo completo del freno de compresión externa.
- Capítulo 6: Mejoras introducidas en el entorno virtual del simulador, adaptación de los resultados a valores reales y modificación de estos para un correcto funcionamiento de la plataforma Stewart.
- Capítulo 7: Instalación mecánica de los sensores sobre la motocicleta.
- Capítulo 8: Conclusiones obtenidas en relación a los objetivos aquí planteados.
- Capítulo 9: Futuras líneas de actuación sobre el simulador en posteriores proyectos.
- Anexo A: Características de la plataforma Stewart.
- Anexo B: Características del ordenador y joystick utilizados.
- Anexo C: Ficha técnica de los sensores.
- Anexo D: Planos del freno de compresión externa.



## **2.- ESTADO INICIAL DEL SIMULADOR**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se va a proceder a describir la situación en la que se encontraban todos los componentes del simulador al inicio de este proyecto.

Puesto que el simulador es resultado de proyectos fin de carrera de diferentes alumnos de la universidad, se debe introducir al comienzo de este, cual era la situación en la se encontraba al comienzo del nuestro.

Así pues en los apartados siguientes se describirá cada una de las partes que componen al simulador.

### **2.2 Plataforma y cabina**

La plataforma Stewart está anclada al suelo de la nave a través de su bancada.

La cabina está montada sobre la plataforma móvil de la plataforma Stewart, como puede observarse en la figura 2.1. Las dimensiones del habitáculo interior de la cabina son: 1450 mm de alto, 2250 mm de largo y 1450 mm de ancho.



Figura 2.1 Cabina sobre plataforma Stewart

### **2.3 Motocicleta**

La motocicleta utilizada en el proyecto es una Honda NSR 125. Está montada en el interior de la cabina, fijada a través de un soporte diseñado en el proyecto anterior y que se puede visualizar en las imágenes 2.2 y 2.3:

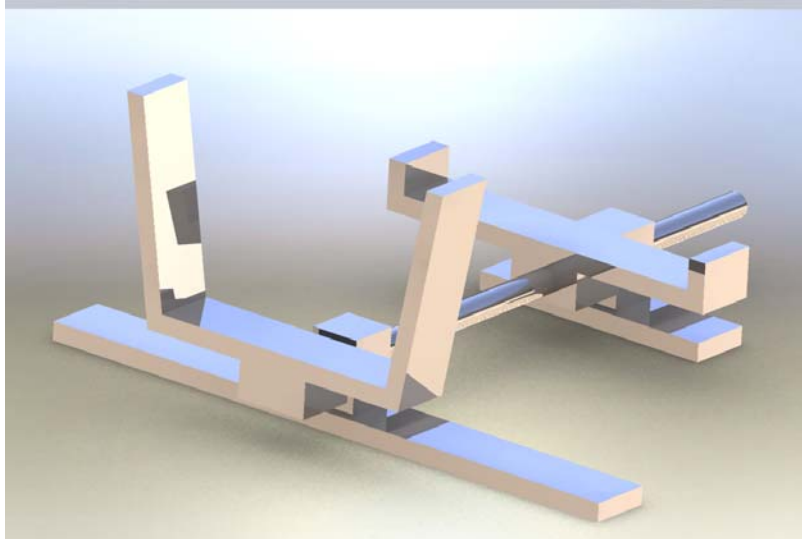


Figura 2.2 Soporte moto en SolidWorks

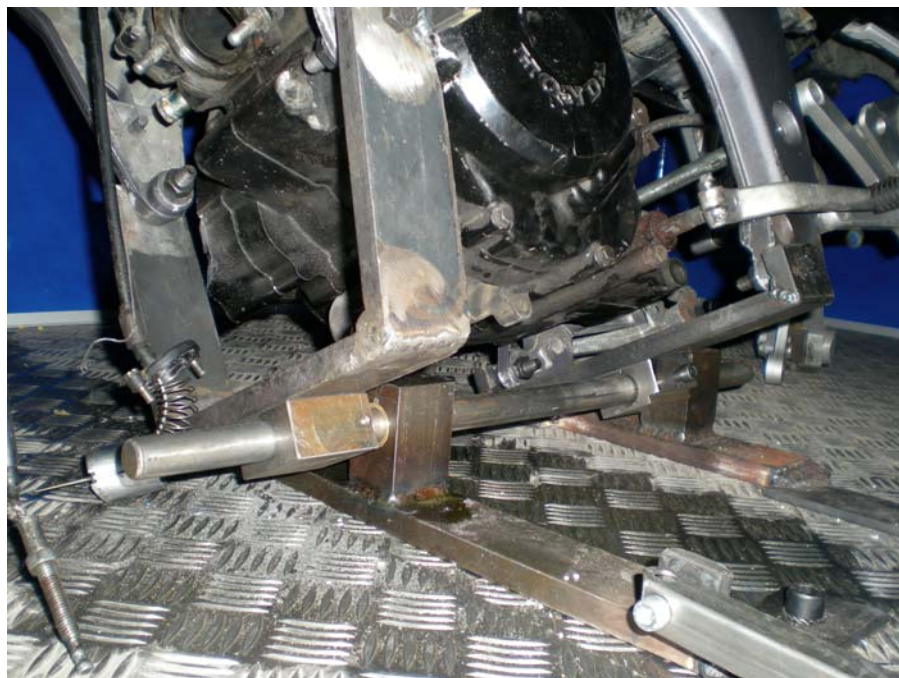


Figura 2.3 Moto sobre soporte en la cabina



Pero un pequeño perfil colocado formando escuadra entre la moto y la base de la cabina, la mantiene fija y perpendicular a esta.

La motocicleta está sobre el soporte pero sin sus ruedas y motor. El motor se ha montado de nuevo puesto que es necesaria la palanca de cambios para la sensorización.

## **2.4 Ordenador y joystick**

En la nave se dispone de un ordenador sobre el que corre la simulación. También se cuenta con un joystick de ocho botones y throttle analógico, con el cual se puede pilotar en tercera persona. Las características de ambos aparecen reflejadas en el anexo B.

## **2.5 Equipo de sonido y audio**

La cabina contiene una televisión de pantalla plana, fijada en el frontal interior de esta. En ella se visualiza lo mismo que en el monitor del ordenador que corre la simulación.

También en el interior de la cabina y fijados al suelo de esta, hay dos altavoces, con los que se puede escuchar las melodías y sonidos que se reproducen durante el pilotaje.



## **2.6 Entorno de realidad virtual**

Hay un simulador creado mediante la herramienta de programación DarkBASIC Professional. Se trata de un software generado con un modelo analítico cinemático. Todo esto se explicará con mayor detenimiento en el apartado 6.3.

Dicho programa presenta muchas carencias, errores de programación que no permiten que funcione correctamente; no dispone de fin de programa, no toma el tiempo de forma adecuada, etc.

La subrutina de envío de datos al módulo MDA no está correctamente introducida, además tampoco se tratan los datos que son egresados por el simulador ni se adaptan a valores óptimos para la plataforma.

Todo esto verá solución en el capítulo 6.



### **3.- PLATAFORMA STEWART DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD**

#### **3.1 Generalidades**

El simulador está construido sobre una plataforma Stewart fabricada por MOOG Inc. modelo 6DOF2000E que podemos ver en la figura 3.1. Las características aparecen en el anexo A.



Figura 3.1 Primer plano plataforma Stewart

La plataforma de tipo Stewart fue presentada en 1965 y es la que utilizan la mayoría de los simuladores desarrollados. Esta posee los seis grados de libertad espacial, es decir, tres direcciones de desplazamiento y tres giros. Está compuesta por una bancada fija al suelo de la nave y una plataforma elevada con los 6 GDL, unidas mediante seis actuadores lineales, que son los encargados de darle movimiento. Estos actuadores constan de una unión Hooke y una rótula.



En este caso dichos actuadores son eléctricos, aunque también es bastante común encontrar actuadores hidráulicos. En la figura 3.2 se puede observar un esquema:

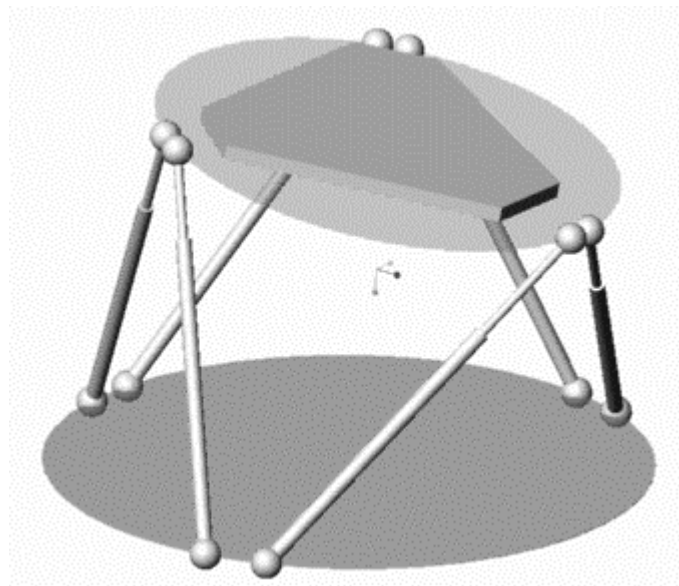


Figura 3.2 Esquema funcionamiento plataforma Stewart

Las ecuaciones de extensión–retracción definen el modelo cinético del sistema. El problema puede orientarse de dos formas opuestas:

- Problema cinemático directo: Para determinada posición y movimiento de los actuadores, se calcula el movimiento resultante de la cabina. En este tipo de plataformas es difícil de calcular, pero completamente necesario para determinar los límites en los desplazamientos del simulador.



- Problema cinemático inverso: Para una determinada posición y movimiento de la cabina, determinar el movimiento necesario de cada actuador. Dado que en la simulación, es el movimiento de la cabina lo que conocemos, este problema es esencial para el correcto funcionamiento del simulador.

Afortunadamente, el fabricante permite directamente la introducción de los grados de libertad como variables de entrada, modo DOF, para no tener que realizar ninguna conversión ni implementar un modelo propio de la plataforma.

### **3.2 Uso y limitaciones**

El principio de funcionamiento de este tipo de simuladores es sencillo. La idea es simular las aceleraciones realizando una inclinación de la plataforma ayudado de un pequeño desplazamiento para dar una mayor sensación. Esta inclinación debe realizarse a una velocidad menor que el umbral de percepción de velocidad angular que tiene el ser humano. Este principio de simulación es llamado el principio de inclinación- coordinación.

Lo que se pretende con el giro de la plataforma es que el vector de fuerza específica:

$$\vec{f} = \vec{a} - \vec{g}$$

Que es lo que percibe nuestro cuerpo en la conducción del vehículo, y el vector:

$$\vec{f} = -\vec{g}$$



Que es el que percibimos en la plataforma de simulación, tengan la misma componente direccional.

Este tipo de plataforma es ideal para la simulación de aviación, debido a que las aceleraciones que tenemos en el interior de la cabina cambian con una velocidad lenta, por lo que podemos realizar inclinaciones de la plataforma sin que la persona se dé cuenta de que está girando.

También se pueden simular aceleraciones de alta frecuencia con pequeños desplazamientos longitudinales de la plataforma. Con esta característica también puede simularse una conducción de vehículos terrestres, teniendo siempre en cuenta la limitación de la velocidad angular.

Se pueden reproducir los giros en la dirección X e Y, pero de una forma limitada. Los giros en Z permitidos en esta plataforma son todavía más pequeños.

En resumen, y concretando para la plataforma utilizada en este proyecto, podemos realizar una simulación de movimiento con las siguientes prestaciones:

- Para unos límites de ángulos de inclinación en X e Y de 22 grados sexagesimales, esta plataforma es capaz de simular aceleraciones de  $\pm 4 \text{ m/s}^2$  en los ejes X e Y.
- Las velocidades angulares máximas en X e Y a simular, suelen ser de 30 °/s, por lo que con este tipo de plataforma es posible simular una conducción normal de un vehículo pero sin llegar a situaciones extremas.



- Debido al poco desplazamiento vertical en Z, sólo es posible simular aceleraciones en Z de alta frecuencia. Cuando la plataforma llega a sus límites, no es posible simular simultáneamente aceleraciones en X o Y, y en Z.
- Otra limitación es que el espacio alcanzable está determinado por el resto de grados de libertad, a medida que la plataforma se desplaza de su posición de reposo los grados de libertad quedan cada vez más restringidos, un incremento en el desplazamiento vertical hace que los giros tanto en X como en Y tengan menor recorrido.



## **4.- ESTABILIDAD DE LA MOTO SOBRE LA CABINA**

### **4.1 Funciones del soporte entre la cabina y la moto**

Se observa que durante la conducción, en los diferentes cambios de dirección y especialmente en el trazado de curvas, el motorista se inclina hacia el interior de esta. Esta inclinación es conocida como balanceo. Una vez que tiene la inclinación y velocidad adecuada, piloto y moto se encuentran en equilibrio. Así desplazando el centro de gravedad del conjunto moto-motorista hacia el centro de la curva, consiguen equilibrar la fuerza centrífuga que les expulsa fuera de la trazada. Una vez alcanzada la situación de equilibrio el motorista no realiza fuerza alguna para mantener la inclinación, ni tiene sensación de “caerse” de la moto.

Para simular este estado de equilibrio en la cabina, el de un motorista trazando una curva inclinado, se debe mantener vertical con respecto al suelo, la moto no debe sufrir inclinación alguna, ya que en la toma de curvas reales el piloto no percibe la sensación física de caída.

Gracias a que, cuando el piloto del simulador produce un ángulo de balanceo la plataforma responde creando el mismo ángulo pero en sentido contrario, el conductor permanece constantemente vertical al suelo, a pesar de que la cabina esté inclinada con respecto a estos. La inclinación de la moto es recibida por el sensor encargado de medir la rotación en el eje de la moto, que a su vez lleva esta información al ordenador y este transmite a la plataforma la orden de movimiento. Así el piloto siente las fuerzas tal como las debería sufrir en un recorrido real, es decir, fuerzas laterales únicamente en las variaciones del ángulo de balanceo y siempre la fuerza ejercida por la aceleración de la gravedad que le mantiene sobre el asiento.



Además la visión del piloto en el interior de la cabina es la que se produce como resultado del movimiento de esta, así pues, la pantalla esta decantada, ya que esta sujeta a la cabina, y produce la meta buscada, generar la impresión de que el conductor está inclinado.

Esto será explicado con mayor detenimiento en el subapartado 6.5.1.2.

A continuación, en la imagen 4.1, se muestra como estaría en este estado, es decir, cuando la cabina se inclina respecto a la moto y al suelo:



Figura 4.1 Posición motocicleta en trazado de curvas



## **4.2 Diferentes diseños de estabilidad:**

Se parte de un sistema de apoyo que fue diseñado en el proyecto anterior, y que puede observarse en la fotografía 4.2. Este diseño permite la inclinación de la moto en torno a un eje horizontal situado en la parte inferior de la moto. Este eje es el encargado de unir la moto a la cabina y permitir su movimiento relativo.



Figura 4.2 Soporte moto

Para evitar el giro de la motocicleta de forma rápida y brusca, y así evitar accidentes, se debe acoplar un sistema mecánico que se oponga a dicho movimiento, pero a la vez permita un movimiento continuo, ofrezca la posibilidad de tener un “0” absoluto y no almacene energía.

Se decidió que se trataría de un sistema pasivo por cuestiones económicas, así que se comenzó el diseño de varios prototipos.

El sistema activo es la solución más adecuada pero su implementación supone un elevado presupuesto, así que, puesto que los resultados que ofrece el pasivo son muy aceptables, se deja la implementación de un sistema activo para futuras actuaciones sobre el simulador.



#### **4.2.1 Primer diseño:**

##### ***Componentes:***

Consta de dos muelles (5) acoplados lateralmente al soporte de la moto (1), formando un ángulo que se establece en función de su constante elástica y de la inclinación de la estructura (1, 3, 7), respecto del bastidor (2, 4, 6). Ver figura 4.3.

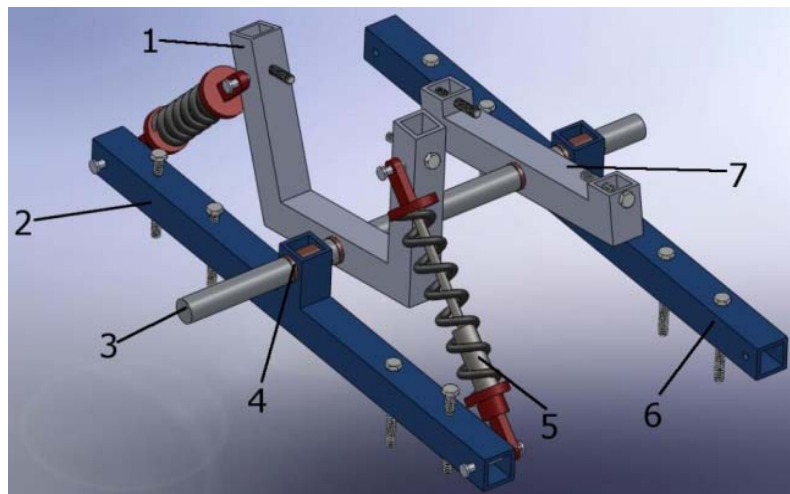


Figura 4.3 Primer diseño estabilidad

##### ***Funcionamiento:***

Actúan amortiguando el movimiento que se produce por el balanceo lateral. Almacenan la energía producida en dicha inclinación y la devuelven para llevar la moto a su posición perpendicular a la base de la plataforma.

##### ***Ventajas:***

Montaje sencillo, ya que son dos muelles, cuyos extremos están unidos; uno al soporte de la moto y el otro a la base de la cabina.



Se consigue un cero absoluto con mucha facilidad.

El cálculo de fuerzas sobre los muelles es sencillo debido a que se rigen por la ley de Hooke:

$$F = \mathcal{K} \star \delta$$

Donde:

$F$  = Fuerza

$\mathcal{K}$  = Constante elástica del muelle

$\delta$  = Elongación del muelle

Se trata de un diseño económico, debido a su sencillez y a que está compuesto únicamente por dos muelles y cuatro tornillos. Como puede observarse en la figura 4.4.

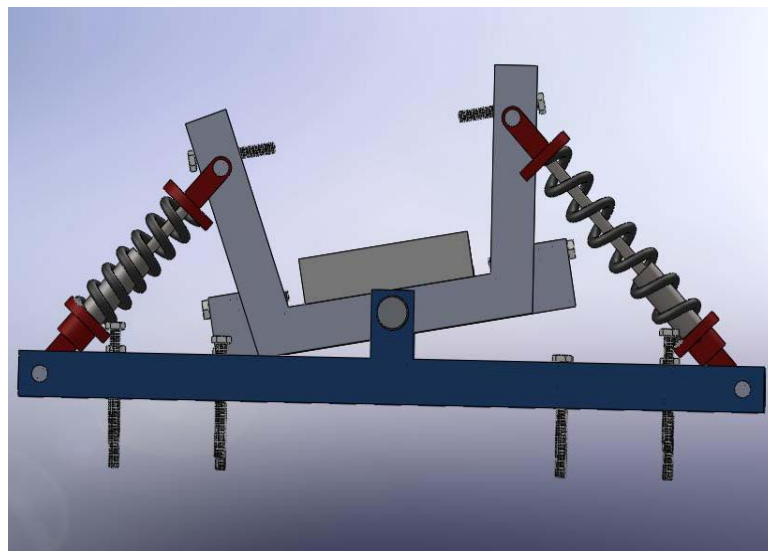


Figura 4.4 Primer diseño estabilidad durante trazado curva



### ***Inconvenientes:***

Al actuar la plataforma, el sistema almacena energía potencial en los muelles, que devuelve cuando se ha logrado el equilibrio entre moto y cabina, con lo que genera fuerzas desestabilizadoras que producen el vuelco de la moto una vez conseguida la posición de verticalidad respecto al suelo.

El movimiento armónico de los mulles impide alcanzar posiciones estáticas inmediatas a los movimientos. Se propuso dar solución a ello con dos amortiguadores pero impedían movimientos rápidos.

Como se encuentran en los laterales de la moto reducen la accesibilidad al habitáculo.

### ***Conclusión:***

Se rechaza por entrar en conflicto con la plataforma, al generar fuerzas que se oponen al giro relativo de la moto respecto a la cabina, crea un estado transitorio y final, entre un estado inicial de verticalidad respecto al suelo y perpendicularidad a la base y otro final de inclinación respecto a la base pero vertical respecto al suelo, que difieren de una simulación real de conducción.



#### **4.2.2 Segundo diseño:**

##### ***Componentes:***

Consta de una semicircunferencia de perfil en U que hace de guía de dos cables metálicos. Al final de éstos y unidos a la cabina, habría dos muelles que trabajarían a tracción. Como puede observarse en la imagen 4.5.

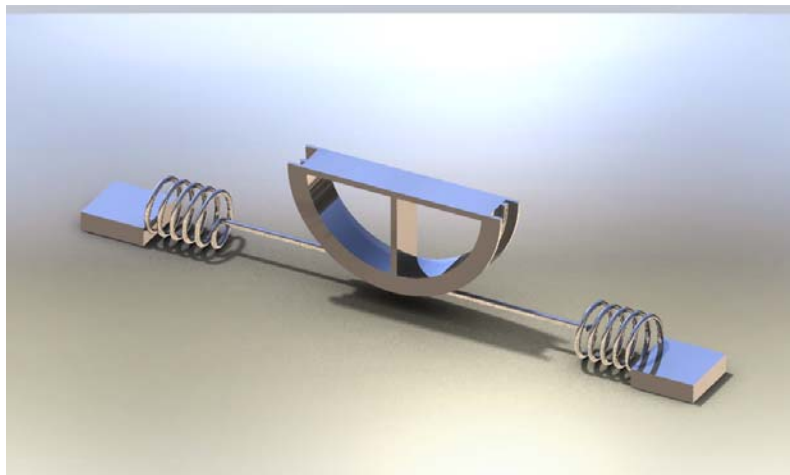


Figura 4.5 Segundo diseño estabilidad

##### ***Funcionamiento:***

Al igual que en el caso anterior actúa suavizando los movimientos sobre la motocicleta, almacenando la energía que se produce por el movimiento de balanceo lateral.

##### ***Ventajas:***

Diseño económico y sencillo, puesto que está compuesto por pocos elementos y fácilmente mecanizables.



Respecto al diseño anterior las fuerzas desestabilizadoras son menores, debido a que únicamente trabaja uno de los dos muelles al tumbar la moto hacia uno de los lados, y solamente el otro cuando se tumba hacia el otro lado.

Se obtiene un cero absoluto, es decir, una posición vertical de reposo, de forma natural, únicamente aplicando una ligera pretensión a los muelles a la hora del montaje.

La posición de equilibrio, independientemente de los grados de inclinación del piloto con la moto respecto de la cabina, mejora.

Permite el acceso a la moto sin interferir en el espacio entre la puerta y esta.

#### ***Inconvenientes:***

No se soluciona totalmente el problema de estabilidad en curva, ya que, aunque menos que el diseño anterior, los muelles generan inestabilidad en los diferentes estados de balanceo.

#### ***Conclusión:***

Al igual que el anterior, se rechaza por entrar en conflicto con la plataforma, al generar fuerzas que impiden el giro relativo de la moto respecto a la cabina, se crea un estado transitorio que difiere de una simulación real de conducción.

En la fotografía 4.6 se puede observar el diseño acoplado al soporte.

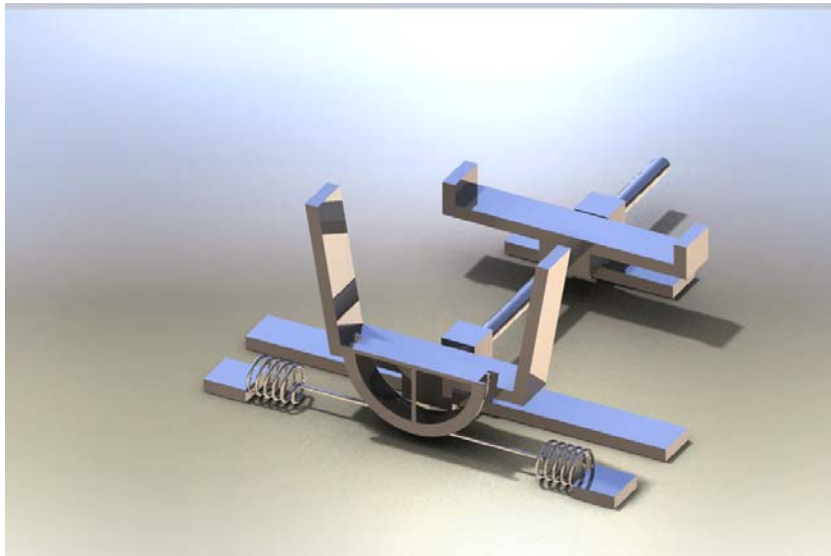


Figura 4.6 Segundo diseño estabilidad acoplado al soporte de la moto

#### **4.2.3 Tercer diseño:**

##### ***Componentes:***

Está compuesto por dos discos de ficción, uno de ellos en forma de leva y unido al eje que soporta la moto y otro de forma cuadrangular montado sobre un soporte fijo a la base. Ambos permanecen en contacto permanente gracias a cinco resortes.

