



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Autor:

Fº de Borja Jiménez Valverde

Directores:

Juan Luis Zamora Macho

José Porras Galán

18 de julio de 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Francisco de Borja Jiménez Valverde

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Diseño de un sistema de suspensión activa para un vehículo a escala”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

ACCEPTA

Fdo.:

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Diseño de un sistema de suspensión activa para un vehículo a escala”
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2015-2016 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Fº de Borja Jiménez Valverde Fecha: 18/07/2016

Autorizada la entrega del proyecto
DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Luis Zamora Macho Fecha: 18/07/2016



Fdo.: José Porras Galán Fecha: 18/07/2016



Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Álvaro Sánchez Miralles Fecha: 18/07/2016



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Autor:

Fº de Borja Jiménez Valverde

Directores:

Juan Luis Zamora Macho

José Porras Galán

18 de julio de 2016

Agradecimientos

A Juan Luis por su paciencia y dedicación.

A mi familia por su apoyo durante todos estos años.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

Autor: Jiménez Valverde, Fº de Borja.

Directores: Zamora Macho, Juan Luis. / Porras Galán, José.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto ha diseñado y acoplado un sistema mecánico de suspensión semi-activa y activa [1] a un prototipo RC a escala 1:10 de un automóvil. Este sistema ha conseguido una mejora en la estabilización del chasis del automóvil en tiempo real, paliando así parte de los efectos negativos que tienen sobre el mismo los defectos del terreno y por tanto demostrando que un control digital puede mejorar las prestaciones del modelo de suspensión de un vehículo.

Con esta línea de trabajo se espera dar a la Universidad Pontificia de Comillas experiencia en este ámbito. De este modo, se conseguirá tanto la formación de estudiantes en este sector como la instauración de nuevas líneas de investigación que permitan desarrollar esta tecnología de cara al futuro, facilitando su extensión al uso cotidiano.

Además, todo el sistema se implementará en el entorno Matlab/Simulink, con el propósito de utilizar unas herramientas potentes pero adaptadas a los estudiantes.

Los objetivos del proyecto, que han sido cumplidos satisfactoriamente, son:

- Diseñar e instaurar un sistema mecánico que permita la aplicación de una suspensión activa.
- Desarrollar el software adecuado para el control de este sistema.
- Optimizar el software para mejorar la estabilidad del vehículo en tiempo real.

El coche RC utilizado como base en este proyecto es el modelo Turnigy TD10, mostrado en la Figura 1.



Figura 1. Modelo RC Turnigy TD10.

Este vehículo usa un motor Brushless de 3900 KV, y por tanto necesita un ESC para ser controlado (en concreto el recomendado por el fabricante), el Turnigy Trackstar 80A Turbo Sensored. Además, es movido por una batería LiPo de 2 celdas (7.4 V de tensión nominal). El microprocesador que se ha utilizado para implantar los controles y las comunicaciones ha sido el Arduino Mega 2560 y su módulo APM Ardupilot, el cual está adecuado para modelaje RC.

También, para calibrar la IMU [2] interna del APM y realizar algunos ensayos ha sido necesario implantar cerca de cada rueda un sensor infrarrojo para leer la altura al suelo en ese punto, los cuales transmiten la información al Arduino analógicamente.

2. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos de este proyecto se ha empezado diseñando el modelo mecánico de suspensión activa, y una vez impreso en 3D e implantado en el vehículo original se ha procedido a la instalación y calibración de los sensores infrarrojos. A

continuación se han realizado diversos ensayos para calcular modelos matemáticos de las plantas de balanceo, cabeceo y aceleración vertical del vehículo, y tras una correcta identificación de estas se ha procedido al diseño de los tres controles respectivos y la comprobación de su utilidad.

1. Sistema mecánico de suspensión activa

El sistema diseñado se basa en mover el punto de apoyo superior de los amortiguadores en dirección casi vertical, consiguiendo así tanto variar la posición de la rueda con respecto al chasis como hacer un modelo dinámico y adaptable al terreno.



Figura 2. Sistema de amortiguación activa delantero instalado.

Como se puede observar en la Figura 2 el sistema consta de 3 piezas básicas diseñadas en 3D con la herramienta Solid Edge:

- Balda de sujeción de los servomotores.
- Semi cilindro oblicuo unido al eje del servomotor.
- Brazo unido a la balda y al amortiguador.

Este modelado consigue que al girar el servomotor el semi cilindro oblicuo gire en su eje y el punto de apoyo del brazo baje o suba con un radio suficientemente grande para considerar el movimiento prácticamente vertical. Con él también varía el punto de apoyo superior del amortiguador y así se consigue mover ese punto del chasis. Por tanto,

la combinación del giro de los cuatro servomotores da una completa libertad de inclinación del chasis.

2. Sensores infrarrojos

Comparando las especificaciones técnicas, la dificultad de puesta en marcha y sobre todo el rango de medición necesario se optó por escoger sensores infrarrojos en lugar de ultrasonidos, ya que el sensor GP2Y0A51SK0F permite una medición de distancia precisa entre 2 y 15 cm, más amplio que el sensor de ultrasonidos HC-SR04 (entre 2 y 4 cm).

El propósito de estos sensores es medir la distancia al suelo en los extremos diagonales del vehículo, próximos a las ruedas. Por ello fueron colocados lo más cerca posible de estas, necesitando de una pieza 3D adicional que los sujetara en la parte frontal del vehículo y a la vez hiciera de parachoques.

Tras instalarlos hubo que calibrarlos para que el valor analógico que devolviesen fueran los milímetros exactos al suelo. Esto se consiguió multiplicando la medida por 5 V (su voltaje máximo de salida), dividiendo entre 1023 y pasando el resultado por una Look-Up Table en Simulink con los valores correspondientes al Datasheet del sensor. Tras ello en cada ensayo se realizaron los cálculos trigonométricos necesarios para obtener las variables de control comentadas en el siguiente apartado.

3. Cálculo de las plantas

Para controlar la estabilidad del chasis del automóvil es necesario controlar como mínimo tres variables:

- Ángulo de balanceo del vehículo.
- Ángulo de cabeceo del vehículo.
- Aceleración vertical del vehículo.

Por tanto, hubo que realizar tres ensayos para calcular los modelos matemáticos de las tres plantas respectivamente y así poder diseñar controles adecuados. Estos ensayos se realizaron usando como entrada una señal PRBS [3] para conseguir una planta que respondiera correctamente a todas las

frecuencias. Además fueron adecuados a cada variable, es decir, se combinó esta señal de entrada en los servomotores actuadores de manera que el coche hiciera respectivos movimientos de sólo balanceo, sólo cabeceo y sólo dirección vertical.

Una vez obtenidos los datos de los ensayos se usó la herramienta de Matlab Ident [4] para calcular una función de transferencia de cada variable, consiguiendo alrededor del 86% de éxito con las dos primeras. Sin embargo, la identificación de la tercera variable (la aceleración vertical) sólo fue de cerca del 40%, por lo que se siguió otro método para calcular su planta: ajuste por mínimos cuadrados de sus parámetros internos.

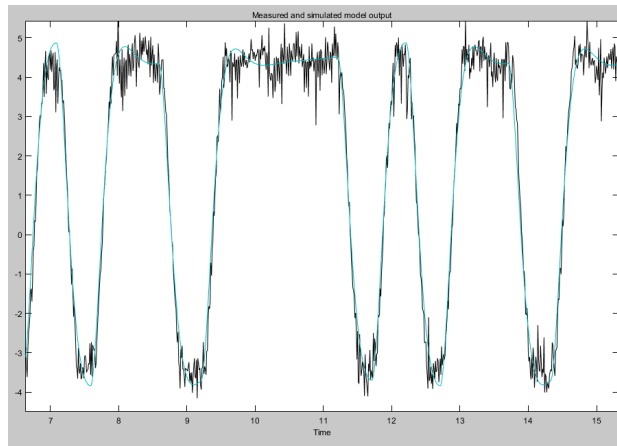


Figura 3. Identificación de la planta de balanceo al 85%.

Este método se basa en crear en Simulink el modelo de simulación de la planta e iterar la simulación variando los parámetros desconocidos hasta conseguir el mínimo error posible en la salida. Con él se consiguió un modelo muy parecido de la altura del chasis al suelo, por lo que calculando su segunda derivada se podría obtener el modelo de aceleración, el cual no había tenido tanto éxito.

Paralelamente se intentó por este método también identificar algunos parámetros del modelo teórico de representación de estados de un vehículo de suspensión activa como el descrito en [5], pero sin conseguir resultados favorables concluyentes.

4. Diseño de controles

Al igual que un plano en el espacio se define por tres puntos, el coche unido al suelo tiene también tres grados de libertad, pero sin embargo tiene cuatro ruedas. Este conflicto se ha resuelto en este proyecto definiendo una altura base de cada rueda (posición inicial de cada servomotor), de forma que durante la calibración y cuando los controles no actúen haya posibilidad de movimiento vertical de las mismas (suspensión semi-activa) si el terreno lo exige, pero no exista libertad en la altura del chasis. Con este grado de libertad adicional fijado sólo queda detallar los controles diseñados para las tres plantas calculadas:

Control de Balanceo:

Diseño mediante margen de fase de un PID completo que anula el error y hace la respuesta más rápida y menos oscilante. Especificaciones:

- Margen de fase (F_m) = 90°
- Velocidad angular (ω_o) = 4 rad/s
- Fase de la acción integral (ϕ_i) = -15°
- Ponderación de la referencia (b) = 1.15

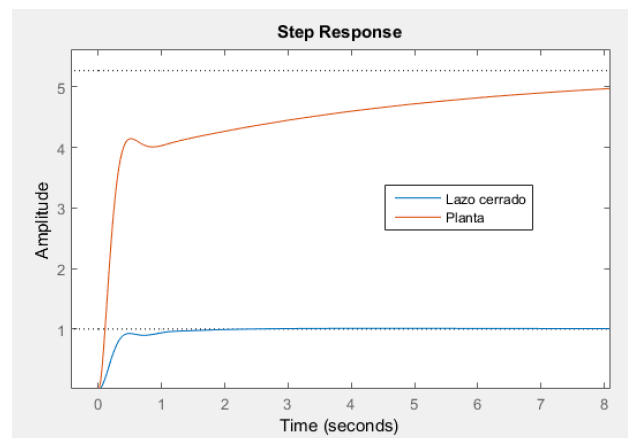


Figura 4. Respuesta a un escalón en referencia de la planta de balanceo con y sin control.

Control de Cabeceo:

Diseño mediante margen de fase de un PI que anula el error y a pesar de la acción integral consigue una respuesta de la misma velocidad aproximadamente. La acción diferencial se ha anulado debido a la gran cantidad de oscilaciones que conllevaba. Especificaciones:

- Margen de fase (F_m) = 70°
- Velocidad angular (ω_o) = 5 rad/s
- Ponderación de la referencia (b) = 1

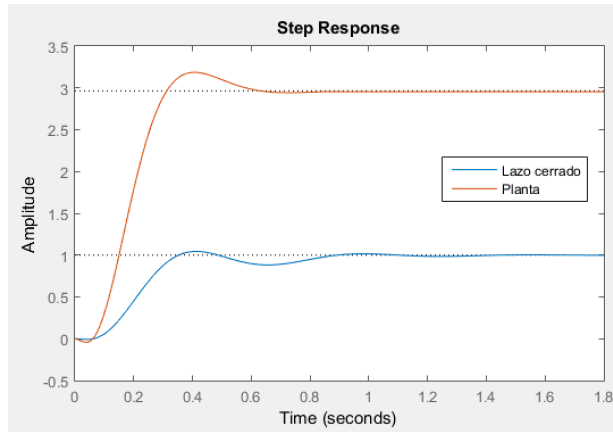


Figura 5. Respuesta a un escalón en referencia de la planta de cabeceo con y sin control.

Control de Aceleración vertical:

Diseño mediante margen de ganancia de un control proporcional que hace la respuesta más rápida y menos oscilante y la lleva a cero. Para el diseño de este control ha sido muy crítico el diagrama de Bode, ya que el objetivo del mismo en realidad era disminuir la ganancia a frecuencias cercanas a 10 rad/s (frecuencia de actuación de pequeños desperfectos del camino). Especificaciones:

- Margen de ganancia (G_m) = 15 dB
- Velocidad angular (ω_u) = 10 rad/s
- Ponderación de la referencia (b) = 1

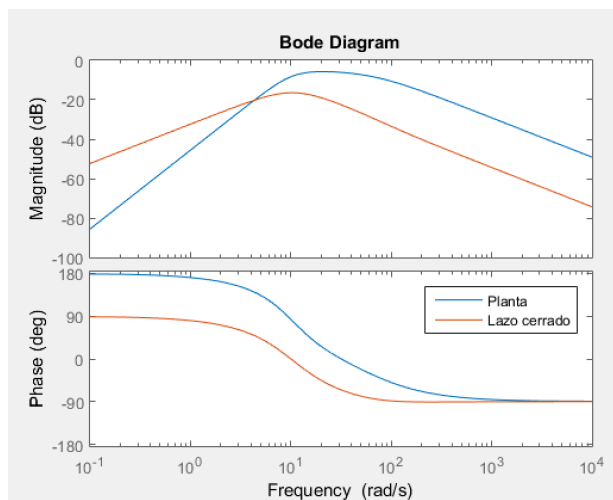


Figura 6. Diagrama de Bode de la planta con y sin control.

3. RESULTADOS

Tras la implantación de los controles se han realizado con el vehículo dos ensayos finales para comprobar la utilidad del sistema. Ambos a lo largo de dos pistas diferentes, cada una fabricada con badenes a distintas alturas: 0.5 y 0.8 centímetros respectivamente.

El primer ensayo consistió en un camino con badenes típicos de cabeceo y para realizarlo se colocaron las dos placas alineadas para que el trazo del camino en ambas fuese igual. Los resultados, como se puede observar en la Figura 7 son muy favorables, ya que si se calcula el error acumulado del ángulo de cabeceo del chasis a lo largo de la trayectoria, el uso de la suspensión activa frente a la pasiva lo disminuye en un 100 %, mientras que el uso de la semi-activa frente a la pasiva también lo reduce, pero sólo en un 45 %.

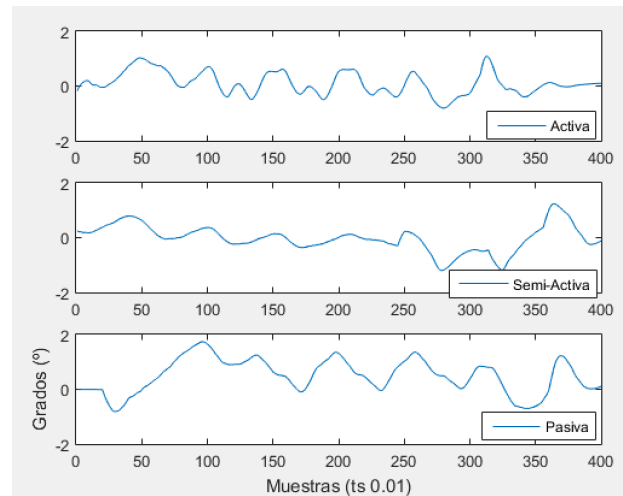


Figura 7. Ángulo de cabeceo del chasis en el ensayo de pistas de 0.5 cm alineadas.

Para realizar el segundo ensayo se desalinearon las placas, con el objetivo de simular un terreno más irregular y campestre, de forma que cada rueda actuara de forma más individual y estuviera más presente el balanceo en el vehículo. Como se puede ver en la Figura 8, los resultados de este ensayo también son muy positivos, y aunque que el error acumulado del ángulo de balanceo del chasis a lo largo de la trayectoria disminuye sólo un 6 % si se usa la amortiguación semi-activa respecto a la pasiva,

lo hace en un 260 % si en su lugar se usa la activa.

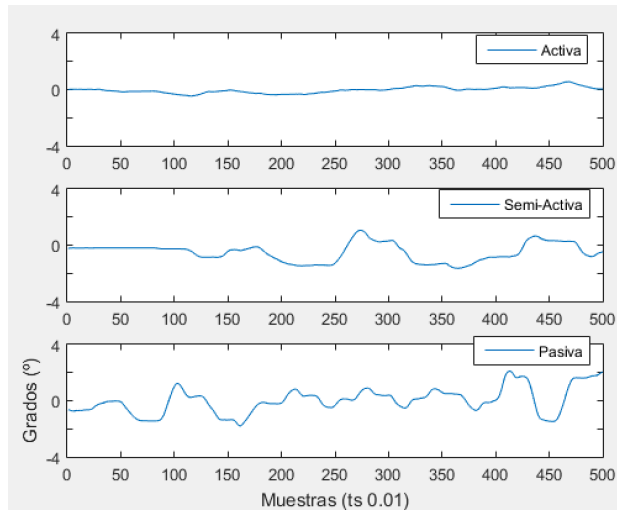


Figura 8. Ángulo de balanceo del chasis en el ensayo de pistas de 0.8 cm desalineadas.

En todo los ensayos se consiguen mejoras en los ángulos de cabeceo y balanceo tanto con la suspensión semi-activa como con la activa, pero sin embargo esta última suele aumentar la aceleración vertical que sufre el chasis durante la trayectoria, mientras que la semi-activa si consigue reducirla, pero no mucho (comparando ambas con la pasiva).

4. CONCLUSIONES

Como se ha dicho en los resultados, los objetivos del proyecto se han cumplido, demostrando que un control digital de suspensión mejora la estabilidad de un automóvil y el confort de los pasajeros del mismo, pero además también se ha demostrado que un sistema de suspensión semi-activa incluso sin control también puede hacerlo si se diseña bien.

Por otro lado, se ha concluido que los controles PID son suficientemente sofisticados para controlar los ángulos de cabeceo y balanceo del chasis, pero no la aceleración vertical del mismo en el proceso. Queda abierto a futuros proyectos realizar controles más complejos como el LQR, predictivos o de realimentación de estados para seguir mejorando el sistema.

5. REFERENCIAS

- [1]R. Sharp and S. Hassan, "The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems", *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering 1984-1988 (vols 198-202)*, vol. 200, no. 34, pp. 219-228, 1986.
- [2]J. Chen, S. Lee and D. DeBra, "Gyroscope free strapdown inertial measurement unit by six linear accelerometers", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 17, no. 2, pp. 286-290, 1994.
- [3]P. Jackson, "PRBS cross-correlation measurements by hybrid computational techniques", *The Computer Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 49-54, 1971.
- [4]H. Lee and D. Rivera, "CR-IDENT: A MATLAB TOOLBOX FOR MULTIVARIABLE CONTROL-RELEVANT SYSTEM IDENTIFICATION", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 1, pp. 708-713, 2006.
- [5]R. Darus and Y. Sam, "Modeling and control active suspension system for a full car model", *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 2009.

DESIGN OF AN ACTIVE SUSPENSION SYSTEM FOR A SCALE VEHICLE

Author: Jiménez Valverde, F° de Borja.

Directors: Zamora Macho, Juan Luis. / Porras Galán, José.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

1. INTRODUCTION

This project has designed and connected a semi-active and active mechanical suspension system [1] to a 1:10 scale RC prototype of a private car. This system has improved the stabilization of the car chassis in real time, to reduce the negative effects that chuckholes have on it, thus demonstrating that a digital control can improve the traditional model of suspension of a vehicle.

This line of work is expected to give the Pontifical University of Comillas experience in this area. This way, we will achieve both the training of students in this area and the introduction of new lines of research to further develop this technology.

The entire system will be implemented in the Matlab/Simulink environment, using powerful, students-adapted tools.

The project objectives, which have been successfully fulfilled, are:

- Design and install of a mechanical system that allows the implementation of an active suspension system.
- Development of the right software to control this system.
- Software's optimization to improve vehicle stability in real time.

The RC prototype used as a model is the Turnigy TD10, shown in Figure 1.



Figure 1. RC Turnigy TD10 model.

This vehicle uses a brushless motor of 3900 KV, and needs an ESC to be controlled. We used the one recommended by the manufacturer, the Trackstar Turnigy 80A Turbo Sensored. It also needs a 2 cells (7.4 V nominal voltage) LiPo battery. We used the Arduino Mega 2560 and APM ArduPilot module, suitable for our RC prototype, to implement the controls and communications.

To calibrate the APM IMU [2] and perform some of the tests, it has been necessary to install an infrared sensor near to each wheel to measure the height to the ground. These sensors analogically transmit the information to the Arduino.

2. METHODOLOGY

This project began with the design of the mechanical model of active suspension, and once it was printed in 3D and put in the original vehicle, we proceeded to the installation and calibration of the infrared sensors. We then performed some tests and the mathematical

model of roll, pitch and vertical acceleration plants have been calculated, and after a successful identification of them, the design of the three respective controls and verifications were achieved.

1. Mechanic system of active suspension

The designed system is based on moving the upper support point of the shock absorbers in almost vertical direction, making it possible to vary the position of the wheel relative to the chassis and to establish a dynamic model that can be adapted to the terrain.



Figure 2. Placed frontal active damping mechanic system.

As shown in Figure 2, the system is made of three basic parts designed in 3D with Solid Edge:

- Servomotors shelf holder.
- Semi oblique cylinder attached to the shaft of the servomotor.
- Arm attached to the shelf and the damper.

This modeling makes possible, by rotating the servomotor, that the semi-oblique cylinder rotates on its axis and the fulcrum of the arm go down or up, with a radius large enough to consider the movement vertical. It also allows the upper support point cushion to vary, thus get moving that part of the chassis. Therefore, the combination of rotation of the four servomotors gives full freedom of tilting to the chassis.

2. Infrared sensors

Comparing the technical specifications, the difficulty of implementation and especially the measurement range needed, we chose infrared sensors instead of ultrasound ones, as the GP2Y0A51SK0F sensor allows a precise measurement in distances between 2 and 15 cm, wider than the ultrasonic sensor HC-SR04 (which allows to measure between 2 and 4 cm).

The purpose of these sensors is to measure the distance to the ground in the diagonal ends of the vehicle, next to the wheels. Therefore they were placed as close as possible to these, requiring an additional 3D piece that hold them in the front of the vehicle and simultaneously worked as a bumper.

After the installation, we calibrated them so the analog value at their output were the millimeters to the ground. This was achieved by multiplying the measure by 5 V (peak output voltage), dividend between 1023 and crossing the result by a Look-Up Table in Simulink with the values corresponding to the sensor Datasheet. In each test, the trigonometric calculations necessary to get the control variables discussed in the following section were made.

3. Plants calculation

To control the stability of the chassis, it is necessary to control at least three variables:

- Roll angle.
- Pitch angle.
- Vertical acceleration.

Therefore, three trials were needed to calculate the mathematical models of the three plants respectively, in order to design appropriate controls. These tests were performed using a PRBS signal [3] as the input, to get a plant that properly respond to all frequencies. They were also adapted for each variable: the input signal was combined before the servomotors actuators so that the car did just swinging movements, pitching movements or vertical movements.

Once the test data was obtained, Ident Matlab

tool [4] was used to calculate a transfer function of each variable, getting about 86% of success with the first two. However, the identification of the third variable (vertical acceleration) was only about 40%, so another method was followed to calculate this plant: least-squares adjustment of its internal parameters.

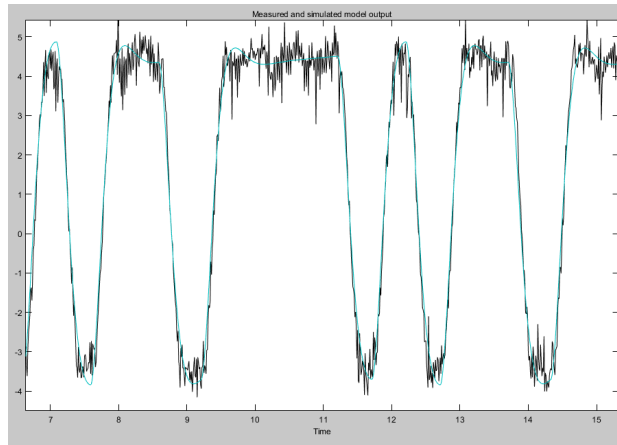


Figure 3. Rolling plant identification at 85%.

This method is based on creating a Simulink simulation model of the plant and iterating it, varying unknown parameters to achieve the minimum possible error in the output. A very similar chassis height to the floor model was achieved, so calculating the second derivative we could obtain the acceleration model, which have not been so successful.

At the same time, we attempted to identify some of the parameters included in the theoretical model of an active suspension vehicle as described in [5], but no conclusive results were drawn.

4. Control design

Like a plane in space is defined by three points, the car attached to the floor also has three degrees of freedom, but it has four wheels. This conflict is resolved in this project defining an initial condition for each wheel height (starting position of each servomotor), so that during calibration and when the controls do not act they can make vertical movements (semi-active suspension) if necessary.

Roll control:

Phase margin design of a full PID control that cancels the error and makes the response faster and less oscillating. Specifications:

- Phase margin (F_m) = 90°
- Angular velocity (w) = 4 rad/s
- Integral phase action (ϕ_i) = -15°
- Weighting reference (b) = 1.15

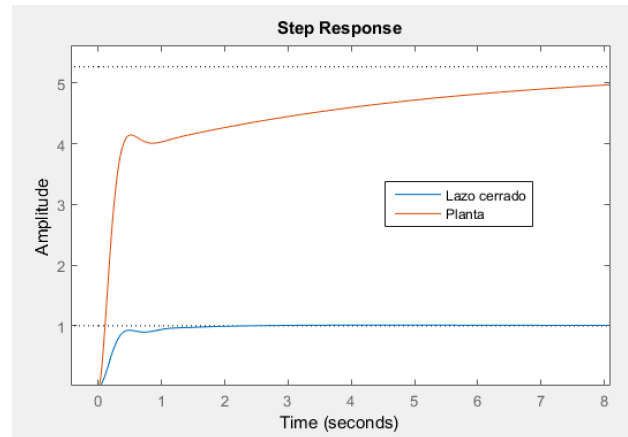


Figure 4. Response of the roll plant to a step in reference with and without the control.

Pitch Control:

Phase margin design of a PI control that cancels the error, and in spite of the integral action gets a response of approximately the same speed that the original one. The differential action has been canceled due to the large number of oscillations that caused. Specifications:

- Phase margin (F_m) = 70°
- Angular velocity (w) = 5 rad/s
- Weighting reference (b) = 1

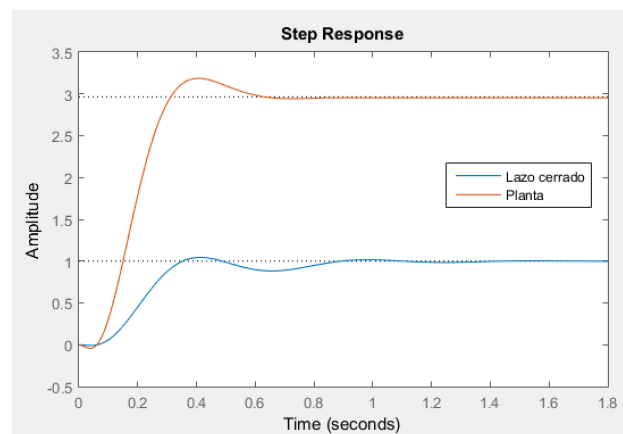


Figure 5. Response of the pitch plant to a step in reference with and without the control.

Vertical acceleration control:

Gain margin design of a proportional control getting a faster and less oscillatory response that leads to zero. For the design of this one, the Bode diagram was crucial since the goal was to decrease the gain at frequencies close to 10 rad/s (frequency performance of small bumps in the road). Specifications:

- Gain margin (Gm) = 15 dB
- Angular Velocity (ω_u) = 10 rad/s
- Weighting reference (b) = 1

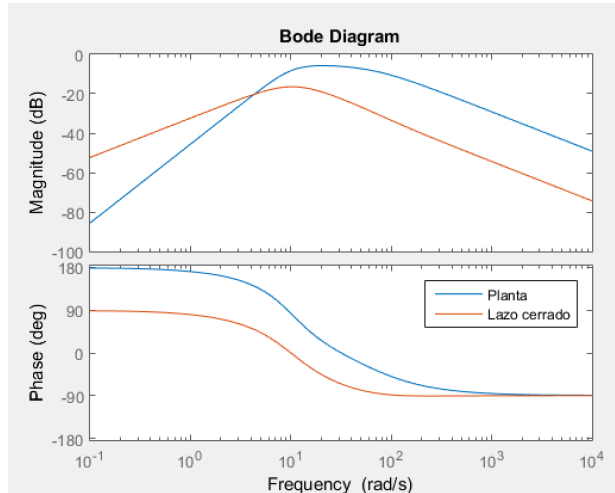


Figure 6. Bode diagram of the plant with and without the control.

3. RESULTS

After the implementation of controls was carried out in the vehicle, two final tests were made to check the usefulness of the system. For them, we used two different tracks, each one made with humps at different heights: 0.5 and 0.8 cm, respectively.

In the first test, we put a road with speed bumps (typical continuous pitch movement). To carry it out, the two plates were placed aligned so the stretch of the road in both was identical. The results, as shown in Figure 7, are very favorable. If the accumulated chassis pitch angle error along the path is calculated, the use of an active suspension against the passive one decreases this error in 100%, while the use of the semi-active against passive also reduces it, but only in 45%.

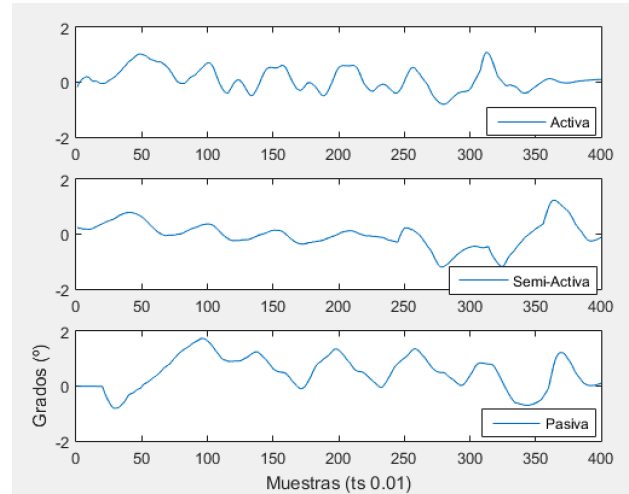


Figure 7. Chassis pitching angle in the 0.5 cm aligned plates test.

To perform the second test, the plates were placed misaligned to simulate a more irregular field in which each wheel should act individually. In this one, rolling movements were more abundant. As seen in Figure 8, the results of this test are also very positive, and although the chassis accumulated error of roll angle along the track decreases by only 6% when used the semi-active damping against the passive one, it decreases 260% if the active one is used.

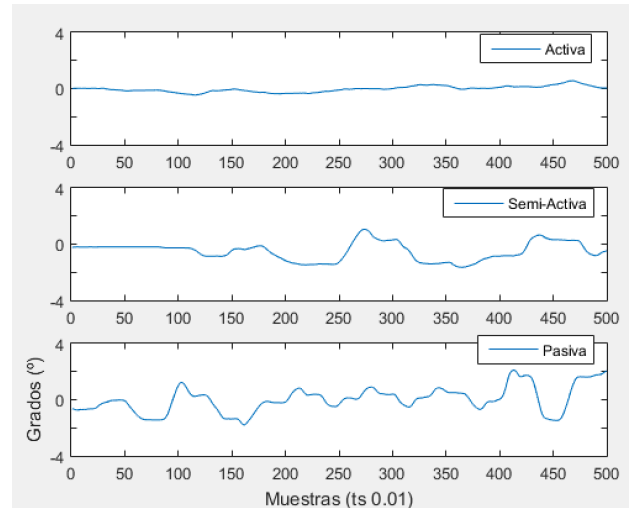


Figure 8. Chassis rolling angle in the 0.8 cm misaligned plates test.

Every trial led to improvements in the pitch and roll angles with both semi-active and active suspensions. However, the active systems usually increase the vertical acceleration

experienced by the chassis along the pathway, while the semi-active tends to reduce it, but not in a significant amount (by comparing both with passive systems).

4. CONCLUSIONS

As stated in the results, the project objectives have been achieved, showing that a digital controlled suspension improves the stability of a vehicle and the passengers' comfort, but it has also been shown that a semi-active mechanical suspension system, even without a digital control, can also do it if it is well designed.

We also found out that PID controls are sophisticated enough to control the pitch and roll angles of the chassis, but not the vertical acceleration in the process. Further research is needed to design more complex controls, such as LQR ones, predictive ones or state feedback ones to keep improving the system.

5. REFERENCES

- [1]R. Sharp and S. Hassan, "The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems", *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering 1984-1988 (vols 198-202)*, vol. 200, no. 34, pp. 219-228, 1986.
- [2]J. Chen, S. Lee and D. DeBra, "Gyroscope free strapdown inertial measurement unit by six linear accelerometers", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 17, no. 2, pp. 286-290, 1994.
- [3]P. Jackson, "PRBS cross-correlation measurements by hybrid computational techniques", *The Computer Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 49-54, 1971.
- [4]H. Lee and D. Rivera, "CR-IDENT: A MATLAB TOOLBOX FOR MULTIVARIABLE CONTROL-RELEVANT SYSTEM IDENTIFICATION", *IFAC*

Proceedings Volumes, vol. 39, no. 1, pp. 708-713, 2006.