##### ***Funcionamiento:***

La fricción entre los dos discos genera un par resistente que se opone al giro producido por el movimiento de conducción de la moto. Una vez superado el par máximo que es capaz de crear el sistema, este permite el giro relativo de ambos, disipando en forma de calor la energía del rozamiento.



Para mantener la leva fija del eje, en permanente contacto con el disco de fricción fijo de la base, se instalaría una pieza móvil en el soporte, que a través de unas guías y cinco resortes, mantendría la posición y la presión requerida para su funcionamiento. Esto puede observarse en la imagen 4.7.

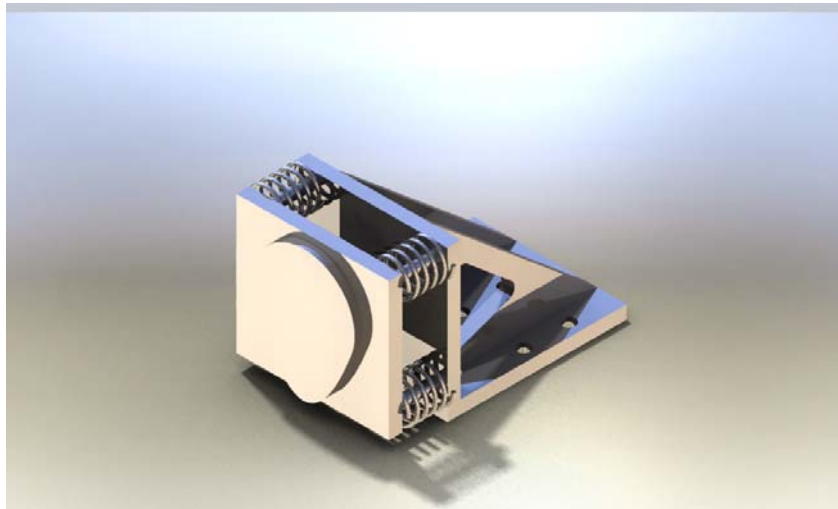


Figura 4.7 Tercer diseño estabilidad

***Ventajas:***

Permite al piloto posicionar el balanceo requerido con más facilidad y precisión.

Este sistema no almacena energía puesto que la disipa en forma de calor, y por lo tanto no la devuelve en ningún estado de equilibrio, no creando así fuerzas desestabilizantes y facilitando al piloto mantenerse siempre vertical al suelo. De esta forma se consigue que el piloto no sufra aceleraciones laterales para distintos grados de balanceo.



### ***Inconvenientes:***

Los pares resistentes que produce el mecanismo son insuficientes para soportar el peso en el giro de un adulto más el del vehículo, impidiendo un movimiento gradual.

La fabricación de los elementos que lo componen tiene mayor dificultad.

El montaje es más complicado que los anteriores ya que el número de componentes es considerable, además a esto se debe añadir, que los muelles tienen que estar bajo compresión en todo momento.

### ***Conclusión:***

Este diseño se desechó debido a que la superficie de fricción entre ambos discos era insuficiente para retener el fuerte balanceo de la moto. Se mejoró el comportamiento aumentando la fuerza ejercida por los muelles, pero quedó finalmente apartado por el cuarto diseño.

La distancia tan reducida entre el eje y la base, impedía acoplar discos de fricción de un tamaño superior para aumentar la superficie de contacto.

El montaje suponía un inconveniente añadido a consecuencia del elevado número de elementos que lo forman.



En la fotografía 4.8 se puede comprobar como sería el resultado final una vez acoplado al soporte de la motocicleta.

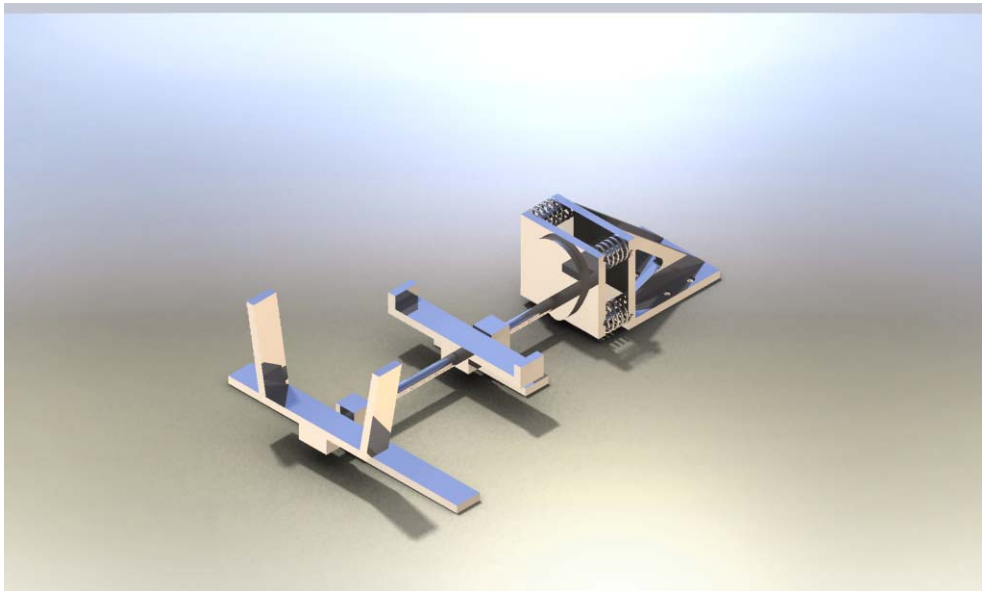


Figura 4.8 Tercer diseño estabilidad acoplado al soporte de la moto

#### **4.2.4 Diseño final:**

Como la parte longitudinal del eje ofrece una mayor área que la transversal, se decide aprovechar dicha superficie acoplándole un mecanismo que mediante presión mejore el par resistente al balanceo.

#### ***Componentes:***

El mecanismo desarrollado es un freno de compresión externa.



Dicho conjunto esta formado por dos piezas simétricas como se puede observar en la imagen 4.9, y el material de fricción para producir el frenado. Ambas compuestas de una pletina base, una pletina inferior plana, una zapata y finalmente una pletina superior plana.

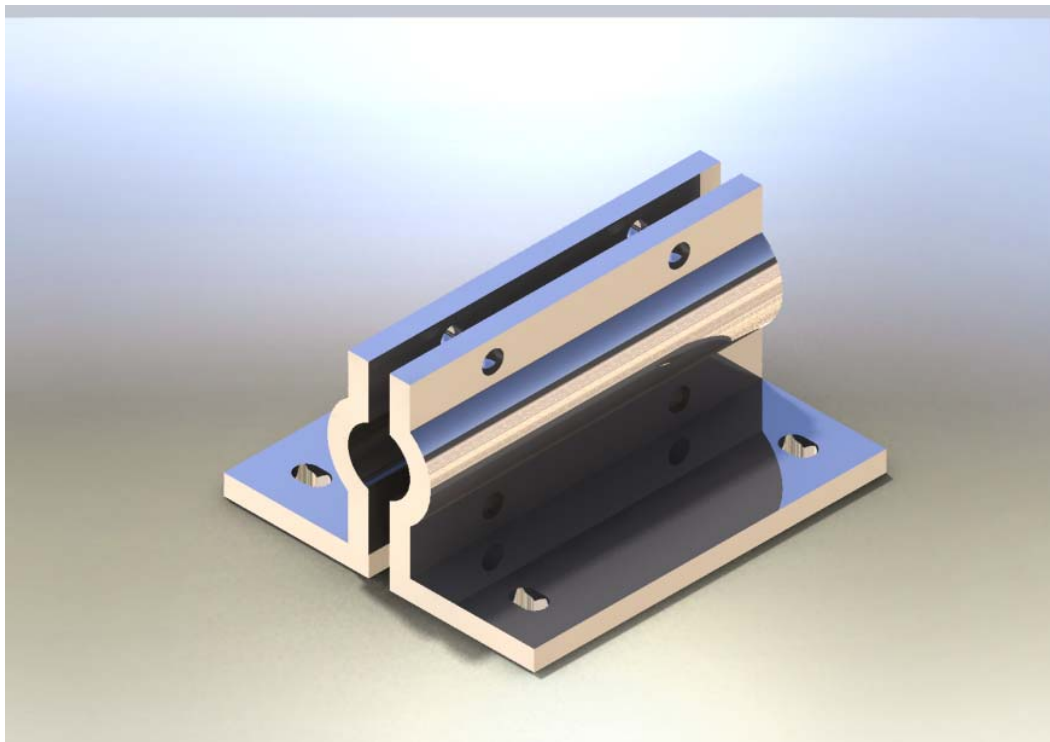


Figura 4.9 Diseño final estabilidad

### ***Funcionamiento:***

El frenado se produce mediante la aplicación de presión sobre el eje.

Esta presión procede del apriete generado por los tornillos que regulan la distancia entre las zapatas. Encargándose éstas de comprimir el material de fricción contra la superficie longitudinal del eje soporte de la moto, ralentizando el movimiento de ésta y eliminando en forma de calor la energía producida.



### ***Ventajas:***

Permite al piloto posicionar con más facilidad y precisión la inclinación de la motocicleta.

Este sistema no almacena energía y por lo tanto no la devuelve en ningún estado de equilibrio, facilita al piloto mantenerse siempre vertical al suelo, ya que no crea aceleraciones laterales.

Rápido montaje y desmontaje, puesto que únicamente consta de las dos piezas simétricas, el material de fricción y ocho tornillos.

El par de apriete es regulable, permitiendo así adaptarlo para ofrecer buen comportamiento con diferentes pesos del piloto.

Intercambiabilidad del material de fricción, pudiendo elegir entre distintos valores de coeficientes de fricción.

Diseño y fabricación sencillos.

### ***Inconvenientes:***

La ubicación dificulta ligeramente el montaje y desmontaje, puesto que el espacio entre el motor y el suelo de la cabina es reducido.

### ***Conclusión:***

Visto el gran numero de ventajas que ofrece para el pilotaje y el realismo obtenido en los giros, se decide llevar a cabo su diseño, fabricación y montaje. Por lo que en el próximo capítulo será estudiado y desarrollado en profundidad.



La fotografía 4.10 muestra como queda el montaje del diseño más el soporte de la moto.

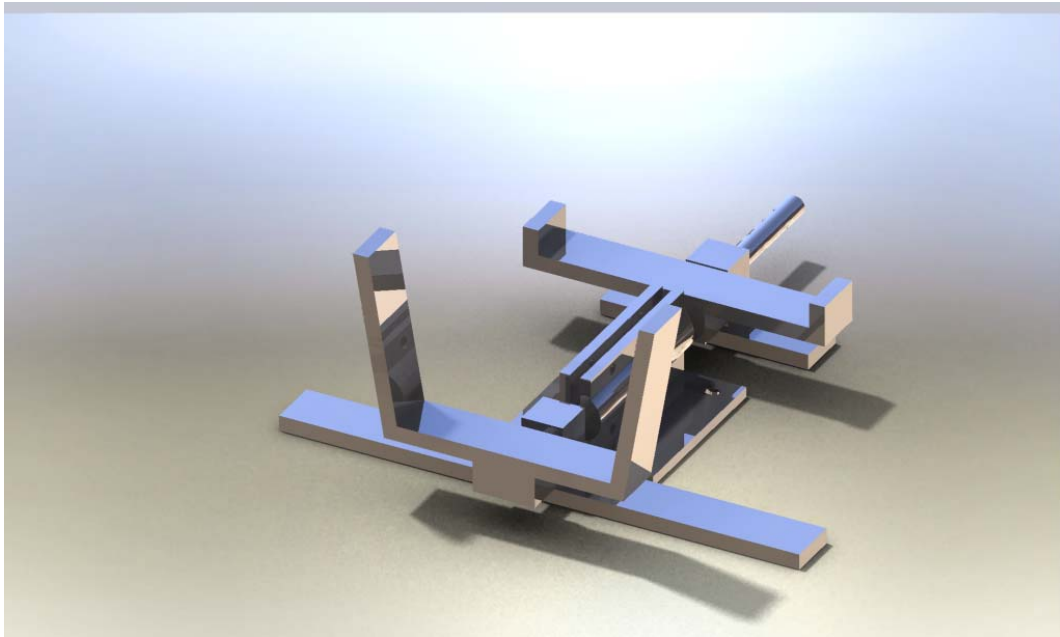


Figura 4.10 Diseño final estabilidad acoplado al soporte de la moto



## **5.- FRENO DE COMPRESIÓN EXTERNA**

### **5.1 Introducción**

Los frenos de fricción están diseñados para actuar mediante fuerzas fricción, siendo este el medio por el cual se transforma en calor la energía cinética del cuerpo a desacelerar. Siempre constan de un cuerpo fijo sobre el cual se presiona un cuerpo a desacelerar.

#### **El frenado con zapatas:**

Este dispositivo esta constituido por una zapata que se obliga a entrar en contacto con un cilindro solidario al eje cuya velocidad se pretende controlar, la zapata se construye de forma tal que su superficie útil, recubierta de un material de fricción, calza perfectamente sobre el tambor. Una vez más, al forzarse el contacto entre zapata y tambor, las fuerzas de fricción generadas por el deslizamiento entre ambas superficies producen el par de frenado.

En este capitulo se desarrolla el diseño y el análisis.



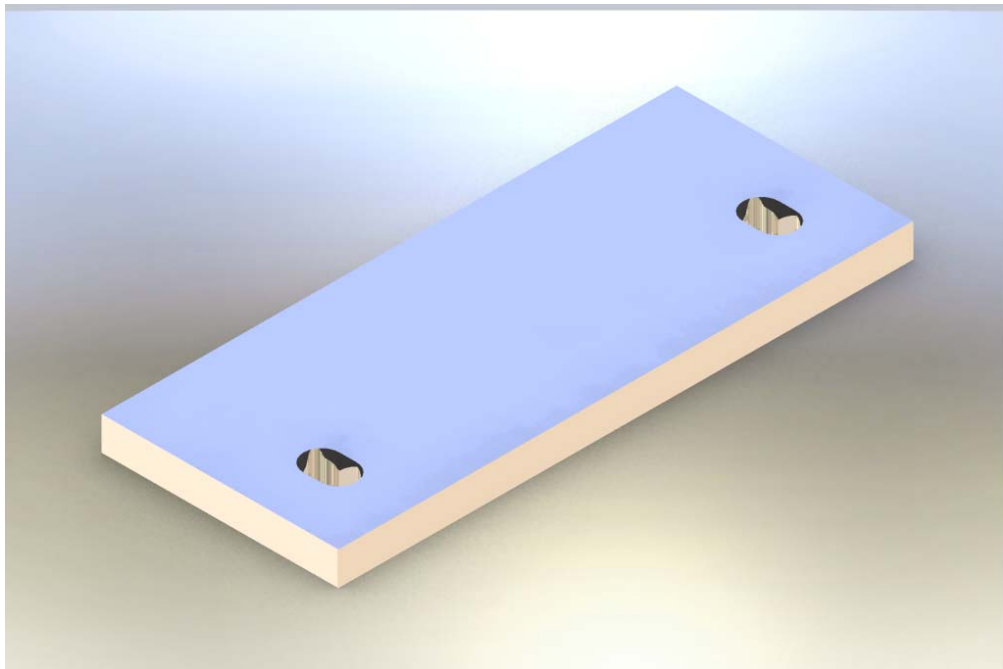
Figura 5.1 Freno de compresión externa sin material de fricción



## **5.2 Componentes**

### **5.2.1 Pletina base:**

Es la parte encargada del anclaje a la cabina a través de tornillos. También permite mediante dos agujeros alargados pasantes, regular la posición de las



zapatas sobre el material de fricción.

Figura 5.2 Pletina base



### **5.2.2 Pletina inferior:**

Ésta sirve de unión entre la anterior y la zapata. Alberga dos taladros pasantes para dos tornillos, encargados de unir las dos partes simétricas del freno y de aplicar el apriete necesario para generar la presión sobre el eje.

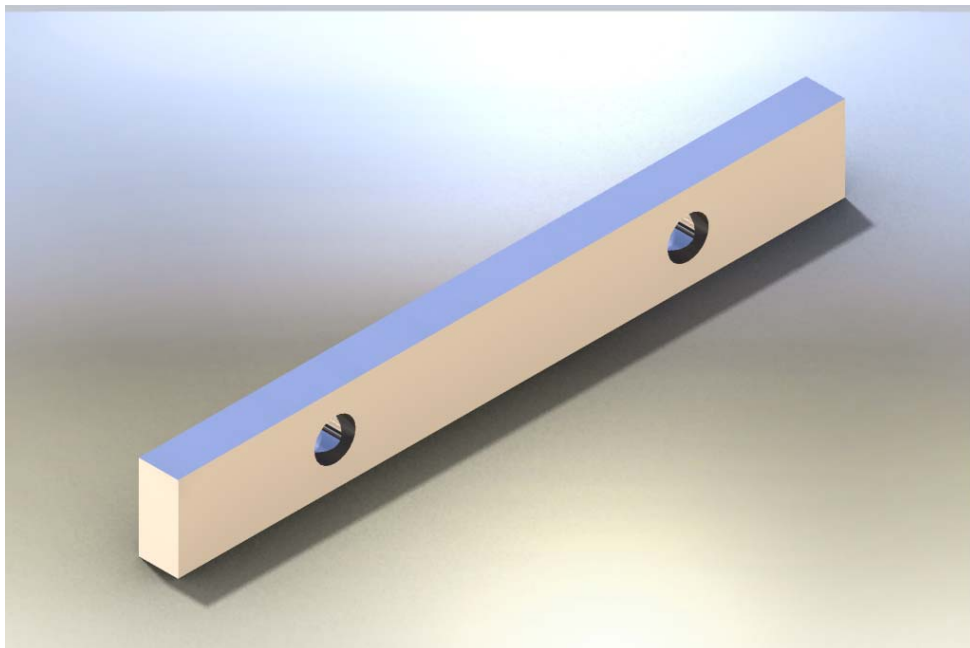


Figura 5.3 Pletina inferior



### **5.2.3 Zapata:**

Es la pieza intermedia entre la pletina inferior y superior, recibiendo la fuerza que sobre estas ejercen los tornillos, para luego ella comprimir el material de fricción contra el eje, frenando el movimiento de éste.

Tiene forma de arco de tubo para poder ajustar la posición del conjunto en función del desgaste del material de fricción.

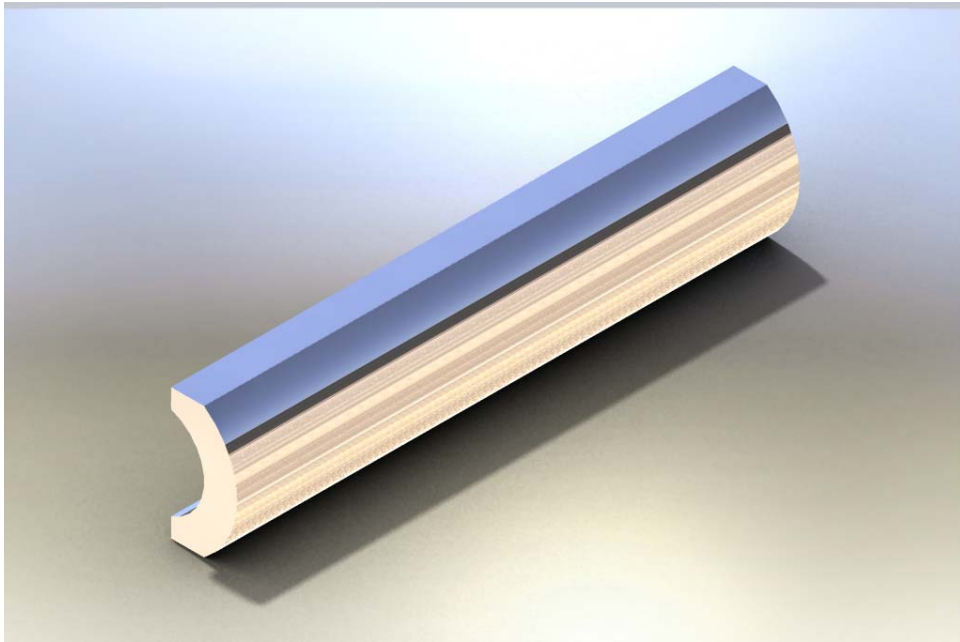


Figura 5.4 Zapata



### **5.2.3 Pletina superior**

También está soldada a la zapata pero en este caso por su parte superior.

Contiene otros dos taladros con la misma función que la inferior.

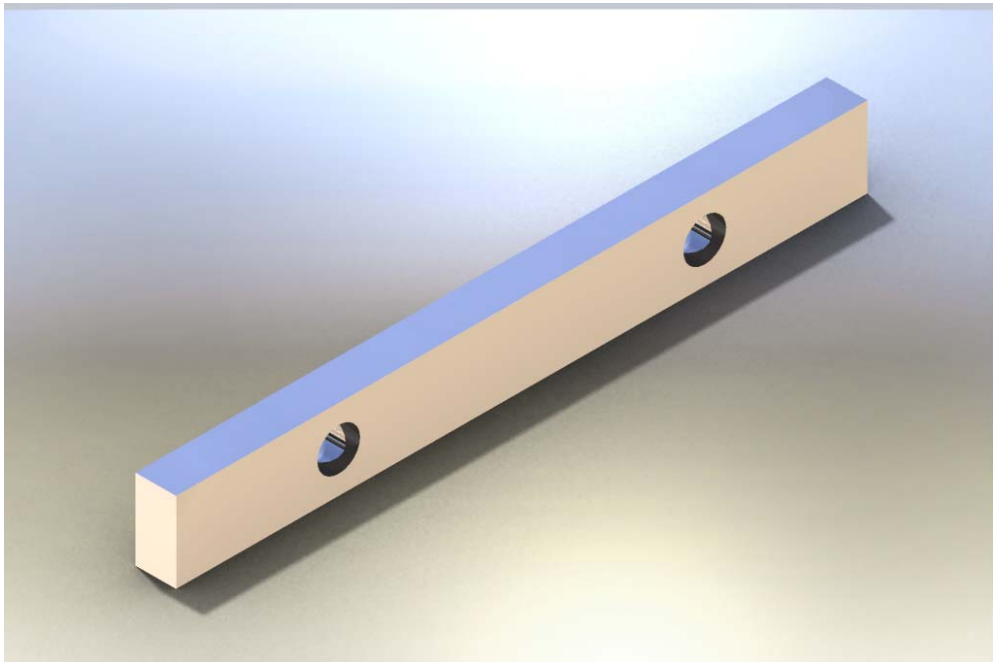


Figura 5.5 Pletina superior

### **5.2.4 Material de fricción**

Consta de varias capas alternas de caucho y malla metálica.

El caucho procede de cámara de neumático, posee un coeficiente de rozamiento estático aproximado de 0,4 y uno dinámico de entorno a 0,2. Se han colocado tres capas de este material, debidamente lijadas longitudinalmente para aumentar su fricción. El espesor de la goma utilizada es de 2,7 mm.



De la malla metálica romboidal se han instalado dos capas, una entre la primera y la segunda de caucho y otra entre la segunda y la tercera. De esta forma evitamos el desplazamiento relativo entre las capas de goma. Las dimensiones de esta son:

- i. Diámetro del hilo: 0.8 mm
- ii. Diagonal mayor rombo: 4 mm
- iii. Diagonal menor rombo: 2.5 mm



Figura 5.6 Material de fricción



## **5.2. Tornillos**

La tortillería utilizada, tanto para el anclaje como para la presión sobre el eje, es M10 x 60 calidad 12.9 de cabeza Allen. En total el sistema necesita 8 tornillos de los nombrados, repartidos 4 para la fijación a la base de la cabina y otros 4 para realizar el frenado.

Las arandelas colocadas son:

- i. Dos planas de métrica 10 por cada tronillo.
- ii. Dos estriadas por cada tornillo de apriete.

Las tuercas empleadas son ocho de M10 calidad 8.

Este mecanismo se caracteriza por utilizar una elevada superficie de fricción



### **5.3 Planos**

El siguiente apartado se desarrolla por completo en el anexo D.

### **5.4 Cálculos**

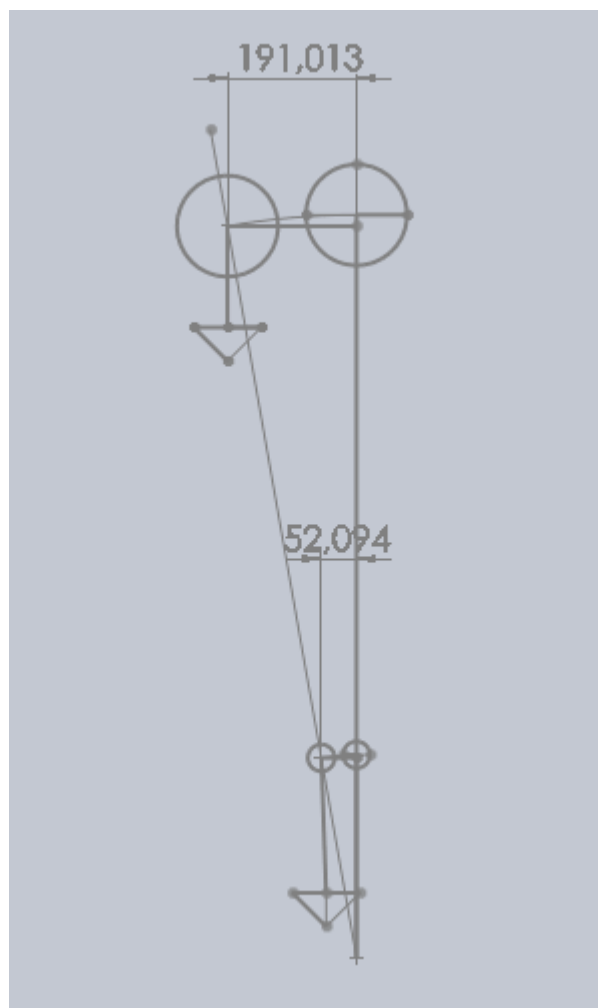


Figura 5.7 Esquema de los centros de gravedad de moto y piloto



## **5.4 Cálculos**

La figura 5.7 Representa el movimiento de los centros de gravedad del piloto y la motocicleta al tomar una curva a la máxima inclinación posible, así como sus pesos (indicados mediante flechas verticales).

Para esta posición el par ejercido por las masas es el máximo que soporta el freno.

En la tabla 5.8 puede verse como deben modificarse el par de apriete de los tornillos para diferentes pesos del conductor, y así obligar al piloto a ejercer una fuerza lateral si desea inclinar la motocicleta.

<b>Peso conductor (N)</b>	<b>Par inercias (N*mm)</b>	<b>Presión (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Fuerza tornillo (N)</b>	<b>Par apriete tornillo (N*mm)</b>
600	171921,40	8,05	4298,04	15472,93
650	181472,90	8,49	4536,82	16332,56
700	191024,40	8,94	4775,61	17192,20
750	200575,90	9,39	5014,40	18051,83
800	210127,40	9,84	5253,19	18911,47
850	219678,90	10,28	5491,97	19771,10
900	229230,40	10,73	5730,76	20630,74

Figura 5.8 Tabla relación peso piloto-par tornillos

Los valores de la tabla 5.8 se han hallado a partir de las siguientes fórmulas.



#### **5.4.1 Presión sobre el eje**

$$M_{rx} = p \cdot f \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \frac{d}{2}$$

#### **5.4.3 Fuerza axial máxima transmisible por la unión**

$$F_{ra} = p \cdot f \cdot \pi \cdot d \cdot L$$

#### **Datos**

$$f = 0'2$$

$$d = 0'02 \text{ m}$$

$$L = 0'17 \text{ m}$$

#### **5.4.5 Resultados del COSMOS**

##### ***Tensiones***

Los resultados obtenidos del cálculo a resistencia se han llevado a cabo con el programa SolidWorks, concretamente con la aplicación COSMOS.

Para los cálculos se ha considerado un peso del piloto de 900 N, por ser el caso estudiado más desfavorable.



La figura 5.9 muestra el diseño en 3D con el que se han llevado a cabo los cálculos.

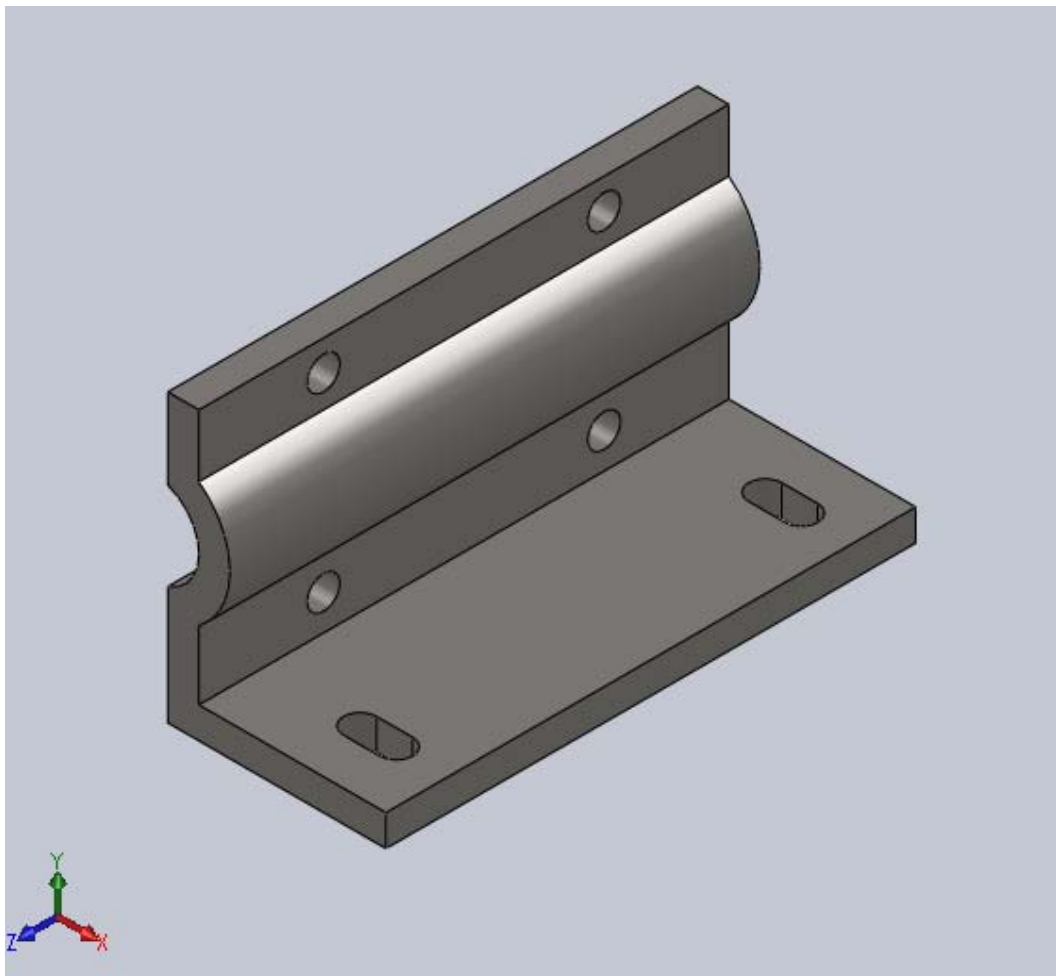


Figura 5.9 Pieza en 3D



El proceso de análisis comienza con la selección del material.

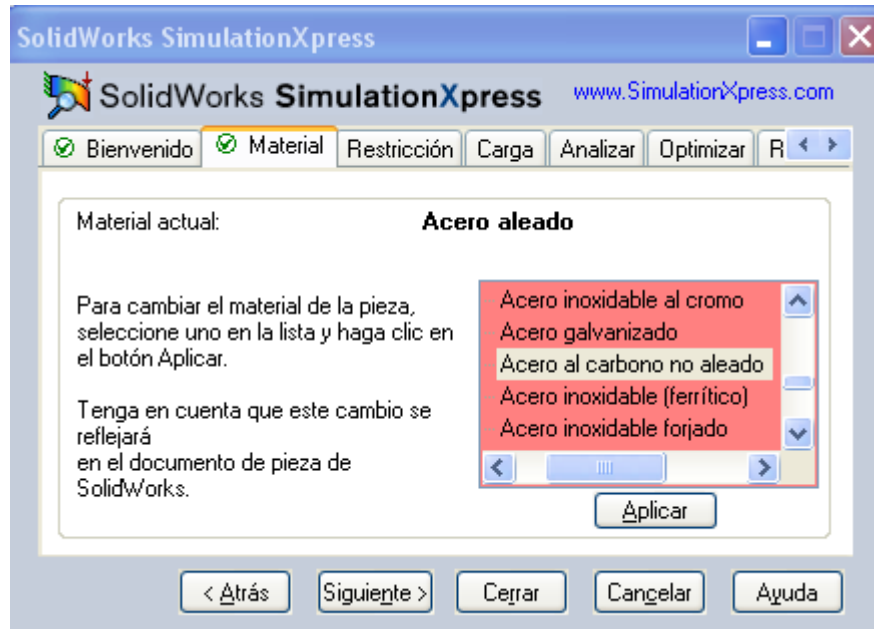


Figura 5.10 Selección material

A continuación se aplican las condiciones de contorno. En este caso se trata de la fijación de los taladros, a los que se les atribuye una restricción de los 6 grados de libertad. Como puede verse en la figura 5.11.

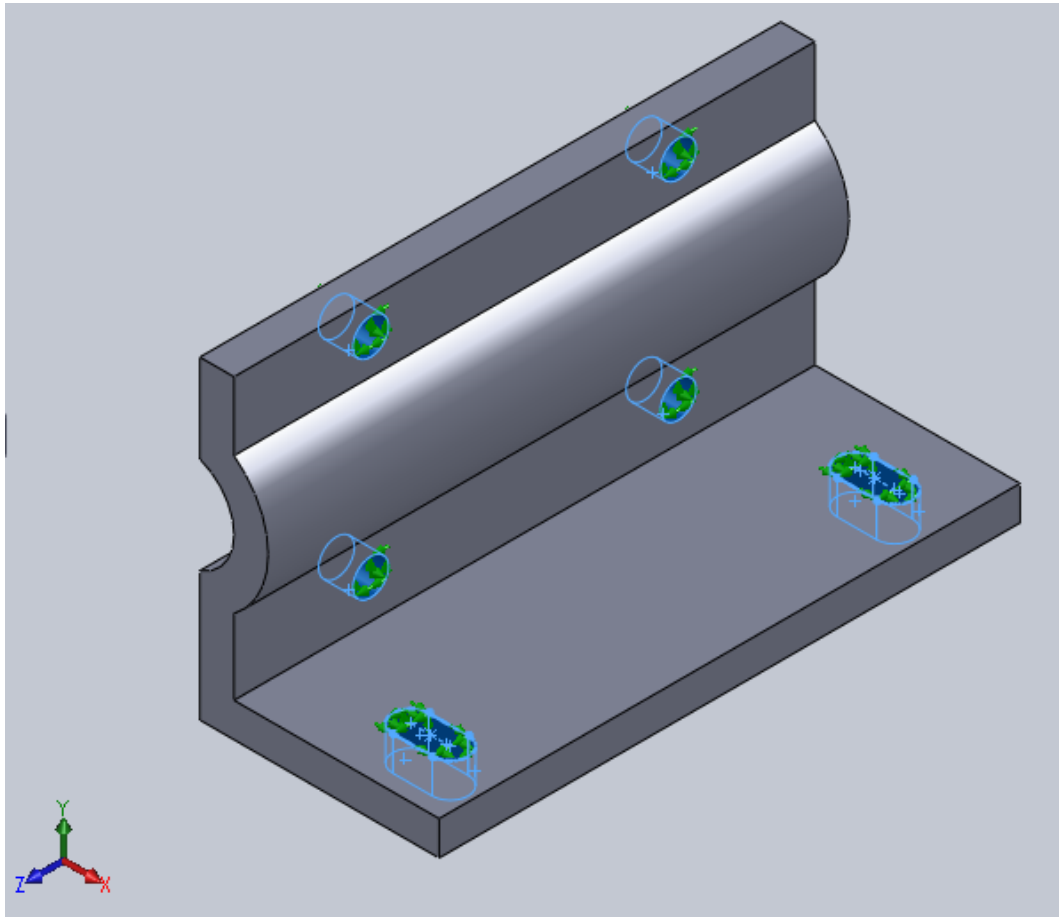


Figura 5.11 Condiciones de contorno

El siguiente paso es el de aplicar el tipo de carga. La presión ejercida por el apriete de los tornillos es la variable seleccionada.

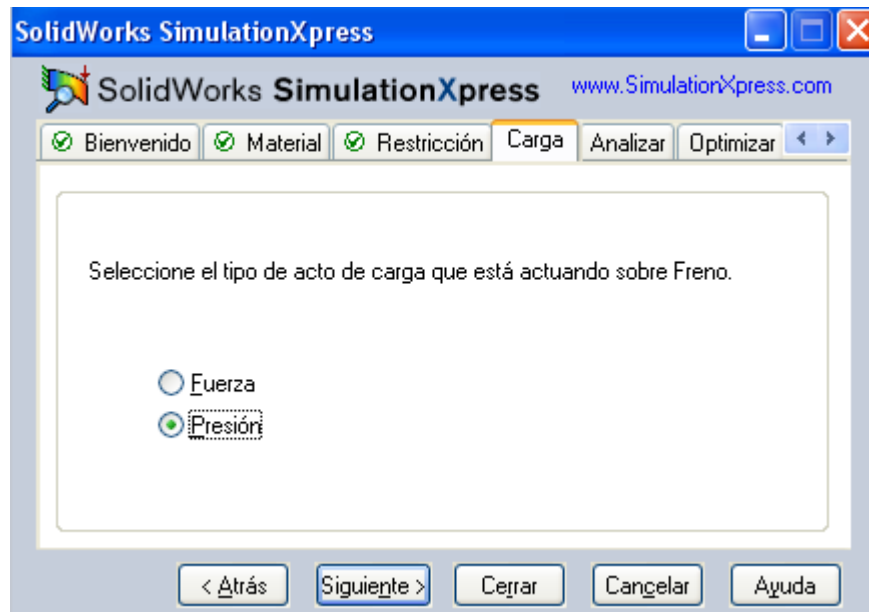


Figura 5.12 Selección carga a aplicar

Se procede a la localización de la presión (figura 5.13) y a su cuantificación (figura 5.14).

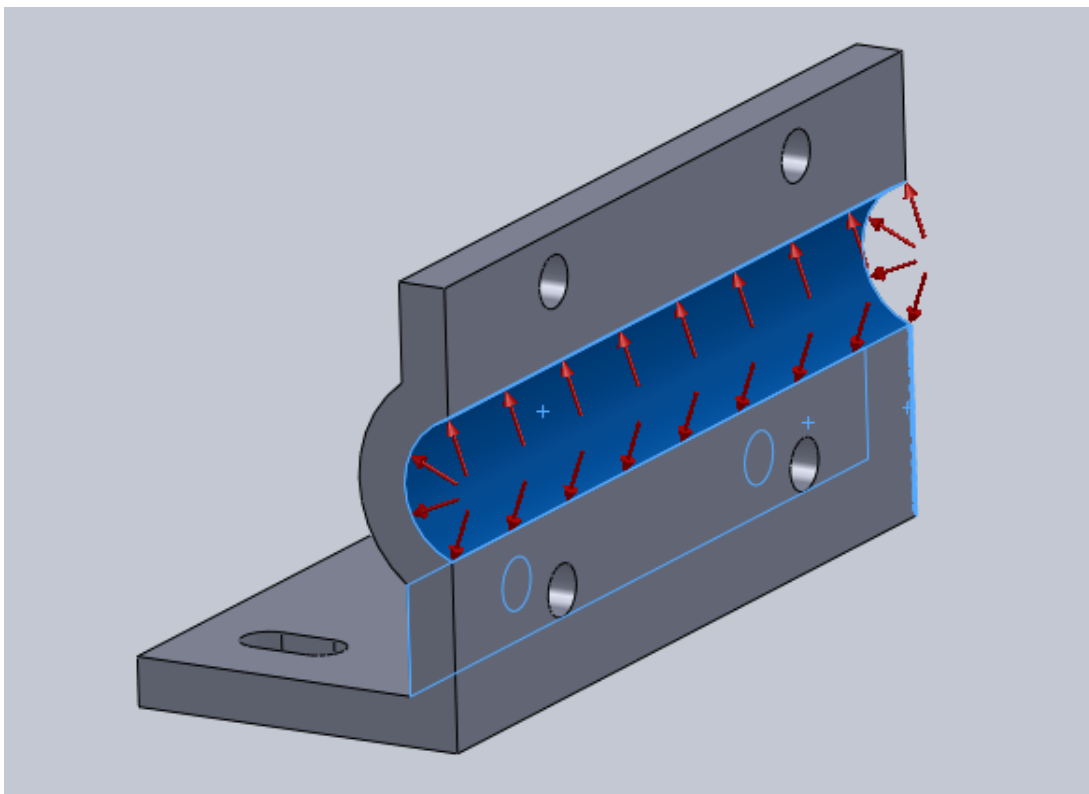


Figura 5.13 Aplicación de la presión en el modelo

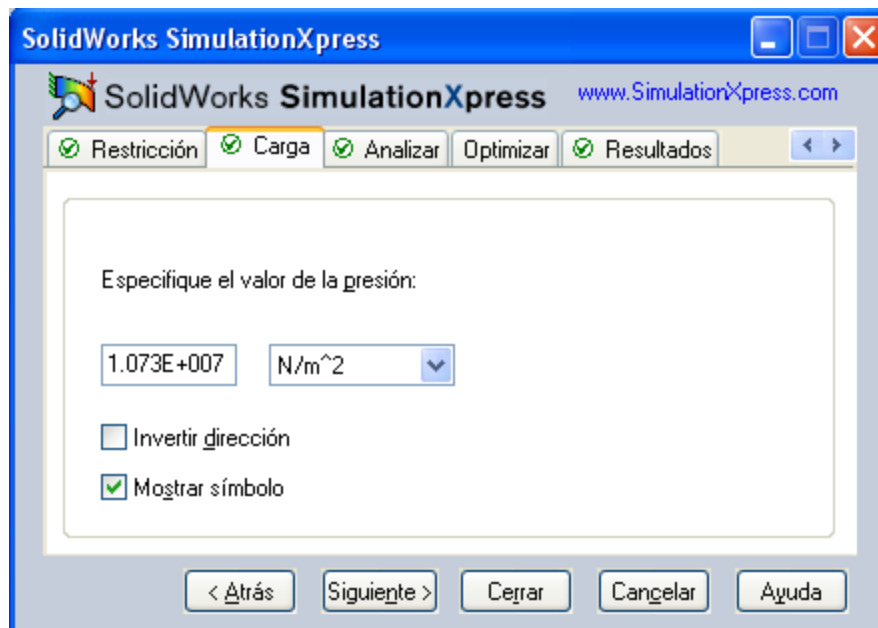


Figura 5.14 Determinación del valor de la carga

Después se analiza la pieza obteniéndose un factor de seguridad de 2,34.

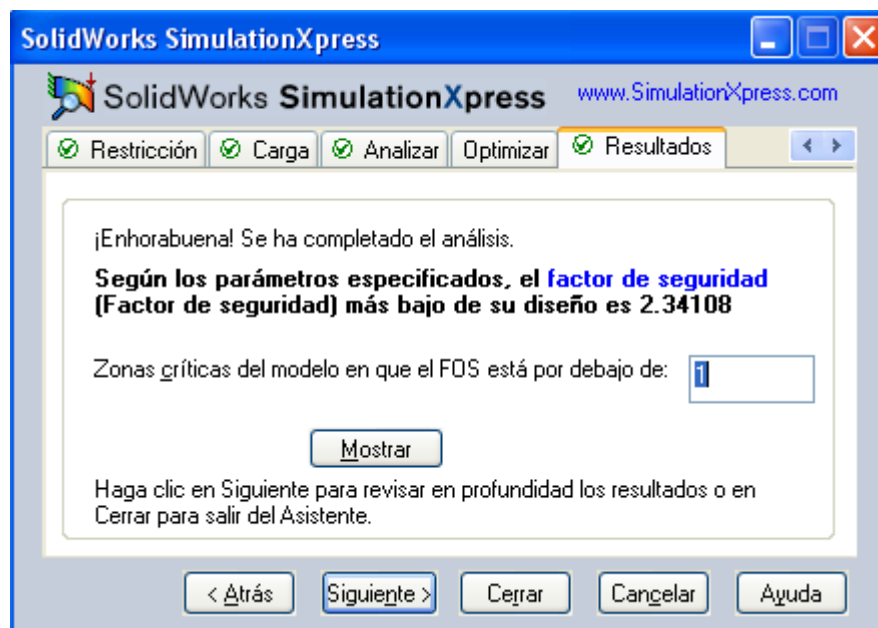


Figura 5.15 Factor de seguridad obtenido en el cálculo

El programa SolidWorks nos permite visualizar los resultados.



De esta forma podemos observar los valores máximos de tensiones y desplazamientos (color rojo) que sufre el freno.

### **Tensiones**

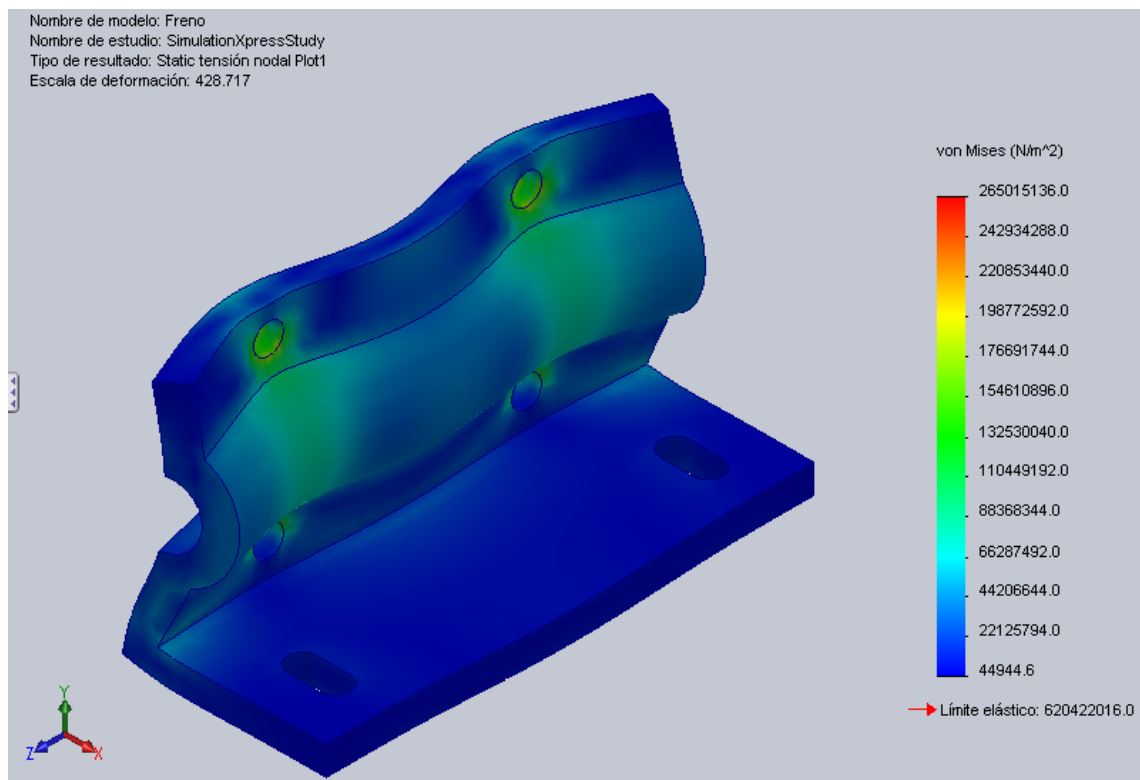


Figura 5.16 Diagrama de tensiones

Como puede observarse en la figura 5.16, que representa las tensiones, éstas son máximas en los taladros que alojan las uniones atornilladas.

Siendo el valor máximo de  $265 \text{ N / mm}^2$ .