[5]R. Darus and Y. Sam, "Modeling and control active suspension system for a full car model", *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 2009.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

MEMORIA

Autor:

Fº de Borja Jiménez Valverde

Directores:

Juan Luis Zamora Macho

José Porras Galán

18 de julio de 2016



Índice de la memoria

Parte I Memoria	2
Capítulo 1 Introducción	4
1.1 Estado del arte	5
1.2 Motivación del proyecto	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Metodología / Solución desarrollada	8
1.5 Recursos / herramientas empleadas	9
Capítulo 2 Montaje del prototipo y banco de ensayos.....	10
2.1 Adquisición y montaje del prototipo RC	10
2.2 Diseño mecánico del sistema de suspensión activa	12
2.2.1 Baldas delantera y trasera	14
2.2.2 Semicilindro unido al servomotor.....	15
2.2.3 Brazo actuador	16
2.3 Elección y montaje de los servomotores actuadores.....	17
2.4 Elección y montaje de los sensores de distancia.....	18
2.5 Diseño y fabricación de las pistas de ensayo	21
Capítulo 3 Comunicaciones y sistema de control.....	24
3.1 Elementos del sistema de control.....	24
3.1.1 Elección y funcionamiento del motor y el ESC.....	24
3.1.2 Memoria Flash	26
3.1.3 Unidad de medición inercial (IMU).....	29
3.1.4 Calibración y puesta en marcha de los sensores IR	32
3.1.5 Seguimiento de velocidad.....	39
3.2 Sistema de comunicaciones	44



3.2.1 Conexionado del Arduino Mega 2560	44
3.2.2 Emisora y receptor	45
3.3 Máquina de estados	46
Capítulo 4 Parametrización del sistema de amortiguación	48
4.1 Modelo teórico	48
4.2 Modelo real	51
4.2.1 Balanceo (roll)	53
4.2.1.1 Ensayo	53
4.2.1.2 Cálculo de la planta	55
4.2.2 Cabeceo (pitch)	58
4.2.2.1 Ensayo	58
4.2.2.2 Cálculo de la planta	59
4.2.3 Elevación (bouncing)	61
4.2.3.1 Ensayo	61
4.2.3.2 Cálculo de la planta	64
Capítulo 5 Diseño de controles	70
5.1 Implementación de los controles	71
5.1.1 Creación de los mandos	72
5.1.2 Mezclador	73
5.2 Control de balanceo	74
5.3 Control de cabeceo	77
5.4 Control de aceleración vertical	78
Capítulo 6 Resultados/Experimentos	84
6.1 Pista alta	84
6.1.1 Ensayo badenes contiguos	84
6.1.2 Ensayo terreno irregular	87
6.2 Pista Baja	89
6.2.1 Ensayo badenes contiguos	89
6.2.2 Ensayo terreno irregular	91
Capítulo 7 Conclusiones	94



Capítulo 8	Futuros desarrollos	96
Bibliografía	98	
Parte II	Estudio económico.....	102
Capítulo 1	Estudio económico	104
Parte III	Anexos	106
Capítulo 1	Anexo A	108
Capítulo 2	Anexo B	112
Capítulo 3	Anexo C	114
Parte IV	Datasheets.....	118
Capítulo 1	Sensor infrarrojo.....	120
Capítulo 2	Motor Brushless 3900KV.....	124



Índice de figuras

Figura 1.1. Control de suspensión activa ABC, diseñado por Mercedes-Benz.....	5
Figura 1.2. Sistema ‘Magic Body Control’, de Mercedes-Benz.	6
Figura 2.1. Modelo RC Turnigy TD10, a escala 1:10.	10
Figura 2.2. Suspensión delantera original del modelo.	11
Figura 2.3. Sistema de suspensión activa desechado.	12
Figura 2.4. Sistema de suspensión activa delantero instalado.....	13
Figura 2.5. Balda delantera.....	14
Figura 2.6. Balda trasera.....	14
Figura 2.7. Cilindro oblicuo actuador.	15
Figura 2.8. Brazo unido al amortiguador en el que apoya el cilindro,	16
Figura 2.9. Micro servomotor escogido y sus características.....	18
Figura 2.10. Sensor IR GP2Y0A51SK0F a la izquierda; sensor de ultrasonidos HC-SR04 a la derecha.	19
Figura 2.11. Gráfica que relaciona la distancia en cm medida por el sensor y el voltaje de salida del mismo.	20
Figura 2.12. Parachoques delantero.	21
Figura 2.13. Pista alta en posición de ensayo con badenes alineados.	22
Figura 2.14. Pista alta en posición de ensayo de terreno irregular.	22
Figura 3.1. Motor Brushless 3900 KV.	24
Figura 3.2. Alimentación del motor.	25
Figura 3.3. ESC Turnigy Trackstar 80A y sus características.....	25



Figura 3.4. Diagrama de conexiones del ESC.....	26
Figura 3.5. Diagrama de entrada de los datos a la memoria flash.....	27
Figura 3.6. Interfaz de acceso a la memoria flash mediante la herramienta PuTTY.	28
Figura 3.7. Atajo de acceso a la herramienta Import Data.	28
Figura 3.8. Esquema de obtención de ángulos reales desde la IMU,	29
Figura 3.9. Interior del bloque de calibración de la IMU.....	30
Figura 3.10. Interior del filtro complementario no lineal.....	31
Figura 3.11. Menú principal del programa Mission Planner.....	32
Figura 3.12. Valores de las LookUp Tables de los sensores IR.....	33
Figura 3.13. Conversión de la lectura de los sensores a milímetros.	34
Figura 3.14. Entradas de la memoria flash en el ensayo de calibración de los sensores IR.	35
Figura 3.15. Ejemplo de datos a preparar por el fichero IMU_param_prep_datos.m.....	36
Figura 3.16. Diagrama de ajuste del peso del giróscopo.....	37
Figura 3.17. Esquema de la simulación iterativa del filtro complementario no lineal.	37
Figura 3.18. Comparación entre los resultados del ensayo real y la simulación de los ángulos de cabeceo (arriba) y balanceo (abajo).....	38
Figura 3.19. Conversión de la lectura de los encoders a velocidad real (en rpm). 40	
Figura 3.20. Interior del bloque ‘Encoder X’.....	40
Figura 3.21. Interior del bloque ‘Derivada filtrada’.....	41
Figura 3.22. Gráfica que transforma el PWM de la emisora en velocidad real (m/s).....	42
Figura 3.23. Flujo de datos del canal 3 del receptor a su respectivo actuador.	42
Figura 3.24. Detalle de la corrección de la aceleración en el eje X a la entrada del filtro complementario no lineal.	43



Figura 3.25. Interior del bloque ‘Derivative’	43
Figura 3.26. Diagrama de conexiones del Arduino Mega.....	44
Figura 3.27. Emisora Walkera WK-2801 PRO (izquierda) y su receptor (derecha).	45
Figura 3.28. Máquina de estados que rige la calibración de la IMU.....	46
Figura 3.29. Reloj interno de la máquina de estados.....	47
Figura 3.30. Diagrama externo de la máquina de estados.....	47
Figura 4.1. Modelo matemático de una amortiguación pasiva.....	48
Figura 4.2. Modelo matemático de una amortiguación activa.	49
Figura 4.3. Modelo matemático de un vehículo completo con suspensión activa.....	49
Figura 4.4. Diagrama de simulación iterativa para el ajuste de parámetros del modelo de suspensión activa para el vehículo completo.....	51
Figura 4.5. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de balanceo.	53
Figura 4.6. Trigonometría asociada al ángulo de balanceo.	54
Figura 4.7. Vista frontal del coche simplificada ante una perturbación en su ángulo de alabeo.....	54
Figura 4.8. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de alabeo.....	55
Figura 4.9. Señal PRBS (abajo) y ángulo de balanceo (arriba) obtenidos tras el ensayo de este.....	56
Figura 4.10. Cálculo de la planta de balanceo seleccionando tres polos y un cero.	57
Figura 4.11. Aproximación gráfica de la planta de balanceo.....	57
Figura 4.12. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de cabeceo.	58
Figura 4.13. Trigonometría asociada al ángulo de cabeceo.	59
Figura 4.14. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de cabeceo.....	59



Figura 4.15. Señal PRBS (abajo) y ángulo de cabeceo (arriba) obtenidos tras el ensayo de este.....	60
Figura 4.16. Cálculo de la planta de cabeceo seleccionando tres polos y un cero.	60
Figura 4.17. Aproximación gráfica de la planta de cabeceo.	61
Figura 4.18. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de aceleración vertical.	62
Figura 4.19. Saturaciones de los servos en el ensayo de aceleración vertical.....	63
Figura 4.20. Trigonometría asociada al cálculo de la altura media del vehículo. .	63
Figura 4.21. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de aceleración vertical.	64
Figura 4.22. Señal PRBS (abajo) y aceleración vertical (arriba) obtenidas tras el ensayo de esta.....	65
Figura 4.23. Cálculo de la planta de aceleración vertical seleccionando tres polos y un cero.	65
Figura 4.24. Modelo de la planta de aceleración vertical usado para la simulación iterativa.....	66
Figura 4.25. Preparación de datos por el fichero Az_t_prep_datos.m.	67
Figura 4.26. Comparación de las plantas de aceleración vertical (arriba) y altura (abajo) simuladas con las reales, obtenidas mediante el ensayo.	67
Figura 5.1. Representación del modelo de un coche tomando el chasis como un plano con cuatro puntos de apoyo.	70
Figura 5.2. Mezclador (izquierda) y bloque contenedor de los controles (derecha).	71
Figura 5.3. Implantación de tres controles PID.....	72
Figura 5.4. Interior del bloque.....	73
Figura 5.5. Mezclador de los mandos individuales de los controles.	73
Figura 5.6. Ganancia transformadora de -2 2 a 600 2400.	73
Figura 5.7. Diagrama de Black de la planta de balanceo.	74



Figura 5.8. Respuesta a un escalón en referencia de la planta de balanceo.	75
Figura 5.9. Diagrama de Black de la planta de balanceo controlada.	76
Figura 5.10. Respuesta a un escalón en referencia del lazo cerrado de la planta de balanceo controlada.	76
Figura 5.11. Respuestas de la planta de cabeceo con y sin control a un escalón en referencia.	77
Figura 5.12. Diagrama de Black de la planta de cabeceo con y sin control.	78
Figura 5.13. Modelo de simulación de la planta de aceleración vertical con perturbaciones.	79
Figura 5.14. Modelo de simulación con y sin control de la planta de aceleración vertical.	80
Figura 5.15. Comparación de la respuesta de la planta de aceleración vertical con y sin control ante una perturbación sinusoidal.	80
Figura 5.16. Comparativa de los diagramas de Bode de la planta de aceleración vertical con y sin controlar.	81
Figura 5.17. Respuesta de la planta de aceleración vertical con y sin control cuando esta se intenta llevar a cero.	82
Figura 6.1. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	85
Figura 6.2. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	86
Figura 6.3. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	86
Figura 6.4. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	87
Figura 6.5. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	88
Figura 6.6. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).	88



Figura 6.7. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).....	89
Figura 6.8. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).....	90
Figura 6.9. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).....	90
Figura 6.10. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).....	91
Figura 6.11. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).....	92
Figura 6.12. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semiactiva (medio) y pasiva (abajo).....	92



Índice de tablas

Tabla 4.1. Variables de estado del modelo de suspensión activa del vehículo completo.....	50
Tabla 6.1. Resultados comparativos del ensayo de badenes contiguos sobre pista alta en referencia a la suspensión pasiva.....	85
Tabla 6.2. Resultados comparativos del ensayo de terreno irregular sobre pista alta en referencia a la suspensión pasiva.....	87
Tabla 6.3. Resultados comparativos del ensayo de badenes contiguos sobre pista baja en referencia a la suspensión pasiva.....	89
Tabla 6.4. Resultados comparativos del ensayo de terreno irregular sobre pista baja en referencia a la suspensión pasiva.....	91



Parte I MEMORIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Desde que en 1886 Karl Benz presentó al mundo el primer coche de la historia fabricado con un motor de combustión interna, el objetivo final de cualquier ingeniero perteneciente a este área ha sido diseñar un automóvil capaz de transportar a los pasajeros donde deseen sin necesidad de un conductor. Actualmente Google, una de las empresas pioneras en el sector electrónico mundial lo está consiguiendo, casi siglo y medio más tarde, pero todavía no es algo rentable que llevar al día a día del primer mundo. Este proyecto va a tratar uno de los aspectos más importantes de la conducción automática, y en el cual la electrónica está cada vez más presente: el diseño de un sistema de suspensión activa.

Existen tres tipos de suspensiones hoy en día. La pasiva, utilizada por la inmensa mayoría de los automóviles, la semi activa, y la activa. La primera citada se diseña con unos parámetros fijos y se implanta de manera únicamente mecánica, albergando la capacidad de almacenar energía en los muelles y disiparla en los amortiguadores. Las otras dos suspensiones además de almacenar y disipar la energía, son capaces de introducirla en el sistema, lo que abre un importante campo de investigación. Las tres intentan resolver el compromiso existente en todo automóvil entre estabilidad, sujeción de la carga y confort de los pasajeros, pero sólo las dos últimas son capaces de adaptarse a las condiciones de la carretera y a las maniobras del conductor en tiempo real, controlando de forma independiente la amortiguación en cada una de las ruedas. De esta manera en cada instante proporcionan la solución óptima a las necesidades del automóvil sin sacrificar en ningún momento el confort de los pasajeros [1].

Este proyecto intentará crear un modelo de suspensión activa en un vehículo RC, modificándolo para que se adapte al asfalto y así los pasajeros disfruten de un máximo confort a pesar de los desniveles u obstáculos del terreno.

1.1 ESTADO DEL ARTE

La electrónica ha avanzado notablemente en las últimas décadas, y como era obvio, el sector automovilístico ha sido uno de los que más se ha beneficiado de ella. A continuación se van a repasar las distintas soluciones que durante los últimos años se le han dado al problema a resolver en este proyecto: la implementación de un sistema de suspensión activa.

En 1999 Mercedes Benz comercializa por primera vez un sistema de suspensión activa, el ABC, en su modelo CL Coupé. El sistema asegura en todo momento la altura de la carrocería del vehículo respecto al suelo, reduciendo las oscilaciones provocadas por los movimientos verticales y el balanceo lateral del vehículo al tomar curvas o en el proceso de frenado. Ajusta activamente las fuerzas en cada rueda con ayuda de cuatro patas telescópicas hidráulicas, y es capaz de reducir hasta en un 70 % las vibraciones producidas en la carrocería. Además, llevaba una interfaz que permitía cambiar entre modos deportivo y confort, adaptando el coche a las necesidades del conductor.

Mercedes-Benz F 700 PRE-SCAN® system control

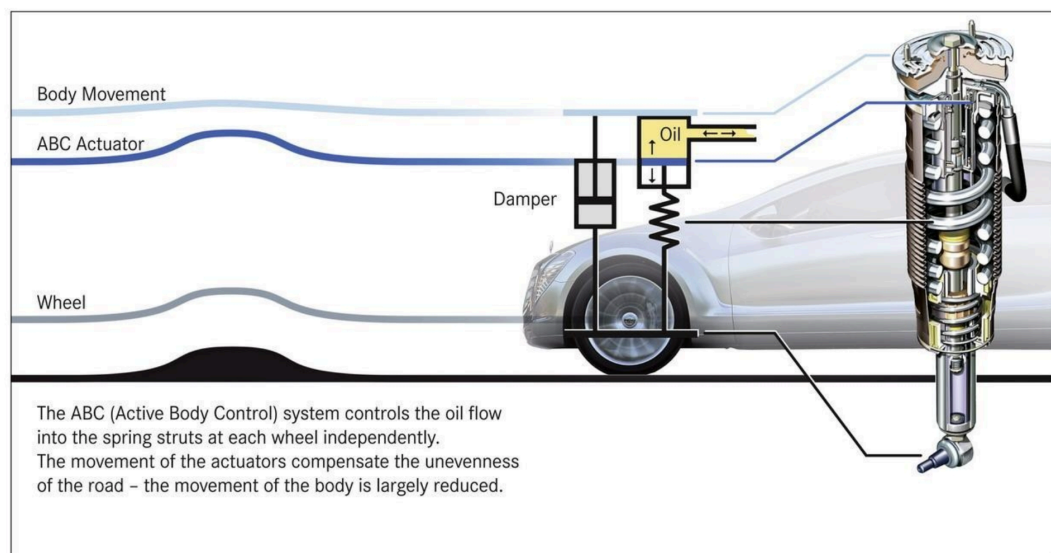


Figura 1.1. Control de suspensión activa ABC, diseñado por Mercedes-Benz.

En 2012, la empresa automovilística Audi presentaba un proyecto para la implementación de un sistema inteligente de suspensión que, por medio de sensores que leyera la carretera, fuera capaz de detectar badenes y otros defectos de la calzada y adelantarse a los mismos. Algo más tarde, otra vez Mercedes-Benz da un salto de calidad al idear un proyecto similar, ‘Magic Body Control’, en el cual una cámara colocada en el parabrisas delantero va “dibujando” un mapa con la orografía de la carretera, ante el que la suspensión activa actuará.

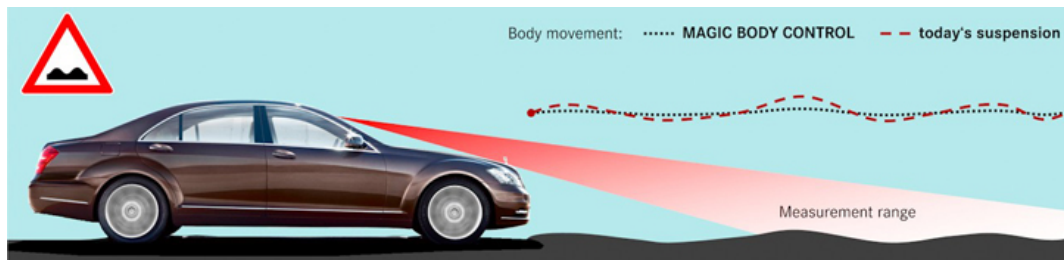


Figura 1.2. Sistema ‘Magic Body Control’, de Mercedes-Benz.

Cabe también destacar en los últimos años el desarrollo por parte de BOSE de un sistema electromagnético que consigue increíbles resultados adaptando la suspensión al terreno, y el último avance de Mercedes Benz, ya en 2016: el FRIC (Front and Rear Interactive Control), una suspensión activa puramente hidráulica. Este sistema conecta los cuatro brazos de la suspensión entre sí, con lo cual el circuito desvía más presión a la zona que más lo necesite en cada momento, y es la gran baza de Mercedes en la competición de F1 de este año.

Dejemos atrás estos maravillosos ejemplos prácticos y centrémonos ahora en el diseño teórico del control de la suspensión. Desde hace décadas existen diversos estudios que tratan sobre la aplicación del control digital a la suspensión de vehículos, tanto hidráulica como mecánica, y se han hecho distintas simulaciones sobre el uso de controles de todo tipo, desde PID hasta lógica borrosa, casi todas de reducido éxito. Sin embargo, en 2013, el GCIS [2], tras acusar a los estudios existentes de imprecisos y poco prácticos, publicó un ambicioso estudio sobre el modelado de las suspensiones hidráulicas que ha servido de base para otros posteriores, como los realizados por Weichao, Sun, Huijun Gao y Kaynak hasta hoy en día.



En el último trabajo nombrado [3], pese a haber conseguido resolver gran cantidad de problemas, persiste la cuestión de la estabilización de las suspensiones, dado que las vibraciones pueden ocasionar perturbaciones en la propia suspensión. Para resolverlo, la mayoría de investigadores apuestan por un control lineal cuadrático gaussiano, dado que, en teoría, es el que mejores resultados da.

El control lineal cuadrático gaussiano (LQG) [4] está basado en sistemas lineales de comportamiento incierto perturbados por ruido blanco (ruido emitido con la misma potencia en todas las frecuencias), incompletos y sometidos a funciones de coste cuadráticas. En definitiva, se trata de una combinación de un filtro de Kalman (estimador lineal cuadrático) y un regulador lineal cuadrático [5].

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación principal del proyecto es demostrar que un control digital puede mejorar las prestaciones del modelo de suspensión de un vehículo, algo que podría revolucionar el mercado del automovilismo si se incorpora a los modelos actuales de forma barata y eficiente.

Este proyecto usa un prototipo a escala 1:10 de un coche RC (Radio Control), el cual es útil para realizar un análisis inicial y sacar algunas conclusiones, pero no termina aquí, ya que este estudio debe servir de estímulo y base teórica para que más adelante la Universidad Pontificia de Comillas pueda comprobar y hacer estudios de la utilidad del control digital sobre vehículos reales, aplicado sobre amortiguaciones hidráulicas, mecánicas o incluso magnéticas y buscando nuevos dispositivos que permitan actuar sobre las suspensiones de los vehículos.



1.3 OBJETIVOS

- Realizar un diseño mecánico con la herramienta Solid Edge adecuado para el uso de servomotores como actuadores en la suspensión.
- Desarrollar usando Matlab/Simulink el software adecuado para el control de las cuatro suspensiones del prototipo de manera independiente y automática.
- Mejorar este software para intentar conseguir un mayor confort del conductor dentro del auto, así como una mayor adherencia del coche al asfalto.

1.4 METODOLOGÍA / SOLUCIÓN DESARROLLADA

Montar entero el coche RC comprado en Hobby King con el motor Brushless y su ESC y comprobar su funcionamiento individual. Tras ello se procede con la parte mecánica del proyecto.

El primer paso es diseñar y probar correctamente en simulación de relaciones de conjuntos (Solid Edge) las piezas que componen el sistema mecánico de suspensión activa / semi-activa, para evitar problemas posteriores e impresiones duplicadas innecesarias.

Tras imprimirlas y comprobar su correcto montaje y funcionamiento es el momento de añadir los sensores infrarrojos y calibrarlos.

Después se procede a estudiar el modelo teórico de simulación paralelamente a la realización de los ensayos pertinentes necesarios para obtener un modelo real. Una vez obtenido este se diseñan los controles adecuados al sistema que actuarán sobre los servomotores actuadores para mantener el chasis del vehículo estabilizado.



Por último, una vez los controles sean precisos, se realizan los ensayos finales sobre pista para obtener los resultados finales y sacar conclusiones.

1.5 RECURSOS / HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Las herramientas que se han usado a lo largo de este proyecto son:

- Digitales:
 - ❖ Matlab 2015a
 - ❖ Simulink
 - ❖ Solid Edge
 - ❖ Putty
 - ❖ Mission Planner
- Físicas:
 - ❖ Impresora 3D
 - ❖ Máquina Plegadora
 - ❖ Osciloscopio
 - ❖ 4 sensores infrarrojos de distancia.
 - ❖ Coche RC de Hobby King con motor brushless y ESC.
 - ❖ Batería LiPo para el vehículo y LiFe para la emisora, y cargador-balanceador para ellas.
 - ❖ Emisora de radio control y receptor Walkera.
 - ❖ Ordenador con todos los programas del apartado digital instalados y en correcto funcionamiento.
 - ❖ Conector USB-micro USB y diversos cables.



Capítulo 2 MONTAJE DEL PROTOTIPO Y BANCO DE ENSAYOS

2.1 ADQUISICIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO RC

Para este proyecto se va usar un prototipo que parte de un coche Radio Control comercial real a escala 1:10, el Turnigy TD10, adquirido por la web de HobbyKings, expertos en este ámbito.



Figura 2.1. Modelo RC Turnigy TD10, a escala 1:10.

Dado que el objetivo final es entre otros intentar crear un sistema de suspensión activa a este automóvil lo primero que se debe hacer es estudiar la suspensión pasiva del mismo, es decir, la que viene de serie:

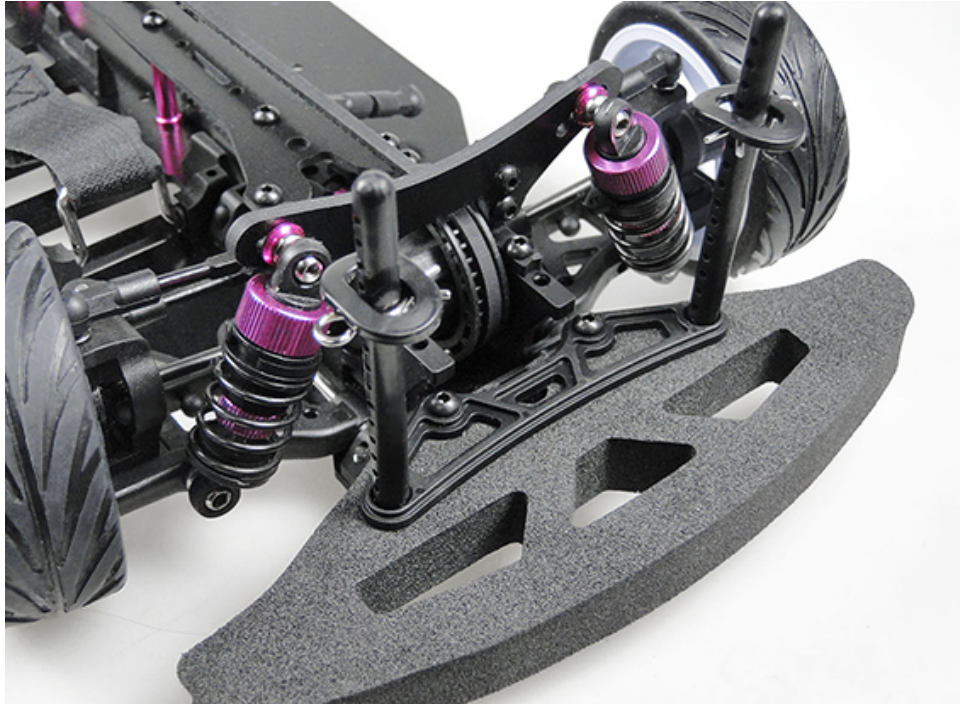


Figura 2.2. Suspensión delantera original del modelo.

Como se puede comprobar en la Figura 2.2 el coche tiene un ámbito deportivo, por lo que de serie (aunque son regulables) los amortiguadores vienen bastante duros. Además, como es habitual en estos modelos el chasis está muy pegado al suelo, para bajar el centro de masas del coche y disminuir los momentos de inercia no deseados.

Esto hace más interesante el proyecto, ya que si se hubiera elegido prototipar un modelo típico 4x4 con grandes amortiguadores y chasis elevado hubiera faltado un objetivo real, porque estos coches están en sí mismos diseñados para caminos con muchos baches. Al haber elegido un modelo más deportivo y parecido a los utilitarios del día a día los resultados son más aplicables y útiles a la industria actual. Aún así cabe nombrar el hecho de que fue necesario recortar un poco cada esquina del chasis inferior del automóvil para aumentar el rango de movimiento

vertical de las ruedas dos centímetros, y así la capacidad de amortiguación de la suspensión.

2.2 DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA

Tras una búsqueda y estudio de las distintas posibilidades a la hora de implantar la suspensión activa al coche de serie, se llegó a una posible solución realizada en otros proyectos: colocar los servomotores en horizontal y que estos giren unas pestañas (piezas rojas) que desplacen el punto superior de apoyo de los amortiguadores, tal como se observa en la siguiente figura.



Figura 2.3. Sistema de suspensión activa desechado.

Sin embargo, tras realizar un estudio Newtoniano [6] de los esfuerzos que sufre cada pieza en este sistema se decidió desecharla. Ante un badén de una altura considerable, o al ir el coche a una velocidad medianamente elevada, el resorte de la amortiguación y su correspondiente fuerza vertical sobre las pestañas rojas podrían ejercer más momento del que el eje del servomotor y sus dientes están

diseñados para aguantar. Es decir, al ir el coche rápido o coger un bache elevado podrían romperse cualquiera de los actuadores. Para este proyecto se consideraron esas limitaciones intolerables, por lo que se diseñó un innovador sistema de actuación sobre los amortiguadores, el cual se presenta en la figura de abajo.



Figura 2.4. Sistema de suspensión activa delantero instalado.

Con este imaginativo diseño se consiguen las mismas posibilidades de actuación de los servomotores sobre los amortiguadores, pero al estar los semicilindros y los propios servomotores colocados en vertical, al recibir una perturbación inesperadamente rápida o potente el momento no lo recibe el servomotor en su propio eje de rotación, sino que lo recibe el chasis, el cual está preparado de sobra para ello. Así se obtiene un sistema sin limitaciones ni riesgos, aunque claro, el diseño de las piezas que lo forman se vuelve más complicado.

Todas ellas están proyectadas según medidas reales del coche de serie para que encajen a la perfección y pensadas geométricamente para no tener puntos de fácil fractura. Además están redondeadas para su mejor fabricación en la impresora 3D y su posterior colocación en el modelo.



2.2.1 BALDAS DELANTERA Y TRASERA

Estas baldas van unidas mediante cuatro tornillos de métrica tres (como todos los del prototipo) al chasis, y su función es sujetar los servomotores y los brazos actuadores, dejando los primeros totalmente fijos y permitiendo a los segundos girar libremente por medio de un casquillo y dos arandelas. Cada una está diseñada detalladamente para que encaje con el resto de las partes del chasis y ningún elemento choque con otro durante el movimiento del mecanismo.

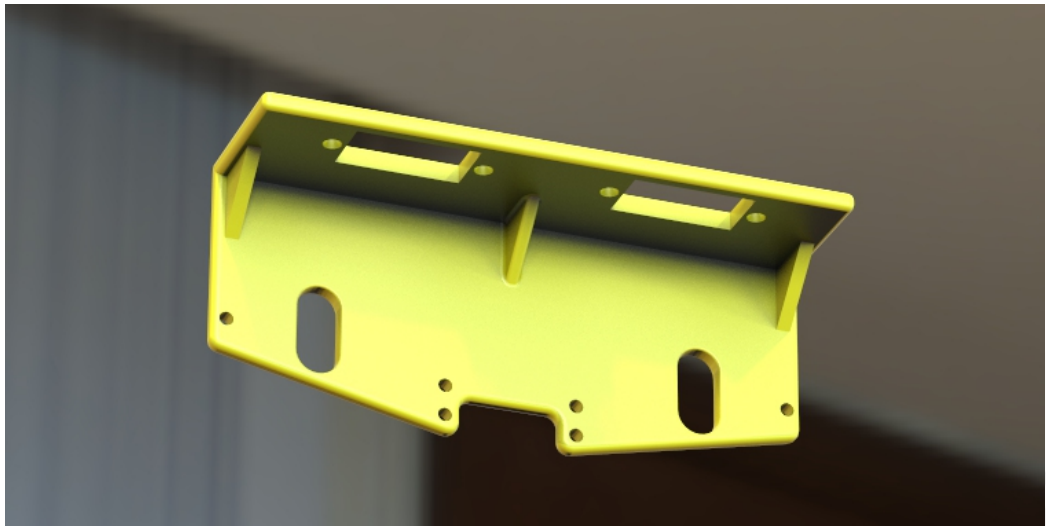


Figura 2.5. Balda delantera

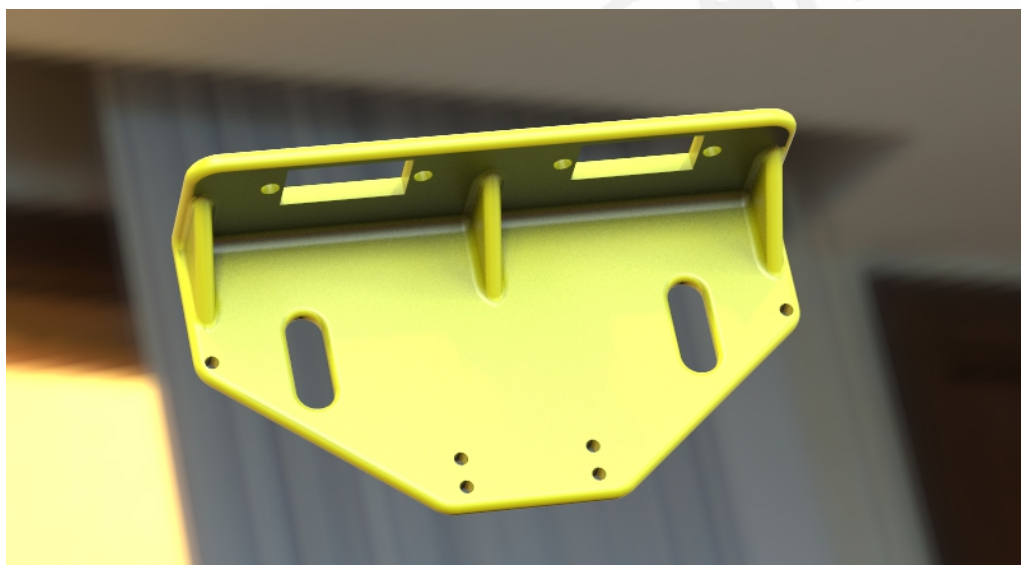


Figura 2.6. Balda trasera.



La principal y casi única diferencia entre la frontal y la trasera, es que la delantera tiene un hueco en su parte inferior central que permite que no choque con el diferencial de las ruedas delanteras.

2.2.2 SEMICILINDRO UNIDO AL SERVOMOTOR

Es un cilindro atravesado por un plano oblicuo que lo corta, dejando una superficie lisa diagonal por la cual desliza el saliente del brazo. El corte está diseñado para que a lo largo de los 180° teóricos de giro del servomotor el brazo gire en su propio eje y mueva de forma casi vertical el amortiguador. Este a su vez empujará la pieza que une la rueda al chasis, y con esto se conseguirá variar la posición de este en ese punto entre la mínima y la máxima altura que permita el choque de ambas piezas del que se habló al principio del capítulo.