## Deformaciones

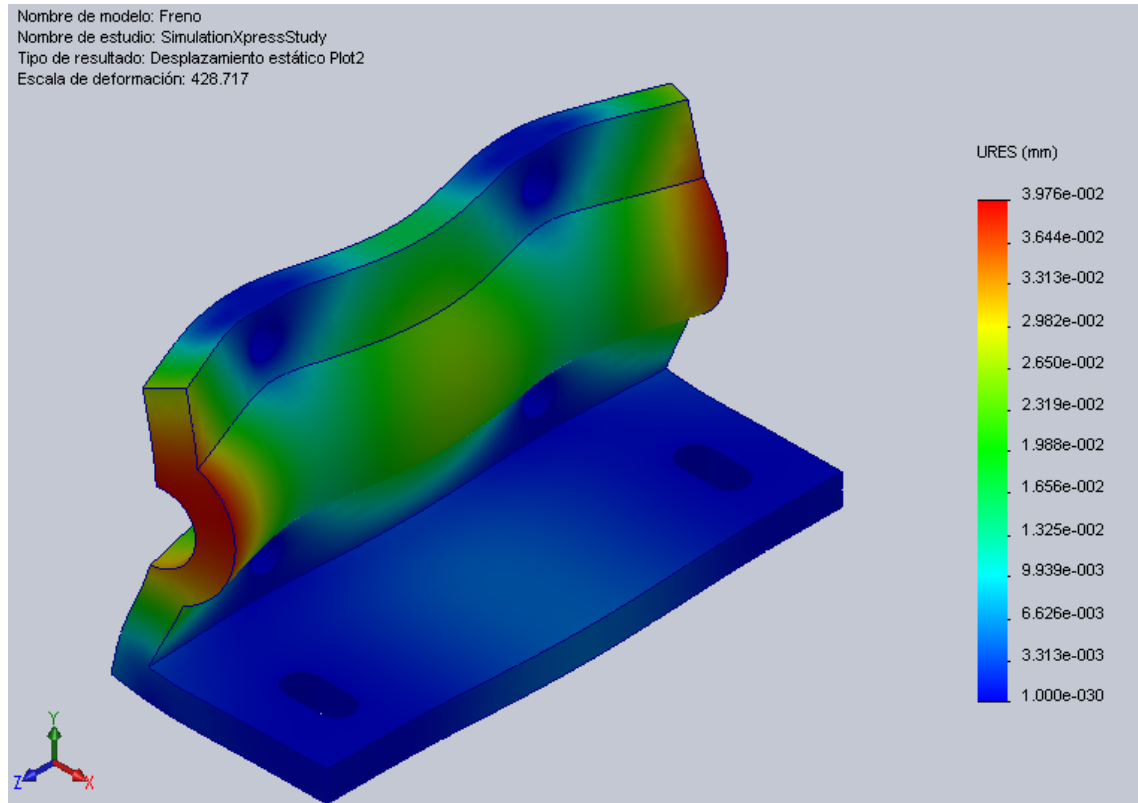


Figura 5.17 Diagrama de deformaciones

Las deformaciones resultado de la presión en la zapata que pueden observarse en la figura superior tienen un valor máximo de 0,0398 mm, localizándose ésta en los extremos de la pieza.



## **Deformada**

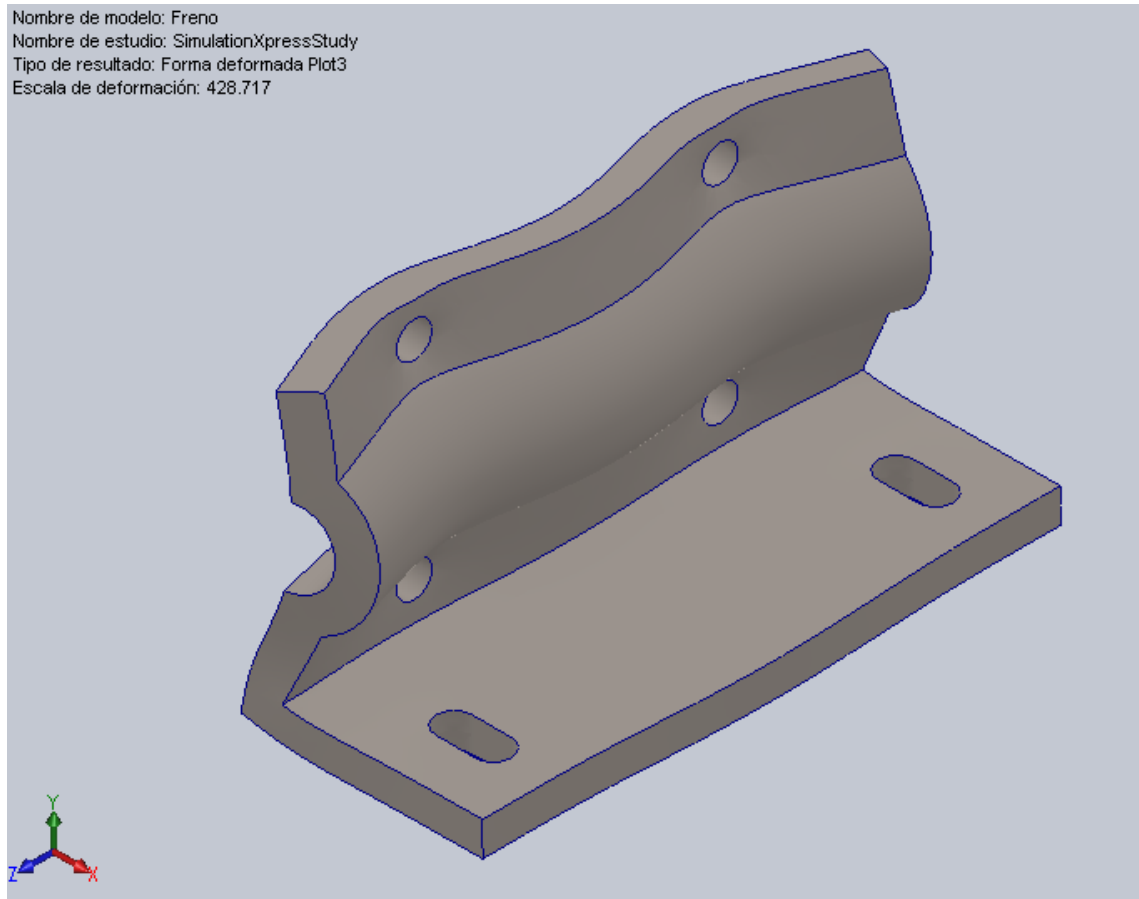


Figura 5.18 Deformada (escala = 428,717 : 1)



## **6.- ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL**

### **6.1 Introducción**

Para crear el entorno virtual, se ha utilizado el lenguaje de programación DarkBASIC Professional en su versión 6.9. Se trata de una herramienta profesional de programación de alto nivel, esto significa que es muy cercana al usuario, para PC. Como su nombre delata, es un derivado del lenguaje BASIC, por lo que destaca su sencillez, así como su gran flexibilidad.

DarkBASIC permite crear cualquier cosa, desde un simple programa de texto hasta una pantalla completa de 3D. Su motor 3D acelerado mediante DirectX, permite recrear mundos virtuales introduciendo objetos tridimensionales creados en un programa de diseño 3D y dotarlos de complejos efectos y vida mediante órdenes sencillas.

Inicialmente es indispensable contar con un ordenador con unas características básicas como las siguientes:

- Procesador Pentium II 300MHz
- Memoria 64 Mb de RAM
- Tarjeta gráfica 8 Mb o superior

Sin embargo, los requerimientos de éste se hacen mayores dependiendo del número de objetos o la cantidad de cálculos a realizar. En el presente proyecto se ha trabajado con un ordenador de características muy superiores. Ver anexo B.



## **6.2 Interfaz PC – usuario**

Tal y como se explica en la introducción, este proyecto termina con la instalación mecánica de los sensores sobre la motocicleta, dejando para una futura fase la instalación eléctrica del sistema sensorizado, la subrutina de control del simulador a través de ellos y la programación dinámica del videojuego.

El control del simulador actualmente se lleva a cabo mediante la combinación de un joystick y el teclado. El joystick se emplea para los comandos más comunes en la conducción como acelerador, frenos, embrague, cambio de marchas e incluso botón de arranque; mientras que el teclado posee funciones secundarias aunque no menos importantes como la puesta en marcha de la interfaz PC-plataforma, la grabación de datos en fichero, cronómetro, cambio de cámaras, fin del programa, etc.

El joystick empleado en la elaboración de este proyecto es un Microsoft Sidewinder Joystick que podemos observar en el anexo B.

Además se facilita la utilización del programa en un PC que no disponga de joystick, ya que está comentado el código necesario para que se puedan manejar desde el teclado las funciones desempeñadas por el joystick.

Para el control en primera persona se instala mecánicamente una serie de sensores electrónicos en la motocicleta, que son los receptores de los movimientos que el piloto produce sobre esta.



### **6.3 Entorno gráfico**

El entorno gráfico consta de varios elementos creados *ad hoc* o transformados mediante diversas herramientas para poder ser empleados en DarkBASIC Professional. Este proporciona un compilador basado en lenguaje Basic en el que se integran los modelos matemáticos con el entorno virtual en tres dimensiones para conseguir una visualización al estilo clásico de un videojuego.

Los principales elementos que lo componen son:

- Un modelo tridimensional de motocicleta. Existen tres texturas diferentes para este modelo con el fin de diferenciar entre los tres modelos simulados.
- Dos circuitos: Una modelización del circuito de Tsukuba (Japón) y un tramo largo de carretera de montaña.
- Elementos varios como cielo, horizonte, sonidos, etc.

Se utiliza un modelo analítico cinemático para el cálculo de las variables necesarias para dotar de movimiento a la plataforma.

Así se obtienen las velocidades longitudinales, laterales y verticales. A partir de estas se calculan las aceleraciones correspondientes. Se trata de un modelo cinemático puesto que dichas velocidades se obtienen de la división del espacio recorrido por la moto entre el tiempo empleado en ello.

El cabeceo y la velocidad angular de guiñado son hallados a partir de los anteriores.

El balanceo no procede de ninguno de los modelos anteriores, sino que se trata del ángulo de inclinación aplicado sobre la moto o el joystick.



## **6.4 Código del programa principal**

Como se decía, la simulación ha sido programada en DarkBASIC Professional. Se trata de un código que integra los modelos matemáticos con un entorno virtual en tres dimensiones para conseguir una visualización al estilo clásico de un videojuego.

A dicha simulación se le han añadido algunas líneas de código más, tanto en el programa principal como en algunas subrutinas, además de implementar las funciones para la comunicación del simulador con la plataforma Stewart.

A continuación se muestra el bucle principal del programa, que comienza con “do” y termina con “loop”.

```
`#####  
`////////////////////GAMELOOP(begin)////////////////////  
`#####  
  
  oldtime = timer()  
  do  
    gosub control_movil  
    gosub fichero_comp_veh  
    gosub datos_MDA  
    gosub control_camara  
    gosub infopantalla  
    sync  
  
    rem dt# mide el periodo entre 2 SYNCs con la hora del sistema  
    tiempo = timer()
```



```
dt# = tiempo - oldtime
oldtime = tiempo
dts# = dt# /1000

if scandcode() = 45 then exit
loop

#####
`////////////////////GAMELOOP(end)////////////////////////////////////
`#####

rem Cierre del fichero de datos
close file 11 :

rem Cierre de la DLL que contiene el MDA
Descargar_MDA(DLL_MDA)

end
```

El programa funciona realizando continuamente todas las instrucciones que están contenidas entre los comandos “do” y “loop”. Cada vez que realiza dichas operaciones se denomina paso. Como se puede ver, en cada paso se ejecutan cinco subrutinas, el comando “sync” realiza el refresco de pantalla y el cálculo del tiempo que ha costado realizar dicho paso, con el fin de poder calcular variables posteriormente.

Como ya ha sido introducido antes, se ha mejorado la simulación de la que se partió, con el fin de optimizarla, filtrado de los datos obtenidos para conseguir un efecto más real y adaptar los datos de salida del PC a los de



entrada de la plataforma Stewart. Estas dos últimas serán desarrolladas en el próximo apartado, ya que están estrechamente relacionadas.

A continuación se ofrece una explicación de las líneas de código introducidas con su respectiva mejora sobre el programa.

#### **6.4.1 Cálculo de “dt#”**

La variable “dt#” es la encargada de medir el tiempo de realización del bucle mediante la hora del sistema.

Se han creado unas líneas de código dentro del bucle principal para conseguir que “dt#” fuese variable, puesto que en el programa inicial este era fijo.

Con esto se ha conseguido solventar los problemas que surgían en el cálculo de algunas variables, que al diferir de los que tendrían que ser en cada instante, producían efectos extraños en la conducción. Consecuencia directa de que “dt#” tuviese un valor fijo frente a que en la realidad, el tiempo que tarda el ordenador en realizar el bucle cada vez, es diferente.



Estas son las líneas introducidas:

```
tiempo = timer()  
dt# = tiempo - oldtime  
oldtime = tiempo  
dts# = dt# /1000
```

Como se puede ver en el cuadro del bucle principal, además de estas líneas, se ha inicializado “oldtime”, asignándole el valor de “timer()” antes del comienzo del bucle, para el correcto funcionamiento del programa.

#### **6.4.2 Final de programa**

También ha habido que introducir un final de bucle principal para salir del simulador y un final de programa para que este terminara.

Para salir del bucle principal y por tanto del simulador, ha bastado con introducir una condición asignada a una letra del teclado, en este caso la “x”, en el interior de dicho bucle. Si durante la ejecución del programa es pulsada la letra “x” este termina y sale. Esta es la condición introducida:

```
if scancode() = 45 then exit
```

Para el final del programa ha sido suficiente con colocar un “end” tras el bucle principal, el cierre de fichero y la descarga del MDA. Como se puede ver al final del cuadro del bucle que se ha incluido más arriba y a continuación:



```
`#####`  
`////////////////////GAMELOOP(end)////////////////`  
`#####`  
  
    rem Cierre del fichero de datos  
  
    close file 11 :  
  
    rem Cierre de la DLL que contiene el MDA  
  
    Descargar_MDA(DLL_MDA)  
  
  
end
```

### **6.4.3 Activación del MDA**

En el programa inicial la activación del MDA se producía de forma automática antes del comienzo del bucle principal, para que esto no ocurriese cada vez que el programa se ejecutase y además permitiese al usuario activar y desactivar la plataforma durante la simulación, se ha modificado dicha orden y se han introducido en la subrutina “datos\_MDA” una serie de condiciones para generar dicha posibilidad:

```
`////////////////////datos_MDA////////////////`  
  
    if scancode() = 33  
  
        if activada = 0  
  
            activada = Activar_MDA(DLL_MDA)  
  
            activada = 1  
  
        endif
```



```
    escribeMDA = 1

endif

if scandcode() = 34

    escribeMDA = 0

endif

if activada <> 0

    if escribeMDA = 1

        MDA_Stewart(DLL_MDA, tiempoMDA, acel_longf#, acel_latf#, acel_vertf#,
cabeceoMDA#, balanceoMDA#, wslidef#)

    else

        MDA_Stewart(DLL_MDA, tiempoMDA, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)

    endif

endif

return
```

Así la plataforma sólo se activa cuando pulsamos la tecla que asigna a la variable “activada” el valor de 1. Dicha tecla es la letra “f” del teclado, que como ya se ha dicho anteriormente, este tiene varias funciones secundarias en la simulación. Si durante la simulación se desea desactivar la plataforma y dejarla en su punto neutro, basta con pulsar la tecla “g” del teclado, que asigna el valor de “0” a la variable “escribeMDA”. Para permitir el movimiento de nuevo, se debe pulsar otra vez la tecla “f”, así a “escribeMDA” le es asignado el valor “1”.

Se llama punto neutro de la plataforma a la posición que adopta esta, cuando está activa pero no realiza ningún movimiento. Se trata de un estado de equilibrio, en el que los cilindros neumáticos se mantienen a la mitad de su



carrera total. De esta forma la base de la cabina permanece paralela al suelo, a la espera de la recepción de los datos que ordenen su movimiento.

#### **6.4.4 Contador de tiempo para el fichero**

Cuando se comenzó a realizar grabaciones en el fichero de datos, para la posterior realización de las gráficas de comportamiento, se observó que el tiempo que este tenía asignado como entrada, era el contador de tiempo de vuelta.

Así que se ha decidido crear una variable que comenzase a contar el tiempo de grabado condicionada a la orden de comienzo de grabación. De esta manera se consigue que el tiempo empiece en cero cada vez que se graban datos en el fichero para su posterior análisis. Dicha variable ha sido introducida en la subrutina conocida como “infopantalla”.

Esta es la línea de código que la define:

```
if recopdat = 1 then tiempo_grabando# = tiempo_grabando# + dt#/1000
```



## **6.5 Filtrado de los datos egresados del simulador**

Un simulador debe transmitir una sensación de conducción lo más real posible a quien haga uso de este. Para ello se dispone de los elementos nombrados en el capítulo ¿?, uno de los más importantes es la plataforma Stewart, que es la encargada de generar las aceleraciones y movimientos que se producirían en una conducción real.

Esta depende del módulo MDA, que es una librería .dll programada en lenguaje C que recibe los datos que le proporciona el ordenador donde corre la simulación y los envía al computador de la plataforma. Esto se consigue con un código para DarkBASIC desarrollado anteriormente por el departamento. Este es quien establece la conexión con el módulo MDA y ha sido incorporado al código principal a través de la subrutina llamada “datos\_MDA”. Las líneas de código introducidas para ello aparecen en el subapartado 6.4.3, en el cual se describe la activación de dicho módulo.

Los datos de entrada que requiere dicho módulo son el tiempo, las aceleraciones tanto longitudinales, como laterales y verticales, los valores de cabeceo, balanceo y velocidad angular de guiñado por deslizamiento. Este es el código de envío de datos al módulo:

```
MDA_Stewart(DLL_MDA, tiempoMDA, acel_longf#, acel_latf#, acel_vertf#,  
cabeceoMDA#, balanceoMDA#, wslidef#)
```

Para que los datos recibidos en el MDA sean realistas, no produzcan intermitencias y por tanto fluctuaciones y variaciones bruscas, deben ser filtrados y acotados dentro de unos valores máximos y mínimos, dentro del propio programa de simulación.



A continuación se detallará el filtro de primer orden utilizado en todas las variables que deben ser enviadas al módulo MDA. Este responde a la siguiente expresión:

$$X_f = X_{of} * (e^{-2\pi * t * freq}) + (2\pi * t * freq) * X$$

Con:

$X_f$  = valor filtrado

$X_{of}$  = último valor filtrado

$X$  = valor actual del dato a filtrar

$t$  = variación temporal

$freq$  = frecuencia del filtro

En el recuadro posterior se muestra el código de programa cuyo fin es el filtrado de la variable aceleración longitudinal, y que adopta la forma de la expresión anterior. Se trata de un ejemplo representativo, puesto que para el resto de variables es prácticamente el mismo, ya que únicamente difieren en la variable que está siendo filtrada:

<pre>old_acel_longf# = acel_longf#  acel_longf# = old_acel_longf# * (2.718282 ^ (-6.2832 * dts# * 0.5) ) + (6.2832 * dts# * 0.5) * acel_long#</pre>
---



Como se puede observar, se han tomado aproximaciones con varios decimales de los valores de " $e$ " y " $2\pi$ ", puesto que no son cálculos de gran precisión y además, se reduce el tiempo de cálculo.

Seguidamente se explicarán los diferentes filtrados y acotaciones realizadas junto a las gráficas de verificación, para mostrar los distintos efectos conseguidos en cada paso.

#### **6.5.1 Filtrado de aceleraciones**

Las aceleraciones son parte fundamental de un simulador, puesto que enviadas en forma de datos al ordenador de la plataforma sobre la que se encuentra la cabina, este las procesa, y da las ordenes necesarias para que los pistones generen las fuerzas, que corresponden a dichas aceleraciones, sufridas por el conductor durante el recorrido.

Por ello estas deben ser suavizadas dentro del propio programa, con la intención de evitar las fluctuaciones y brusquedades a las que pueden dar lugar los cálculos matemáticos de las diferentes variables.

##### ***6.5.1.1 Filtrado de las aceleraciones longitudinales***

La aceleración longitudinal es la aceleración sufrida por la moto en su eje longitudinal. Dicho eje tiene la misma dirección y sentido que un vector que recorre la moto con origen en el centro la rueda trasera y con extremo en el centro de la rueda delantera.



Como se puede visualizar en la gráfica 6.1, los resultados obtenidos al principio eran grandes aceleraciones con variaciones de magnitud y sentido muy bruscas:

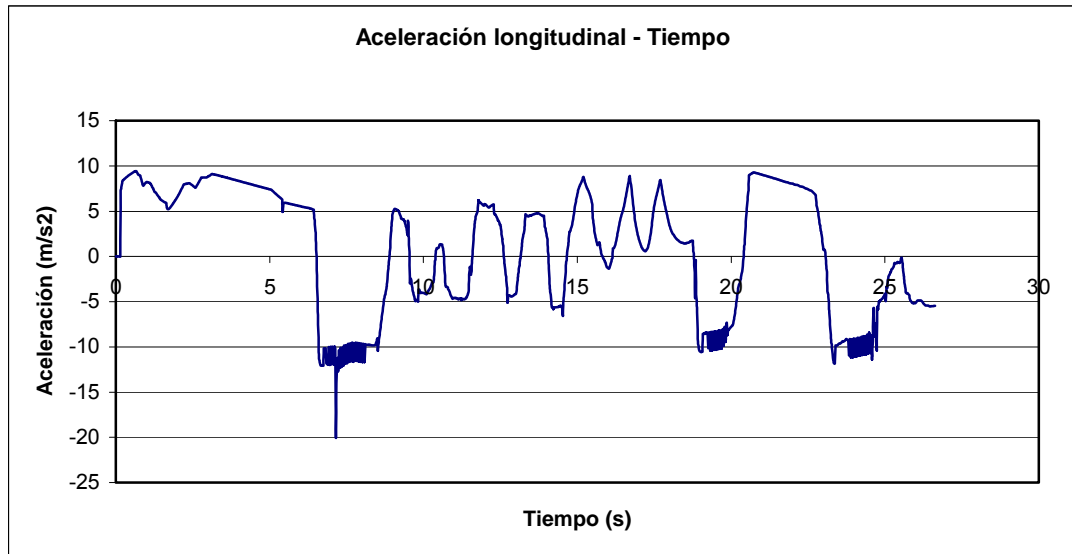


Figura 6.1 Aceleración longitudinal original frente a tiempo

Una vez pasada por el filtro y acotada entre valores de  $+ 9.8 \text{ m/s}^2$  y  $- 9.8 \text{ m/s}^2$  se puede observar en la figura 6.2 que el trazado de la curva es mucho más fluido, dando valores aceptables para la conducción:

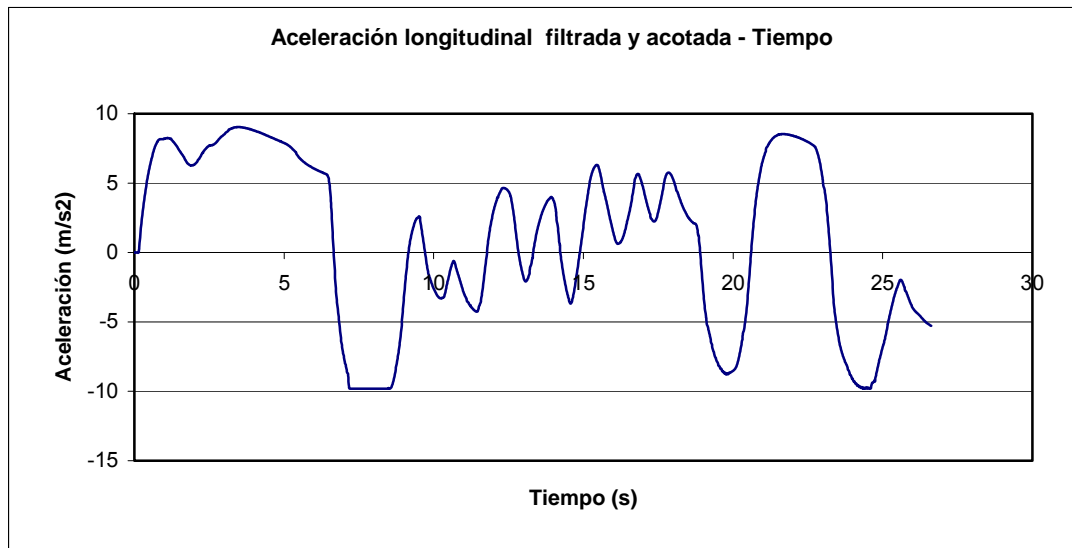


Figura 6.2 Aceleración longitudinal filtrada y acotada frente a tiempo

El tercer gráfico, figura 6.3 es una superposición de ambas, en el cual se puede ver la clara mejoría del resultado:

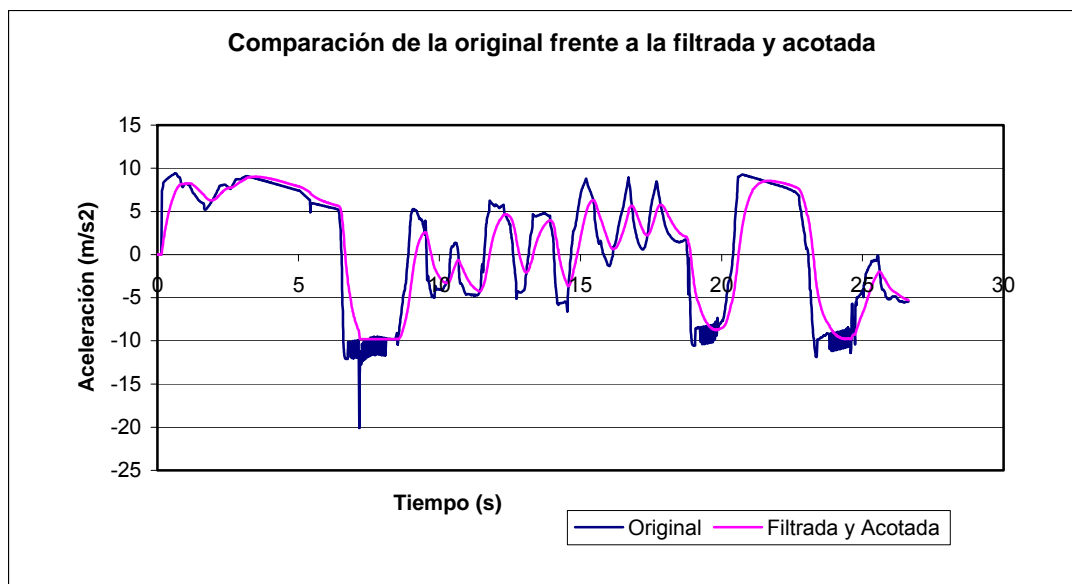


Figura 6.3 Aceleración longitudinal original frente a la filtrada y acotada

Con esta aplicación se consiguen unos valores más realistas y una mejor adaptación de la plataforma de simulación a los posibles valores que pueda tomar la aceleración longitudinal cuando la moto acelera y frena.