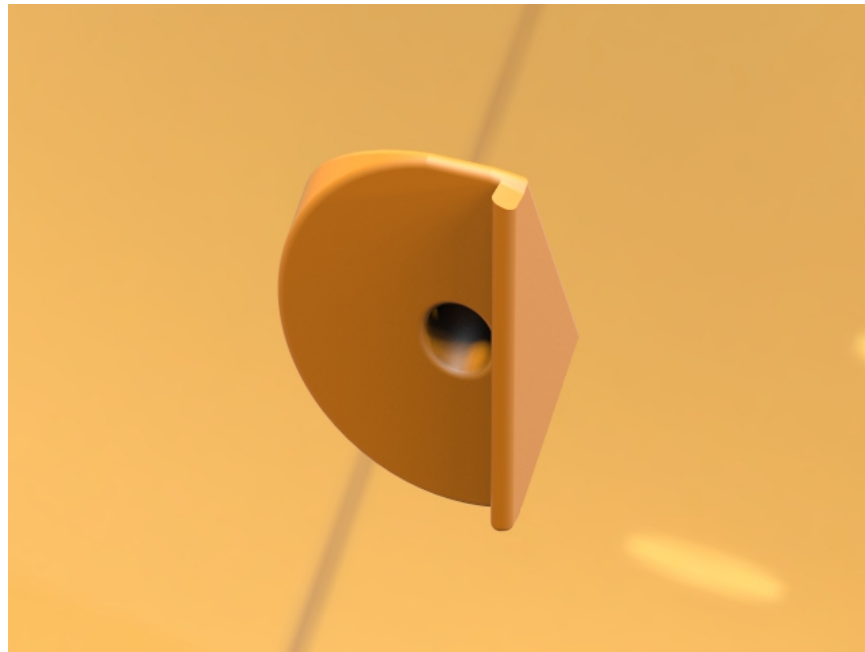


Figura 2.7. Cilindro oblicuo actuador.

Hay cuatro instalados si contamos todo el coche, al igual que brazos y servomotores, y obviamente dos son piezas espejo de las otras dos.



2.2.3 BRAZO ACTUADOR

Este brazo convierte un movimiento rotatorio como es el del semicilindro en uno casi vertical por parte del amortiguador. Por limitaciones del modelo de serie era imposible colocar los amortiguadores rectos a 90° (ya que chocaban con las ruedas), por lo que para variar su posición se optó por unirlos físicamente al brazo y hacer girar este desde un eje lo más alejado posible. Así conseguimos actuar sobre la amortiguación y conseguir un sistema de suspensión activa.



Figura 2.8. Brazo unido al amortiguador en el que apoya el cilindro,

Hubo dos problemas clave a solucionar para conseguir un correcto funcionamiento del sistema:

- El primero fue conseguir que los brazos giraran independientemente de los tornillos que los sujetan a su respectiva balda. Fue necesario diseñar un casquillo de diámetro interior 3 cm y exterior 5 cm que rodara entre el tornillo y el brazo, y permitiera que el segundo girara libremente sin perturbar al primero.
- El segundo problema se presentó a la hora de empezar a probar el mecanismo, ya que el rozamiento entre el cilindro y el “bulón” del brazo hacían que el segundo se desgastara muy rápidamente (recordemos que son piezas impresas en una impresora 3D), con lo cual al poco tiempo de utilización el sistema quedaría inservible. Para resolverlo se optó por



diseñar una “tapa” que cubriera el saliente del brazo que desliza por el cilindro. Esta cubierta tiene la misma geometría que la parte del brazo que cubre, sólo que 1 mm más de diámetros inferior y superior, y está fabricada en bronce, al igual que el casquillo del anterior caso, para evitar cualquier posible fallo de gripado.

2.3 ELECCIÓN Y MONTAJE DE LOS SERVOMOTORES ACTUADORES

Dado que se diseñó el sistema de actuación de modo que los servomotores no sufrieran fuerzas en su eje existía gran libertad a la hora de elegir estos. Aún así y por precaución se eligió usar micro servos con 25 dientes y engranajes de metal, más resistentes y de más calidad que los de plástico.

Una de las características más importantes a cumplir por el diseño era que fuera manejable, pequeño y fácilmente montable, por ello se escogieron servos más pequeños de lo habitual (micro). Además, obviamente debían operar a una tensión e intensidad que el microprocesador que los fuera a controlar (Arduino Mega) pudiera darles: alrededor de 5V y 220mA. Por último, se debía de estar seguro de que tendrían bastante fuerza para entre los cuatro levantar el coche sin dificultades, lo cual quedaba asegurado gracias a su alto par de bloqueo (4kg/cm aproximadamente a 5V) comparado con la masa de un coche Radio Control como el de este proyecto.



Figura 2.9. Micro servomotor escogido y sus características.

2.4 ELECCIÓN Y MONTAJE DE LOS SENSORES DE DISTANCIA

Lo primero de lo que se debe hablar en este apartado es por qué se ha elegido usar infrarrojos y no ultrasonidos. Ambos son útiles y posibles soluciones ante la necesidad de medir la distancia del chasis al suelo en diferentes puntos, pero el rango de medición de la altura del chasis podría variar de 2 a 7 cm, ya que al haber un mínimo de distancia para que el sensor no de errores la máxima también aumenta. En este rango tenemos dos alternativas claras, una de cada estilo:



Figura 2.10. Sensor IR GP2Y0A51SK0F a la izquierda; sensor de ultrasonidos HC-SR04 a la derecha.

Entre estas dos opciones fue escogido el sensor de infrarrojos, ya que suele ser más fácil de utilizar y dar menos errores de medición, por no hablar de tener una salida analógica de fácil interpretación y uso. Además, su rango permite más margen, ya que baja unos milímetros de los 2 cm de medida mínima y llega hasta los 15 cm de máxima, mientras que el HC-SR04 tiene un rango de entre sólo 2 y 4 cm.

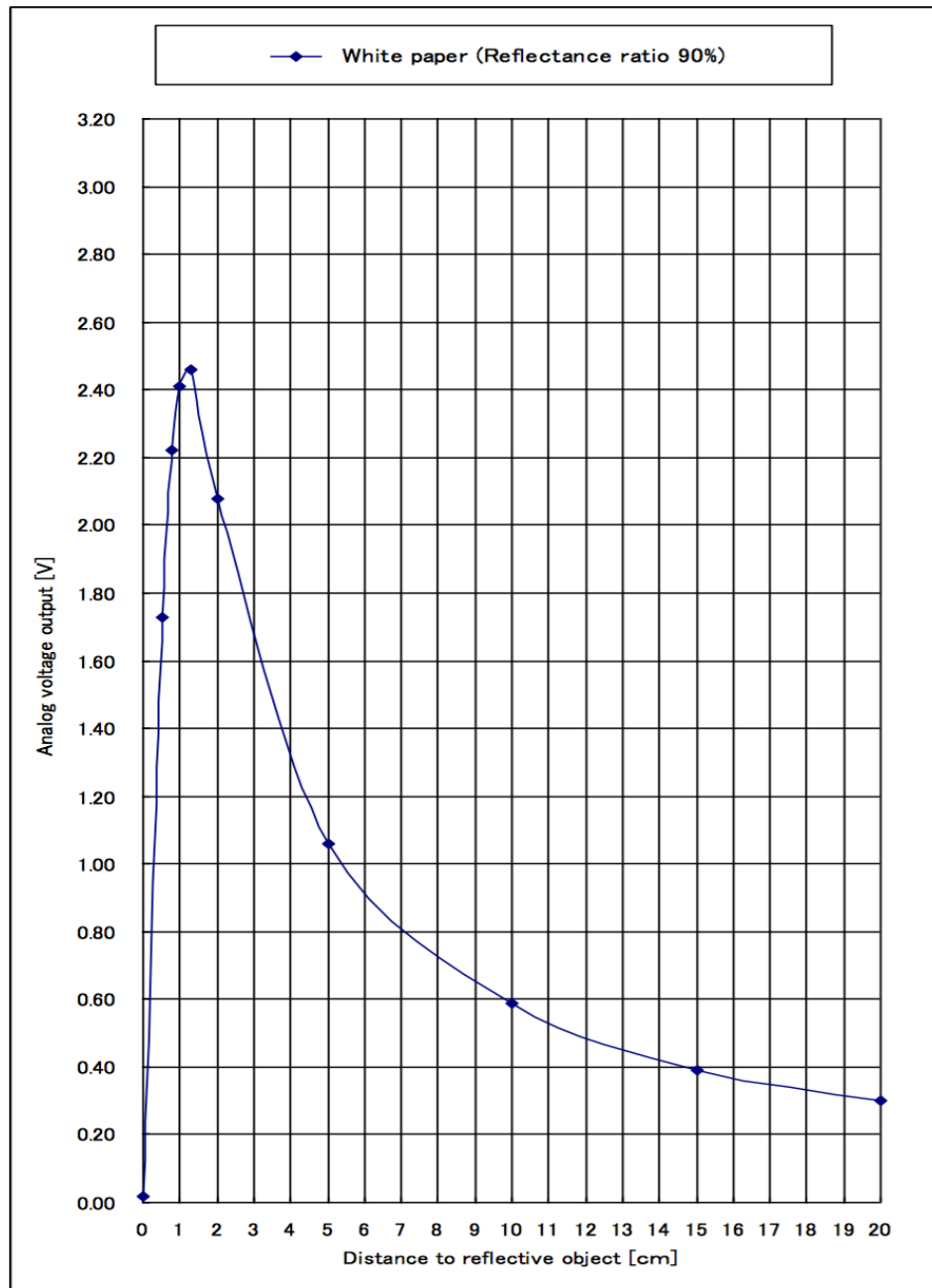


Figura 2.11. Gráfica que relaciona la distancia en cm medida por el sensor y el voltaje de salida del mismo.

2.4.1 Sensores infrarrojos delanteros

Para la colocación en el chasis de los sensores infrarrojos delanteros fue necesario imprimir en 3D una pieza adicional, el parachoques frontal.



Figura 2.12. Parachoques delantero.

Esta pieza está diseñada para sostener dos sensores, uno justo delante de cada rueda delantera, lo que nos permite medir la distancia de la parte delantera del chasis a la carretera y además prever cualquier bache unos milisegundos antes de que llegue a la rueda, por lo que la suspensión activa tiene tiempo para actuar y mitigarlo.

2.4.2 Sensores infrarrojos traseros

Los sensores traseros no necesitaron la impresión de ninguna pieza adicional, ya que la propia balda trasera pudo sostenerlos con ayuda de cinta de doble cara. La sujeción es bastante sólida y permite la lectura con mucha precisión de la distancia de la parte trasera del chasis al suelo.

2.5 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PISTAS DE ENSAYO

Una vez con el prototipo en funcionamiento se procedió a montar el banco de ensayos finales, un camino con badenes. Se diseñaron dos pistas, una alta que



consigue una distancia entre el suelo y el badén de 0.8 cm (aproximadamente un 30 % de la rueda del automóvil) y otra baja con una distancia entre el suelo y el badén de 0.5 cm. Para cada una se fabricaron dos placas de aluminio con cuatro badenes (6 cm de extensión el badén y 3 cm la rampa) con una máquina plegadora [7], de manera que colocando estas placas alineadas o desalineadas se consiguieran realizar dos ensayos en cada pista:

- Ensayo de badenes consecutivos (Figura 2.13).
- Ensayo de terreno irregular (Figura 2.14).

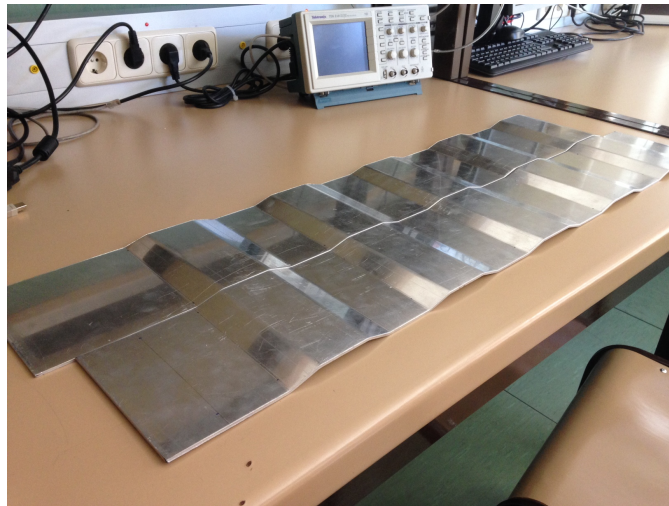


Figura 2.13. Pista alta en posición de ensayo con badenes alineados.

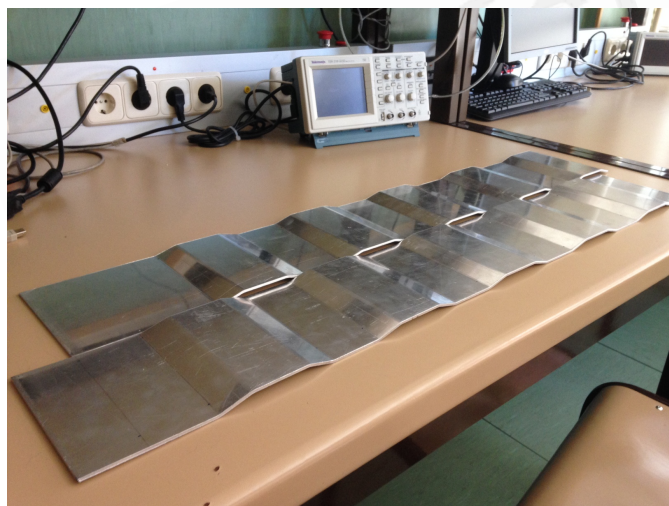


Figura 2.14. Pista alta en posición de ensayo de terreno irregular.





Capítulo 3 COMUNICACIONES Y SISTEMA DE CONTROL

3.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1.1 ELECCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR Y EL ESC

El motor elegido para mover el coche es el recomendado por el fabricante del mismo, un motor Brushless de 3900 KV (Figura 3.1), con un piñón de diecisiete dientes y un centímetro de diámetro exterior.



Figura 3.1. Motor Brushless 3900 KV.

Para mover el motor Brushless del automóvil es necesario usar un ESC (Electronic Speed Controller) [8], en español llamado típicamente controlador de velocidad, ya que este tipo de motores no se puede controlar directamente con la batería, porque debido a la complejidad de su sistema sus tres fases deben ser regidas por un circuito electrónico.

Cabe destacar el esquema de alimentación del motor, ya que es algo imprescindible y muy útil de recordar, tal y como se ve en la Figura 3.2.

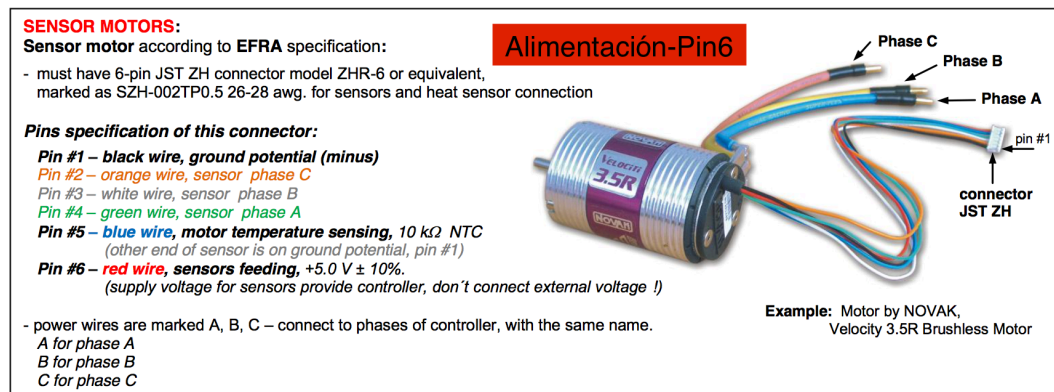


Figura 3.2. Alimentación del motor.

El ESC escogido para este proyecto es también el recomendado por el fabricante del coche RC a escala, concretamente el Turnigy Trackstar 80A Turbo Sensored, cuyas especificaciones más importantes se pueden observar en la Figura 3.3.

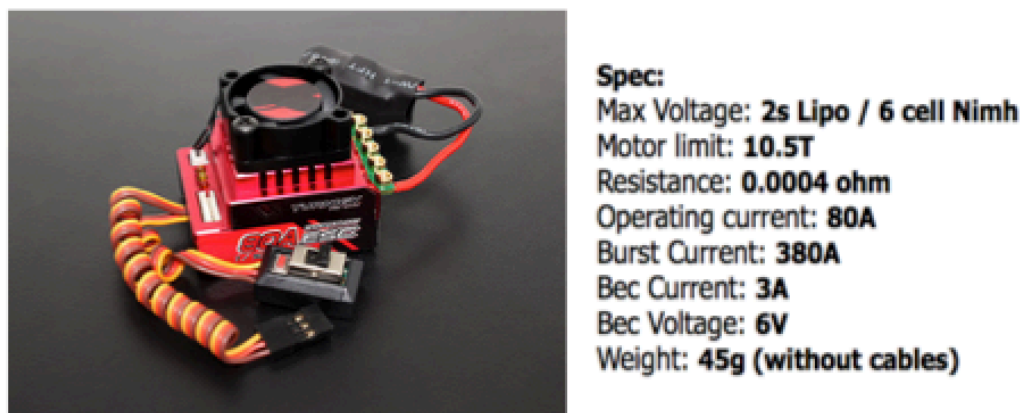


Figura 3.3. ESC Turnigy Trackstar 80A y sus características.

La conexión de este dispositivo con el resto de componentes del sistema y su interacción se pueden observar en la Figura 3.4 de más abajo.

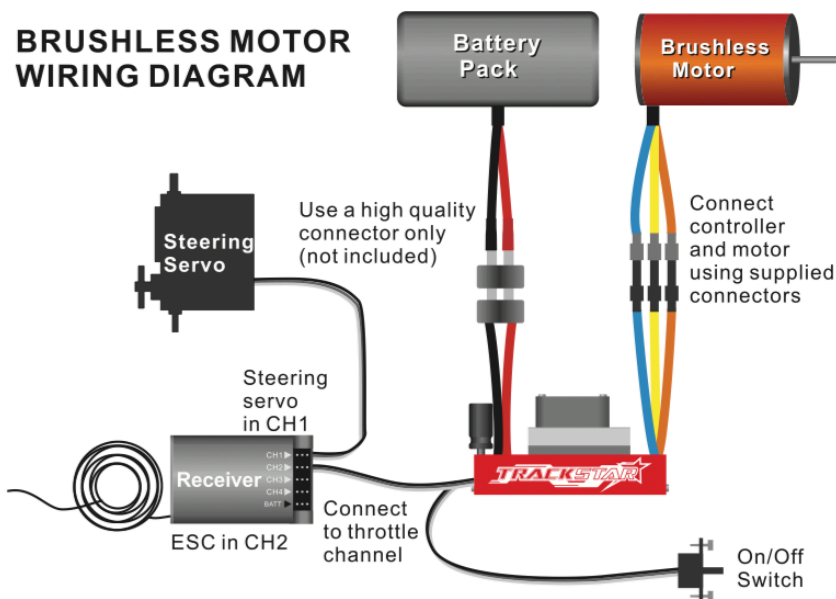


Figura 3.4. Diagrama de conexiones del ESC.

3.1.2 MEMORIA FLASH

Para todo el guardado de datos durante este proyecto se ha usado una memoria Flash [9] que trae el Arduino APM incorporada. Una memoria flash es un derivado de una memoria EEPROM, de tipo no volátil (si el Arduino deja de ser alimentado eléctricamente los datos que haya en esta memoria permanecerán). En concreto la placa usada Arduino Mega 2560 contiene una de 256KB, suficiente para su aplicación en este trabajo.

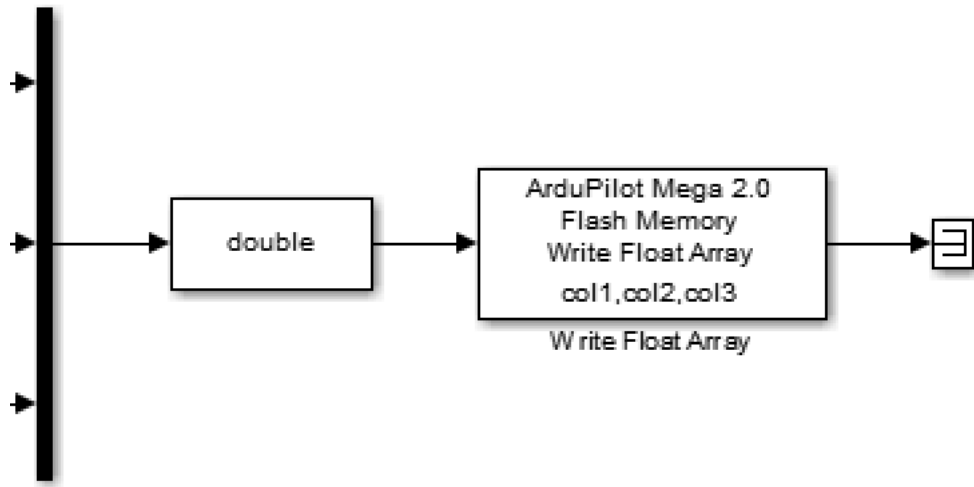


Figura 3.5. Diagrama de entrada de los datos a la memoria flash.

Para seleccionar los datos a guardar se debe usar el bloque correspondiente de la biblioteca de Simulink, al cual deben llegar los datos mediante un Mux (si hay varios) y siempre en formato double [10], por lo que hay que transformarlos si este no es el caso. El número de variables que entran al bloque ha de corresponder con el número de nombres definidos dentro del mismo, los llamados “col1”, “col2” y “col3” en la Figura 3.5.

Para acceder a la memoria Flash del Arduino (mediante su puerto COM correspondiente [11]), guardar, ver y borrar datos se ha usado la herramienta externa a Matlab, Putty [12], un cliente SSH [13], Telnet [14], rlogin [15], y TCP raw [16] con licencia libre (por elección de su autor puede ser copiado, estudiado, modificado, utilizado libremente con cualquier fin y redistribuido con o sin cambios o mejoras).

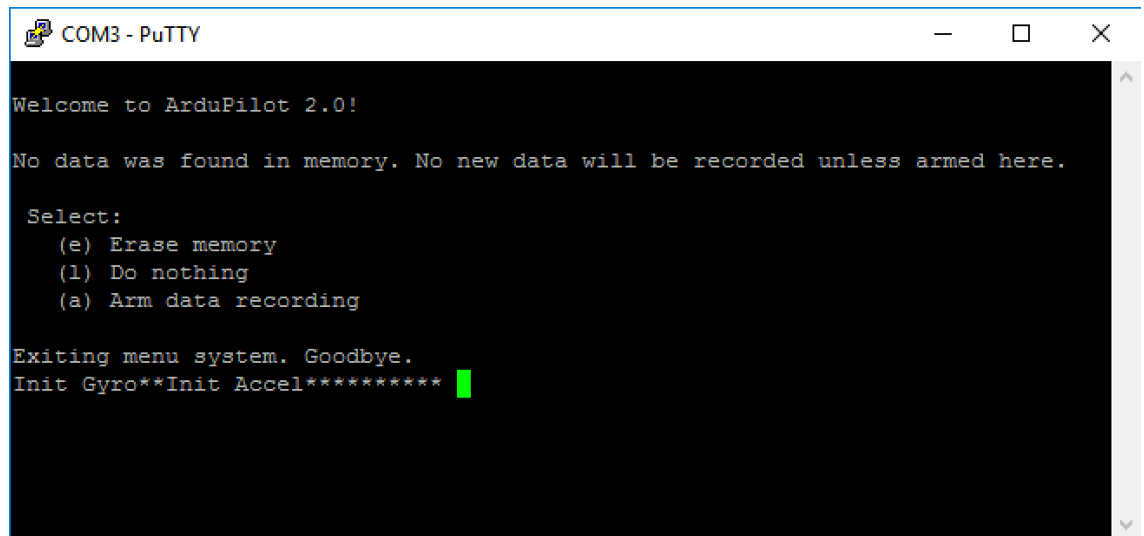


Figura 3.6. Interfaz de acceso a la memoria flash mediante la herramienta PuTTY.

En la Figura 3.6 se puede observar el menú principal del programa en cuestión, el cual una vez seleccionada la opción deseada espera unos segundos para inicializar el giróscopo y el acelerómetro del Arduino y después la ejecuta.

Para guardar datos deben ser borrados previa y manualmente los anteriores mediante la opción *Erase memory*, y seleccionar la opción *Arm data recording*. Tras la inicialización anterior los empezará a almacenar automáticamente, y dejará de hacerlo cuando se desconecte el cable USB que une la placa Arduino al ordenador. Si se restablece la unión entre ambos y se vuelve a acceder a la memoria Flash mediante el Putty aparecerá la opción *Print data*, la cual mostrará en pantalla y en columnas los datos guardados previamente.

Para mover estos datos a Matlab la mejor opción y la que se ha usado en este proyecto ha sido copiarlos a un archivo de texto (extensión .txt) e importarlos al propio Matlab mediante la herramienta *Import Data* (Figura 3.7).

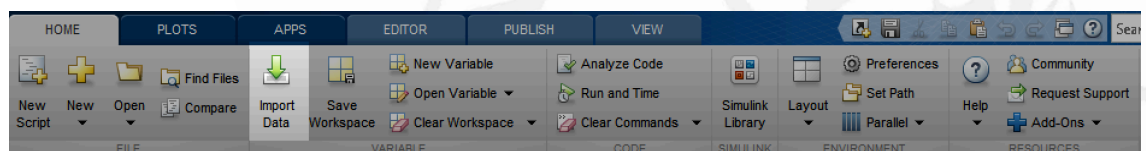


Figura 3.7. Atajo de acceso a la herramienta Import Data.



Con esta herramienta se puede crear un script que cargue las columnas de datos en el workspace de Matlab como vectores con el nombre seleccionado. Así se podrá trabajar con los datos guardados en la Flash de manera rápida y eficiente.

3.1.3 UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL (IMU)

El diseño del sistema de suspensión se basa en controlar tres variables de estado, los ángulos de cabeceo (pitch) y balanceo (roll) del chasis y la aceleración vertical del mismo. Las tres se pueden medir en cada instante gracias a la unidad de medición inercial (IMU) [17] interna del Arduino APM. Además, en este proyecto no es necesario conocer la posición del vehículo en cada instante, se confía en la habilidad del conductor para no chocar, por lo que los magnetómetros de la unidad no van a ser necesarios.

Un giróscopo [18] es un instrumento capaz de medir las velocidades angulares de un cuerpo. La IMU consta de tres giróscopos, uno para cada eje, de modo que la medida resultante es la velocidad angular total expresada en los ejes del cuerpo (sistema solidario).

Los acelerómetros [19] son capaces de medir las aceleraciones en un eje, siendo insensibles a las aceleraciones ortogonales a éste. Igual que sucede con los giróscopos, la IMU cuenta con 3 acelerómetros orientados en los 3 ejes para poder medir la aceleración total en el sistema solidario al cuerpo.

Para hacer uso de la IMU en la herramienta Simulink se colocará el bloque de su propia librería antes citada “6-DOF IMU”, el cual tiene siete salidas.

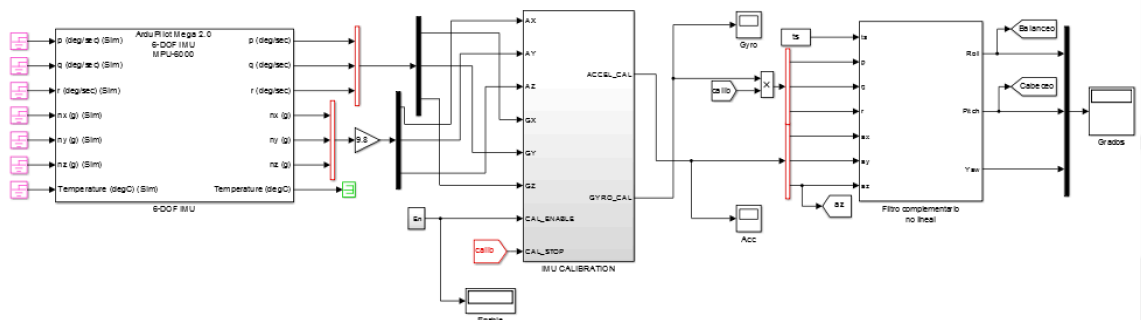


Figura 3.8. Esquema de obtención de ángulos reales desde la IMU,

Como podemos observar en la Figura 3.8 la última salida del bloque es la temperatura, la cual en principio no se va a tener en cuenta en este proyecto. Las otras seis se dividen en dos grupos de tres, el primero referido al giróscopo y el segundo (multiplicado por la gravedad) referido al acelerómetro.

Calibración

En la Figura 3.8 además podemos observar a continuación de la IMU otro bloque, el de calibración, el cual viene explosionado en la Figura 3.9 a continuación. Este bloque cuenta con dos entradas externas que no provienen de la IMU, el *enable*, el cual permite su actuación cuando es un 1, y el *calib*, el cual se pone a 0 al haber terminado la calibración y convierte el propio bloque desde ese instante en una ganancia sin efecto. Esta última variable proviene de la máquina de estados, la cual se explicará más adelante.

Además, todas las constantes que intervienen en este bloque y sus respectivos sub-bloques de la Figura 3.8 son definidas en el archivo “Config_SIMULATOR.m”, el cual está adjunto en el Anexo A.

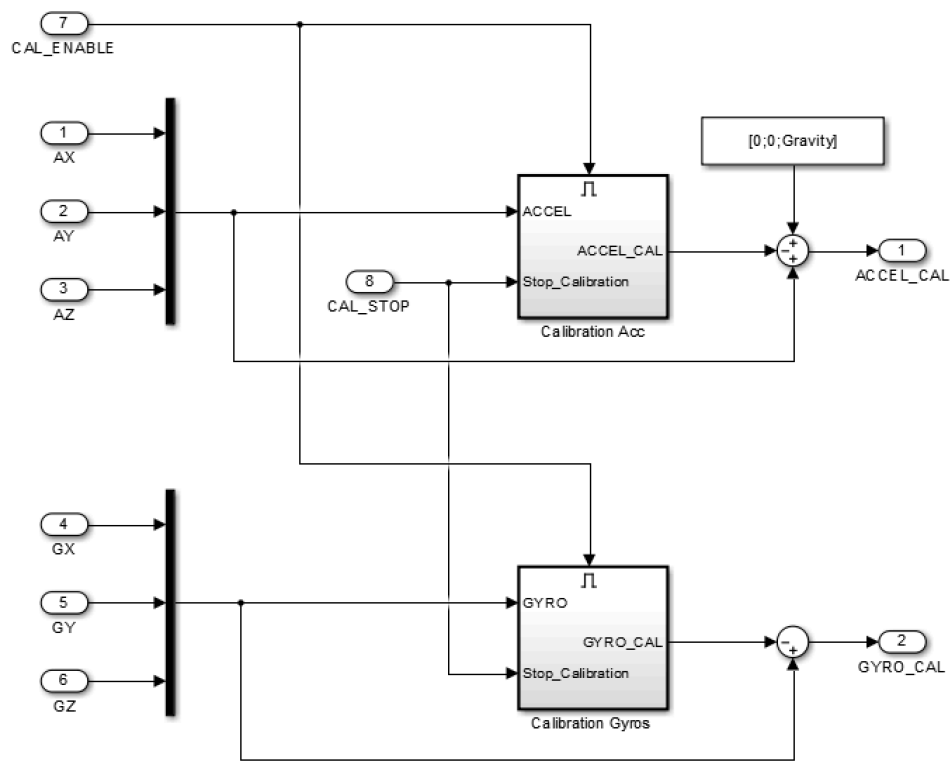


Figura 3.9. Interior del bloque de calibración de la IMU.

La calibración dura cinco segundos, y es necesaria para que los integradores del filtro que viene a continuación no acumulen y sumen error desde el principio y las variables estimadas sean reales. Así el filtro sólo empezará a actuar cuando haya acabado la calibración.

Filtro complementario

En este proyecto se usa un filtro complementario no lineal [20], el tercer bloque que se puede observar en la Figura 3.8, justo después de la calibración. Este filtro actúa parecido a un filtro de Kalman [21], transformando las seis variables de su entrada en los tres ángulos de giro del Arduino Mega en cada instante de tiempo respecto a una referencia inicial.

Este filtro combina las medidas de giróscopos y acelerómetros eliminando primero las componentes que desvirtúan la medida. Por eso se pasan las medidas de los giróscopos por un filtro paso alto, que elimina el error de medida que es aproximadamente constante a la misma temperatura, y la medida de los acelerómetros por un filtro paso bajo, para quedarse con el valor fijo que es la gravedad.