### 6.5.1.2 Filtrado de las aceleraciones laterales

Los motoristas cuando trazan una curva se inclinan hacia el interior de esta con el objetivo de mantener el equilibrio de fuerzas. Así desplazando el centro de gravedad del conjunto moto-motorista hacia el centro de la curva, consiguen equilibrar la fuerza centrífuga que les expulsa fuera de la trazada. Como puede observarse en la imagen 6.4:

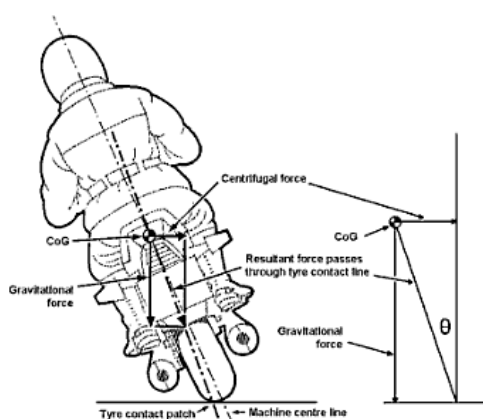


Figura 6.4 Fuerzas en moto durante trazado curva

La inclinación, conocida como balanceo, la velocidad a la que se circula y el radio de la curva que se está trazando, son los tres parámetros que se pueden modificar en dicho equilibrio de fuerzas.

Para que el motorista no se caiga o pierda la trazada es necesario que se cumpla ese equilibrio, por lo tanto sólo puede existir aceleración lateral en los instantes en los que se varía alguno de los parámetros antes nombrados, cuando estos sean fijos no existirá dicha aceleración. Con la plataforma se pretende emular esto, pero con la limitación de que el único parámetro que esta es capaz de modificar es el ángulo de balanceo.

Puesto que la plataforma nos ofrece esta ventaja y que, como se ha comentado en el capítulo 3, la motocicleta está montada sobre un eje longitudinal dentro de la cabina, se decidió el diseño del freno de compresión



externa para que el balanceo de la motocicleta fuese más suave. De esta forma se aprovecha todo el potencial que la plataforma Stewart es capaz de desarrollar.

Gracias a que, cuando el piloto del simulador produce un ángulo de balanceo la plataforma responde creando el mismo ángulo pero en sentido contrario, el conductor permanece constantemente vertical al suelo, a pesar de que la cabina este inclinada con respecto a estos. Así el piloto siente las fuerzas tal como las debería sufrir en un recorrido real, es decir, fuerzas laterales únicamente en las variaciones del ángulo de balanceo y siempre la fuerza ejercida por la aceleración de la gravedad que le mantiene sobre el asiento.

Aquí se muestra de forma representativa, imagen 6.5, cómo vería el piloto la pantalla cuando se encuentra trazando una curva, como se puede ver el piloto permanece siempre perpendicular al suelo.



Figura 6.5 Posición motocicleta en la cabina durante el trazado de curva



Tras esta breve explicación se llega a la conclusión de que la aceleración lateral que debe ejercer la plataforma Stewart es nula. Ella únicamente debe contrarrestar el valor del balanceo para mantener vertical al piloto. Así pues el valor de aceleración lateral que será enviado a través del módulo MDA será cero.

De todas formas los valores aportados por el programa de simulación han sido filtrados y acotados, al igual que se ha llevado a cabo con las aceleraciones longitudinales, para que sus resultados teóricos sean próximos a la realidad y sus efectos en la simulación no difieran de los prácticos. El filtro utilizado es el desarrollado al comienzo de este apartado y la acotación se ha ejecutado entre  $+ 9.8 \text{ m/s}^2$  y  $- 9.8 \text{ m/s}^2$ .

Estas son las gráficas que representan respectivamente los datos originales frente al tiempo (figura 6.6), los filtrados y acotados frente al tiempo (figura 6.7) y finalmente una superposición de las anteriores (figura 6.8) en la que se puede observar claramente la mejora realizada:

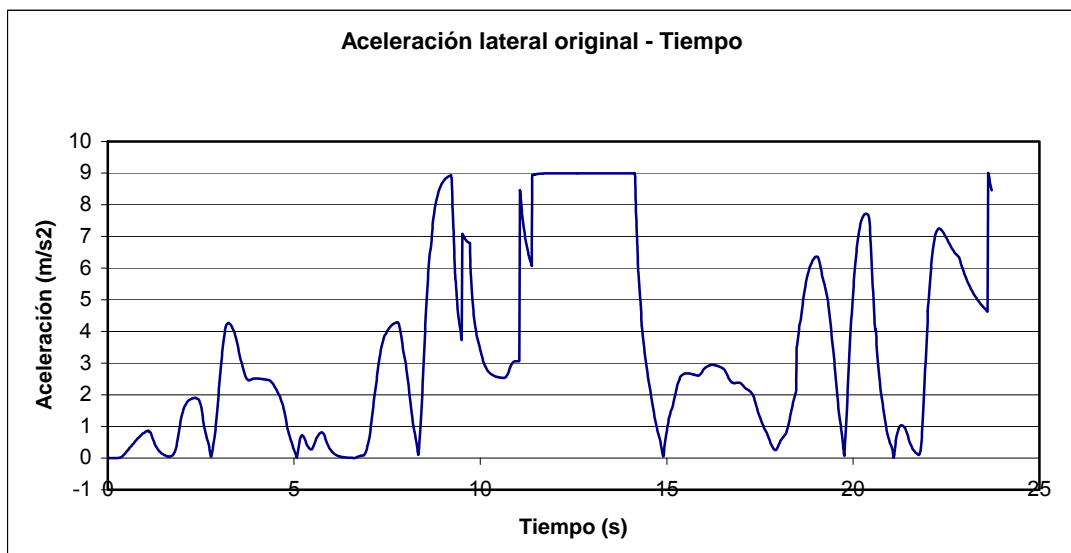


Figura 6.6 Aceleración lateral original frente a tiempo

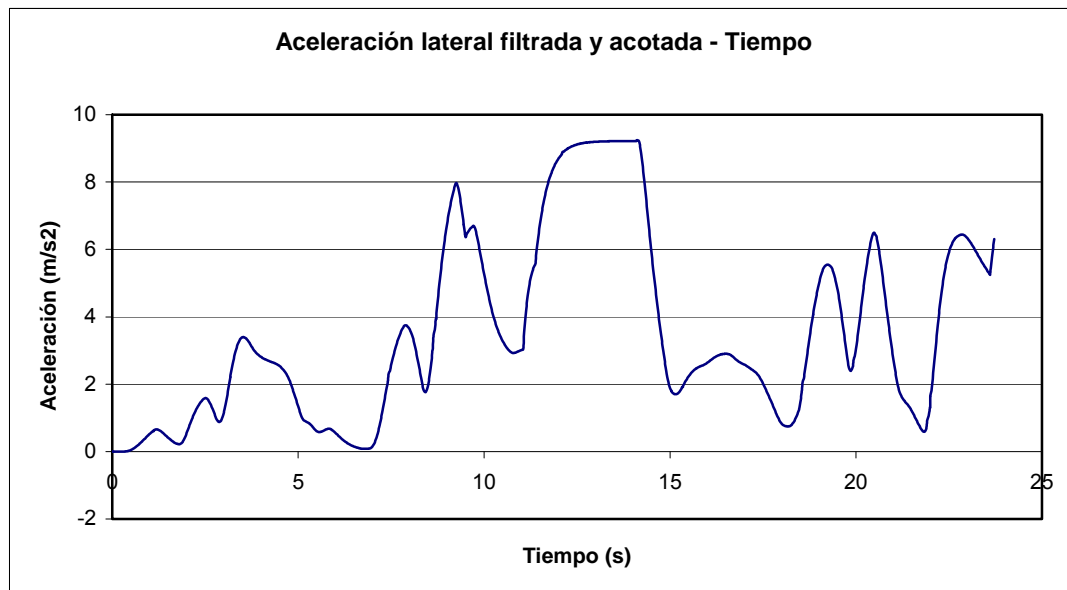


Figura 6.7 Aceleración lateral filtrada y acotada frente a tiempo

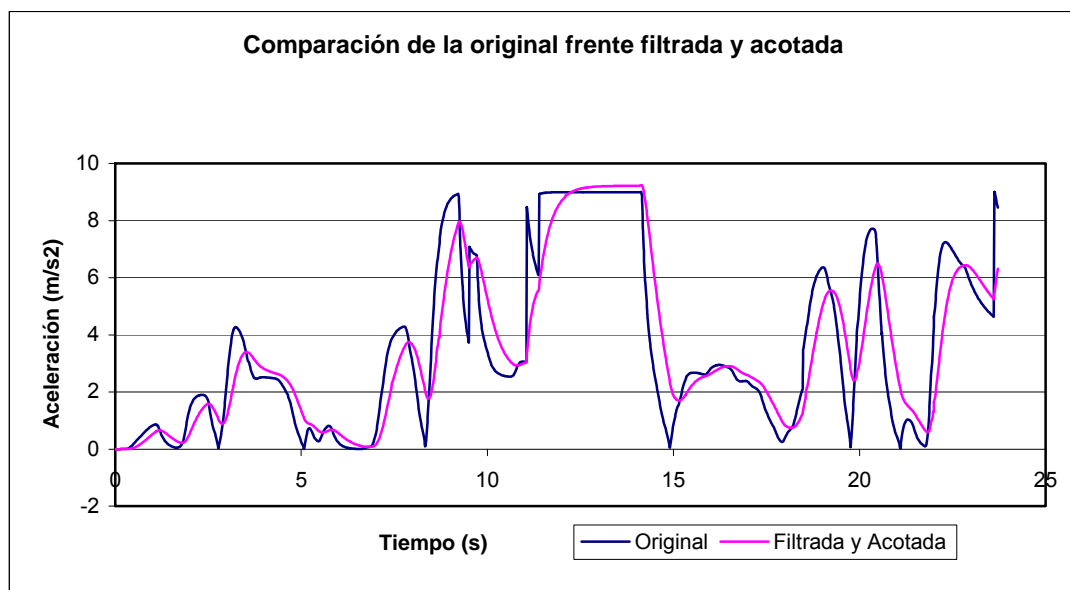


Figura 6.8 Aceleración lateral original frente a la filtrada y acotada



### 6.5.1.3 Filtrado de las aceleraciones verticales

La aceleración vertical es la sufrida por el piloto en el sentido del eje vertical. Este tiene la misma dirección y sentido que un vector cuyo origen esta situado en el punto de contacto entre rueda y piso, y su extremo en el centro del eje de dicha rueda. Como se puede comprobar es perpendicular al longitudinal.

Las aceleraciones verticales son las producidas por los cambios de rasante y por las desigualdades del piso sobre el que se circula.

El gráfico 6.9, muestra las aceleraciones verticales que se producían originariamente:

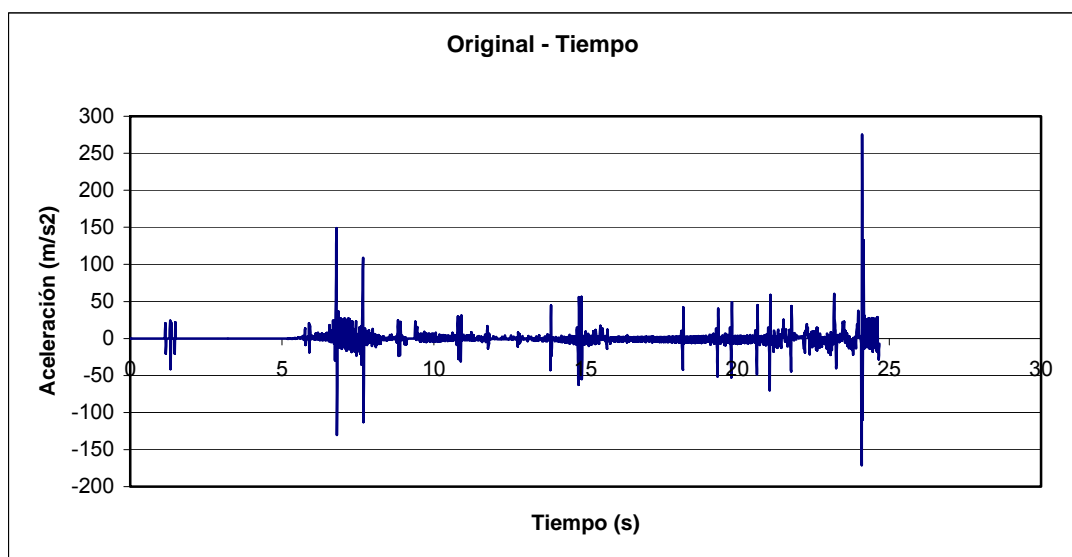


Figura 6.9 Aceleración vertical original frente al tiempo

Como puede comprobarse, se producían unas fuertes aceleraciones con valores muy elevados, grandes intermitencias y unos cambios muy bruscos.

Para solucionar esto, primero ha habido que eliminar los picos tan elevados que se producían y después acotarla en valores de  $+ 9.8 \text{ m/s}^2$  y  $- 9.8 \text{ m/s}^2$ .



Para filtrar todos esos picos se introdujeron las siguientes líneas de código, cuyo procedimiento es el de no permitir variaciones en la aceleración superiores a  $5 \text{ m/s}^2$ . A la variable se le asigna el valor de cero si supera dicha magnitud, esto es así para evitar la acumulación de aceleraciones debidas a los defectos del piso que pueden llegar a crear valores elevados, al sumarse a las producidas en los cambios de rasante, que no se corresponderían con los prácticos:

```
if (acel_global_y# - old_acel_global_y#) > (5) then acel_global_y# = 0  
if (acel_global_y# - old_acel_global_y#) < (-5) then acel_global_y# = 0
```

Tras esta corrección se obtuvo una mejoría notable, pero todavía se producían grandes y numerosas intermitencias, como se puede observar en la gráfica 6.10:

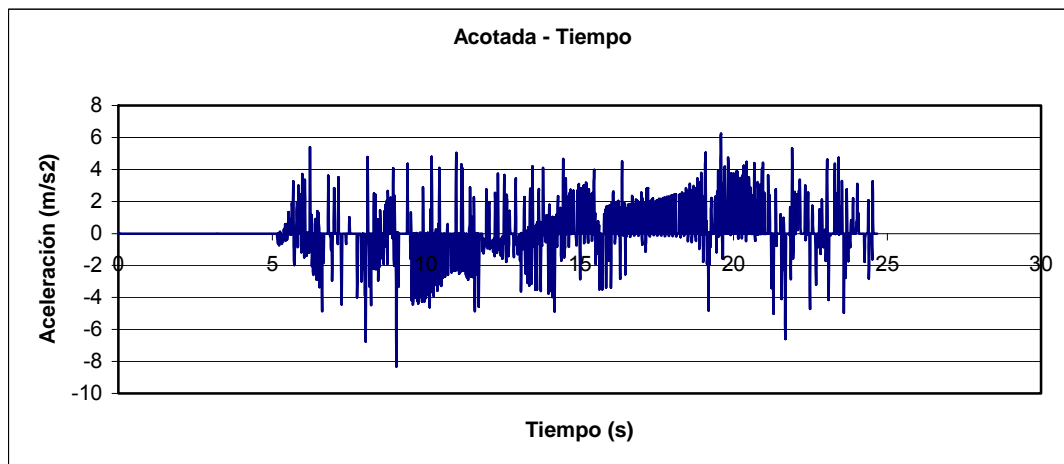


Figura 6.10 Aceleración vertical acotada frente al tiempo

Finalmente se le ha añadido el filtro de primer orden explicado al principio de este apartado, con el cual se ha obtenido el gráfico 6.11, que como se puede observar a dado un resultado con zonas crecientes y decrecientes, muestra de



los cambios de rasante del recorrido, y pequeñas fluctuaciones a lo largo de estas que reflejan los desniveles del trazado:



Figura 6.11 Aceleración vertical acotada y filtrada frente al tiempo

La gráfica 6.12 es una superposición de las tres anteriores, en la que se puede ver la clara mejoría tras los filtrados y el acotado. Con la finalidad de que se viesen las tres gráficas y como consecuencia de que los valores originales fuesen tan elevados, los datos originales aparecen divididos por un factor 30:

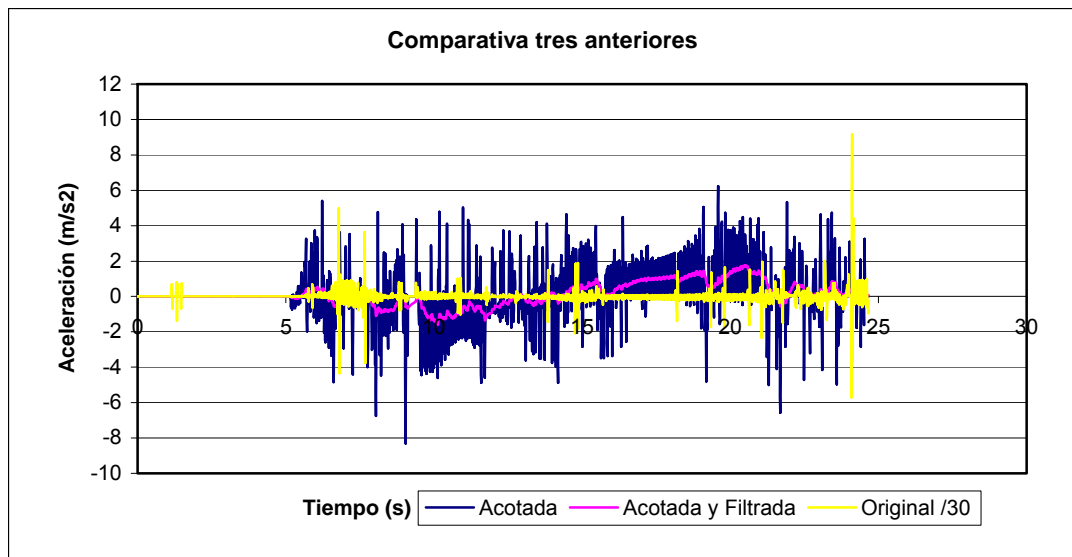


Figura 6.12 Comparativa entre original, acotada, acotada y filtrada frente a tiempo

Hasta aquí los filtrados y acotados que se han realizado a las aceleraciones, el siguiente subapartado trata de los mismos efectos pero en el cabeceo.

### **6.5.2 Filtrado del cabeceo**

El cabeceo es el ángulo que se inclina hacia delante o hacia atrás una moto cuando se frena o se acelera. Se mide en grados sexagesimales.

Al igual que ocurría en las aceleraciones, los primeros resultados obtenidos mostraban irregularidades, como se puede comprobar en el gráfico 6.13:

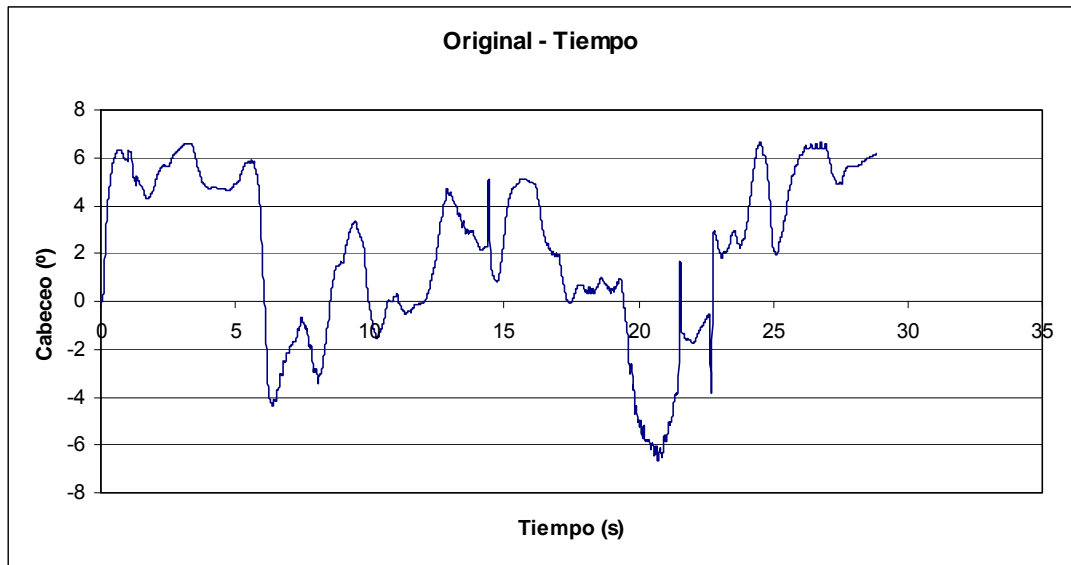


Figura 6.13 Cabeceo original frente a tiempo

Tras aplicar el filtro de primer orden, se consigue un resultado continuo y sin brusquedades, representado en la figura 6.14:

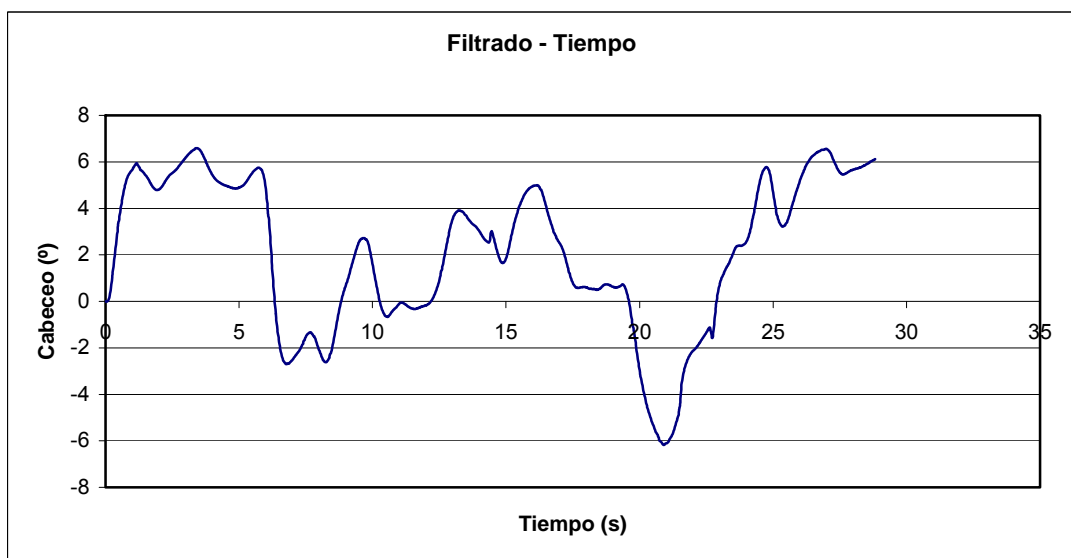


Figura 6.14 Cabeceo filtrado frente tiempo



La mejora puede verse en la imagen 6.15, en la que aparecen representadas las dos anteriores, generando así una comparación directa entre la sin filtrar y la filtrada:

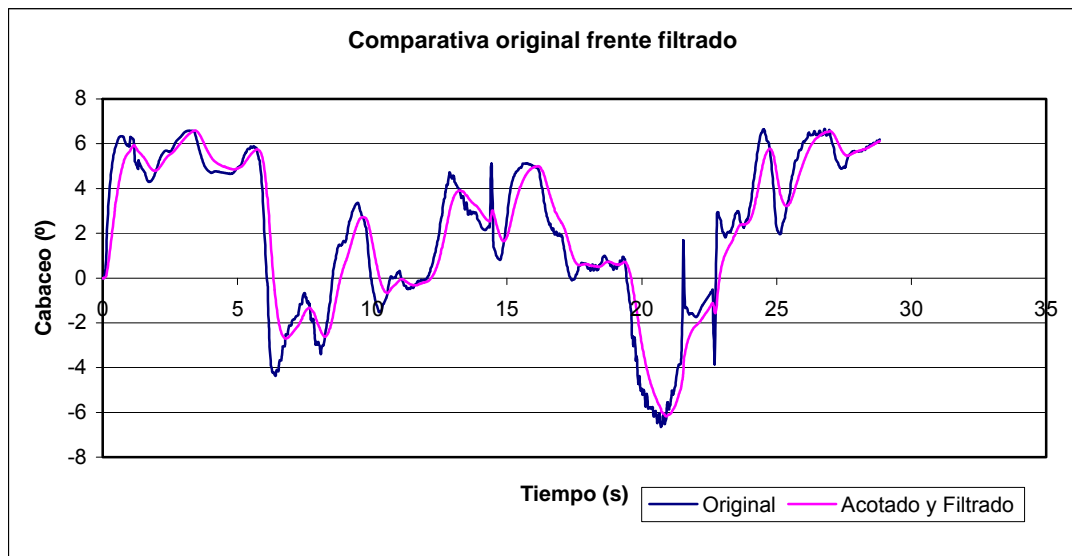


Figura 6.15 Comparativa entre cabeceo original y filtrado

### **6.5.3 Filtrado del balanceo**

El balanceo es el ángulo que mide la inclinación lateral producida por el piloto con el fin de variar la dirección durante el trazado de una curva. Al igual que ocurre con el cabeceo, este también se mide en grados sexagesimales.