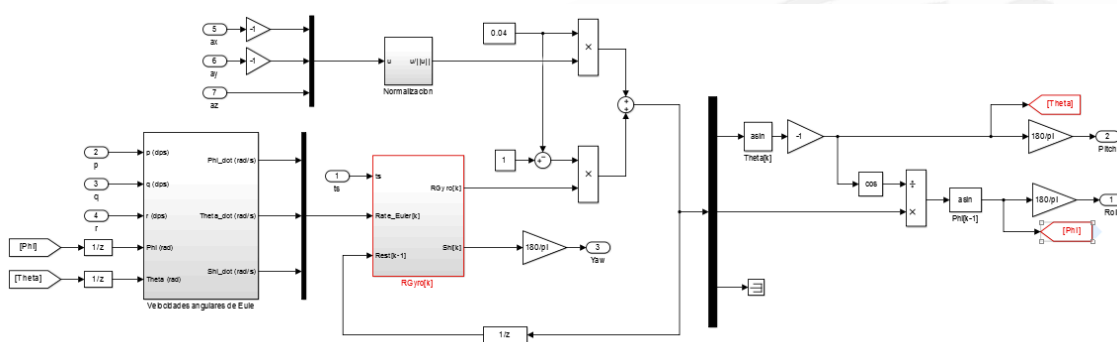


Figura 3.10. Interior del filtro complementario no lineal.

En la Figura 3.10 se puede observar su interior. Un detalle a destacar es que hay dos pesos (uno del giróscopo y otro del acelerómetro) que han de ser calibrados para asegurarse del correcto funcionamiento del filtro. Estos pesos deben sumar uno, y su calibración se hará con los sensores infrarrojos y se explicará en la siguiente sección.

Mission Planner

Además es necesario calibrar también el propio Arduino APM con la herramienta Mission Planner [22] como se puede ver en la Figura 3.11. Siguiendo los pasos de la configuración básica y girando el Arduino se conseguirá que detecte los ángulos cero como tales y no haya posteriores errores.



Figura 3.11. Menú principal del programa Mission Planner.

3.1.4 CALIBRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS SENSORES IR

En el apartado 2.4 ya se habló de la elección y montaje de estos sensores, por lo que esta sección se centrará en el método de uso de los mismos. Según la Figura 2.11 incluida en el *datasheet* del sensor, estos tienen una tensión analógica diferente a su salida según la distancia que midan, dando lugar a errores cuando esta distancia es menor que 1.2 cm o mayor que 15 cm. Para crear esta relación se utiliza en Simulink la herramienta *LookUp Table* [23], la cual como se observa en la Figura 3.12 permite definir manualmente los valores de entrada y salida según la gráfica original.

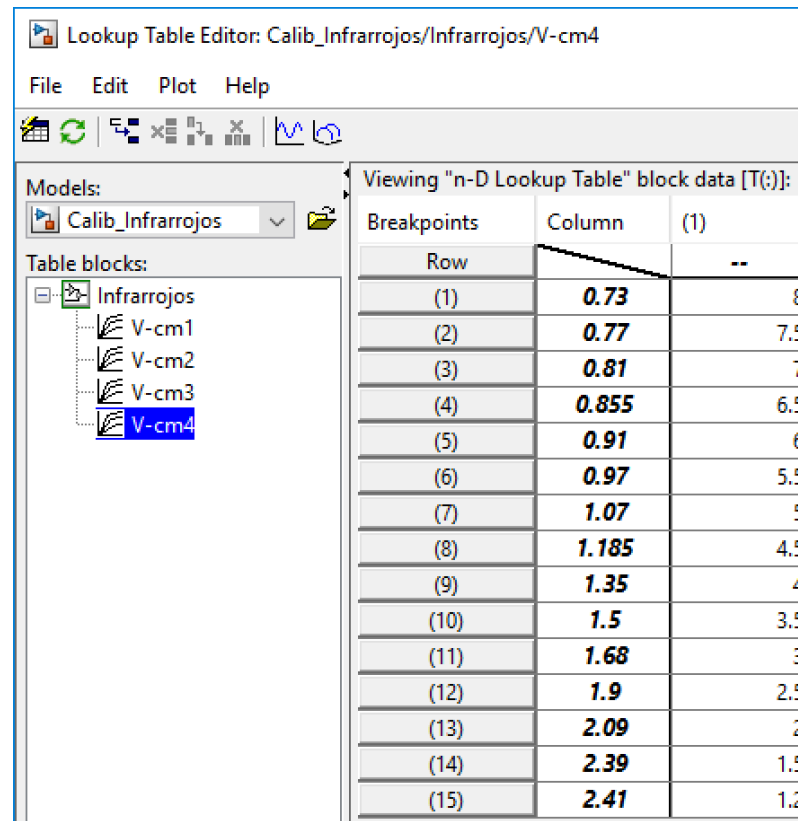


Figura 3.12. Valores de las LookUp Tables de los sensores IR.

Cabe destacar que los *breakpoints* deben ser siempre ascendentes, por lo que fue necesario que escribir la tabla en sentido contrario a la del *datasheet* original.

Sin embargo, a esta tabla debe llegarle una tensión, y para leer estos sensores (al igual que las señales cuadradas del *encoder*) con el Arduino Mega se utiliza la herramienta *Analog Input* de la librería de Simulink ArduPilot 2 Target. Este bloque da una señal que varía entre 0 y 1023 y que va de 0 a 5 V, por lo que la conversión necesaria para pasarla a tensión no es muy difícil de imaginar.

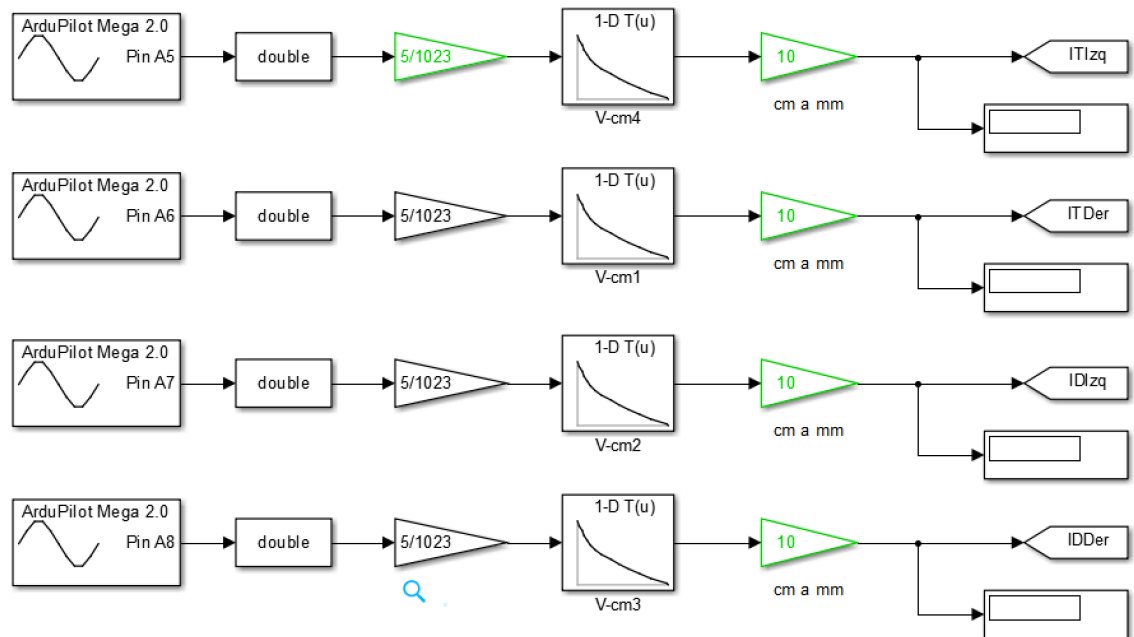


Figura 3.13. Conversión de la lectura de los sensores a milímetros.

Como se puede observar en la Figura 3.13 es necesario transformar el valor a double antes de la conversión, ya que esta realiza una operación $(5/1023)$ que probablemente conlleve decimales. Tras la *Look-Up Table* explicada anteriormente simplemente se multiplica por 10 para tener la distancia a trabajar en milímetros y ahorrarnos algunos decimales. Con esto se consiguen cuatro variables las cuales indican en tiempo real los milímetros que mide cada sensor en cada instante con total fiabilidad.

Calibración de los sensores IR

Una vez que los sensores funcionan en perfecto estado es el momento de usarlos para calibrar el filtro complementario no lineal de la IMU.

Ensayo

Para ello lo primero será realizar un ensayo en el cual se someta al vehículo a un movimiento de cabeceo y balanceo conjunto ordenado según dos señales PRBS [24], cada una guiando uno de estos movimientos. Dado que la memoria de Simulink respecto a este tipo de procedimientos es limitada se ha creado una PRBS el doble de larga y se dividirá por la mitad, algo mucho más eficiente para el programa que crear dos señales.

Dado que quiere simular un comportamiento adecuado del filtro complementario no lineal es necesario guardar en la flash del Arduino los datos de (Figura 3.14):

- Ambas entradas PRBS que guían los movimientos del coche.
- Los seis parámetros que van de la IMU al filtro.
- Los ángulos de alabeo y cabeceo del automóvil calculados mediante los sensores IR y su trigonometría asociada explicada más adelante en la sección 4.2.1.1.

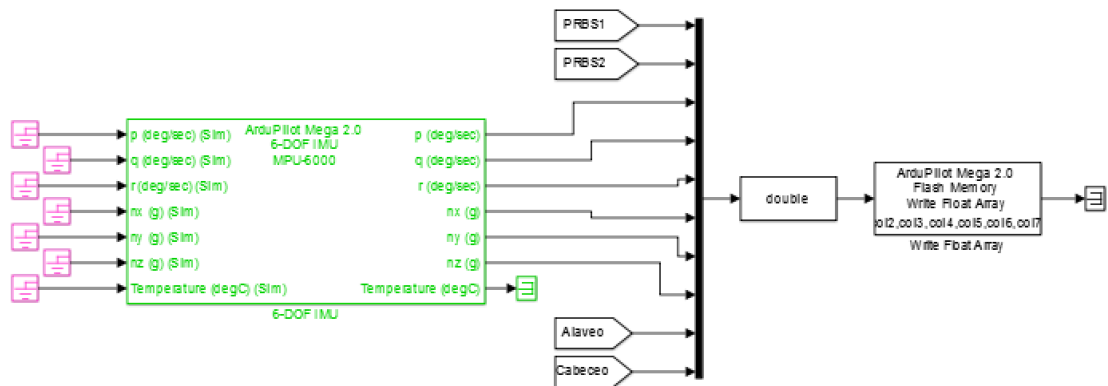


Figura 3.14. Entradas de la memoria flash en el ensayo de calibración de los sensores IR.

Estos datos se guardarán importándolos a Matlab tal y como está explicado en la sección de uso de la Flash (3.1.2) y se ejecutarán los dos archivos .m siguientes en orden: IMU_param_prep_datos.m e IMU_param_ajuste.m. El código explícito de ambos está en el Anexo B y en el Anexo C, respectivamente, y el objetivo de cada uno se explica a continuación.

IMU_param_prep_datos.m

Este archivo se asegura de cargar los datos del ensayo, los dibuja con el comando *plot* y hace elegir la zona de los datos que se considera más real para preparar el ajuste (en la Figura 3.15. por ejemplo, habría que desechar la parte final del ensayo).

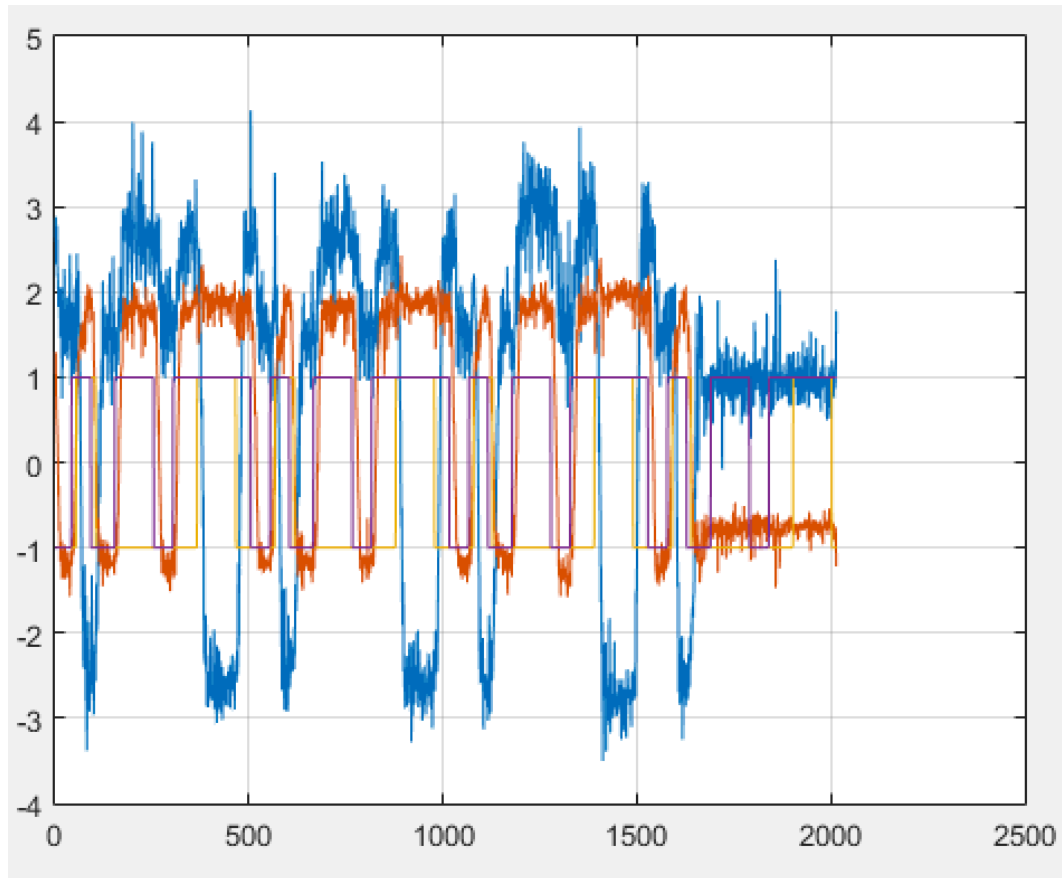


Figura 3.15. Ejemplo de datos a preparar por el fichero IMU_param_prep_datos.m.

IMU_param_ajuste.m

Este archivo intenta ajustar un valor para los parámetros definidos como “th” (en este caso el peso del giróscopo, Figura 3.16. en el Simulink llamado “IMU_param_sistema”. Este ajuste se lleva a cabo conociendo las entradas y las correspondientes salidas del sistema según los datos del ensayo realizado previamente.

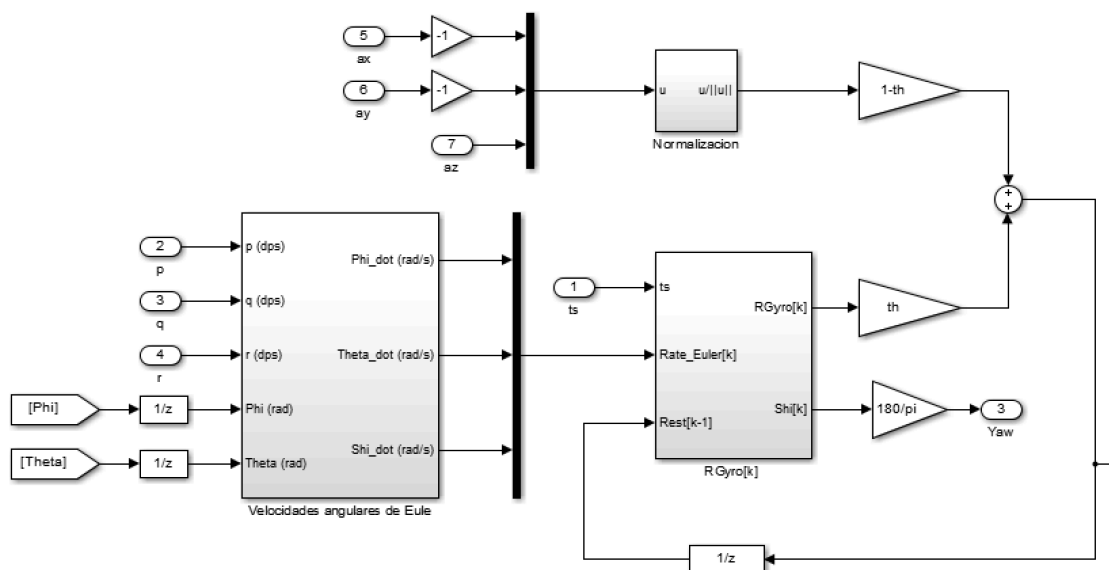


Figura 3.16. Diagrama de ajuste del peso del giróscopo.

Como se puede observar en la Figura 3.17 se simula el funcionamiento del filtro de la IMU y mediante el algoritmo de estimación por mínimos cuadrados [25] se intenta ajustar el parámetro o parámetros del sistema minimizando el error entre lo simulado y la salida real del ensayo.

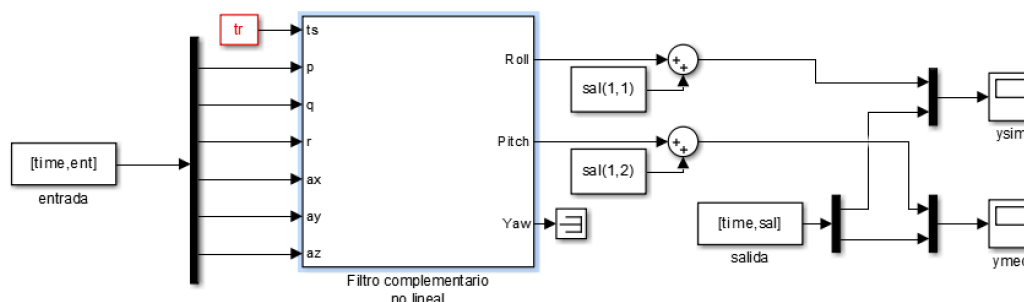


Figura 3.17. Esquema de la simulación iterativa del filtro complementario no lineal.

Tras este ajuste el parámetro θ_h tomó un valor de 0.99 (dejando el peso del acelerómetro a 0.01), algo con mucho sentido, ya que en el automóvil y para nuestro objetivo son mucho más importantes los datos del giróscopo que los del acelerómetro. Además, un peso más alto en el acelerómetro podría provocar que se tuviera en cuenta la aceleración del coche en sus propio eje al arrancar y los controles intentarían corregirla, logrando lo contrario.

Resultados

Si una vez terminado el ajuste de datos (o simplemente se ejecuta el archivo simulador IMU_param_sistema, Figura 3.17) se observan los osciloscopios que reflejan los ángulos de Roll y Pitch se puede ver claramente que el ajuste ha sido un éxito, y que los pesos han sido ajustados con una gran precisión (Figura 3.18).

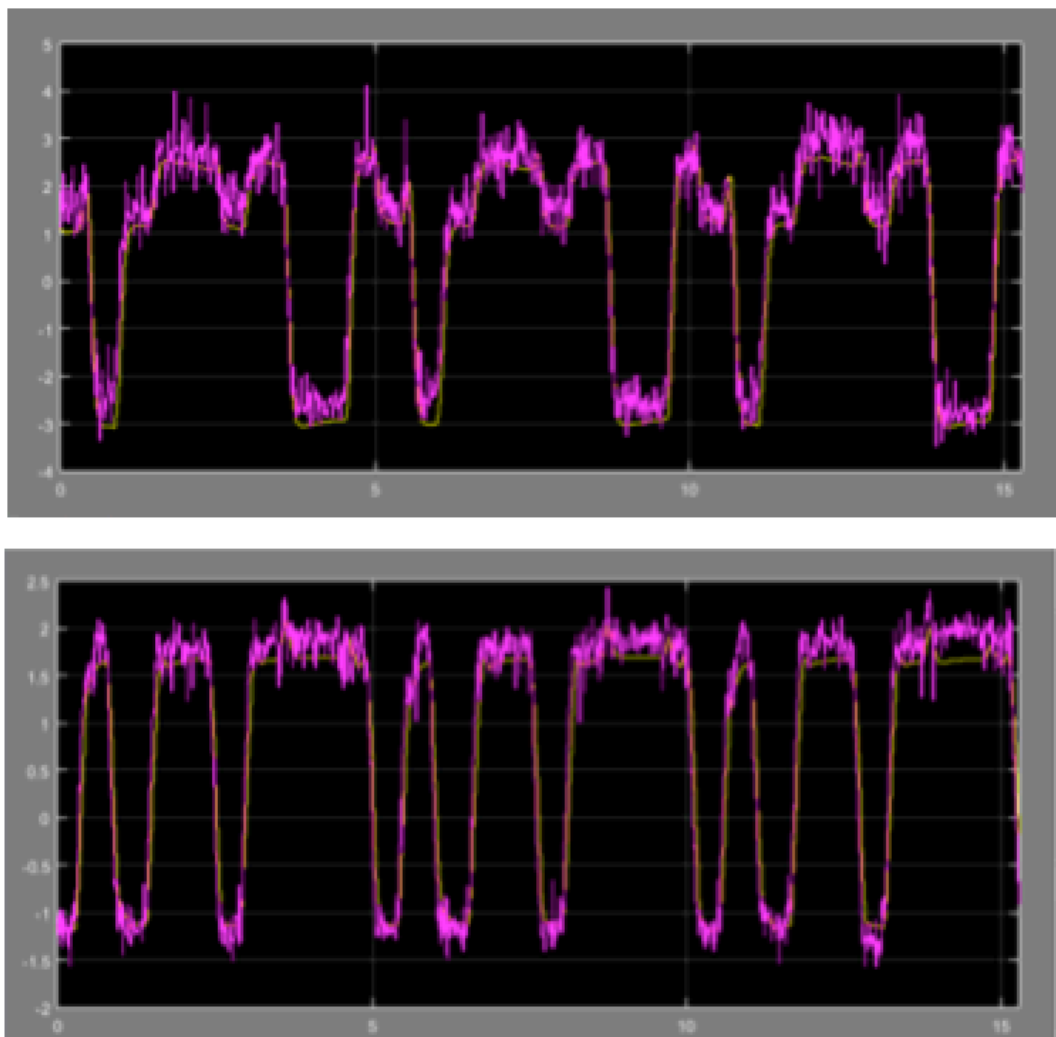


Figura 3.18. Comparación entre los resultados del ensayo real y la simulación de los ángulos de cabeceo (arriba) y balanceo (abajo).



3.1.5 SEGUIMIENTO DE VELOCIDAD

La monitorización y el control de velocidad del automóvil durante este proyecto se ha intentado llevar a cabo mediante dos métodos que se verán a continuación, pero primero se va a explicar por qué es necesario tal control:

- A pesar de conocer en tiempo real la orden de avance que se envía con la emisora al motor no se puede verificar que el coche vaya a esa velocidad real, ya que podría estar en un plano inclinado o ser falsa en algún badén del asfalto.
- Esta orden de avance directa de la emisora conmuta como un cambio rápido en la señal PWM que le llega al motor, de modo que actúa prácticamente como un escalón, mientras que para un correcto funcionamiento fino y suave debería actuar más bien como una rampa.
- El coche al arrancar recibe una fuerte aceleración en su eje x (el de la “carretera” que va a seguir), por lo que una vez instaurados los controles, los actuadores intentarán corregirla. Para que esto no suceda debemos medir la velocidad en cada instante, derivarla para calcular la aceleración en dicho eje x y restar esta a la medida de la IMU antes del filtro complementario no lineal.

Con los motivos totalmente justificados, a continuación se van a explicar los dos métodos que se probaron para seguir dicha velocidad.

Encoder

El *encoder* [26] usado en este proyecto funciona leyendo en los pines 0 y 2 del Arduino Mega las ondas cuadradas que el ESC envía al motor brushless en cada instante. A este motor le llegan tres ondas cuadradas como se ha explicado anteriormente, pero con leer sólo dos podemos contar las revoluciones que da el mismo por minuto, las cuales nos indican la velocidad real de las ruedas.

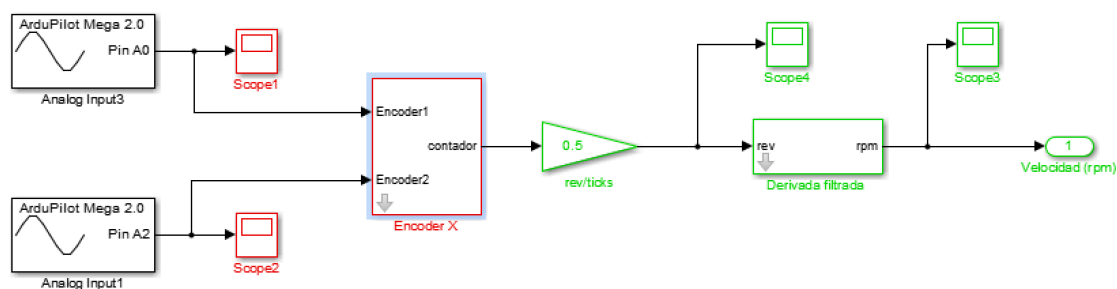


Figura 3.19. Conversión de la lectura de los encoders a velocidad real (en rpm).

Cabe decir, como se ve en la Figura 3.19, que existen dos tiempos de muestreo (diferenciados con colores) en el sistema: uno de 0.001 s para la lectura de las señales y otro de 0.01 s para filtrar y transformar esta en revoluciones por minuto. Esto es necesario porque las ondas cuadradas que envía el ESC tienen un período muy pequeño (0.005 s), por lo que para no perder muestras se ha seguido el teorema de Nyquist [27] y se ha escogido un tiempo de muestreo menor de la mitad de ese período.

El bloque ‘*Encoder X*’ anterior se muestra extendido en la Figura 3.20. Su objetivo es contar *ticks* por cada flanco (tanto de subida como de bajada) de las ondas cuadradas que llegan motor. Es por eso que es necesario multiplicar su salida por una ganancia de 0.5 para hallar las vueltas reales por minuto, las cuales coinciden con el número de períodos por minuto de las señales.

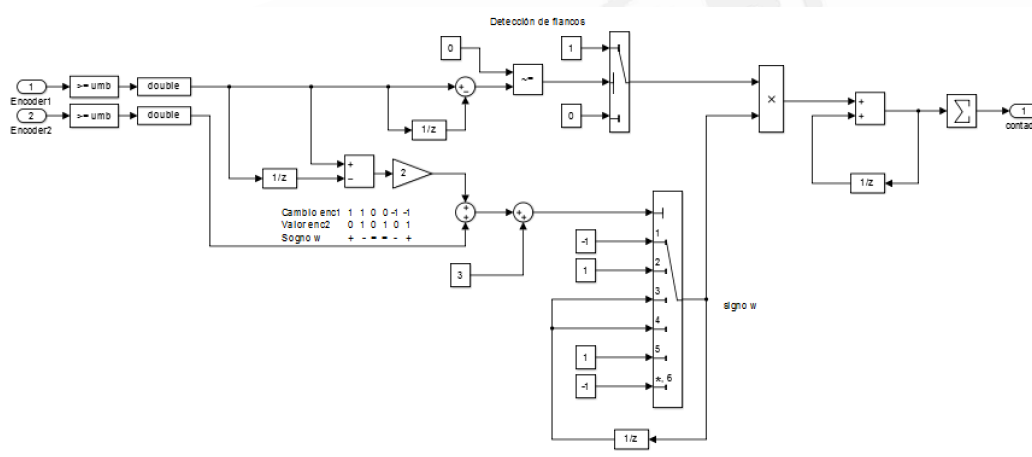


Figura 3.20. Interior del bloque ‘Encoder X’.

El derivador explosionado en la Figura 3.21 es el último componente del sistema de cálculo de la velocidad real del vehículo. Multiplica por 60 para pasar las revoluciones de segundos a minutos, y además aplica un filtro en tiempo discreto para regular el ruido a la salida. La constante (alfa) de este filtro debe regularse, ya que aproximadamente es el tiempo que el motor tarda en pararse cuando no detecta señal. Tras varias pruebas con el motor para conseguir la mejor relación ruido-precisión de la medición del *encoder* se fijó su valor en 0.08 segundos.

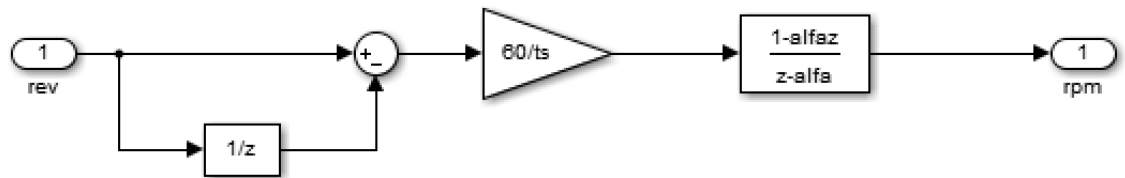


Figura 3.21. Interior del bloque 'Derivada filtrada'.

El problema de este método y el por qué fue descartado es que al implantarlo en el Arduino Mega, este último no era capaz de llevar a cabo el muestreo a un tiempo tan bajo como 0.001 segundos, por lo que se perdían muestras del *encoder*. Esto hacía que la medición de la velocidad real fuera inestable y falsa.

Look up Table

Dado que el primer método que se intentó no funcionó fue necesario ingeniar otro método para medir la velocidad del coche en cada instante: usar una *Look-Up Table* para transformar el PWM [28] de la emisora a metros/segundo.

Para crear esta tabla fue necesario hacer un ensayo en el que con la memoria Flash se guardara el PWM constante que se recibía de la emisora (capado entre 1500 y 1650 para no exceder una velocidad normal). Además con un cronómetro se midió el tiempo exacto que el coche tardó en recorrer 6.28 (2π) metros a tres diferentes velocidades. Los datos del ensayo fueron satisfactorios, ya que la tabla resultante se puede ver en la Figura 3.22 y es lineal.

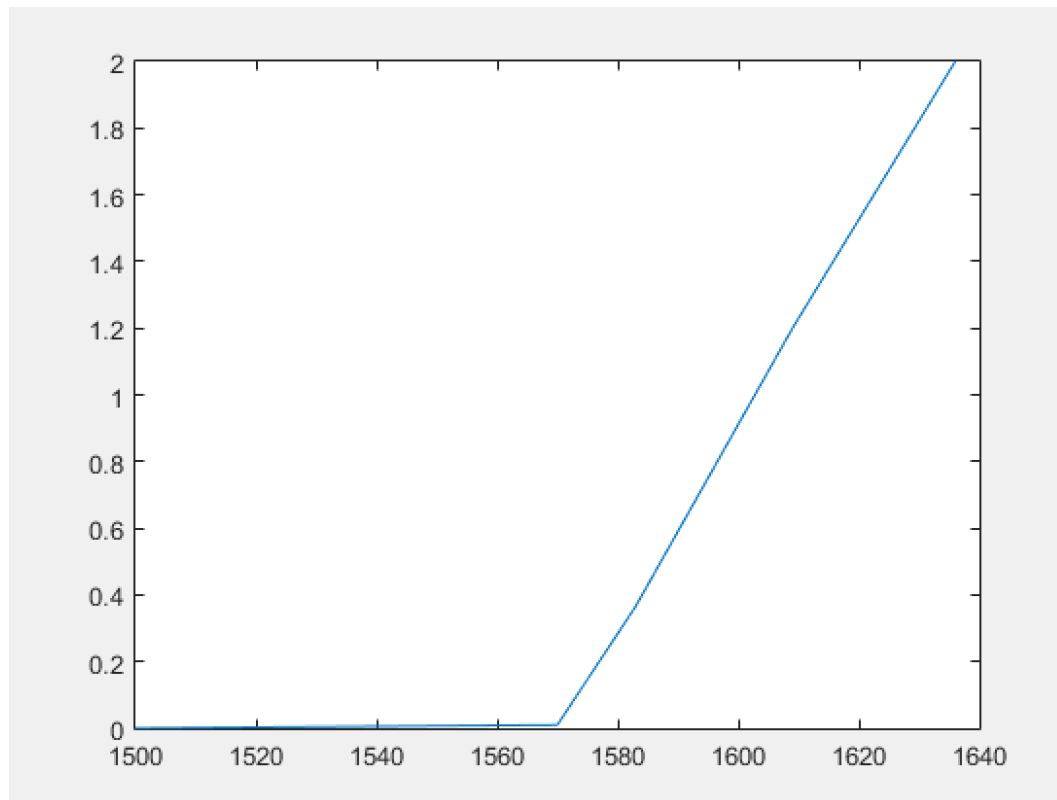


Figura 3.22. Gráfica que transforma el PWM de la emisora en velocidad real (m/s).

Cabe decir que el coche no arranca hasta que no recibe una señal PWM superior o igual a 1570, por eso en la gráfica la velocidad es cero hasta ese valor.

Como se puede observar en la Figura 3.23 esta *Look-up Table* se implementa entre la lectura del mando de velocidad del coche (canal 3) de la emisora y su llegada al ESC por medio del bloque *RC Write*.

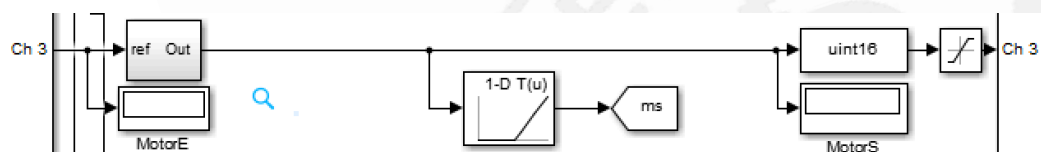


Figura 3.23. Flujo de datos del canal 3 del receptor a su respectivo actuador.

Se guarda la salida de la tabla, que es la velocidad del coche en metros/segundo como la variable “ms”, y como se observa en la Figura 3.24 su derivada calculada mediante el bloque ‘*Derivative*’ se resta en cada instante a la aceleración horizontal (eje X coincidente con la carretera) que entra al filtro complementario no lineal (explicado en la sección 3.1.3).