Como se ha explicado con anterioridad, en el filtrado de la aceleración lateral, en este proyecto es de gran importancia el balanceo. Puesto que es parte fundamental de la simulación del trazado de las curvas, gracias a que la plataforma Stewart reproduce el ángulo de balanceo que produce el motorista pero en sentido contrario, permitiendo así mantener la posición siempre vertical al suelo del conductor del simulador, haciendo que este no sienta ninguna fuerza lateral que falsee la que sufriría a lo largo de un recorrido real.



Como se acaba de decir, el balanceo es un dato fundamental en la simulación, por lo tanto también debe ser filtrado para evitar las brusquedades originadas al principio y suavizar las pendientes de crecimiento y decrecimiento de la curva que lo representa. Así se conseguirá un envío de datos al módulo MDA más fluido, sin intermitencias, aunque antes de remitirlos a este se deberán adaptar al ángulo que es capaz de inclinarse la moto en el interior de la cabina y darles el sentido contrario al original, pero esto será desarrollado en el apartado 6.6.

En este se van a reproducir las gráficas de la corrección producida por el filtro de primer orden expuesto al comienzo de este apartado. La figura 6.16 representa los datos generados por el simulador en un origen:

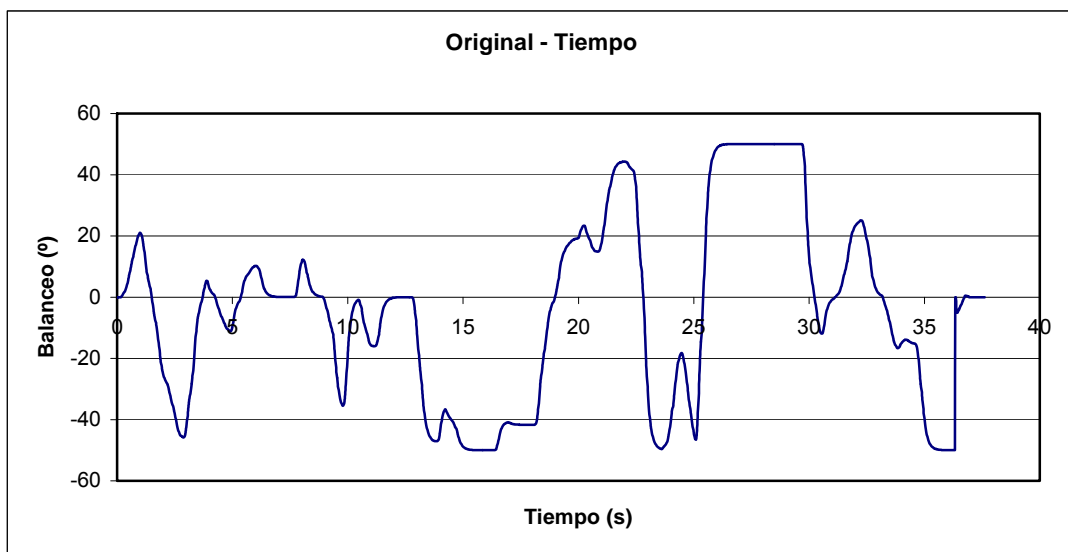


Figura 6.16 Balanceo original frente al tiempo

El gráfico 6.17 está referido a los datos resultantes tras el filtrado, se puede observar como los picos originales han sido redondeados:

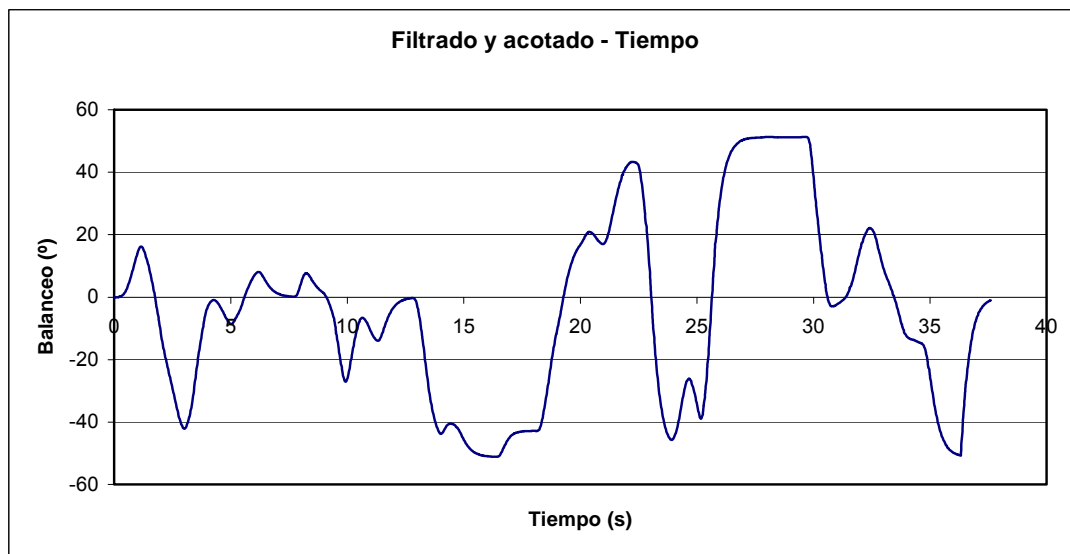


Figura 6.17 Balanceo filtrado y acotado frente al tiempo

Finalmente se muestra la gráfica comparativa 6.18, con la superposición de las dos anteriores:

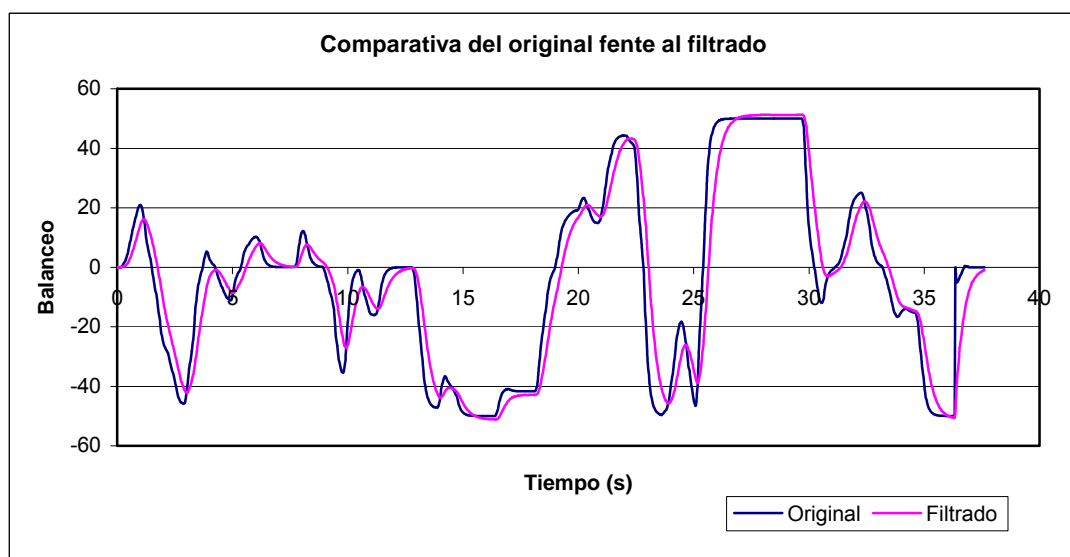


Figura 6.18 Comparativa entre balanceo filtrado y acotado frente al original



#### **6.5.4 Filtrado de la velocidad angular**

La velocidad angular sólo existe durante los cambios de dirección de un objeto, ya que por definición es la velocidad lineal dividida por el radio de la curva que se está trazando durante dicho cambio de dirección. Por lo tanto sus unidades pueden ser radianes partido segundo ( $\text{rad} / \text{s}$ ) o grados sexagesimales partido segundo ( $^{\circ} / \text{s}$ ).

La velocidad angular del motorista no es un dato que deba ser enviado al ordenador de la plataforma. Aún así debe ser filtrada, ya que el programa hace uso de variables derivadas de esta, como la aceleración lateral, y además mejora el realismo en la visualización.

El gráfico 6.19 muestra los datos creados por el programa para el valor de la velocidad angular antes de ser depurados:

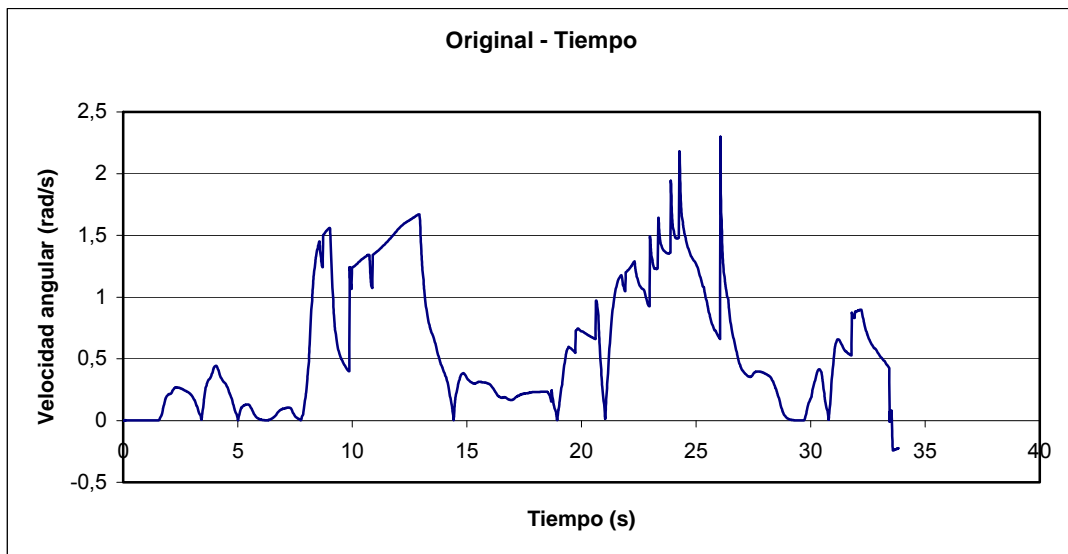


Figura 6.19 Velocidad angular original frente al tiempo



La figura 6.20, muestra el resultado obtenido tras el paso por el filtro de primer orden desarrollado al principio del apartado:

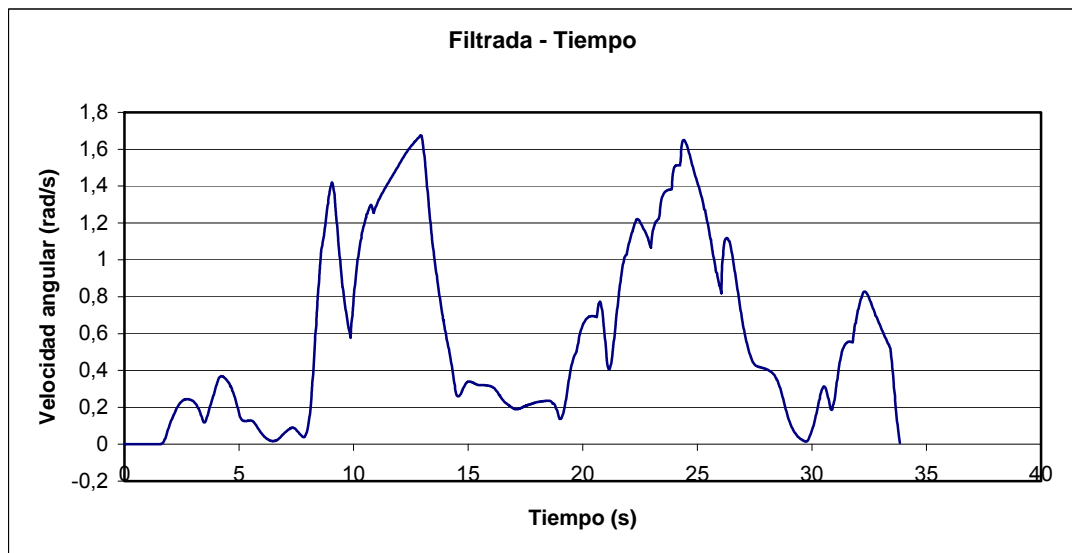


Figura 6.20 Velocidad angular filtrada frente al tiempo

Continuando con el patrón seguido hasta ahora, la imagen 6.21 es la superposición de la originaria y la tratada con el filtro, de esta forma se consigue un efecto mejorado en la visión de la corrección de los resultados:

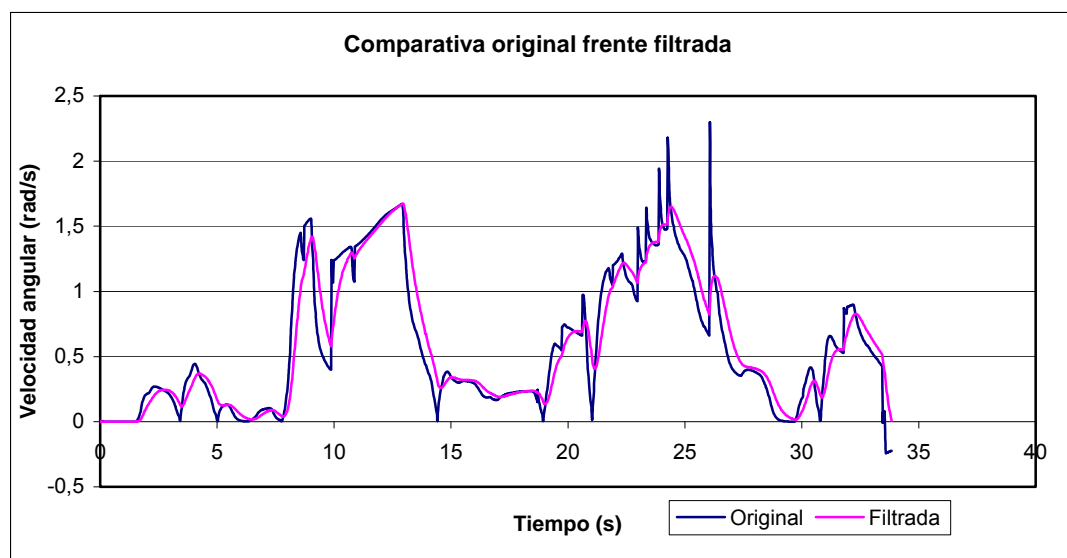


Figura 6.21 Comparativa velocidad angular filtrada frente a la original



#### **6.5.5 Filtrado de la velocidad angular de guiñado**

El guiñado es el ángulo girado por la moto en torno al eje vertical, eje Y, del conjunto moto-motorista. Este efecto puede producirse durante el trazado de una curva, cuando la rueda trasera desliza o cuando ambos ocurren a la vez. La aplicación de este efecto a la plataforma se centrará únicamente en los casos en los que la rueda trasera desliza, ya sea en recta o durante el trazado de una curva. El caso de guiñado por trazado de curva se descarta, puesto que durante la conducción real de una motocicleta, el piloto no siente los efectos de este. Los motoristas únicamente perciben una rotación de la moto cuando esta desliza, que en muchas ocasiones este efecto conlleva la caída del piloto por la pérdida del control.

La velocidad angular de guiñado es la velocidad angular producida en la moto durante el guiñado.

Esta velocidad angular si que tiene que ser enviada al módulo MDA, ya que la plataforma Stewart es capaz de generar movimientos de guiñado.

En este subapartado solamente se tratará el filtrado de datos anterior al envío de estos al módulo MDA. El modificación de estos para ello se desarrollará en el apartado 6.6.

Al igual que se ha realizado hasta ahora, se va a proceder a mostrar las gráficas que representan la velocidad angular de guiñado.

En la gráfica 6.22 se puede observar la curva original:

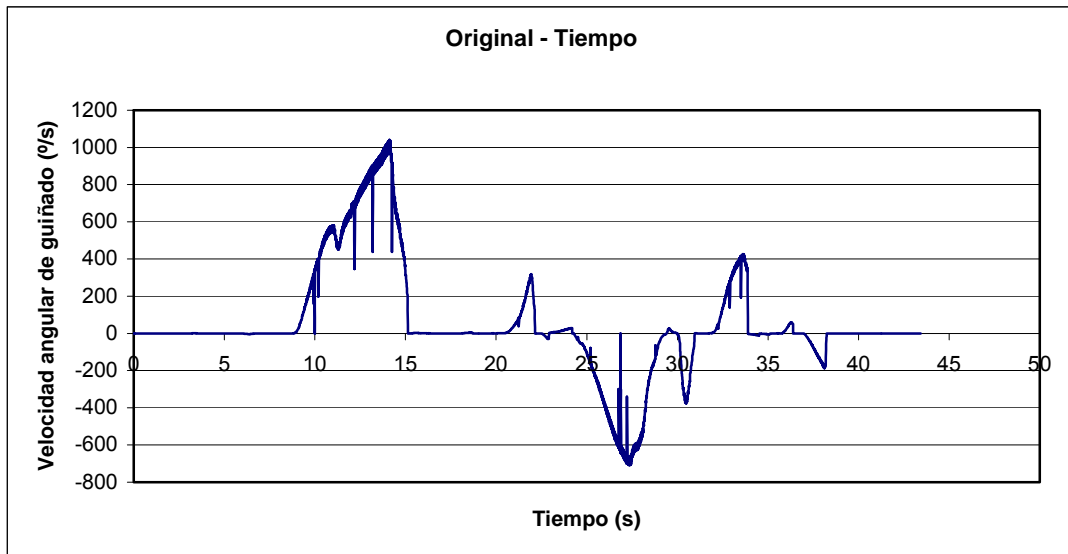


Figura 6.22 Velocidad angular de guiñado frente al tiempo

La figura 6.23 muestra el resultado de pasar la variable por el filtro de primer orden explicado al comienzo del apartado:

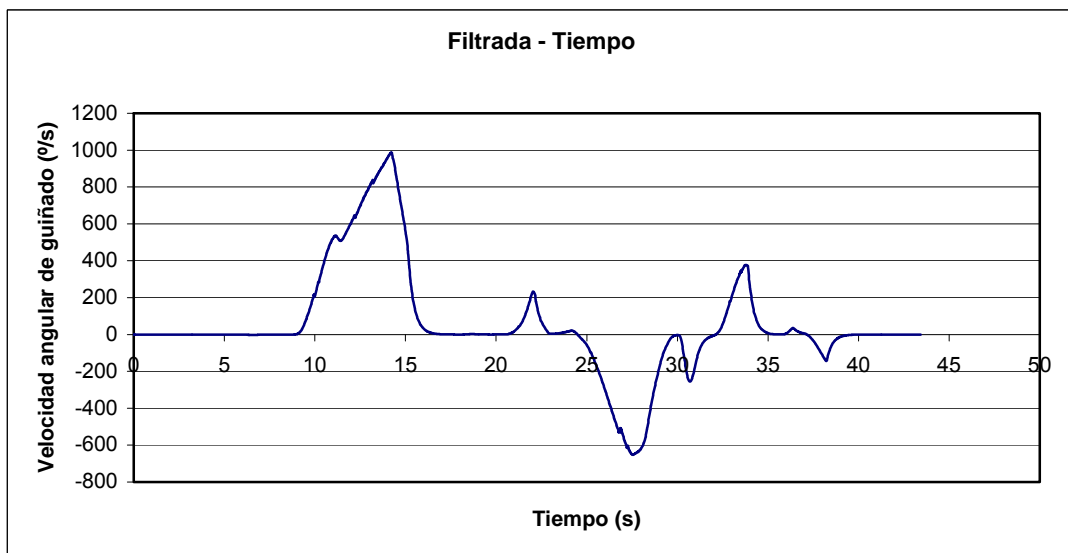


Figura 6.23 Velocidad angular de guiñado filtrada frente al tiempo



La gráfica 6.24 representa una superposición de las curvas originaria y filtrada para la mejor visualización de los resultados:

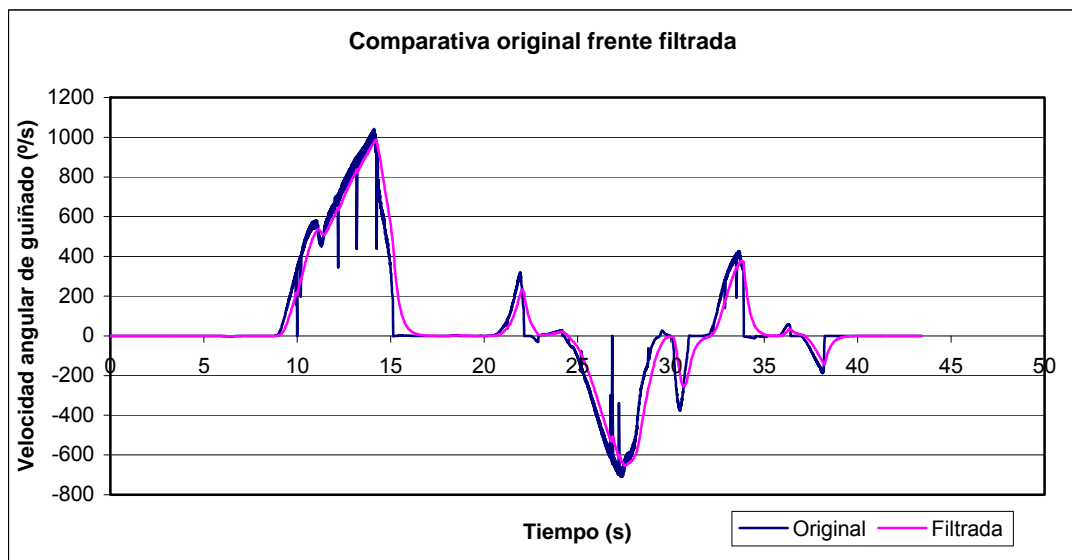


Figura 6.24 Comparativa velocidad angular de guiñado filtrada frente a la original



## **6.6 Interfaz PC – Plataforma Stewart**

En este capítulo se describirán los elementos que componen la interfaz de comunicación entre el PC donde corre la simulación y la plataforma Stewart. Esta última ya ha sido desarrollada en el capítulo 3 y aparece toda su documentación en el manual de usuario, anexo A.

La plataforma consta de un ordenador de control que va alimentado por un circuito eléctrico independiente del ordenador que corre la simulación y que debe ser accionado también el momento de iniciar la sesión de simulación. Este ordenador va unido a la base de la plataforma Stewart.

Es muy complicado determinar la posición de la plataforma a partir de la longitud de los cilindros, y por ello el fabricante permite directamente que se le introduzcan los grados de libertad, modo DOF.