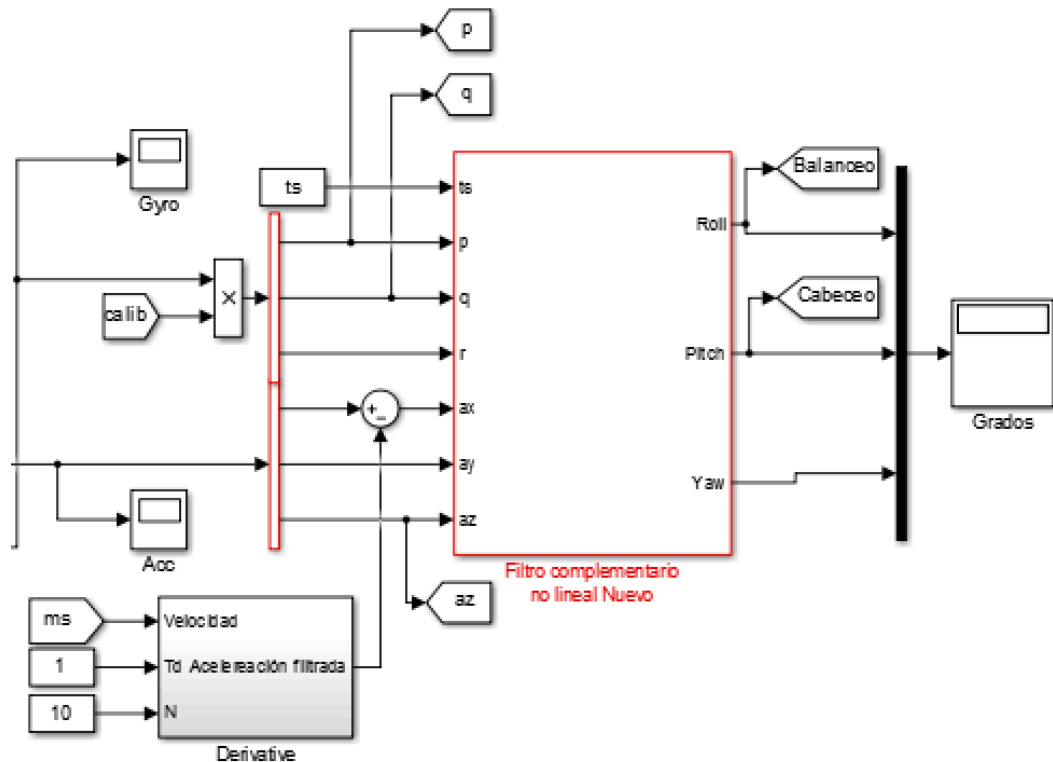


Figura 3.24. Detalle de la corrección de la aceleración en el eje X a la entrada del filtro complementario no lineal.

Se puede observar el interior del bloque ‘Derivative’ en la Figura 3.25. Este bloque se usa también en el diseño de los controles, para calcular la parte diferencial de los mismos de manera artificial. En este caso, la variable que se quiere derivar es la velocidad (en m/s), y como no se requiere diseñar un control los valores de Td y N como se puede observar en la Figura 3.24 (1 y 10 respectivamente) están escogidos para influir lo mínimo en la salida del bloque.

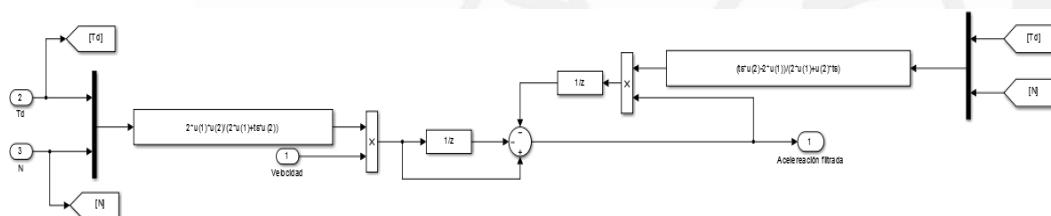


Figura 3.25. Interior del bloque ‘Derivative’.

3.2 SISTEMA DE COMUNICACIONES

3.2.1 CONEXIONADO DEL ARDUINO MEGA 2560

La placa Arduino ArduPilot que se usa en este proyecto está adecuada para un contexto de radiocontrol, por lo que tiene incorporadas ocho entradas para recibir los mandos PWM que la emisora envía al receptor.

Por supuesto, al ser un Arduino Mega 2560 tiene gran cantidad de entradas digitales, las cuales se han usado para leer los cuatro sensores infrarrojos de los que se ha hablado en la sección 3.1.4. Además, el seguimiento de velocidad de la sección 3.1.5 mediante *encoders* hacía uso de estas entradas para leer las fases que el ESC envía al motor.

Las salidas de la placa están conectadas a los actuadores que han de moverse según las órdenes del microprocesador, es decir, los cuatro micro servomotores del sistema de amortiguación activo, el motor Brushless que controla la velocidad del vehículo y el servomotor que modula la dirección de avance del coche.

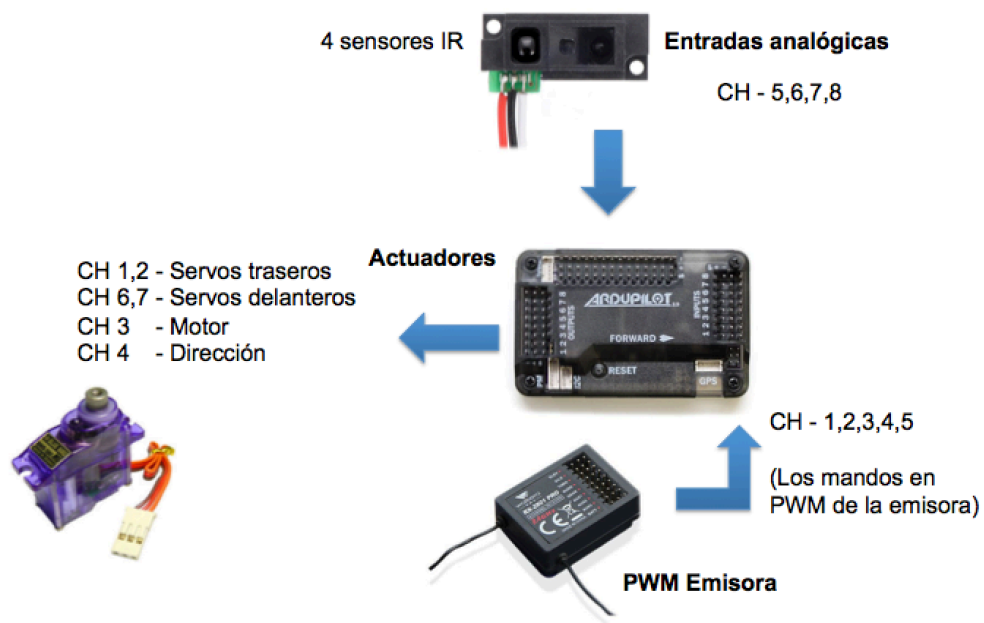


Figura 3.26. Diagrama de conexiones del Arduino Mega.

3.2.2 EMISORA Y RECEPTOR

Para controlar el prototipo realizado en este proyecto se van usar la emisora de marca Walkera WK-2801 PRO y su respectivo receptor (Figura 3.27). Tienen 8 canales y funcionan a 2.4 Ghz, lo que las hace suficientes, ya que se usarán sólo 5 canales y su frecuencia es muy cómoda de manejar.



Figura 3.27. Emisora Walkera WK-2801 PRO (izquierda) y su receptor (derecha).

Los mandos se pueden clasificar en *sticks*, que varían su valor de manera analógica al desplazarlos linealmente y *switches*, que tienen dos o tres posiciones que funcionan como señales digitales.

En el conexionado del receptor se utilizan los 5 primeros canales del mismo, los cuales se envían al Arduino Mega en el mismo orden y corresponden a los siguientes actuadores de la emisora:

- Canal 1: eje X *stick* izquierdo.
- Canal 2: eje Y *stick* izquierdo.
- Canal 3: eje X *stick* derecho.
- Canal 4: eje Y *stick* derecho.
- Canal 5: *switch* superior central izquierdo.



El uso de la emisora para conducir el vehículo se ha configurado de manera instintiva, de forma que el *stick* izquierdo modula la velocidad del motor (dirección vertical) y la dirección de las ruedas delanteras (dirección horizontal), mientras que el derecho conlleva un movimiento de cabeceo (dirección vertical) o alabeo (dirección horizontal) en el coche, pero únicamente mientras el *switch* asociado al canal 5 está en su posición superior, indicando modo manual. En el modo automático el *stick* derecho no realiza ninguna acción.

3.3 MÁQUINA DE ESTADOS

En este proyecto se va a usar sólo una máquina de estados [29], y además muy sencilla. Su objetivo es simplemente empezar la calibración y mantenerla durante seis segundos. Por tanto sólo hay dos estados: no calibrado y calibrado.

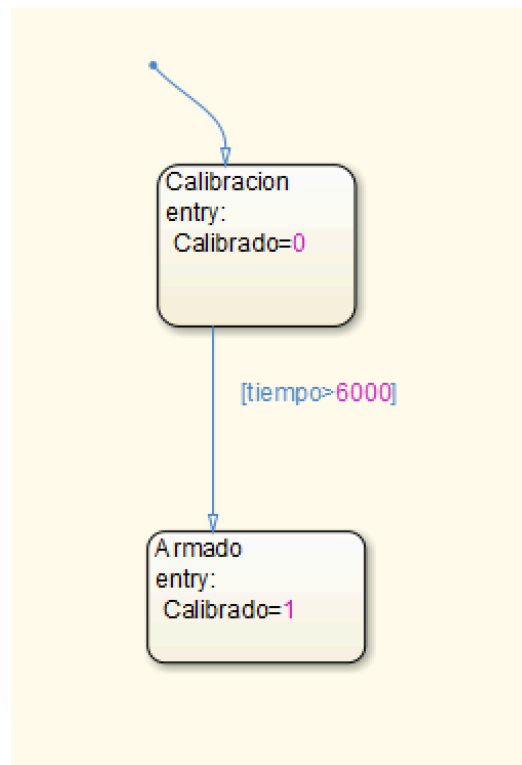


Figura 3.28. Máquina de estados que rige la calibración de la IMU.

Como se puede observar en la Figura 3.28, en el primero la variable “calibrado” es igual a cero, y tras pasar seis segundos, la máquina cambia de estado automáticamente y la variable “calibrado” pasa a valer uno, valor que no vuelve a cambiar hasta que se reinicia el Arduino.

Estos segundos son contados por un reloj interno (Figura 3.29), el cual tiene en cuenta el tiempo de muestreo del programa (0.01 segundos) y deja de contar y se hace cero cuando la variable “calibrado” toma el valor uno.

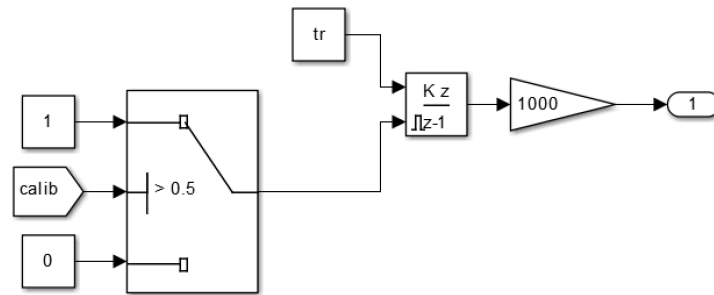


Figura 3.29. Reloj interno de la máquina de estados.

Además, observando la Figura 3.30 se puede ver que que la variable “calibrado” se asigna al tag “calib” usado en el reloj (Manual Clock), y que para que todo esté sincronizado ha sido necesario añadir un pequeño *delay* del mismo tiempo de muestreo a esta misma variable. Por último, cabe también decir que se ha usado el bloque “LED Yellow” para encender un pequeño LED amarillo en el Arduino que indica cuando la calibración ha terminado.

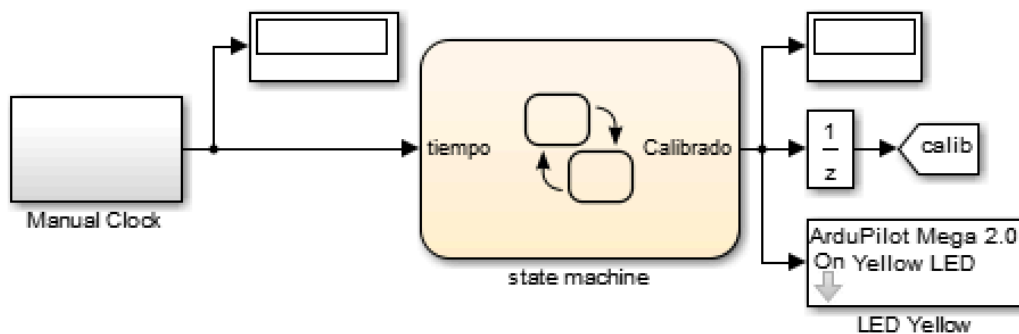


Figura 3.30. Diagrama externo de la máquina de estados.

Capítulo 4 PARAMETRIZACIÓN DEL SISTEMA DE AMORTIGUACIÓN

4.1 *MODELO TEÓRICO*

Para crear un entorno de simulación se ha intentado representar en Simulink el modelo de estado del coche descrito en [30]. En el paper se explica la representación de estado del modelo de suspensión pasiva (Figura 4.1), activa (Figura 4.2) y del vehículo entero de ambas formas. En este apartado se explicará el modelo de suspensión activa del vehículo completo (Figura 4.3).

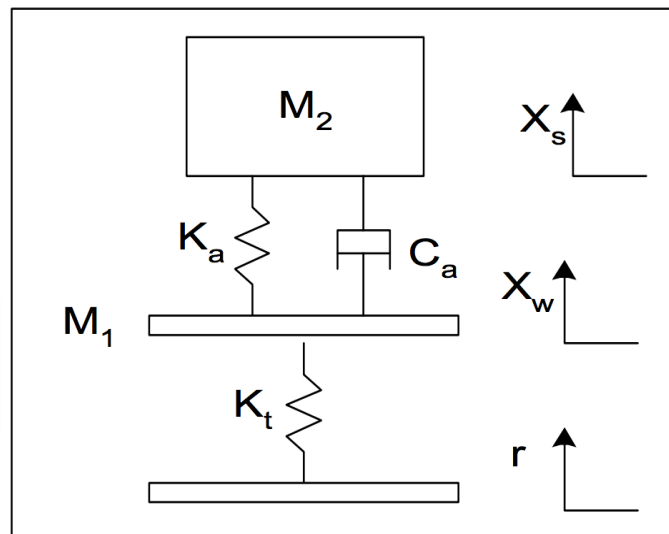


Figura 4.1. Modelo matemático de una amortiguación pasiva.

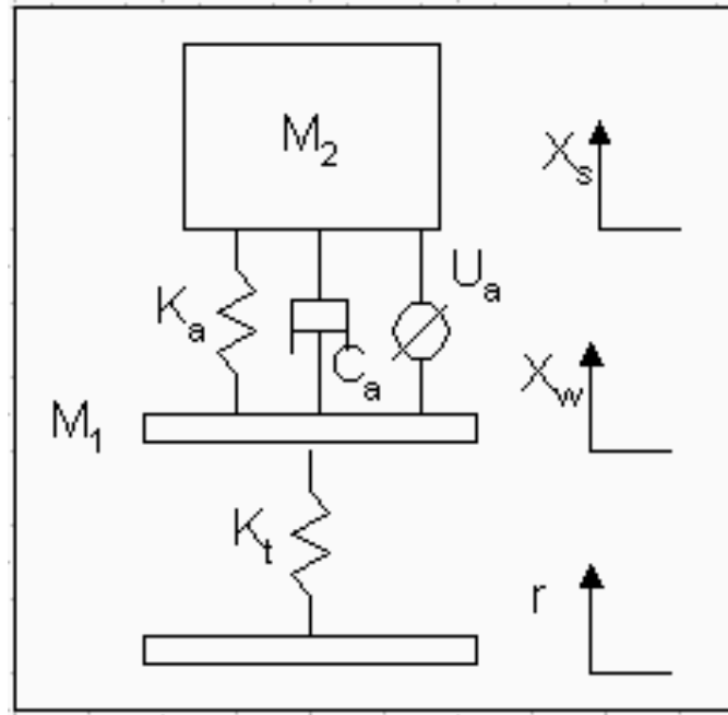


Figura 4.2. Modelo matemático de una amortiguación activa.

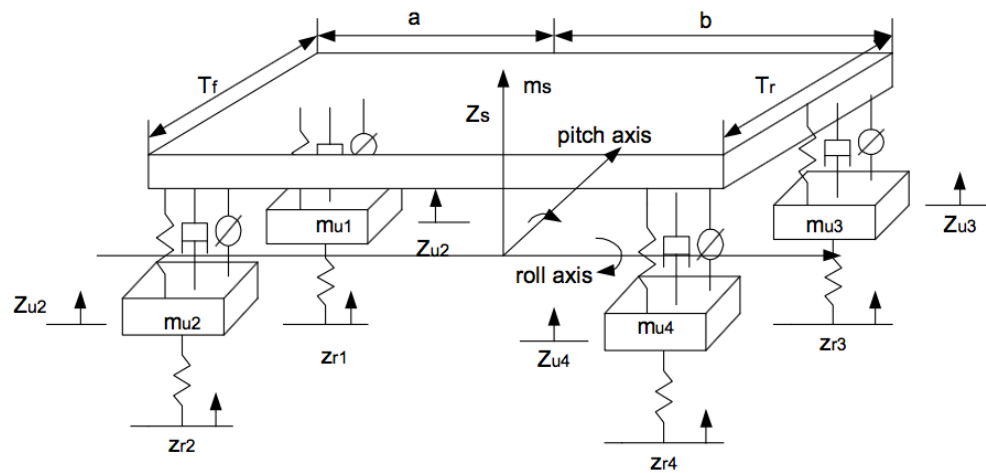


Figura 4.3. Modelo matemático de un vehículo completo con suspensión activa.

La representación se ha llevado a cabo modelando en Simulink el vehículo de la misma forma. Los parámetros del coche a tener en cuenta son:

- m_s = masa del chasis (kg)
- m_{uf} , m_{ur} = masas de las ruedas frontales y traseras respectivamente (kg)
- I_p , I_r = momentos de inercia de balanceo y cabeceo (kg m²)



- Z_s = desplazamiento vertical del chasis (m)
- $Z_{s1}, Z_{s2}, Z_{s3}, Z_{s4}$ = desplazamiento del chasis en cada esquina (m)
- $Z_{u1}, Z_{u2}, Z_{u3}, Z_{u4}$ = desplazamiento de las ruedas (m)
- T_f, T_r = distancia entre los amortiguadores delanteros y traseros (m)
- a = distancia de la masa del muelle a la rueda delantera (m)
- b = distancia de la masa del muelle a la rueda trasera (m)
- b_f, b_r = viscosidad de los muelles delanteros y traseros (Nm/s)
- k_f, k_r = rigidez de los muelles delanteros y traseros (N/m)
- k_{tf}, k_{tr} = rigidez de las ruedas delanteras y traseras (N/m)

Se usan catorce variables de estado en dicha representación, las cuales se pueden observar en la Tabla 4.1.

Variables	Definición
φ_s	Ángulo de balanceo
$\partial\varphi_s$	Velocidad angular de balanceo
θ_s	Ángulo de cabeceo
$\partial\theta_s$	Velocidad angular de cabeceo
Z_s	Desplazamiento vertical
∂Z_s	Velocidad vertical
Z_{u1}	Desplazamiento vertical de la rueda frontal derecha
∂Z_{u1}	Velocidad vertical de la rueda frontal derecha
Z_{u2}	Desplazamiento vertical de la rueda frontal izquierda
∂Z_{u2}	Velocidad vertical de la rueda frontal izquierda
Z_{u3}	Desplazamiento vertical de la rueda trasera derecha
∂Z_{u3}	Velocidad vertical de la rueda trasera derecha
Z_{u4}	Desplazamiento vertical de la rueda trasera izquierda
∂Z_{u4}	Velocidad vertical de la rueda trasera izquierda

Tabla 4.1. Variables de estado del modelo de suspensión activa del vehículo completo.

Dado que algunos de los parámetros anteriores no se pueden medir con claridad de una forma óptima se ha decidido usar el método descrito en el apartado 3.1.4 (calibración de la IMU por medio de los sensores IR). Los parámetros a ajustar son la ganancia de los mandos, los dos momentos de inercia, la viscosidad del amortiguador y la rigidez del muelle.

Para verificar los datos de la simulación del modelo teórico se realizó un ensayo conjunto de cabeceo y balanceo con señales PRBS combinadas, y se guardaron los resultados (ambos ángulos de inclinación del chasis) en la memoria Flash.

Usando el diagrama de la Figura 4.4 se ha simulado repetidamente el modelo intentado ajustar los parámetros para que los datos de estas simulaciones coincidan con los del ensayo, pero no se han conseguido resultados concluyentes (ya que no existía gran similitud entre ambos), lo que deja abierta esta línea de investigación a futuros proyectos.

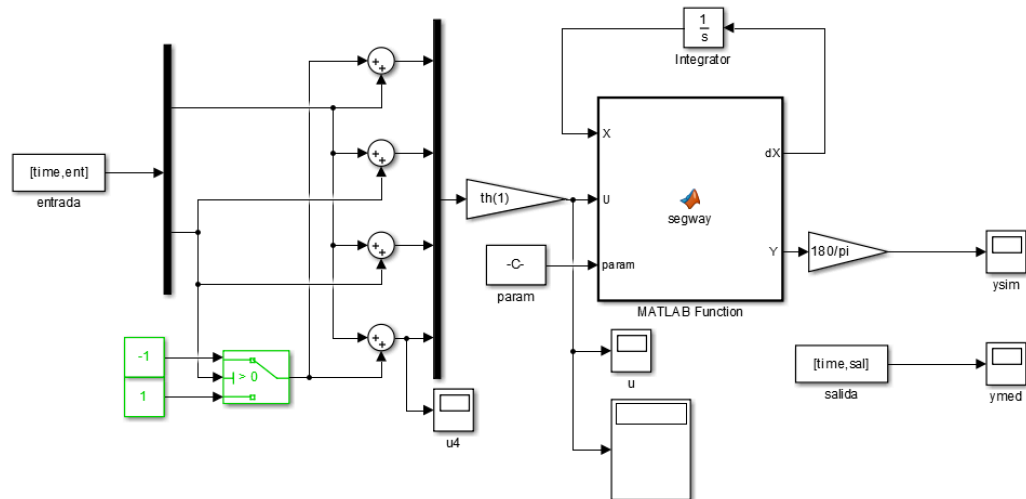


Figura 4.4. Diagrama de simulación iterativa para el ajuste de parámetros del modelo de suspensión activa para el vehículo completo.

4.2 *MODELO REAL*

Para conseguir un modelo real del vehiculo se ha optado por dividirlo en tres plantas consideradas independientes a: balanceo cabeceo y aceleración vertical, y se realizará un ensayo a cada una para obtener su función de transferencia. Para realizar estos tres ensayos se ha de hacer llegar a los actuadores (servomotores) una señal PRBS (Pseudorandom Binary Sequence) con tiempo de muestreo 0.01 segundos definida con el comando de Matlab “idinput” tal como se muestra a continuación:



```
uensayo=idinput(512,'prbs',[0 0.02],[600 2400]);
```

- 512 son las muestras de la señal.
- 'prbs' el tipo de señal a crear.
- [0 0.02] es el rango de frecuencia que tendrá la señal. Se ha escogido un rango muy pequeño, ya que si no los movimientos del coche no tendrían sentido, porque nunca le daría tiempo a alcanzar sus posiciones máximas y mínimas.
- [600 2400] son los valores mínimo y máximo de la señal. Los servos usados se mueven recibiendo señales PWM de rango cercano a 500 y 2500, pero justo en esos valores suelen actuar aleatoriamente, por lo que se ha limitado un poco este rango.

El por qué de elegir este tipo tan concreto de señal es que si se descompone una señal PRBS en armónicos por Fourier se obtiene que todos los armónicos tienen la misma amplitud. Esto permite sacar un modelo que funcione igual a todas las frecuencias.

Además, para que los ensayos duren todo el tiempo necesario, en Simulink se ha usado el bloque "Repeating Sequence" a la entrada del receptor, el cual repite la señal PRBS indefinidamente.

Cabe destacar además, que según la disposición de los cuatro actuadores ha de llegar a ellos una señal PRBS distinta en cada ensayo. Esto se debe a que están situados en forma de espejo los de las ruedas de la izquierda con respecto a los de las ruedas de la derecha. Por tanto, es necesario combinar adecuadamente la PRBS original y su inversa (creada por medio de un bloque switch cuando es necesaria) para lograr que el coche haga el movimiento deseado.



4.2.1 BALANCEO (ROLL)

4.2.1.1 Ensayo

En este ensayo se quiere que el coche se balancee de derecha e izquierda en su rango máximo. Durante el mismo se ha de medir en cada instante con cada uno de los cuatro sensores infrarrojos la distancia al suelo, y con cálculos trigonométricos explicados más adelante se obtendrá el ángulo de alabeo del mismo, el cual es la salida que guardaremos en la memoria flash.

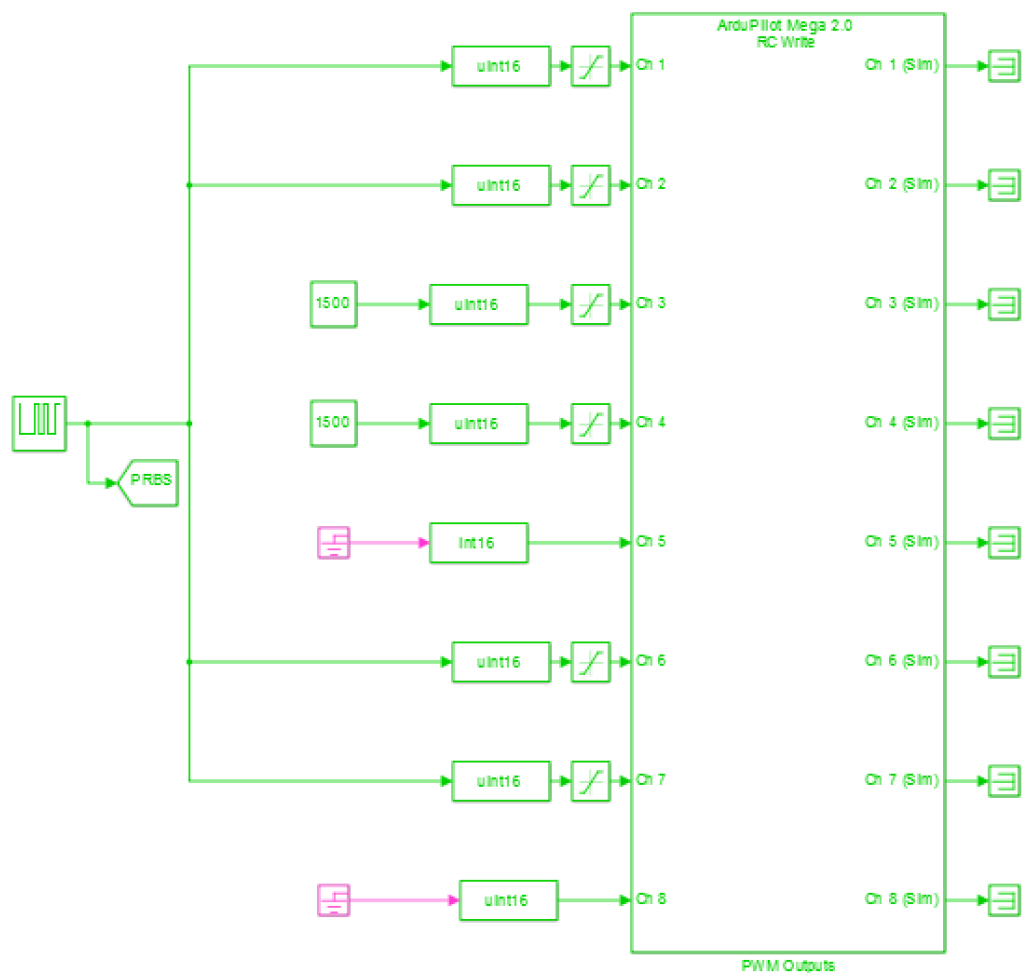


Figura 4.5. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de balanceo.

En la Figura 4.5 se puede observar como en este ensayo debe llegarles a los cuatro servomotores la misma señal PRBS comprendida entre 600 y 2400, por lo que no es necesario usar su inversa. Mediante trigonometría, leyendo los sensores infrarrojos al igual que en la Figura 3.13, se puede calcular la salida deseada en cada instante, el ángulo de alabeo.

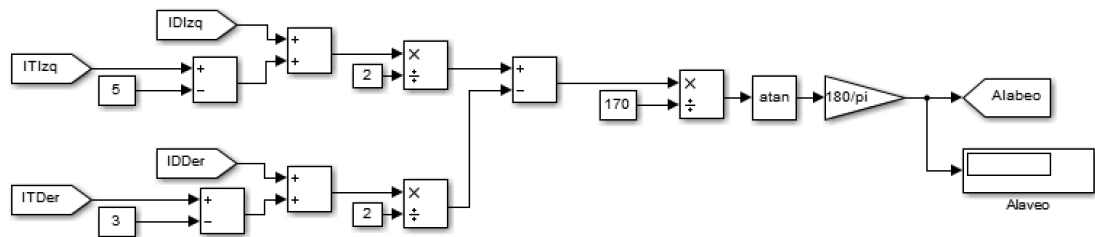


Figura 4.6. Trigonometría asociada al ángulo de balanceo.

El primer paso es obtener mediante *tags* las medidas de los cuatro sensores, pero las dos traseras deben ser corregidas, ya que estos dos sensores se encuentran algo más altos con respecto al suelo que los dos delanteros, concretamente 5 y 2 milímetros, las dos constantes que se restan al inicio del cálculo.

Tras este pequeño ajuste se puede continuar asimilando que los cuatro sensores leen a la misma distancia, por lo que el siguiente paso es llevar el problema a dos dimensiones haciendo la media de los dos sensores de la izquierda y la de los dos de la derecha, es decir, sumándolos y dividiendo entre dos.

Una vez hecho esto se puede plantear un problema trigonométrico bastante básico si se mira el coche desde delante, es decir, desde su posición frontal (Figura 4.7).

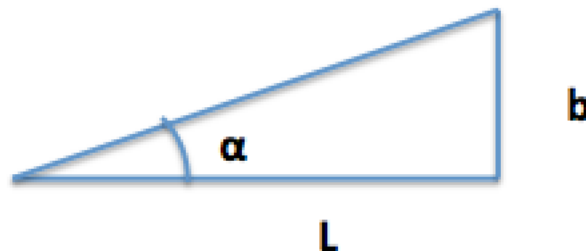


Figura 4.7. Vista frontal del coche simplificada ante una perturbación en su ángulo de alabeo.

Si se quiere calcular el ángulo α de balanceo del vehículo, se obtiene la ecuación:

$$\tan \alpha = \frac{b}{L} \quad (4.1)$$

Despejando α se consigue:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{L}\right) \quad (4.2)$$

Si se vuelve a observar la Figura 4.7 se puede ver claramente que b es la diferencia de altura al suelo entre los lados izquierdo y derecho y L es la distancia horizontal entre los sensores izquierdos y derechos (17 cm), por lo que sólo queda pasarlo todo a grados multiplicando por $180/\pi$ y se obtiene la salida “Alabeo”, la cual junto a la PRBS se guarda en la flash, como se puede observar en la Figura 4.8.

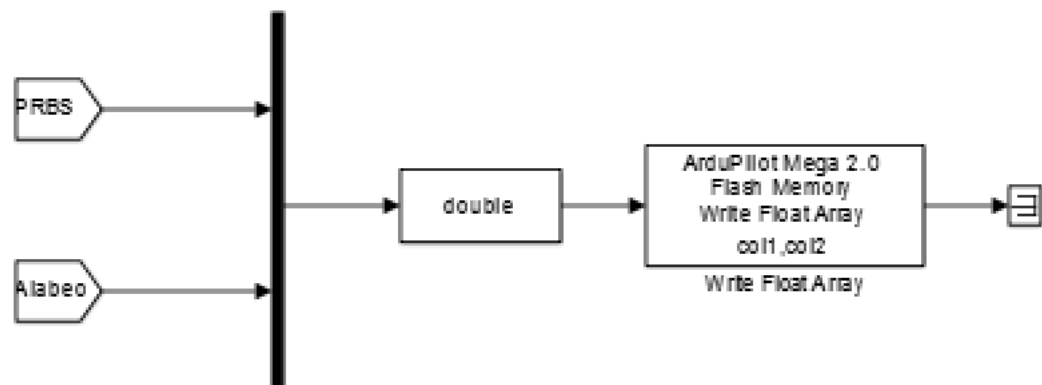


Figura 4.8. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de alabeo.

4.2.1.2 Cálculo de la planta

Una vez guardados los datos del ensayo se ha de convertir la señal PRBS entre 600 y 2400 (U) a otra entre -1 y 1 llamada U_p para hacer una parametrización adecuada usando la ecuación:

$$U_p = \frac{2}{1800} \cdot (U - 600) - 1 \quad (4.3)$$

Para calcular una planta adecuada se usará la herramienta de Matlab Ident [31], una aplicación de sencillo uso que construye modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de reconocimiento y validación de entradas y salidas medidas



en ensayos. Para ello, el primer paso será darle a la aplicación los datos del ensayo de alabeo en cuestión, entrada “Up” y salida “Alabeo” (Figura 4.9).