La información que requiere ese modo, en unidades del sistema internacional, es la que se muestra en la figura 6.25:

#	Data	Description	Unit	Type
0	MCW	Motion Command Word	-	32 bit unsigned long
1	roll	Roll Command	rad	32 bit float
2	pitch	Pitch Command	rad	32 bit float
3	position_z	Heave Command	m	32 bit float
4	position_x	Surge Command	m	32 bit float
5	yaw	Yaw Command	rad	32 bit float
6	position_y	Lateral Command	m	32 bit float
7	-	Spare	-	32 bit tbd

Figura 6.25 Unidades requeridas por la plataforma Stewart

En la imagen 6.26 se muestran la dirección y sentido de todos los grados de libertad de la plataforma:

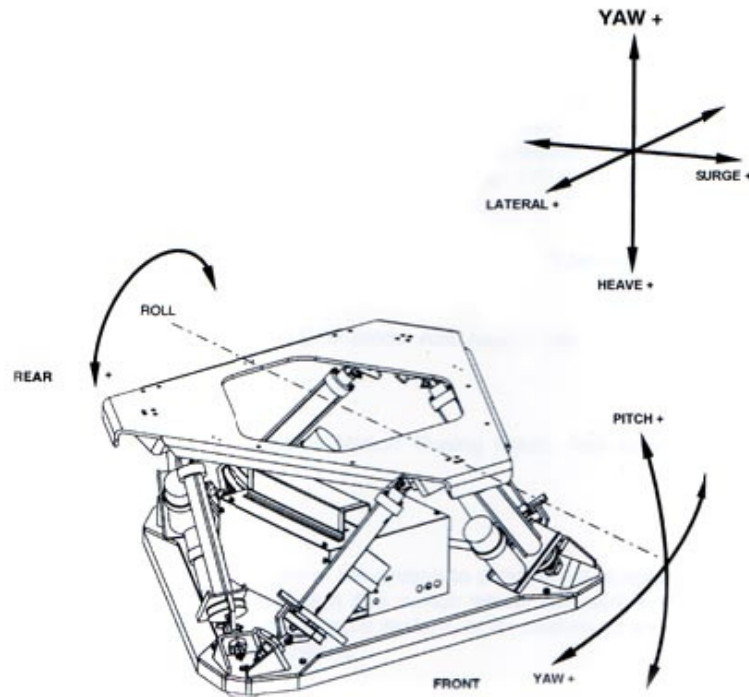


Figura 6.26 Sentidos de los movimientos en la plataforma Stewart

Siendo:

Surge = posición longitudinal

Lateral = posición lateral

Heave = posición vertical

Pitch = cabeceo

Roll = balanceo

Yaw = guiñado

La comunicación entre ambos ordenadores se hace por conexión Ethernet y se comunica mediante el protocolo UDP, User Datagram Protocol, que proporciona una sencilla interfaz entre la capa de red y la capa de aplicación,



pero no otorga garantías para la entrega de sus mensajes y no retiene estados de los mensajes que han sido enviados a la red.

Como se puede comprobar, la comunicación entre ambos computadores no es sencilla. Dicha comunicación se produce a través del módulo MDA, el cual ya ha sido explicado al comienzo del apartado 6.5.

Pues bien, este módulo solamente actúa como puente entre ambos ordenadores, no es capaz de adaptar los datos ya filtrados y acotados obtenidos en el apartado anterior, para que la plataforma mueva la cabina correctamente.

Este módulo ya ha sido desarrollado en el subapartado 6.4.3, donde aparecen las líneas de código que lo conforman y su correspondiente explicación.

Así que aquí comienza la adaptación de los datos resultantes del filtrado y el acotado del apartado anterior para que produzcan los efectos deseados en el movimiento de la plataforma Stewart.

#### **6.6.1 Adaptación de las aceleraciones**

Tras obtener los valores filtrados de todas las aceleraciones y conseguir acotarlos a un rango, que se corresponde fielmente al producido sobre una moto real con las mismas características, solo queda adaptarlos a los márgenes de trabajo de la plataforma y conseguir que no se produzcan aceleraciones muy elevadas en la cabina. Puesto que al tratarse de una moto de competición, produce aceleraciones superiores a las que una persona normal está acostumbrada, lo que podría ocasionar el mareo o lesiones sobre quien conduzca la moto dentro de la cabina.



Así que se ha decidido que los datos de las aceleraciones a enviar al módulo MDA serán los siguientes:

#### **6.6.1.1 Aceleración longitudinal**

A lo largo del recorrido se puede alcanzar  $\pm 9,8 \text{ m/s}^2$ , un valor demasiado elevado para las personas que no están acostumbradas a pilotar motocicletas de competición.

Se ha decidido que para la plataforma es adecuado dividir esta aceleración por un factor “4”. Esto se consigue con una simple línea de código:

`acel_longMDA# = (acel_longf# / 4)`

La variable que se debe pasar al módulo MDA es “acel\_longMDA#”.

#### **6.6.1.2 Aceleración lateral**

Como ya se ha explicado en el subapartado 6.5.1.2, la aceleración lateral no es necesaria en la cabina. Así que el módulo MDA recibe “0.0” en la posición de ésta aceleración. Esto significa que no se reproducen los efectos de ésta en la plataforma.

#### **6.6.1.3 Aceleración vertical**

En éste caso, también se pasa al MDA un valor de “0.0”.

Con ésta aceleración existe un problema, puesto que el cálculo de las aceleraciones se produce por colisiones entre cuerpos, se produce un rizado



que produce innumerables vibraciones, tantas como baches existen en el trazado del circuito. Y a pesar de los filtrados éste sigue apareciendo.

En la cabina, ésta aceleración produce un efecto de continuas elevaciones y descensos bruscos, lo cual no es necesario ni deseable para la simulación. Ya que en una moto real este efecto es absorbido por la amortiguación.

### **6.6.2 Adaptación del cabeceo**

Una vez depurados los valores que es capaz de darnos el simulador, estos deben ser adaptados a los límites físicos de la plataforma y de la persona que pilota dentro de la cabina.

La plataforma puede dar un cabeceo positivo o negativo de  $22^\circ$ . Más que suficiente para la simulación, ya que rara vez se superan en esta los  $8^\circ$  y nunca se alcanzan los  $15^\circ$  ya sean positivos o negativos para ambos casos.

Durante las pruebas realizadas con la plataforma activada se observó que esta reproducía el ángulo de cabeceo en sentido contrario al que debía, es decir, que cuando la moto aceleraba, esta cabeceaba hacia delante y que cuando se frenaba, cabeceaba hacia detrás.

Así que para solucionar el problema de los signos se ha decidido la implementación de unas líneas de código en el programa principal. Creando una nueva variable y asignándole el valor del cabeceo multiplicado por un coeficiente de corrección, en este caso “-1”.

Para obtener una situación estable en torno al  $0^\circ$ , se establece un margen de  $\pm 1^\circ$  de cabeceo, así se evita el movimiento continuo de la cabina para aceleraciones y frenadas de valores pequeños.



La plataforma debe recibir los valores en radianes, y puesto que el simulador los emite en grados sexagesimales, estos se deben multiplicar por el siguiente conversor: " $\pi / 180$ "

Esta nueva variable es la que se envía al módulo MDA para que la plataforma ejecute el cabeceo corregido.

En el siguiente recuadro aparecen las líneas de código que producen el efecto deseado:

```
if (cabeceof# < 1) and (cabeceof# > -1) then cabeceof# = 0.0  
  
cabeceoMDA# = (-1.0 * cabeceof# * pi# / 180)
```

La figura 6.27 muestra el cabeceo después del filtrado y el acotado:

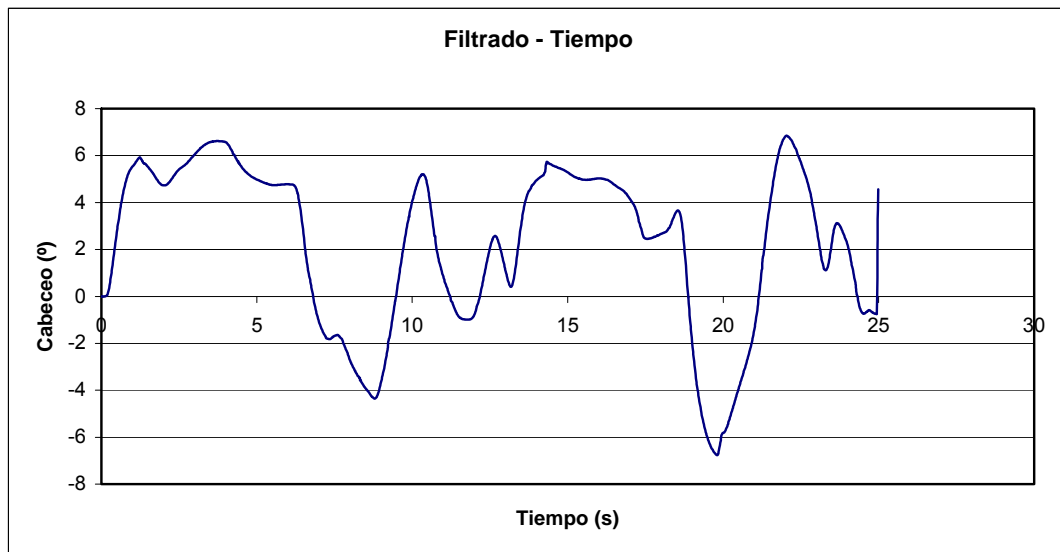


Figura 6.27 Cabeceo filtrado frente al tiempo



La gráfica 6.28 es el resultado del paso de los datos por la línea de código arriba descrita:

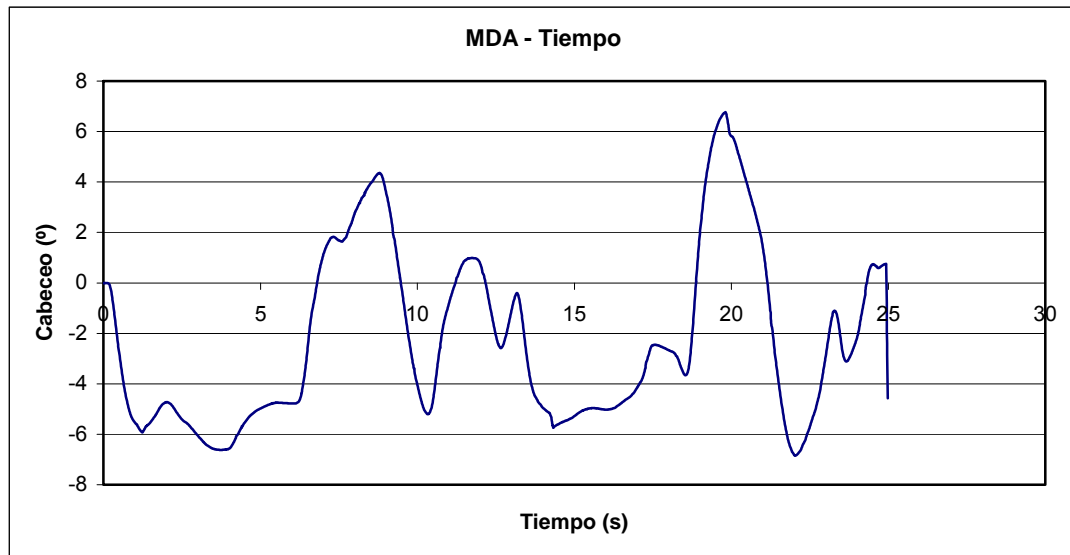


Figura 6.28 Cabeceo para módulo MDA frente al tiempo

Finalmente se muestra el gráfico 6.29, con la superposición de ambas curvas, en la cual se observa el efecto obtenido, con mayor claridad:

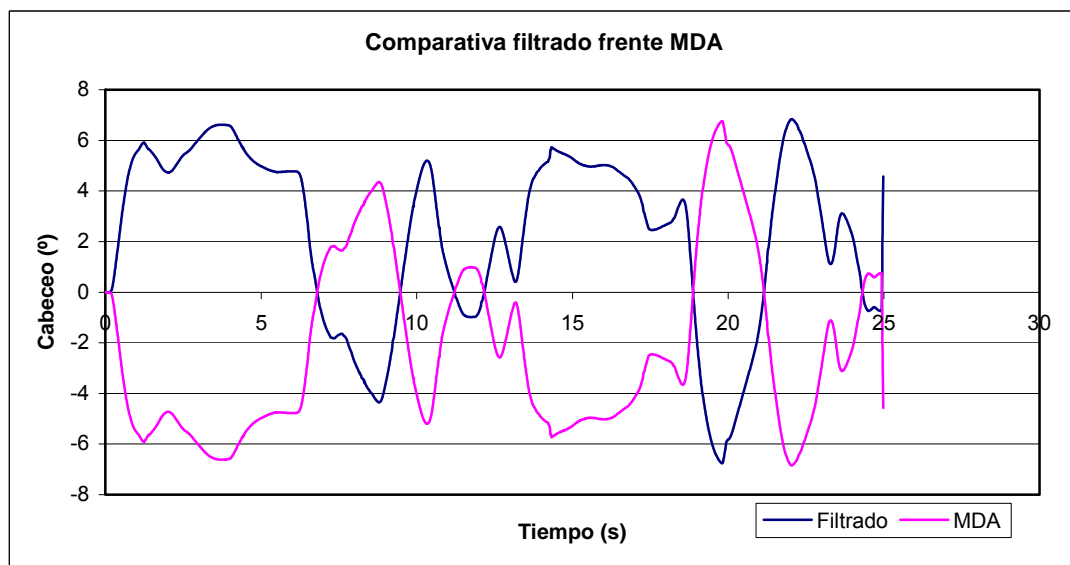


Figura 6.29 Comparativa cabeceo para módulo MDA frente al filtrado



También se añade otra gráfica, figura 6.30, comparativa de otra de las pruebas realizadas:

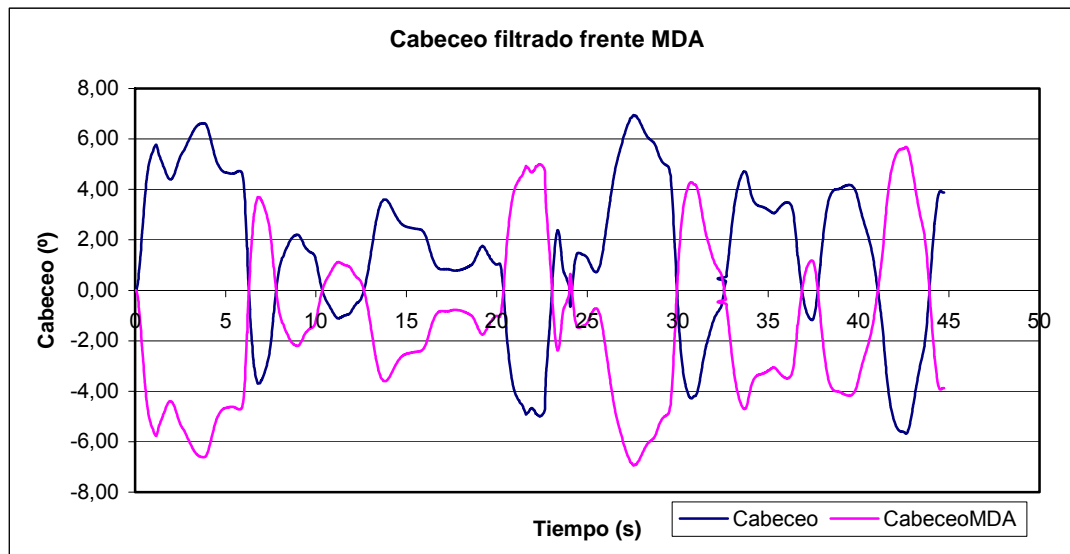


Figura 6.30 Otra comparativa cabeceo para módulo MDA frente al filtrado

### **6.6.3 Adaptación del balanceo**

La plataforma Stewart es capaz de ofrecer 22°, ya sean negativos o positivos, de balanceo. Dicho valor es suficiente para la simulación, pero insuficiente para realizar los movimientos que egresa el programa, que en ocasiones supera los 50°, puesto que se trata de una motocicleta de competición de alta cilindrada.

Por lo tanto se debe aplicar un coeficiente de reducción a los valores que deben transmitirse al módulo MDA. En este caso se divide por “2”.

Debido a que la plataforma debe contrarrestar la inclinación que produce el piloto sobre la moto dentro de la cabina, para mantener la continua verticalidad



del piloto respecto al suelo, el porqué ya ha sido explicado en el subapartado 6.5.3, el signo con el cual deben llegar los datos al módulo MDA debe ser el contrario al emitido por el simulador, así pues también se multiplicarán los valores por el factor “-1”, para cambiar el signo de estos.

Además, estos valores, para ser enviados al módulo, tienen que estar en las unidades de recepción de la plataforma, en este caso, radianes. Como los datos desprendidos por el simulador están en grados sexagesimales, también se multiplicarán por el siguiente conversor: “ $\pi / 180$ ”.

Para obtener una mejor estabilidad y que no se encuentre oscilando continuamente cuando el piloto está en posición perpendicular a la cabina, es decir, cuando se conduce en un tramo recto, se establece un margen en torno al “0°” para evitar el movimiento continuo de la cabina para movimientos muy pequeños de piloto, en este caso  $\pm 2^\circ$ .

Todo esto se consigue con las dos líneas de código que se muestran a continuación:

```
if (balanceof# < 2) and (balanceof# > -2) then balanceof# = 0.0  
  
balanceoMDA# = (-1.0 * balanceof# * pi# / (2 * 180))
```

Así pues, la variable que se pasa al módulo MDA es “balanceoMDA#”, en la que aparecen todas las correcciones anteriormente nombradas.

Para poder comprobar visualmente los cambios, se muestra a continuación una serie de gráficas, que representan los diferentes estados por los que pasan los datos desde que son filtrados hasta su estado final, en la variable “balanceoMDA#”.

La imagen 6.31, representa el valor tras el filtrado de datos explicado en el apartado anterior:

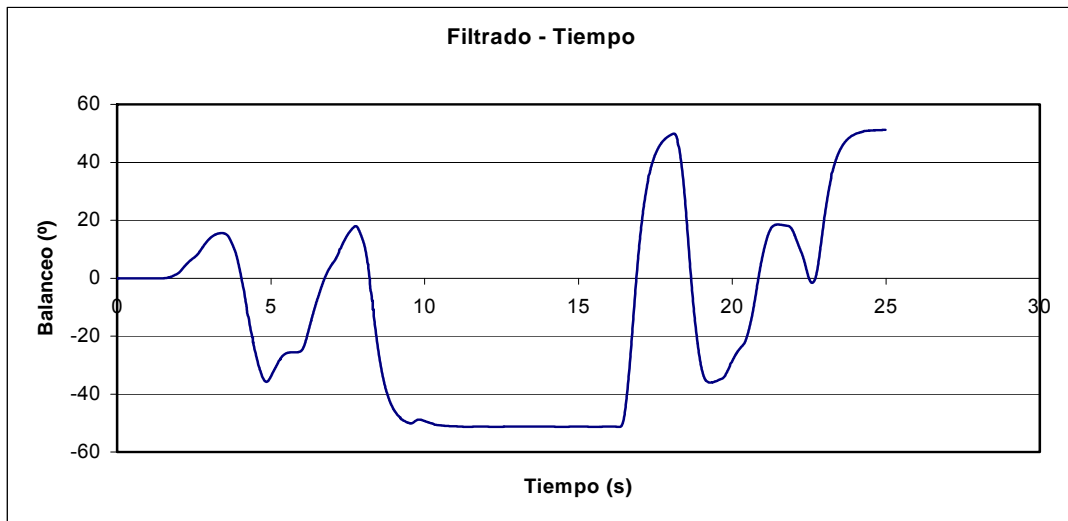


Figura 6.31 Balanceo filtrado frente al tiempo

En la figura 6.32 se puede observar como queda tras el paso por las líneas de código, cabe señalar que el valor aparece en grados sexagesimales y no en radianes para su posterior comparativa con la gráfica 6.31:

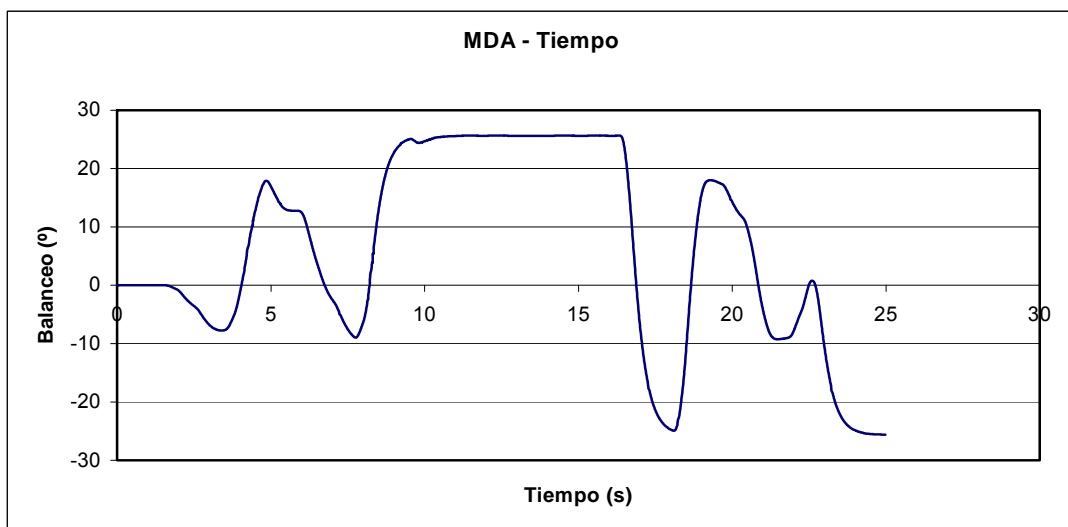


Figura 6.32 Balanceo para el módulo MDA frente al tiempo



El gráfico 6.33, que se ve a continuación, representa una comparativa entre las dos anteriores:

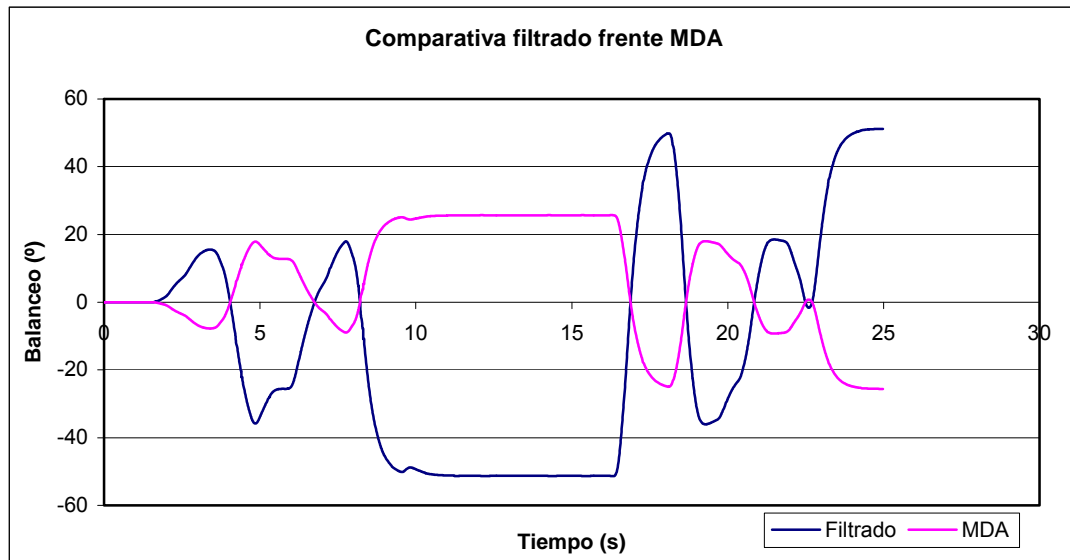


Figura 6.33 Balanceo para el módulo MDA frente al filtrado

Se puede observar otro ejemplo en la figura 6.34:

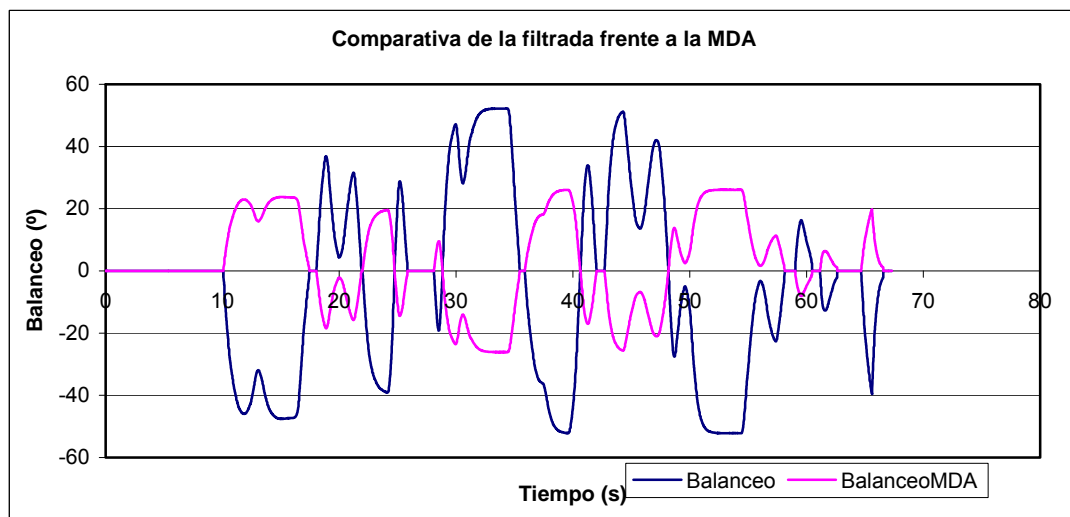


Figura 6.34 Otro balanceo para el módulo MDA frente al filtrado



#### **6.6.4 Adaptación de la velocidad angular de guiñado**

Después de observar los resultados sobre los gráficos y el efecto producido por dicha velocidad sobre la plataforma, se ha llegado a la conclusión de que sobre la cabina se produce el movimiento esperado, por lo tanto no será necesaria ninguna acción sobre los datos emitidos por el simulador.

Como se puede observar en la imagen 6.35, los valores emitidos por el simulador son muy elevados, pero puesto que se crea el efecto deseado sobre la cabina, los valores no se varían:

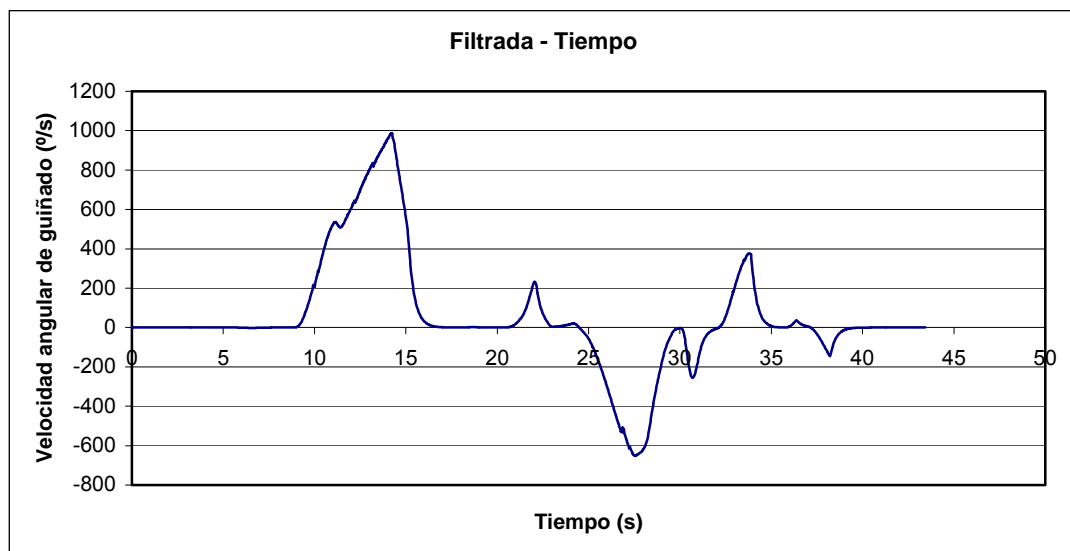


Figura 6.35 Velocidad angular de guiñado filtrada frente al tiempo



## **7.- INSTALACIÓN MECÁNICA DE LOS SENSORES**

### **7.1 Introducción**

La instrumentalización de la moto se realiza mediante el acople de sensores en las partes idóneas para la medición de los parámetros que rigen el comportamiento de la moto, así como los movimientos que realiza.

Concretamente se han colocado:

- Dos potenciómetros rotatorios EVUE3J.
- Dos potenciómetros deslizantes EWA-P10C15D14.
- Dos sensores de presión 87N-3000A-8C.
- Dos finales de carrera V15T16-CZ300A03-K.

Los sensores se han dispuesto en el embrague, en el freno trasero y delantero, en el manillar, en el eje sobre el que gira la moto y en la pata de cambio de marchas. Por ser éstos, los elementos reales encargados de la conducción y comportamiento de la moto.



## **7.2 Sensores empleados**

### **7.2.1 Potenciómetros**

Un potenciómetro se define como una **Potenciómetro** resistencia con un contacto móvil deslizante (cursor), accionado normalmente por desplazamiento lineal o relativo, que desde el punto de vista dinámico (suponiendo despreciable la resistencia del cursor) constituye un sistema de orden 0.

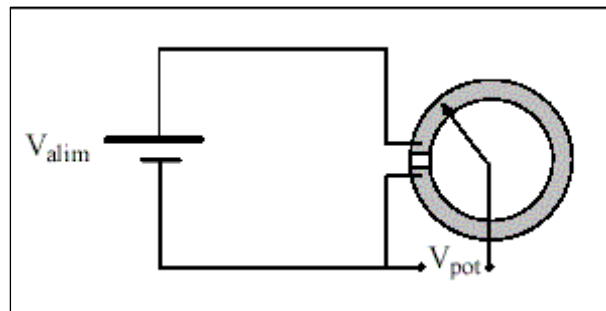


Figura 7.1 Potenciómetro esquematizado

#### ***7.2.1.1 Potenciómetros rotatorios***

Se controlan girando su eje. Son los más habituales pues son de larga duración y ocupan poco espacio.

Se han empleado en la lectura de los grados girados de la inclinación de la moto y de la rotación del manillar.



#### **7.2.1.2 Potenciómetros deslizantes**

La pista resistiva es recta, de modo que el recorrido del cursor también lo es. Han estado de moda hace unos años y se usa, sobre todo, en ecualizadores gráficos, pues la posición de sus cursores representa la respuesta del ecualizador. Son más frágiles que los rotatorios y ocupan más espacio. Además suelen ser más sensibles al polvo.

Han sido utilizados para conocer el desplazamiento de las sirgas del acelerador y del embrague.

#### **7.2.2 Interruptores finales de carrera**

A diferencia de los detectores electrónicos y magnéticos, en general, este grupo de interruptores electro-mecánicos, se basa en los dispositivos con contactos físicos, que realizan la conexión o desconexión, a partir de accionamientos mecánicos, sin electrónica ni accionamientos magnéticos.

Los Interruptores Final de Carrera, se componen normalmente de una caja, un elemento de contacto (cámara de contacto) y un dispositivo mecánico de accionamiento.

Un punto importante a tener en cuenta, y frecuentemente ignorado, consiste en no utilizar jamás un Final de carrera como tope mecánico.

Se han utilizado para por realizar el cambio de marchas, con el mismo movimiento que en la conducción real.



### **7.2.3 Sensores de presión**

#### ***Electromecánicos***

- Elemento mecánico + transductor eléctrico
- El elemento mecánico, consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos.

#### ***Resistivos:***

- Consisten en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. Este está conectado a un puente de Wheastone.
- Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación.
- Son sensibles a la vibración.
- La señal de salida no es continua (salta de una espira a otra).
- El intervalo de medida de estos sensores/transmisores corresponden al elemento de presión que utilizan (tubo Bourdon, fuelle...) y varía en general de 0 a 300 Kg/cm<sup>2</sup>. La precisión es del orden de 1-2%.

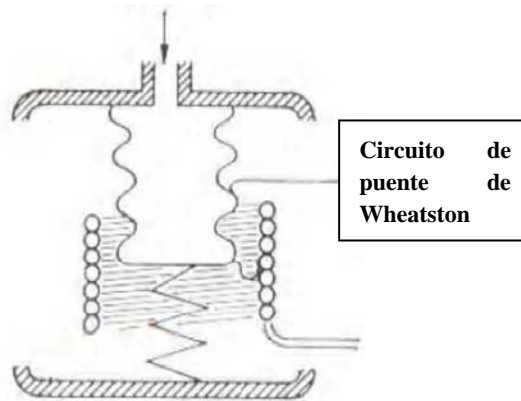


Figura 7.2 Sensor de presión simplificado

Se han aplicado empalmados al tubo del circuito del líquido de freno, para saber la presión de éste.



## **7.3 Aplicación de los sensores**

### **7.3.1 Simulación cambio de marchas**

Como puede observarse en la imagen 7.3, se han colocado dos pulsadores atornillados a un perfil cuadrangular hueco, estando éste fijado del mismo modo al bastidor de la moto.

Al accionar la pata de cambio de marcha, ésta hace contacto con el pulsador, superior para la primera marcha o inferior para las restantes, que envían la señal correspondiente.

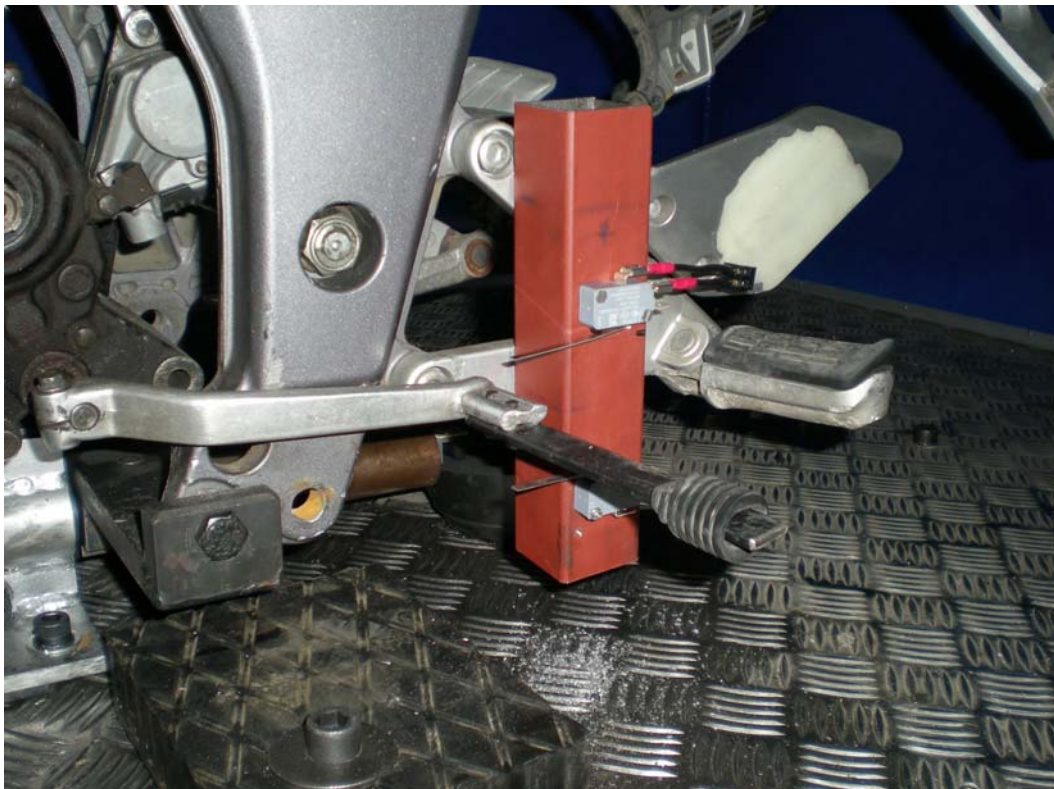


Figura 7.3 Contactores en palanca de cambios



### **7.3.2 Simulación balanceo / inclinación lateral**

Se ha mecanizado un acople, para que sirva de unión entre el eje y el potenciómetro rotatorio.

Dicho acople transmite el movimiento de giro del eje al potenciómetro, que esta fijado a éste, mediante un prisionero. A su vez la base del potenciómetro se encuentra encajada en un taco de goma que se halla unido al suelo. Puede visualizarse en la figura 7.4.

Con ello se consigue averiguar los grados girados por el eje.

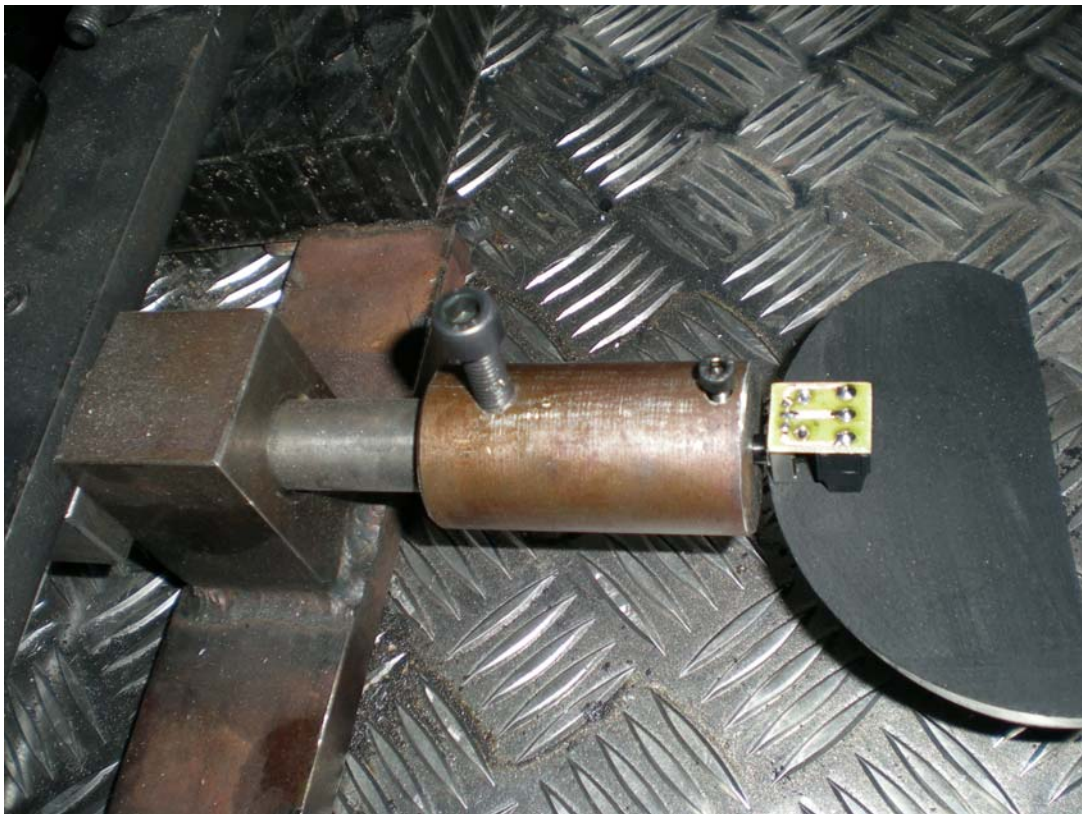


Figura 7.4 Potenciómetro rotatorio acoplado al eje



### **7.3.3 Simulación del giro del manillar**

Se ha fijado un potenciómetro rotatorio a un perfil cuadrangular hueco mediante dos prisioneros.

El perfil sirve de alojamiento al potenciómetro, mediante una balda soldada al perfil. Estando éste unido la moto mediante dos pletinas atornilladas al deposito de gasolina. Como se muestra en la imagen 7.5.

La unión entre potenciómetro y eje se produce a través de un taco de goma (encajado en el potenciómetro y pegado al eje).

De éste modo el potenciómetro gira solidario al eje, midiendo así los grados que rota en cada maniobra.



Figura 7.5 Potenciómetro rotatorio acoplado al manillar



#### **7.3.4 Simulación de frenado**

El objeto de medida en este caso es la presión ejercida por el líquido de freno.

La presión se mide mediante un sensor que se empalma a través de un racor al circuito del líquido de freno.

El empalme se realiza tanto en el freno trasero (figura 7.6), como en el delantero (figura 7.7).



Figura 7.6 Sensor de presión en el freno trasero



Figura 7.7 Sensor de presión en el freno delantero



#### **7.3.4 Simulación aceleración**

Para ello se ha extraído la sirga procedente de la empuñadura del manillar, fijando su recorrido al bastidor de la moto.

El extremo final de la sirga, se fija al potenciómetro deslizando de movimiento longitudinal.

Para mantener la tensión de la sirga y que ésta recupere su posición previa al accionamiento del acelerador, se ha colocado un muelle. Mostrado en la figura 7.8.

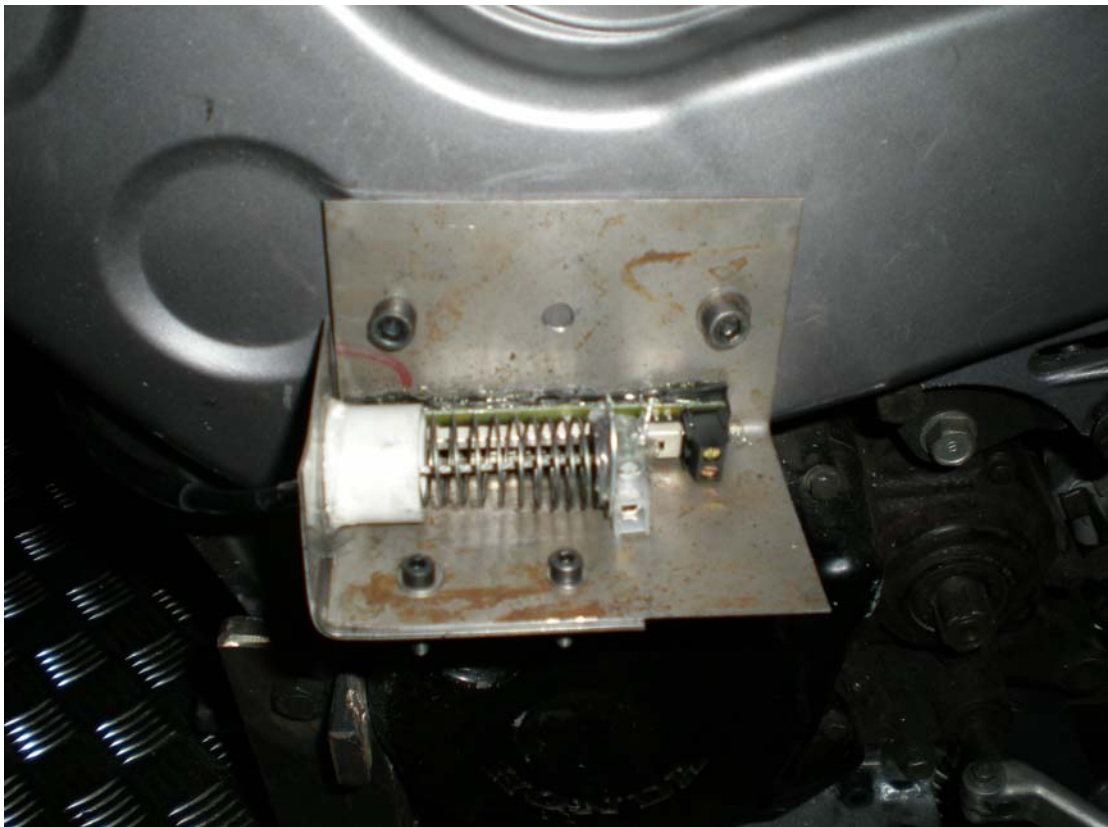


Figura 7.8 Potenciómetro deslizando para el acelerador



### **7.3.5 Simulación embragado**

En este caso, por ser similar al anterior, al mandar la orden desde la maneta mediante una sirga, se ha procedido a instalar el mismo mecanismo de toma de datos que en el acelerador. Se puede visualizar en la figura 7.9.



Figura 7.9 Potenciómetro deslizante para el embrague



## **8.- LINEAS FUTURAS**

Para obtener un mayor realismo en la conducción hay tres puntos a desarrollar:

- Manejo del simulador en primera persona
- Control de posición de la moto en la cabina mediante elementos activos
- Sustitución del modelo semi-cinemático por un modelo completamente dinámico.

### **8.1 Manejo del simulador en primera persona**

Para dirigir el simulador en primera persona es necesario desarrollar una interfaz de comunicación entre estos sensores y el PC que corre el simulador.

Esto se consigue cableando los sensores, para enviar los datos a una tarjeta capturadora.

A su vez, la tarjeta lee y transforma las señales que le llegan para poder enviarlas al ordenador, y que éste procese la información y envíe una respuesta a la plataforma.

De esta forma, la plataforma actúa en consecuencia a los movimientos que el piloto realiza.

Por ejemplo, cuando el conductor acelere la plataforma lo inclinara levemente hacia arriba.



## **8.2 Control de estabilidad de la moto en la cabina mediante elementos activos**

Actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos se proponen como vías alternativas de cara a mejorar la simulación.

El control de la estabilidad de la moto mediante sistemas activos resuelve dos cuestiones de gran relevancia:

### **8.2.1 Precisión en la posición del vehículo**

La aplicación de actuadores neumáticos permitiría establecer rangos de movimiento concretos, así como velocidades de inclinación determinadas.

### **8.2.2 Inclinación progresiva**

Con el actual freno de fricción al inclinarse la moto, se genera un par constante de oposición al movimiento. Sin embargo el par producido al ladear la moto es variable, aumentando conforme se inclina la moto.

Al inicio del movimiento este par es pequeño, al estar el centro de gravedad cercano a la posición de equilibrio, pero al aumentar esta distancia el par aumenta de manera directamente proporcional a ella.



Figura 8.1 Inclinación sobre motocicleta

Los sistemas activos presentan grandes ventajas que van dirigidas a una sensación de conducción más real que los pasivos, pero tienen la gran desventaja de su elevado costo.

### **8.3 Modelo dinámico**

La sustitución del cálculo de aceleraciones, velocidades, balanceos, cabeceos y velocidades angulares de guiñado, que actualmente son obtenidos mediante un proceso cinemático.

Se pretende generarlos a partir de las fuerzas producidas en la motocicleta, utilizando para ello el par motor.



Esto presenta una serie de problemas, entre los que destaca; la incapacidad del ordenador de hacer cero valores ínfimos tales como, el ángulo de deriva de las ruedas. Además, estos pequeños valores al ser utilizados para el cálculo de aceleraciones y ser divididos por “dt#”, dan lugar a resultados muy elevados e imposibles de reproducir por parte de la plataforma, que genera grandes brusquedades y termina llevándola al colapso.



## **9.- CONCLUSIONES**

El acondicionamiento de la plataforma Stewart para la simulación de una motocicleta ha sido abordado desde tres ramas:

- Diseño, análisis y montaje de un freno de fricción que proporciona estabilidad a la motocicleta.
- Mejora de subrutinas para conseguir un funcionamiento correcto del simulador durante su pilotaje, así como el escalado, acotado y adecuado de los datos proporcionados por el ordenador a la plataforma.
- Diseño y montaje de acoplamientos para colocar los sensores sobre el bastidor de la motocicleta.

### **9.1 Freno de fricción**

Se trata de un sistema pasivo que cumple con la función para la que fue diseñado: reducir le movimiento brusco de balanceo de la motocicleta, ofreciendo una resistencia que el piloto debe vencer si desea inclinar el vehículo.

El cálculo a resistencia estático a resultado válido por lo que la pieza aguanta las fuerzas a las que esta sometida.

Otro factor a reseñar es el bajo coste de fabricación.

Por todo esto la valoración de su implementación ha sido muy positiva.



## **9.2 Entorno de realidad virtual**

En cuanto al entorno de realidad virtual, se ha logrado satisfactoriamente los objetivos previstos al comienzo de este proyecto.

Como se ha podido observar en el apartado 6.4, a sido necesaria una mejora de varias subrutinas para conseguir un funcionamiento correcto del simulador. Gracias a una serie de líneas de código introducidas, se ha perfeccionado notablemente el manejo y la forma de cálculo de las aceleraciones, cabeceo, balanceo, y velocidad angular de guiñado.

Tras un largo trabajo de generación de gráficas a través de pruebas en el simulador en tercera persona, mediante el joystick;

- Se ha conseguido que los valores emitidos por el simulador sean suavizados, carezcan de brusquedades y se aproximen a los producidos en una motocicleta deportiva, como ha podido observarse en el apartado 6.5.
- Se ha logrado una correcta respuesta de la plataforma a los datos emitidos por el simulador. Esta se mueve dentro de unos límites establecidos, para garantizar la seguridad del piloto en el interior de la cabina, y con suavidad, logrando así un gran símil con la conducción sobre una moto real. Esta parte aparece desarrollada en apartado 6.6.



### **9.3 Diseño e instalación mecánica de sensores**

El montaje de los sensores ha sido acertado, puesto que se han adaptado mediante sencillos mecanismos, que les permiten solidarizarse con los recorridos de los diferentes mandos accionados durante la conducción.

La carrera angular en los potenciómetros rotatorios no se ven superadas en el eje, ni en el manillar.

Al igual que en el caso anterior, el rango de medida de los potenciómetros deslizantes no se rebasa en el accionamiento del embrague y el acelerador.

El desplazamiento de la palanca de cambios queda acotada de forma idónea, tanto superior como inferiormente, por el contacto de dos pulsadores.

A pesar de las dificultades surgidas para la adquisición, se ha conseguido una válvula con forma de “T”, que permite el acople del sensor de presión al circuito de líquido de freno.



## **10.-BIBLIOGRAFÍA**

Mira editores, Jesús Martín SanJosé, María Antonieta Madres Sediles, José Manuel Franco Gimeno: *Ingeniería de materiales para industria y construcción*.

Paraninfo, José M. Auria Apilluelo, Pedro Ibañez Cervantes, Pedro Ubieta Artur: *Dibujo Industrial Conjuntos y despieces*.

Antonio Serrano Nicolás: Cálculo y construcción de máquinas.

Apuntes de la asignatura: Diseño de máquinas.

Manuales de instalación y mantenimiento de la plataforma Stewart Series 6DOF2000E.

Páginas Web:

[www.solidworks.es](http://www.solidworks.es)

[www.darkbasic.es](http://www.darkbasic.es)

[www.digikey.com](http://www.digikey.com)