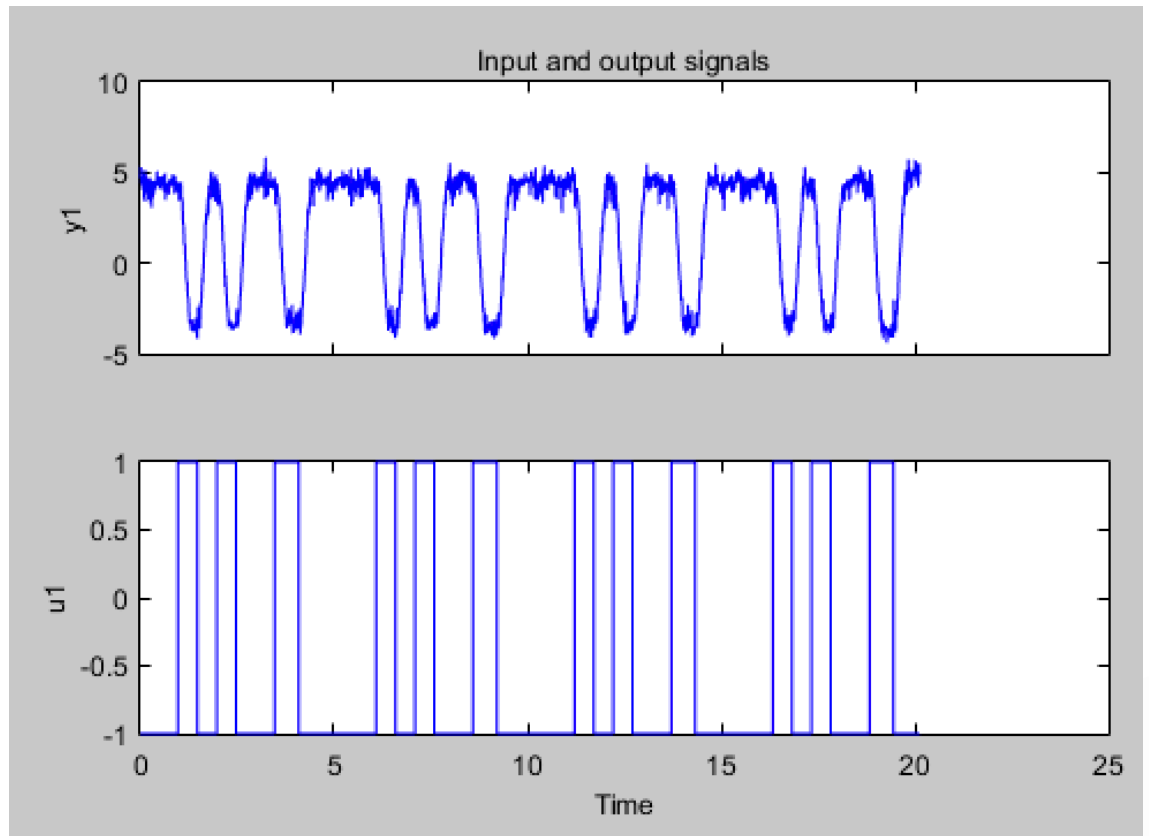


Figura 4.9. Señal PRBS (abajo) y ángulo de balanceo (arriba) obtenidos tras el ensayo de este.

Con los datos importados correctamente en el dominio del tiempo se pueden seleccionar estos como ‘*Working Data*’, también como ‘*Validation Data*’, aparte de poder seleccionar un rango específico de los mismos si todos no son útiles. Una vez hecho esto mediante la opción ‘*Estimate > Transfer Function Models*’ se estimará una planta probando combinaciones de ceros y polos [32] para obtener el mejor resultado posible.



Parametrización del sistema de amortiguación

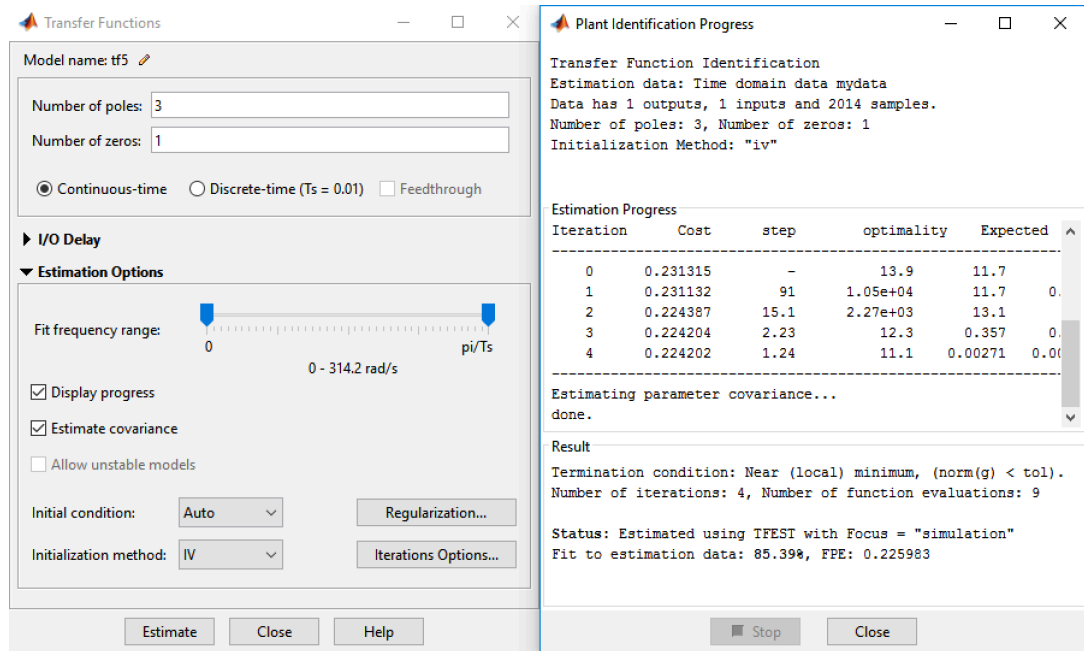


Figura 4.10. Cálculo de la planta de balanceo seleccionando tres polos y un cero.

En el caso del alabeo, el mejor resultado ha sido del 85,39% de coincidencia (Figura 4.11).

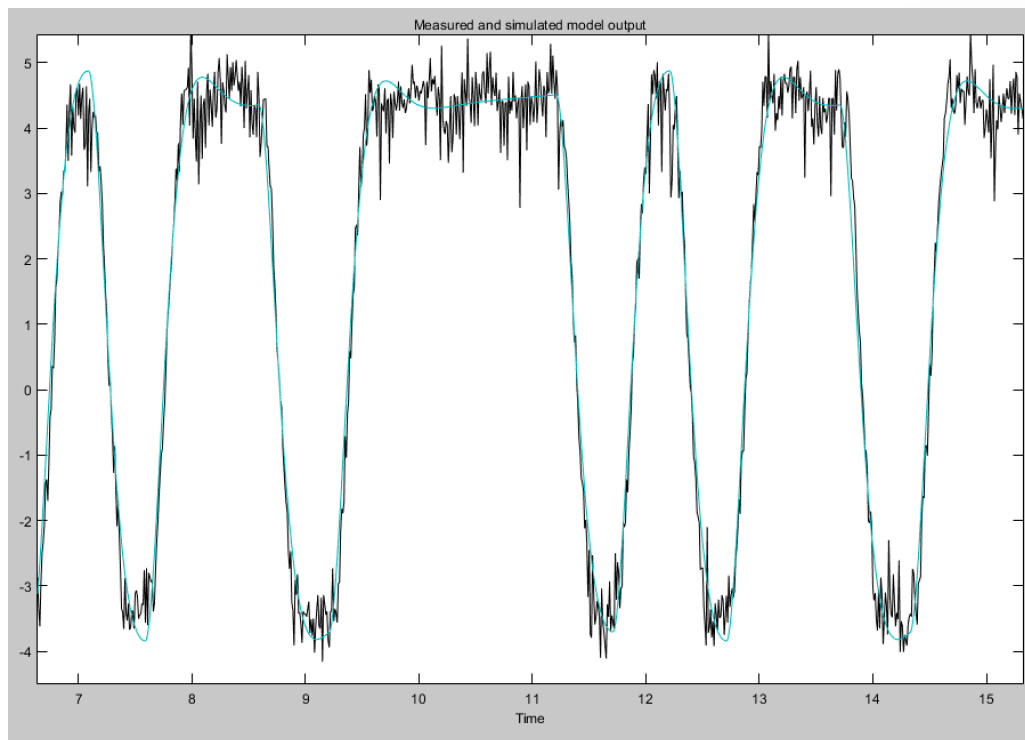


Figura 4.11. Aproximación gráfica de la planta de balanceo.

Y la función de transferencia de alabeo del vehículo resultante queda como:

$$T_{f\text{alabeo}} = \frac{-276.32 (s + 0.2774)}{(s + 0.2011) (s^2 + 11.32s + 72.4)}$$

4.2.2 CABECEO (PITCH)

4.2.2.1 Ensayo

El ensayo de cabeceo es prácticamente igual al de alabeo pero observando el vehículo desde un lateral. La entrada PRBS esta vez es diferente para los diferentes servos. Como se puede observar en la Figura 4.12 hay que hacer una combinación de la señal PRBS original creada (esta vez entre 1400 y 1600 para no saturar los servos delanteros y que el coche no choque contra el suelo) y su inversa conseguida mediante un switch para que el coche realice un movimiento de cabeceo real.

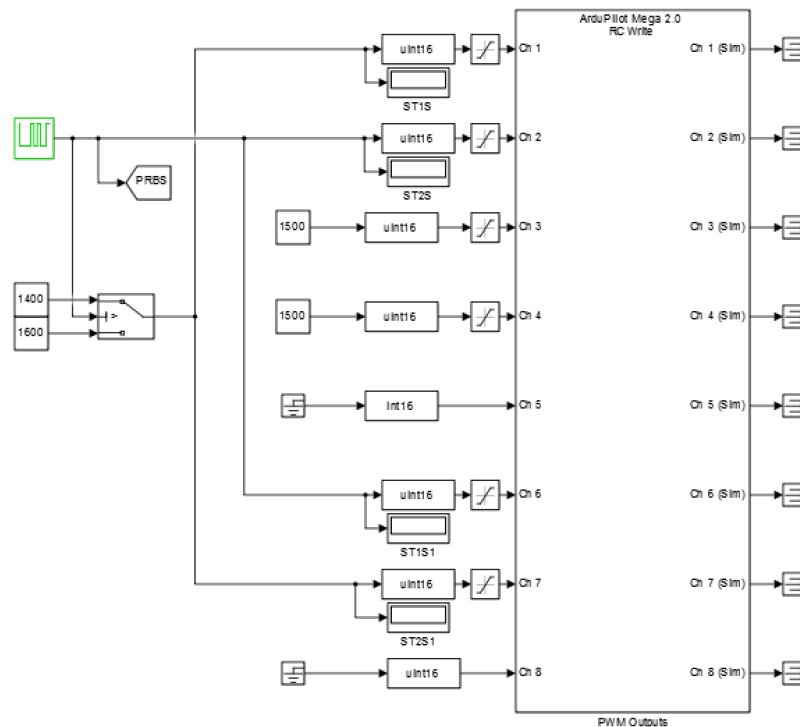


Figura 4.12. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de cabeceo.

A la hora de conseguir la variable de cabeceo se han de realizar los mismos cálculos trigonométricos que en el apartado anterior correspondiente de alabeo (4.2.1), pero como ya se ha dicho, esta vez observando el coche desde un lateral (Figura 4.7).

De esta manera se despeja la misma ecuación que en la sección 4.2.1.1, pero ahora b es la diferencia de altura al suelo entre la parte delantera y trasera del coche y L es la distancia horizontal entre los sensores traseros y delanteros (34.5 cm).

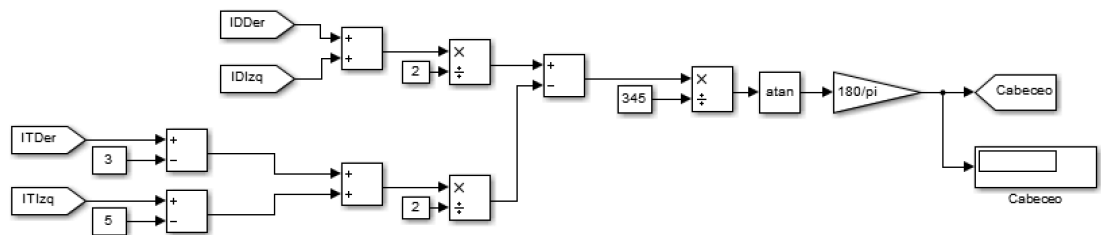


Figura 4.13. Trigonometría asociada al ángulo de cabeceo.

En la flash, también al igual que en el ensayo de alabeo se guardarán tanto la PRBS de entrada como el ángulo de cabeceo de salida (Figura 4.14).

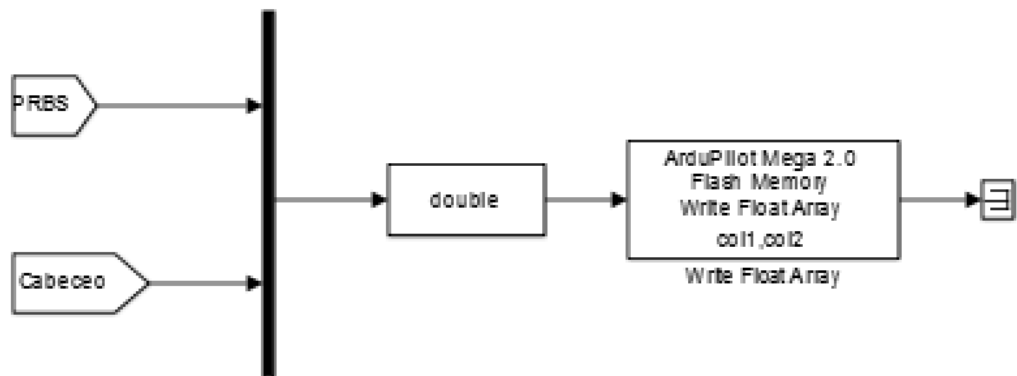


Figura 4.14. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de cabeceo.

4.2.2.2 Cálculo de la planta

Al igual que en la sección 4.2.1.2, se usará la herramienta Ident y la entrada Up para identificar la planta de cabeceo del vehículo. Los datos del ensayo se pueden observar en la

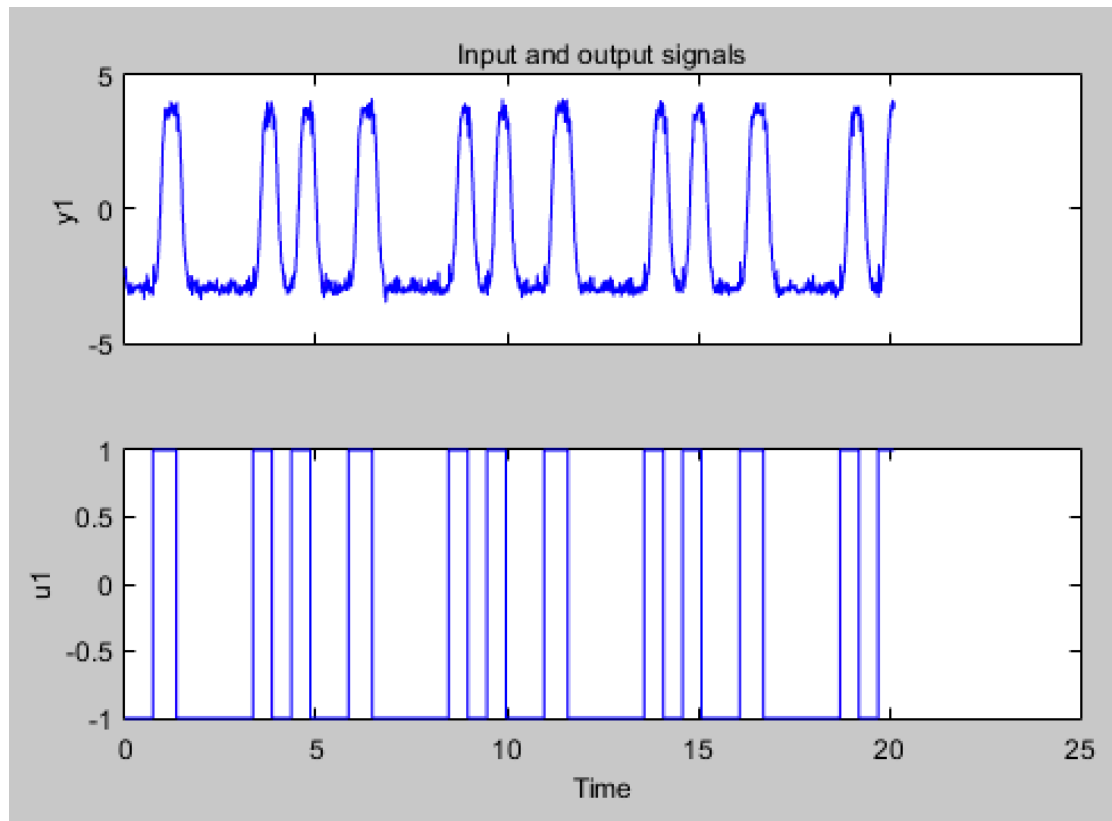


Figura 4.15. Señal PRBS (abajo) y ángulo de cabeceo (arriba) obtenidos tras el ensayo de este.

Se consiguió una identificación de un 86,94% (Figura 4.16, Figura 4.17)

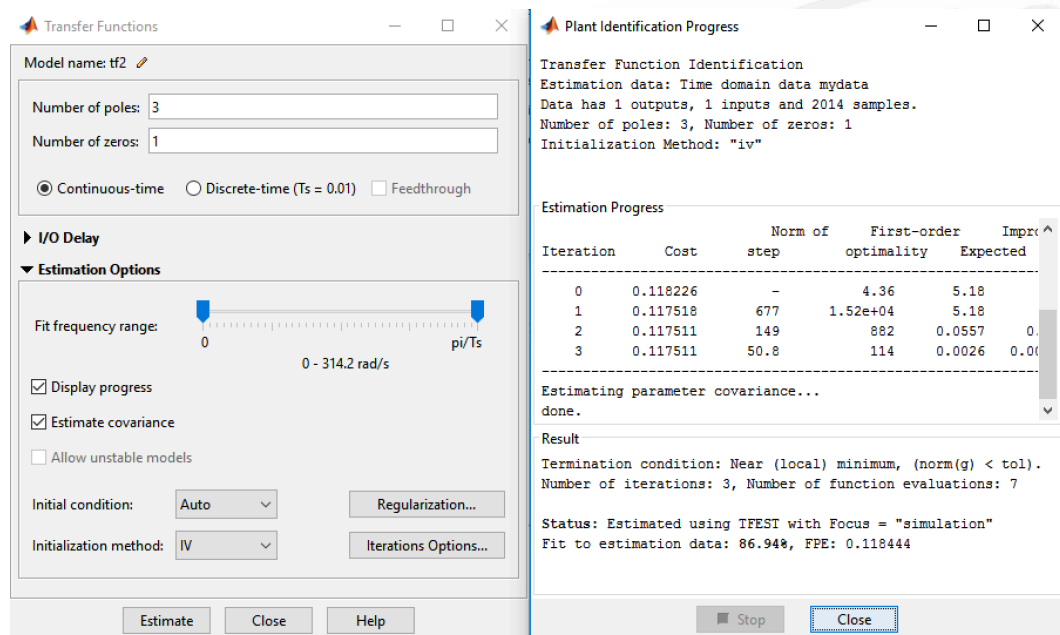


Figura 4.16. Cálculo de la planta de cabeceo seleccionando tres polos y un cero.

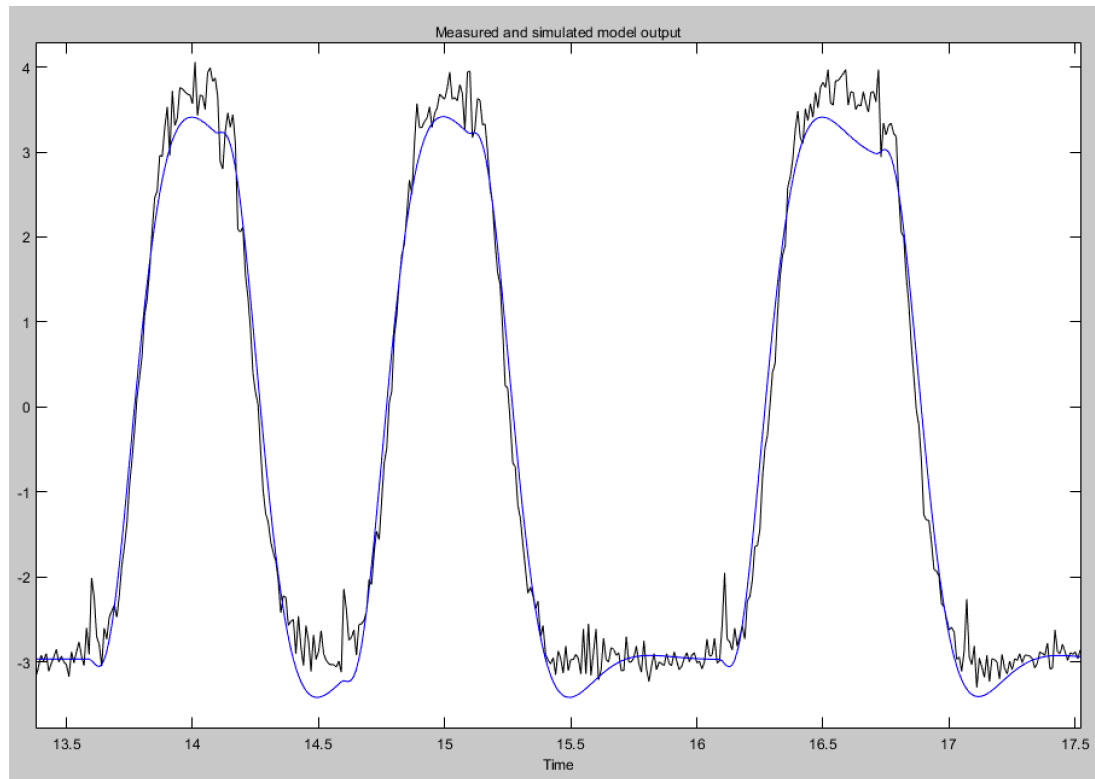


Figura 4.17. Aproximación gráfica de la planta de cabeceo.

Con este método y su alto porcentaje de rendimiento la función de transferencia de cabeceo del vehículo queda:

$$T_{\text{cabeceo}} = \frac{-226.6 (s - 40.57)}{(s + 20.57) (s^2 + 14.77s + 150.8)}$$

4.2.3 ELEVACIÓN (BOUNCING)

4.2.3.1 Ensayo

Para conseguir que el vehículo se moviera de forma sólo vertical arriba y abajo hubo que realizar distintas pruebas, y por ensayo y error se consiguió estimar la saturación adecuada de cada servomotor siendo esta la entrada del ensayo que se guardó en la Flash.

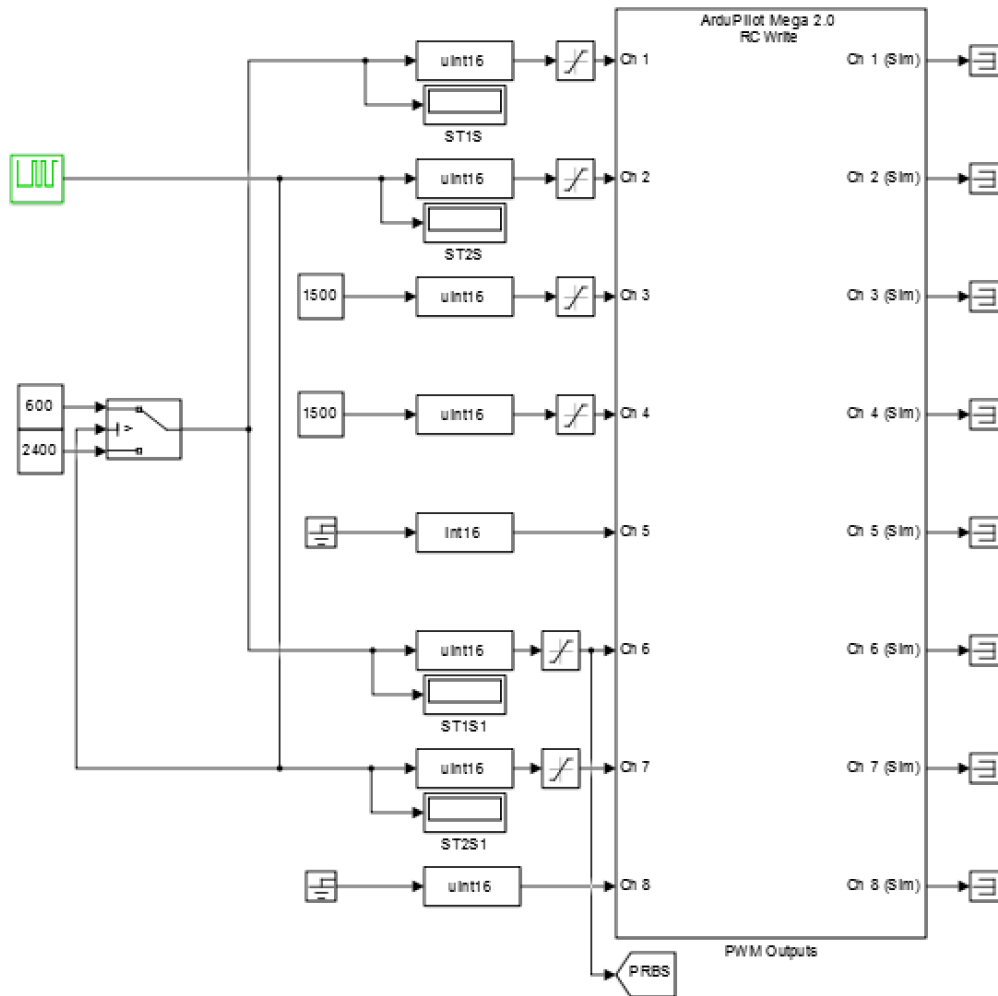


Figura 4.18. Combinación de la señal PRBS para su llegada a los servos actuadores en el ensayo de aceleración vertical.

En la Figura 4.18 se puede observar la combinación de la PRBS original (entre 600 y 2400) con su inversa, mientras que en la Figura 4.19 se pueden observar las saturaciones individuales de cada servomotor, siendo los canales 1 y 2 los traseros y 7 y 8 los delanteros.



Parametrización del sistema de amortiguación

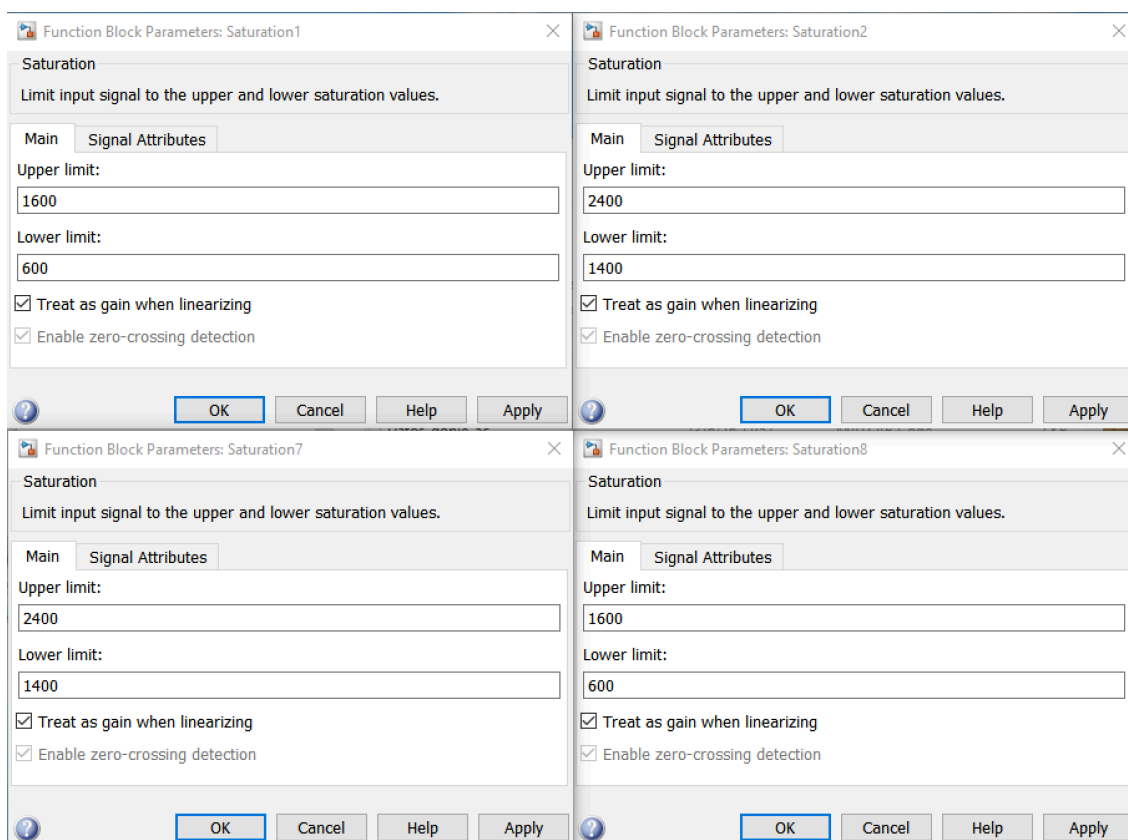


Figura 4.19. Saturaciones de los servos en el ensayo de aceleración vertical.

La trigonometría se usa en este ensayo para calcular la altura media respecto al suelo en cada instante del coche, haciendo la media entre las lecturas de los cuatro sensores infrarrojos como se puede observar en la Figura 4.20.

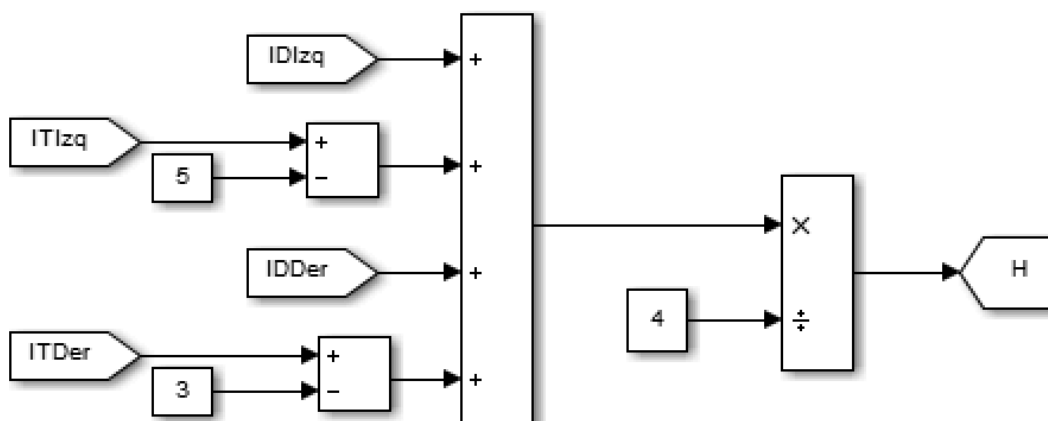


Figura 4.20. Trigonometría asociada al cálculo de la altura media del vehículo.



La otra variable de vital importancia que ha de guardarse durante el ensayo es la aceleración vertical del chasis en cada instante, la cual es registrada por la IMU. Cabe decir que esta aceleración es la “az” que entra al filtro complementario no lineal, tal y como se puede observar en la Figura 3.24, a la cual se le resta la gravedad para conseguir un valor medio de cero. En la Figura 4.21 están todas las variables que llegan a la Flash.

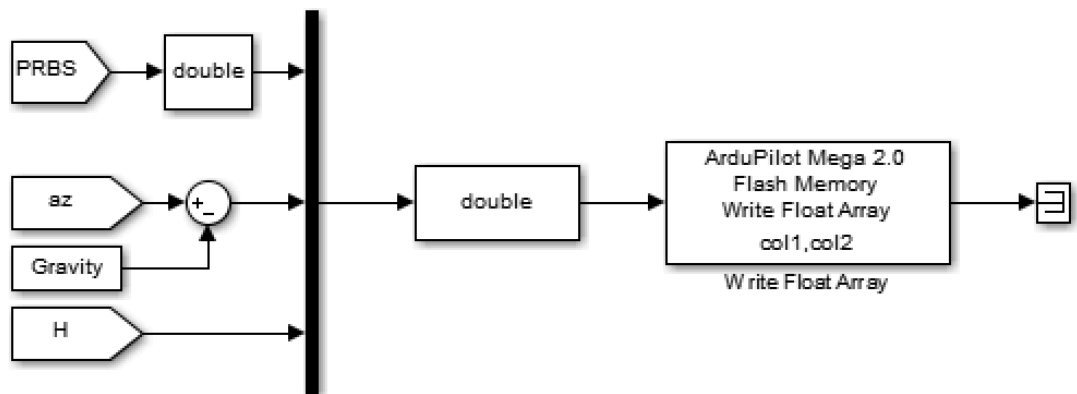


Figura 4.21. Flujo de datos a la memoria flash durante el ensayo de aceleración vertical.

4.2.3.2 Cálculo de la planta

Para el cálculo de la planta referente a la aceleración vertical del vehículo se intentó el mismo método que en los dos apartados anteriores, el uso de la herramienta Ident (Figura 4.22 y Figura 4.23), pero la estimación fue sólo del 40% aproximadamente.

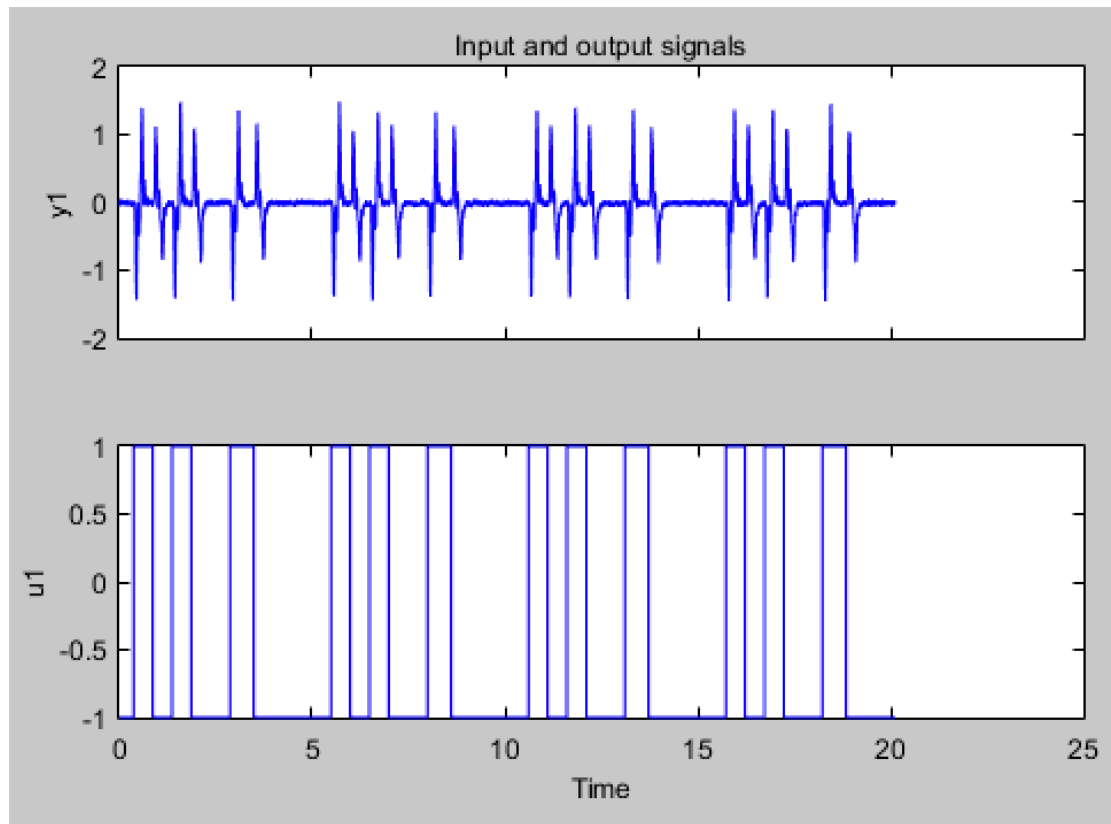


Figura 4.22. Señal PRBS (abajo) y aceleración vertical (arriba) obtenidas tras el ensayo de esta.

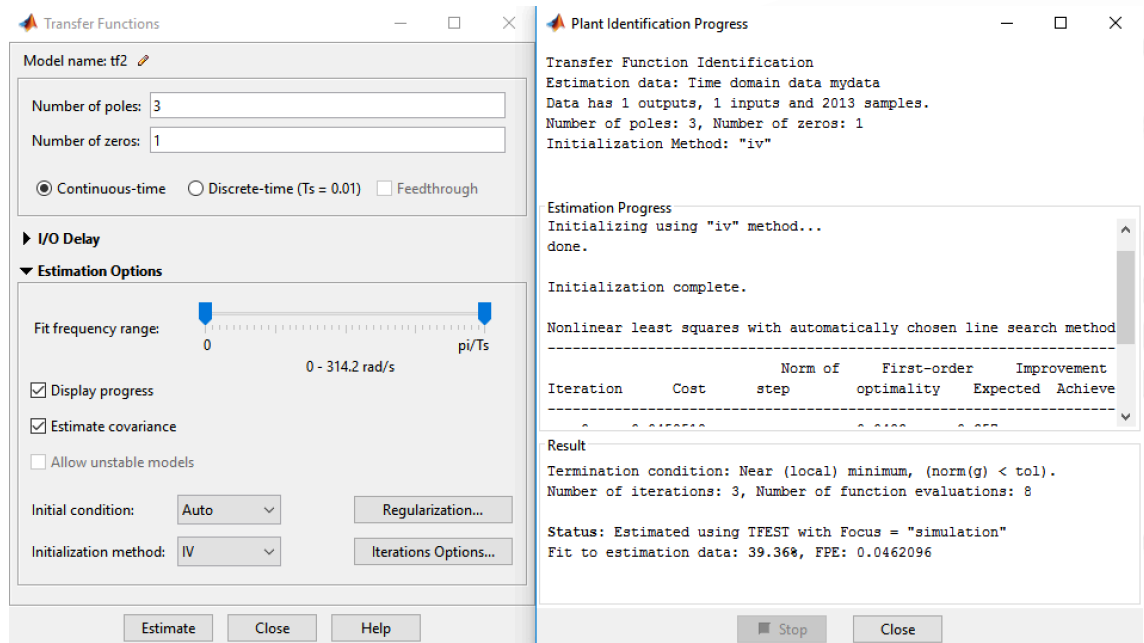


Figura 4.23. Cálculo de la planta de aceleración vertical seleccionando tres polos y un cero.

Debido al bajo porcentaje de parecido, se decidió usar otro método de estimación, el mismo que se usó en el apartado 3.1.4 para calcular los pesos del giróscopo y el acelerómetro en el filtro de la IMU.

Se montó en Simulink un modelo de la planta (Az_t_param_sistema.slx), como se observa en la Figura 4.24 y se usaron los archivos Az_t_prep_datos.m y Az_t_ajuste.m (muy similares a los existentes en el Anexo B y el Anexo C, respectivamente) para ajustar los parámetros $th(1)$, $th(2)$ y $th(3)$.

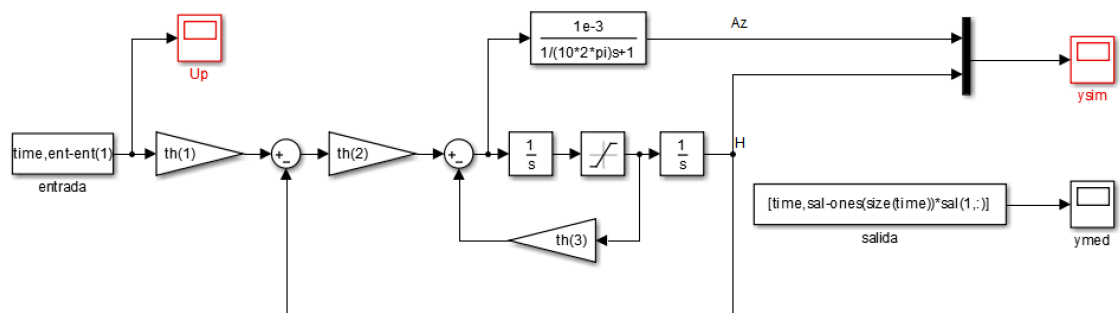


Figura 4.24. Modelo de la planta de aceleración vertical usado para la simulación iterativa.

En este modelo se ve como la aceleración del chasis corresponde a la segunda derivada de la altura del mismo, por lo que se intentan identificar ambas salidas a la vez. Además se usa un filtro paso bajo [33] Para reducir el ruido de la señal de aceleración y ayudar manualmente a una mejor estimación. El $1e-3$ convierte la salida de mm a metros.

Otro detalle a tener en cuenta en el modelo es la saturación anterior a la segunda integral, la cual es la pendiente de la gráfica de altura medida en la salida del ensayo, es decir, 70 mm/s.

Una vez ejecutado el archivo Az_t_prep_datos.m los datos seleccionados para ajustar se muestran en la Figura 4.25, y la inicialización de los parámetros es: $th=[5 \ 100 \ 13]$.

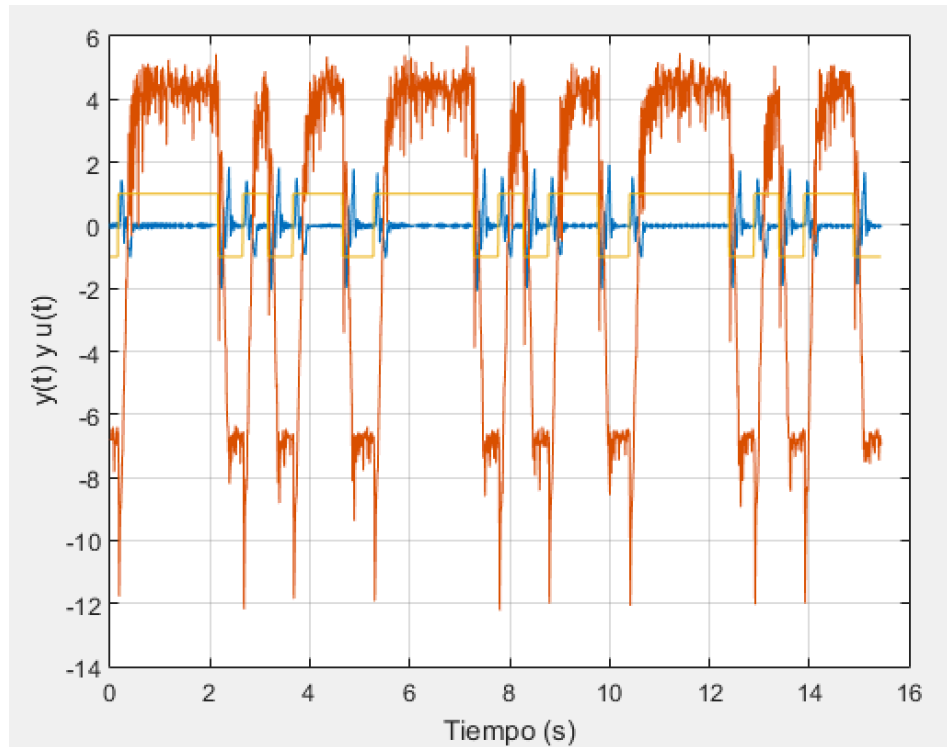


Figura 4.25. Preparación de datos por el fichero Az_t_prep_datos.m.

Tras el ajuste por mínimos cuadrados [25] el vector de parámetros queda como $th=[5.2212 \quad 106.09 \quad 14.188]$ y el resultado de la simulación tanto de la variable altura como de la aceleración vertical se observa en la Figura 4.26.

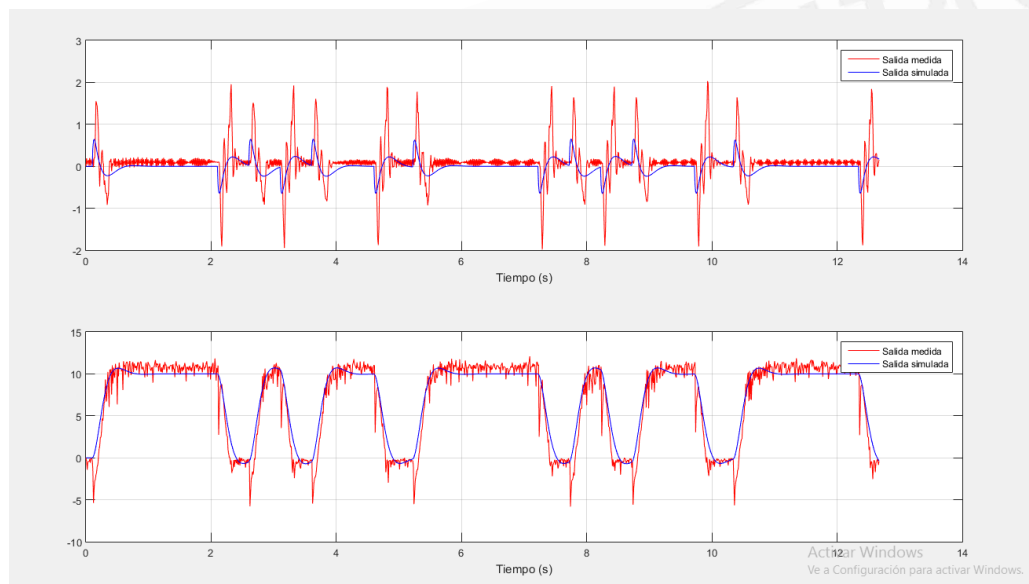


Figura 4.26. Comparación de las plantas de aceleración vertical (arriba) y altura (abajo) simuladas con las reales, obtenidas mediante el ensayo.



Al ser tan bueno el ajuste de la altura se podía confiar en este para diseñar el control, por lo que se operó el modelo de la Figura 4.24 y se obtuvo la función de transferencia de la aceleración vertical del vehículo, la cual lleva una doble derivada en el numerador, como era de esperar.

$$T_{fbouncing} = \frac{34.9 s^2}{(s + 62.83) (s^2 + 14.27s + 105.6)}$$



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERO INDUSTRIAL

Parametrización del sistema de amortiguación

Capítulo 5 DISEÑO DE CONTROLES

Para controlar todo el diseño mecánico explicado en el Capítulo 2 y que el sistema de suspensión activa funcione correctamente es necesario diseñar unos controles basados en las plantas matemáticas que actúen sobre el modelo real, concretamente uno para cada grado de libertad a minimizar en el sistema.

Estos grados de libertad son tres, la misma cantidad que define un plano en el espacio. Este número debe coincidir, ya que estabilizar el vehículo es el mismo tipo de problema, con la excepción de que hay una cuarta rueda, es decir, sobra un punto de apoyo (Figura 5.1).

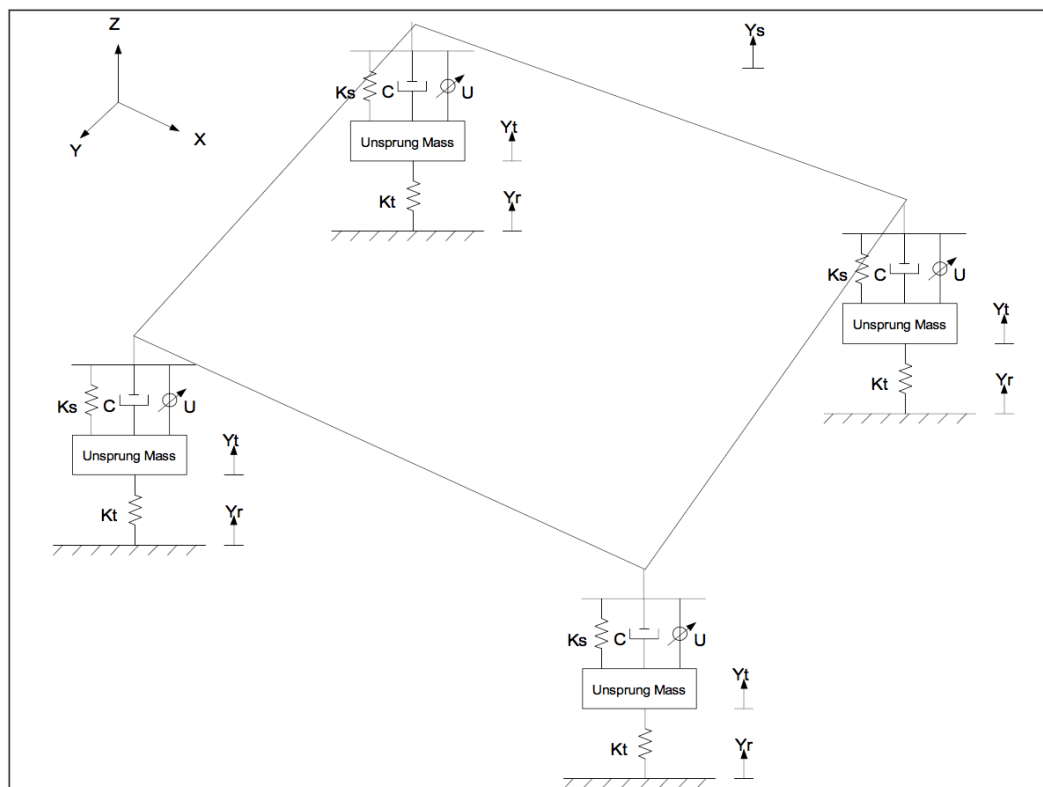


Figura 5.1. Representación del modelo de un coche tomando el chasis como un plano con cuatro puntos de apoyo.

Este punto de apoyo adicional crea un grado de libertad adicional que se soluciona estabilizando el chasis a una altura respecto del suelo constante y definida, es decir, una posición inicial para los controles y una posición fija cuando estos no actúen.

Cabe decir que debido a usar un microprocesador con memoria limitada como el Arduino Mega 2560 los controles diseñados son PID [32]. Se deja para futuros proyectos realizar el diseño de otro tipo de controles que mejorarían la respuesta del sistema como por ejemplo controles predictivos.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLES

Antes de explicar los controles por individual es necesario explicar la implementación de los mismos en el vehículo. Como se puede observar en la Figura 5.2 existen dos conjuntos a detallar, los controles en sí (balanceo, cabeceo y aceleración vertical) y el mezclador de los mismos.

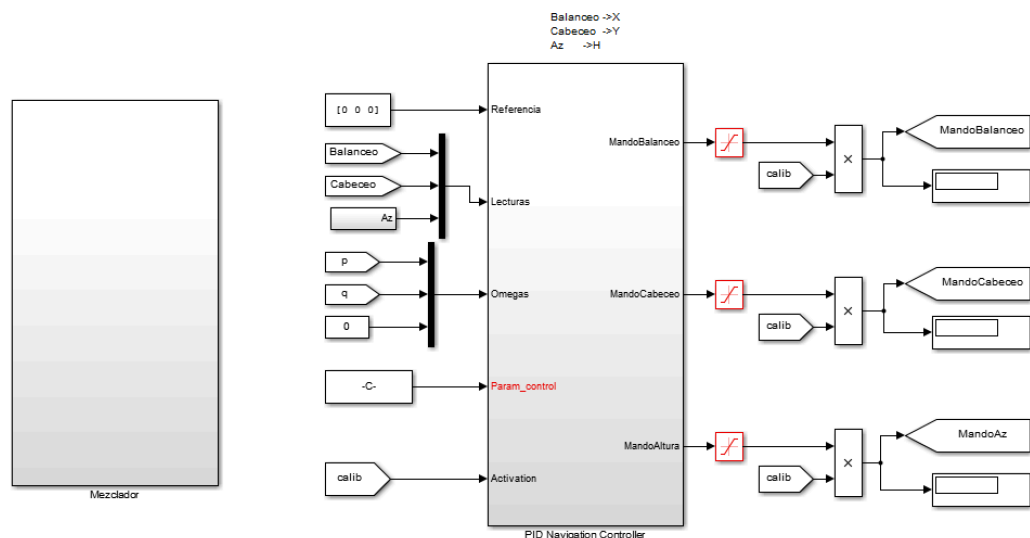


Figura 5.2. Mezclador (izquierda) y bloque contenedor de los controles (derecha).

5.1.1 CREACIÓN DE LOS MANDOS

El bloque de la derecha de la Figura 5.2 contiene tres controles PID individuales e independientes (ordenados como se ve en la figura), y permite su implementación de manera sencilla y eficaz.

Recibe las referencias a seguir (cero al querer estabilizar el chasis), las lecturas en cada instante de las variables a controlar provenientes de la IMU, las dos velocidades angulares de cabeceo y balanceo (derivadas reales de sus respectivos ángulos) también de la IMU, los parámetros de los controles calculados en Matlab y la variable calibración que al igual que en los mandos (derecha de la Figura 5.2) - que son las salidas del bloque- sólo permite a los controles actuar una vez calibrada la IMU para evitar errores. Estos mandos de los tres controles están limitados por una saturación entre -1 y 1.

El interior del bloque que contiene los tres controles se puede observar en la Figura 5.3. Es la implementación básica de los tres en formato paralelo y con ponderación a la referencia [32].

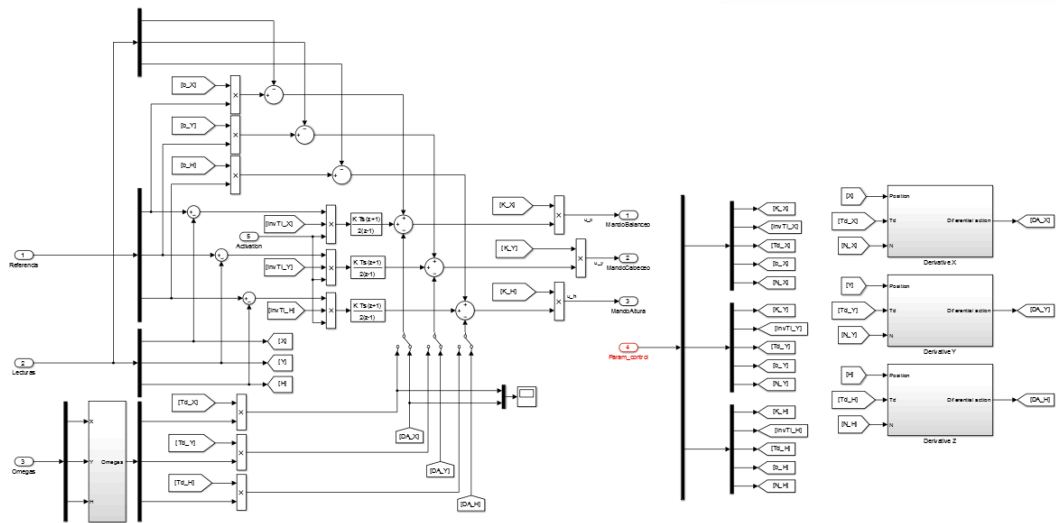


Figura 5.3. Implantación de tres controles PID

Sobre las velocidades angulares externas actúan tres *switches* manuales que permiten elegir entre las derivadas calculadas mediante la acción diferencial

(salidas de los bloques de la derecha explosionados en la Figura 5.4) o las medidas reales de las velocidades angulares.

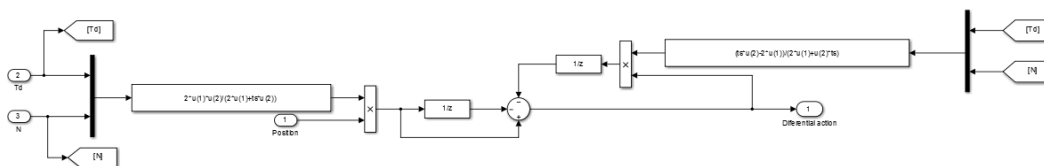


Figura 5.4. Interior del bloque

5.1.2 MEZCLADOR

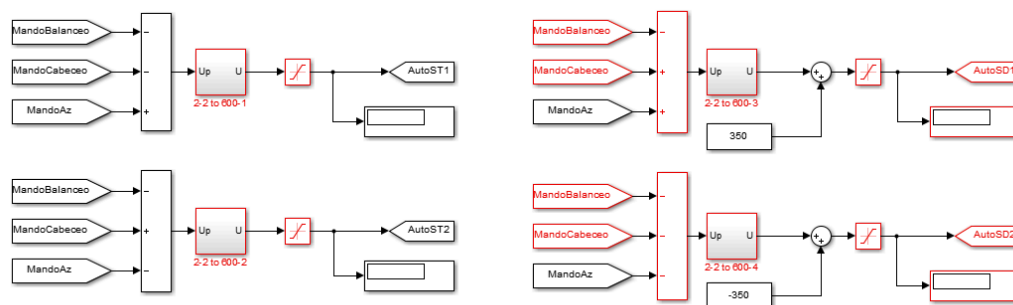


Figura 5.5. Mezclador de los mandos individuales de los controles.

Este bloque simplemente suma los tres mandos (cada uno saturado entre -1 y 1 como se explicó en el apartado anterior) con su signo correspondiente (debido a la posición de los servos debió comprobarse experimentalmente por individual), convierte la suma de -2 2 a 600 2400 (rango de actuación de los PWM que llegan a los servos reales) con la ganancia de la Figura 5.6 y la limita a estos valores para que no haya errores.

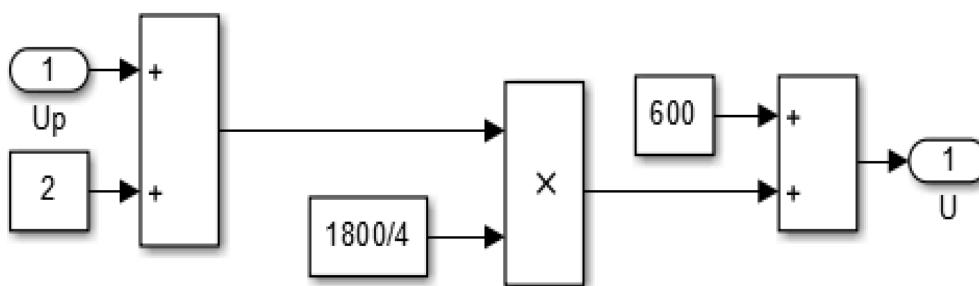


Figura 5.6. Ganancia transformadora de -2 2 a 600 2400.

Dado que el mando de la aceleración suele ser muy pequeño y debe existir la posibilidad de que un solo mando tenga suficiente rango para mover casi todo el servo se escogió el formato 2-2 en lugar 3-3, que parecería lógico a primera vista pero resultó demasiado grande.

Además, como se observa en la Figura 5.5, el bloque “Mezclador” también establece la posición inicial y sin controlar de los servos, aplicando cuando no hay mando 1500 de PWM a los traseros y un rango de 1500+-350 a los delanteros, para que estén estos algo más subidos y el coche esté horizontal.

5.2 CONTROL DE BALANCEO

El control del ángulo de balanceo se ha diseñado mediante margen de fase [32], un método de diseño en frecuencia muy utilizado y muy útil.

Si dibujamos el diagrama de Black de la planta de alabeo (cambiando su signo para que su ganancia estática sea positiva) se puede ver que es estable en lazo cerrado (Figura 5.7), por lo que el diseño de su control no es muy complicado. Además, su respuesta a un escalón es lenta y no muy adecuada (Figura 5.8).

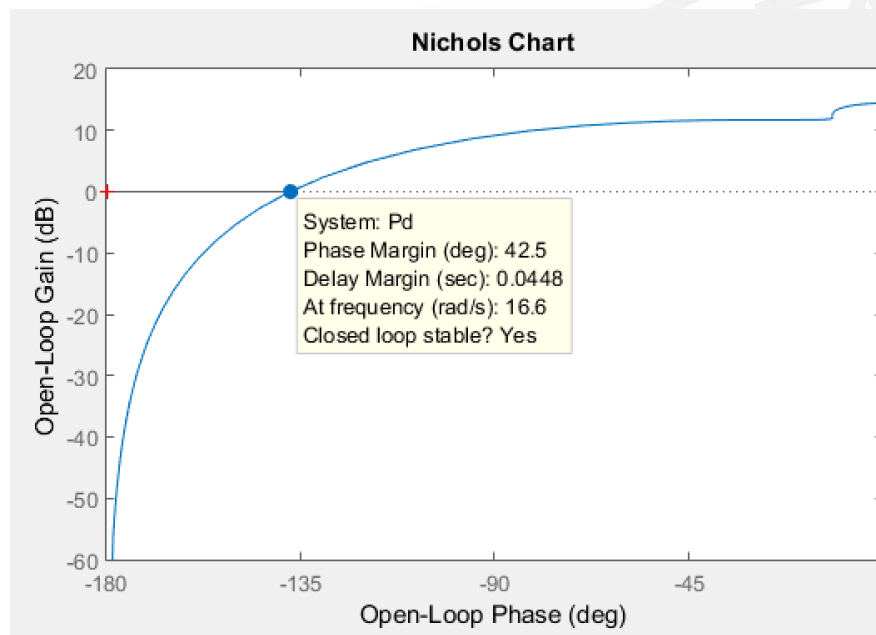


Figura 5.7. Diagrama de Black de la planta de balanceo.

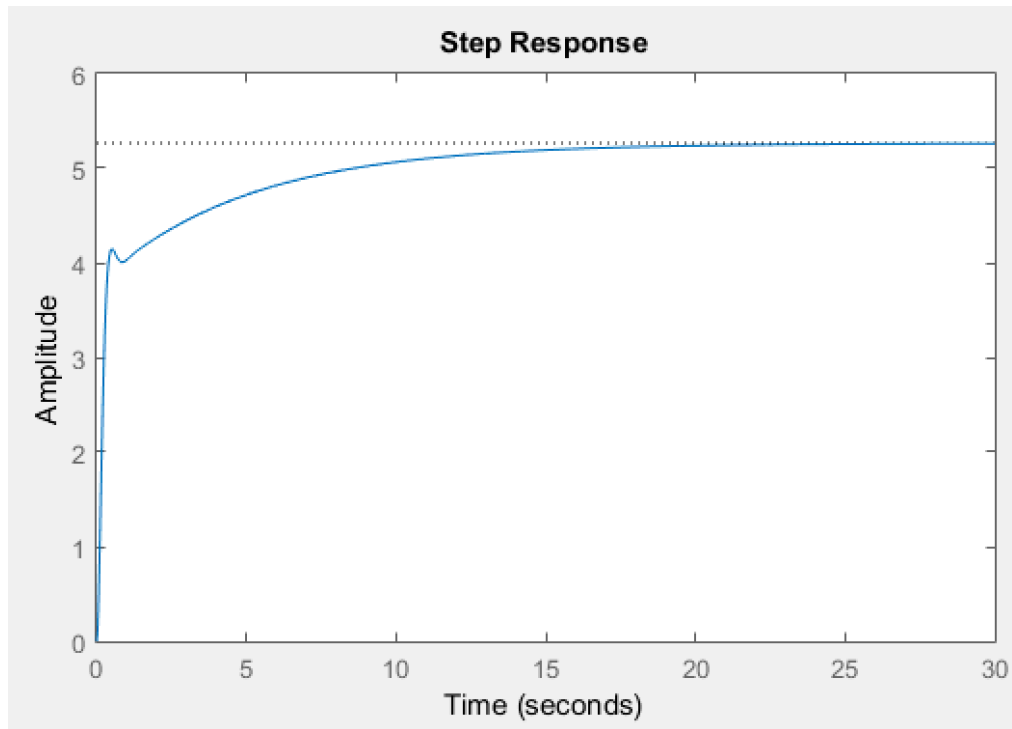


Figura 5.8. Respuesta a un escalón en referencia de la planta de balanceo.

Para diseñar el control se ha optado por las siguientes especificaciones:

- Margen de fase (F_m) = 90°
- Velocidad angular (ω_o) = 4 rad/s
- Fase de la acción integral (ϕ_i) = -15°
- Ponderación de la referencia (b) = 1.15

El control como se puede observar en la Figura 5.9 y la Figura 5.10, respectivamente mejora enormemente la respuesta del sistema, consiguiendo que por ejemplo ante un escalón pase de llegar al régimen permanente en 15 segundos a llegar en menos de 2 segundos.

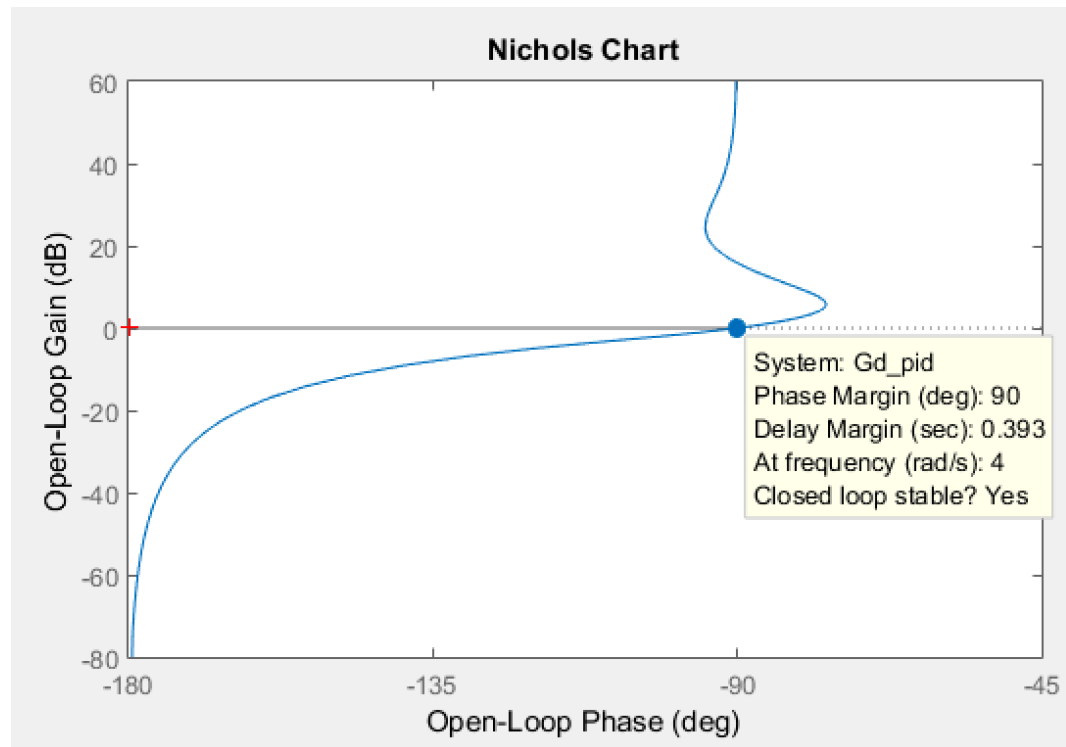


Figura 5.9. Diagrama de Black de la planta de balanceo controlada.

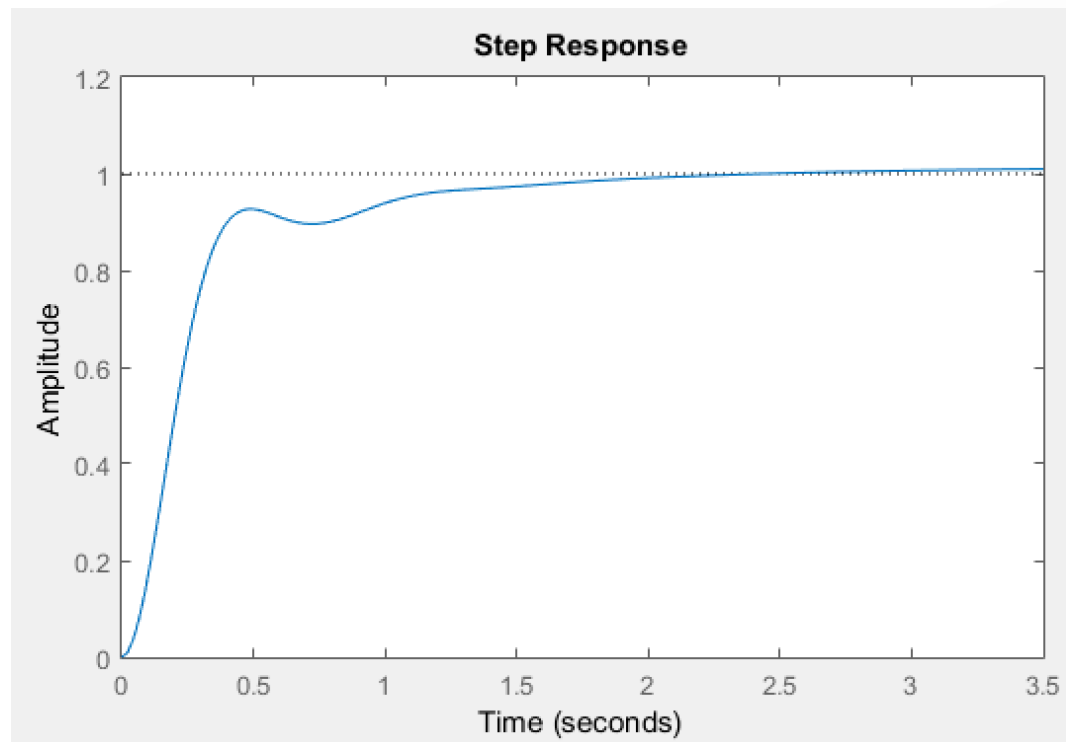


Figura 5.10. Respuesta a un escalón en referencia del lazo cerrado de la planta de balanceo controlada.



5.3 CONTROL DE CABECEO

El control del ángulo de cabeceo del vehículo también se ha diseñado mediante margen de fase, pero se ha omitido la acción diferencial debido a que a pesar de probar el diseño con diferentes N el ruido era demasiado grande y la respuesta se hacía muy oscilante en el modelo real. Por tanto se ha diseñado un control con sólo acciones proporcional e integral, ya que evitar el error final si que es muy importante.

En la Figura 5.11 se puede comparar la respuesta de la planta sin controlar frente a la respuesta del sistema controlado en lazo cerrado, ambos ante el mismo escalón de tamaño uno.

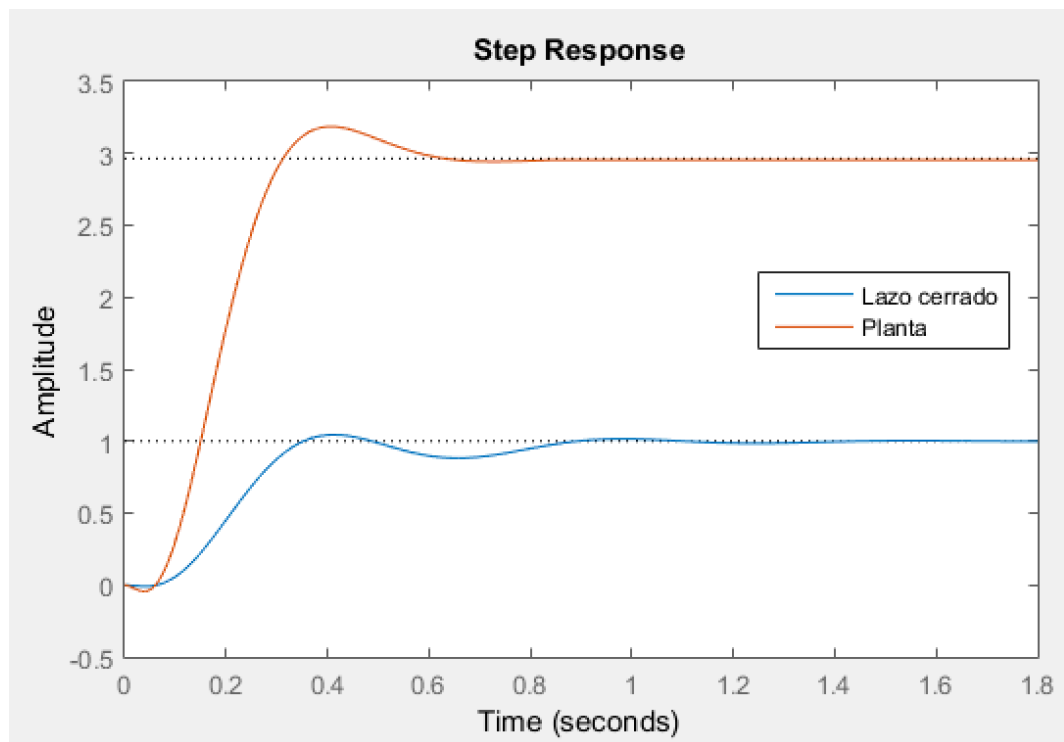


Figura 5.11. Respuestas de la planta de cabeceo con y sin control a un escalón en referencia.

Como era de esperarse se ha conseguido anular el error en régimen permanente, y a pesar de que la acción integral típicamente suele hacer las respuestas más lentas, gracias a un diseño adecuado se ha conseguido que en este caso sea la respuesta prácticamente igual de rápida que la original.

Si se observa la Figura 5.12 se pueden ver los diagramas de Black de la planta original y del lazo abierto una vez diseñado el control.

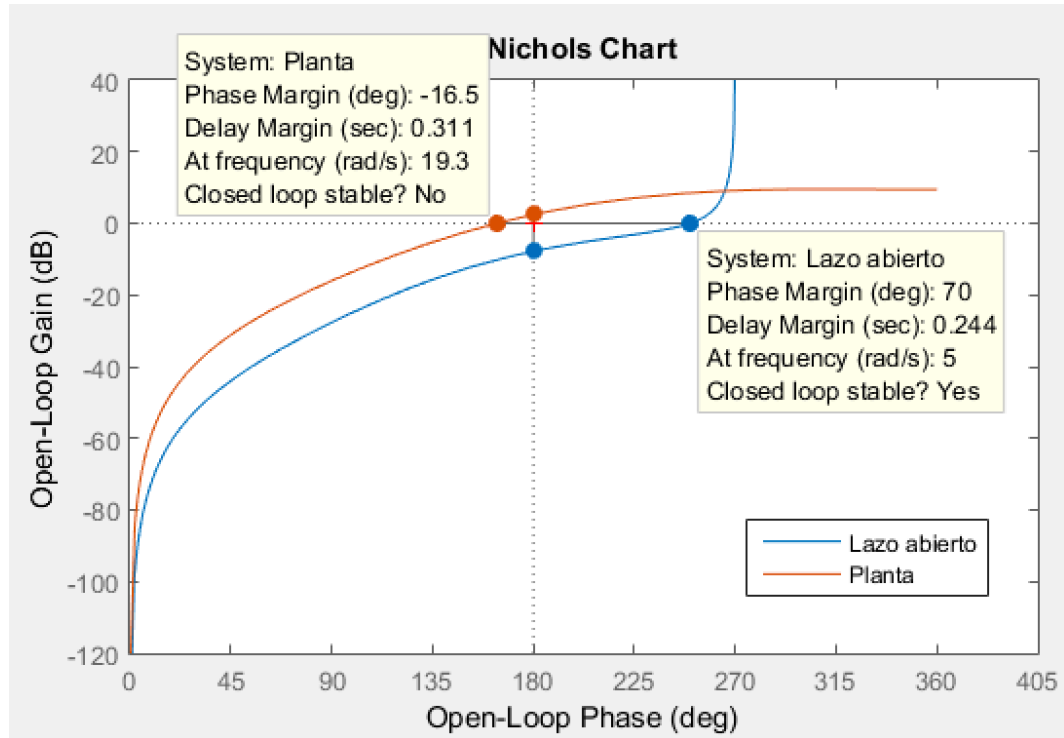


Figura 5.12. Diagrama de Black de la planta de cabeceo con y sin control.

En ellos se puede apreciar la estabilidad del sistema en lazo cerrado y algunas especificaciones del diseño:

- Margen de fase (F_m) = 70°
- Velocidad angular (ω_o) = 5 rad/s
- Ponderación de la referencia (b) = 1

5.4 CONTROL DE ACELERACIÓN VERTICAL

Para diseñar el control de la aceleración vertical del chasis fue necesario crear en Simulink un simulador, ya que en realidad el objetivo del diseño era crear un filtro paso bajo [33] que llevara a cero la aceleración vertical a frecuencias altas comparables a oscilaciones en el camino.

El simulador creado utiliza el modelo matemático usado para calcular la planta (Figura 5.13), pero introduce en el sistema una onda senoidal con una frecuencia de 10 rad/s como perturbación que simula un camino con baches para el vehículo.

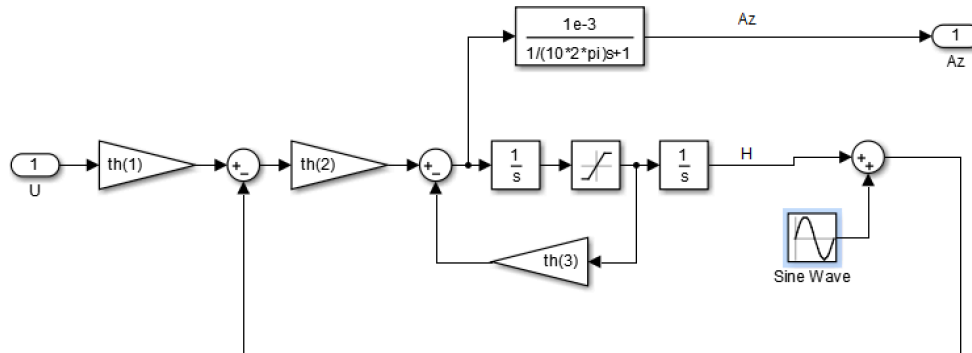


Figura 5.13. Modelo de simulación de la planta de aceleración vertical con perturbaciones.

Como la planta es algo complicada (ya que tiene un s^2 en el numerador debido a ser la segunda derivada de la altura) fue necesario diseñar el control por margen de ganancia. Dado que la acción diferencial no era necesaria debido a la gran velocidad de la planta y la acción integral tampoco debido que el objetivo es llevar la respuesta a cero, se optó por diseñar sólo un control proporcional de especificaciones:

- Margen de ganancia (G_m) = 15 dB
- Velocidad angular (ω_u) = 10 rad/s
- Ponderación de la referencia (b) = 1

El modelo completo del simulador (Figura 5.14) compara la respuesta de la planta sin controlar con la de la planta controlada, y como se puede observar en la Figura 5.15 el control disminuye la perturbación real que sufre el coche.

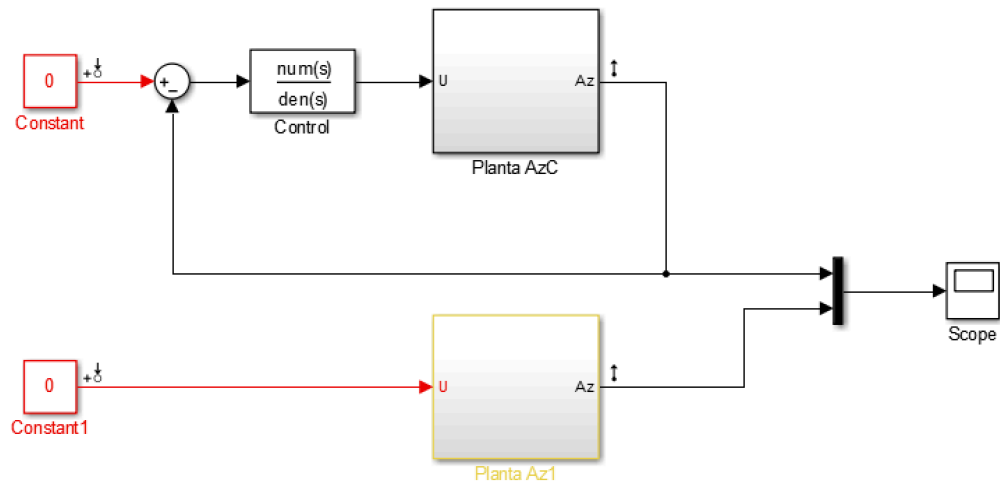


Figura 5.14. Modelo de simulación con y sin control de la planta de aceleración vertical.

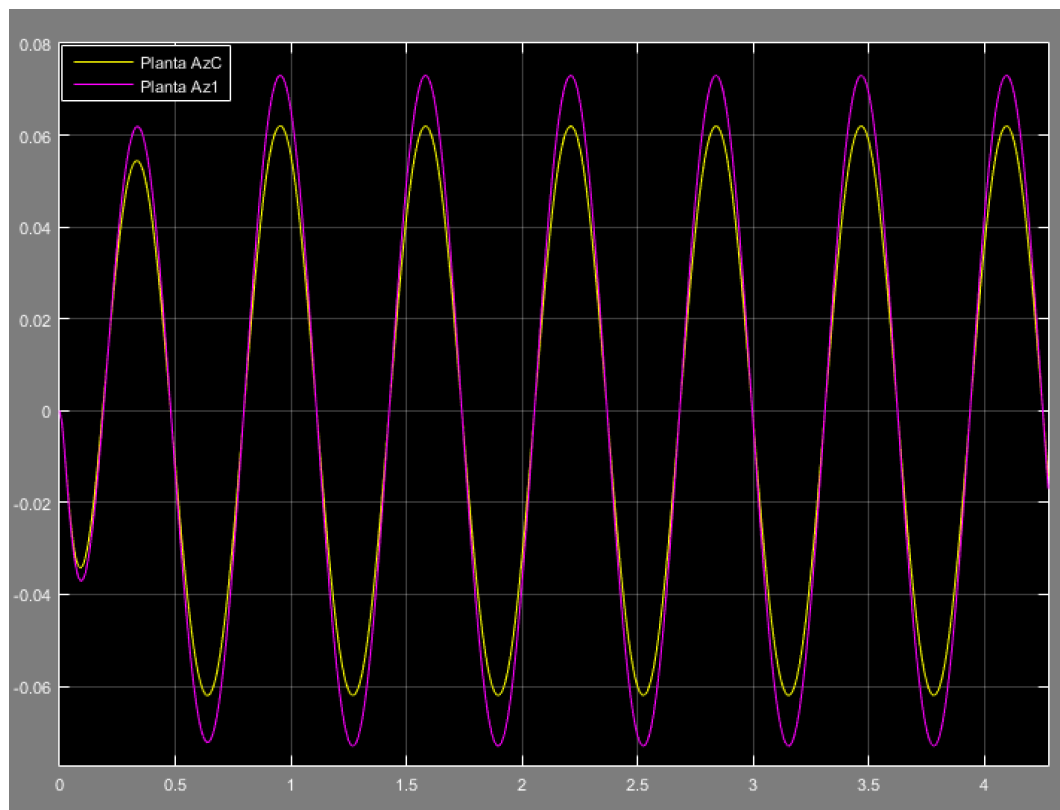


Figura 5.15. Comparación de la respuesta de la planta de aceleración vertical con y sin control ante una perturbación sinusoidal.

No obstante, como el objetivo es que realice este comportamiento frecuencias parecidas a baches reales de los caminos (cerca de 10 rad/s) la mejor herramienta para demostrar el correcto diseño del control es el diagrama de Bode [34].

La Figura 5.16 muestra el diagrama de Bode de la planta controlada y sin controlar, en el cual se puede ver que esta sólo a 10 rad/s tiene aproximadamente una ganancia de -7 dB, mientras que con el control se consigue reducir esa ganancia hasta los -20 dB.

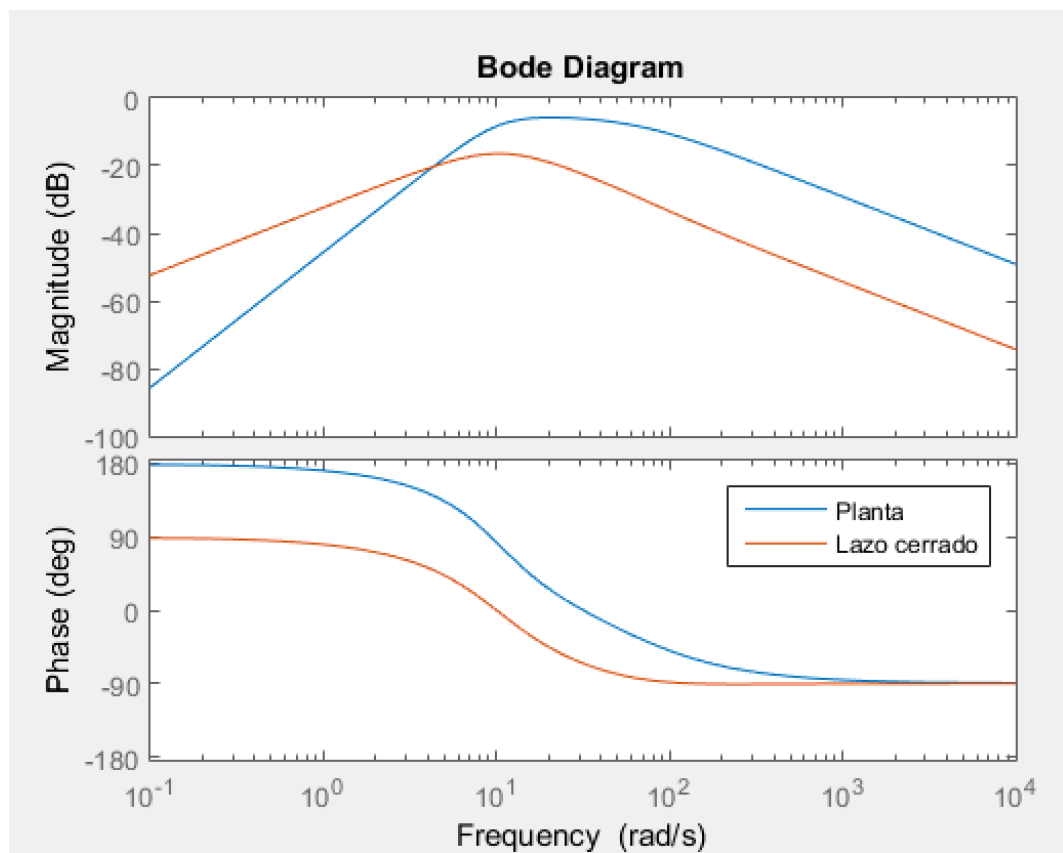


Figura 5.16. Comparativa de los diagramas de Bode de la planta de aceleración vertical con y sin controlar.

No es una enorme disminución de ganancia, pero debería ser suficiente para que el control sea válido y útil en el prototipo, ya que además, a frecuencias más bajas la disminuye aún más.

Por último, cabe decir que al simular el objetivo de llevar la aceleración vertical a cero, como se puede observar en la Figura 5.17, el control consigue que este camino sea mucho más rápido y menos oscilante.

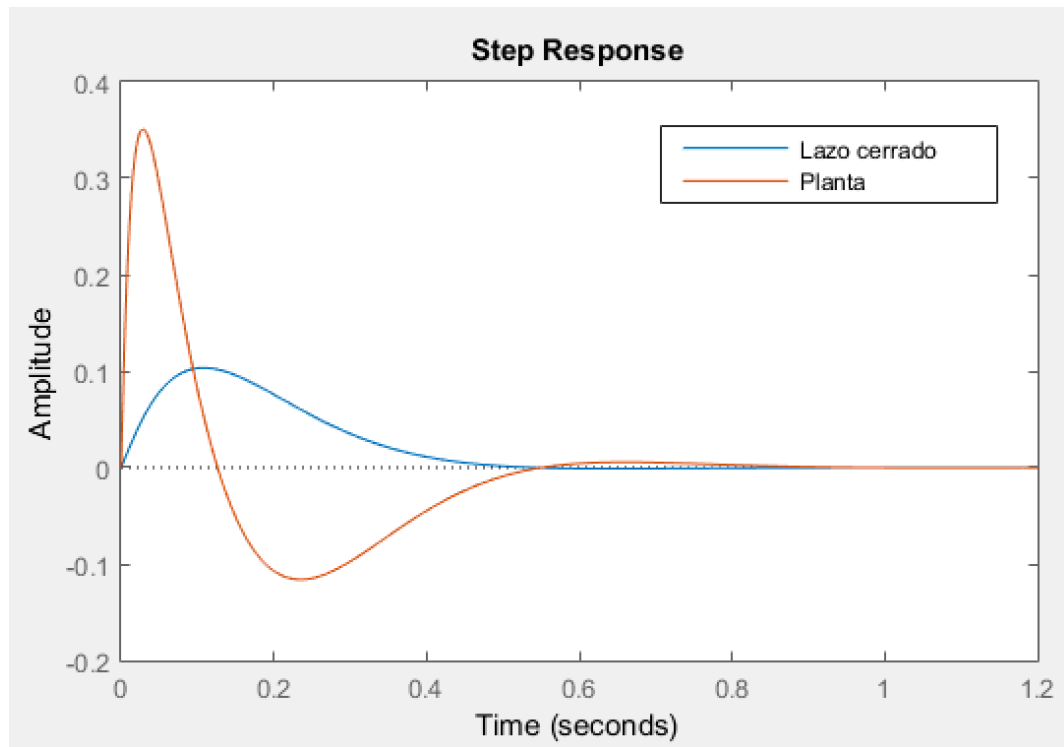


Figura 5.17. Respuesta de la planta de aceleración vertical con y sin control cuando esta se intenta llevar a cero.





Capítulo 6 RESULTADOS/EXPERIMENTOS

Los resultados del proyecto se han obtenido a raíz de cuatro ensayos finales, dos en la pista alta y dos en la baja, uno de badenes similares a los de las calzadas cotidianas que atraviesan los turismos en el día a día y otro de simulación de un terreno más irregular parecido a un campo o una carretera mal asfaltada.

Los resultados de estos ensayos en balanceo, cabeceo y aceleración vertical del chasis se pueden observar a continuación en las figuras de su apartado correspondiente, las cuales están ordenadas respectivamente, pero se pueden obtener algunos resultados comunes de todas ellas:

- La suspensión activa mejora enormemente (entre un 100 y un 200 % por regla general) la estabilidad del chasis del vehículo usando como referente los ángulos de cabeceo y balanceo del mismo.
- La suspensión semi-activa también mejora esta estabilidad, pero en un grado algo menor (50 % de media aproximadamente).
- Ambas son ineficientes en su intento de disminuir la aceleración vertical del automóvil, ya que usualmente la aumentan (sobre todo en la pista baja), y cuando la disminuyen lo hacen ligeramente (18% de media y generalmente la semi-activa).

6.1 *PISTA ALTA*

6.1.1 ENSAYO BADENES CONTIGUOS

Comparando la Figura 6.1, la Figura 6.2 y la Figura 6.3 se han obtenido algunos resultados concluyentes calculando el error acumulado a lo largo de la trayectoria y su diferencia entre los tres métodos de suspensión utilizados. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.1. Resultados comparativos del ensayo de badenes contiguos sobre pista alta en referencia a la suspensión pasiva.



	Balanceo (%)	Cabeceo (%)	Aceleración vertical (%)
Semi-Activa	22.63	1.65	16.02
Activa	239.77	64.08	-22.06

Tabla 6.1. Resultados comparativos del ensayo de badenes contiguos sobre pista alta en referencia a la suspensión pasiva.

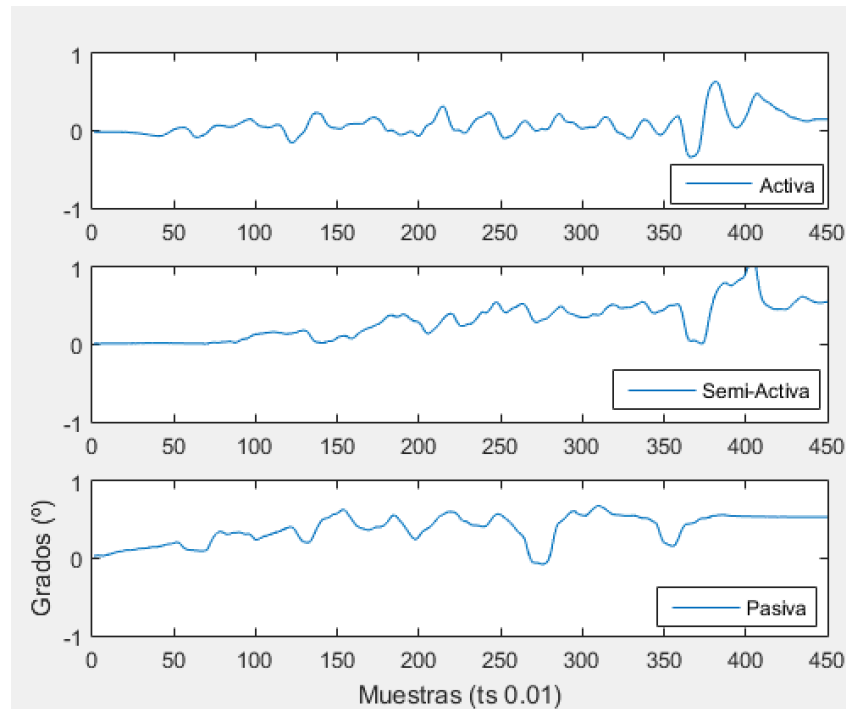


Figura 6.1. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

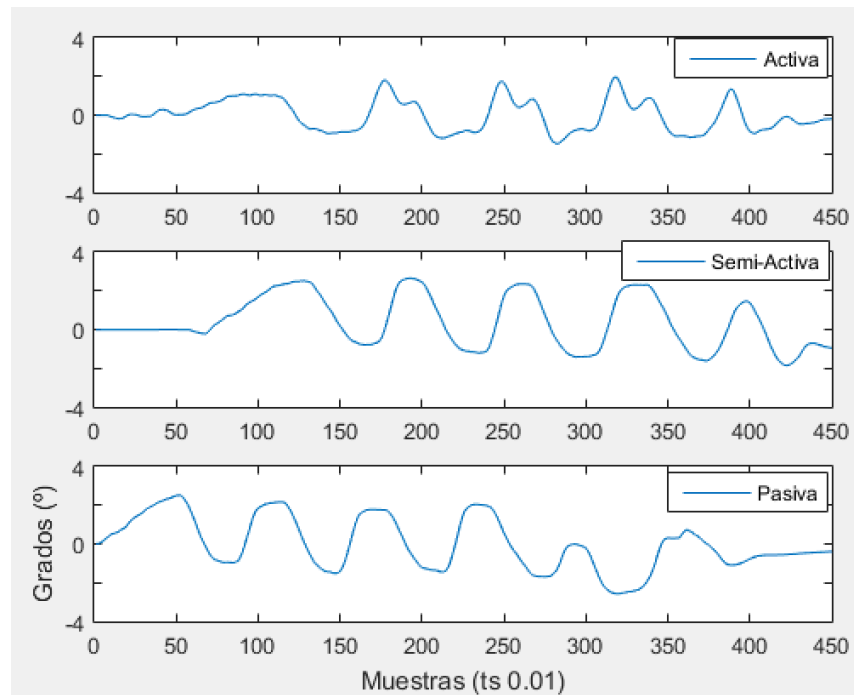


Figura 6.2. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

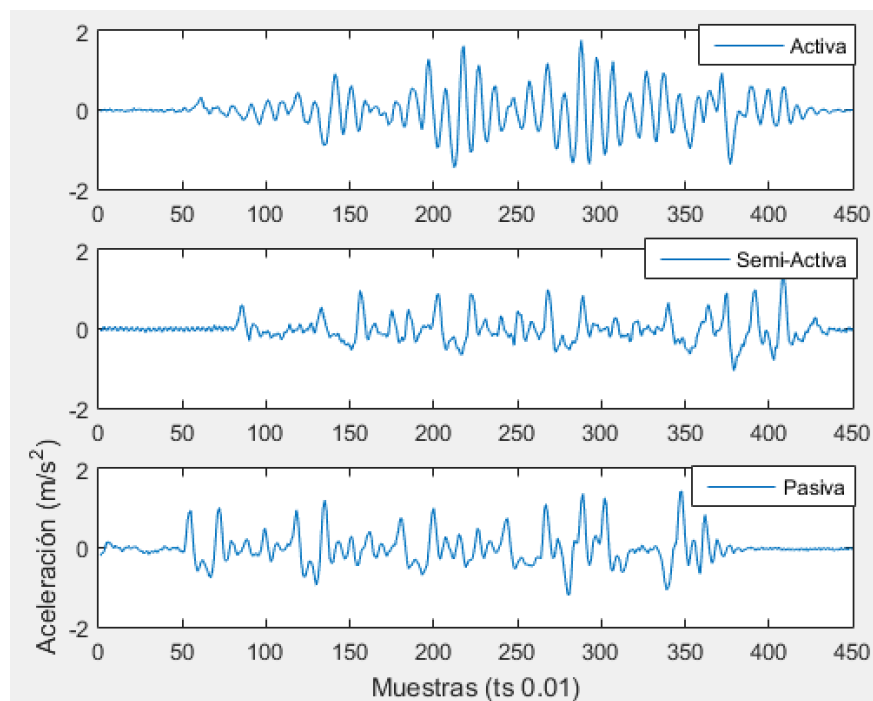


Figura 6.3. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).



6.1.2 ENSAYO TERRENO IRREGULAR

Comparando la Figura 6.4, la Figura 6.5 y la Figura 6.6 se han obtenido algunos resultados concluyentes calculando el error acumulado a lo largo de la trayectoria y su diferencia entre los tres métodos de suspensión utilizados. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.2.

	Balanceo (%)	Cabeceo (%)	Aceleración vertical (%)
Semi-Activa	6.02	41.11	36.49
Activa	263.64	148.44	3.13

Tabla 6.2. Resultados comparativos del ensayo de terreno irregular sobre pista alta en referencia a la suspensión pasiva.

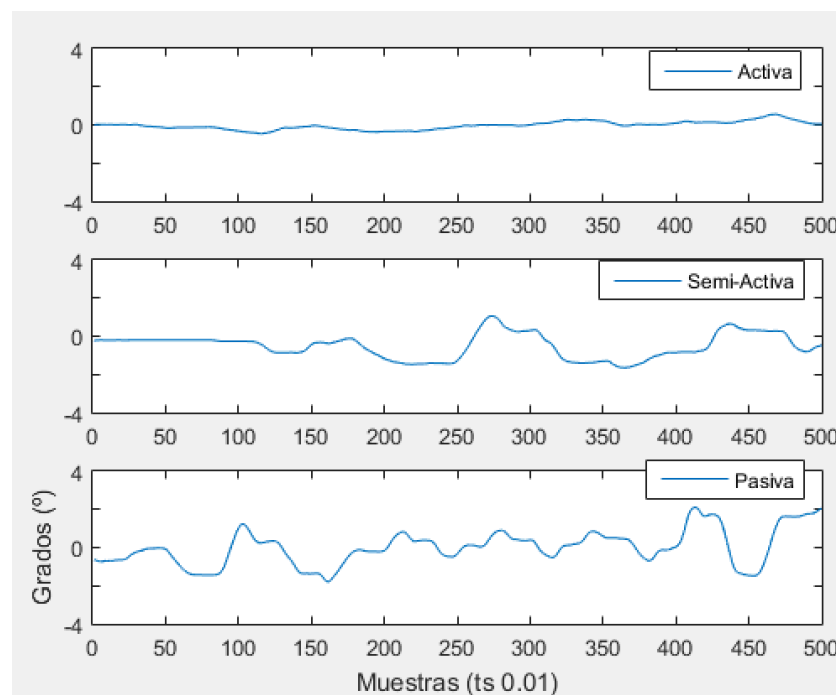


Figura 6.4. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

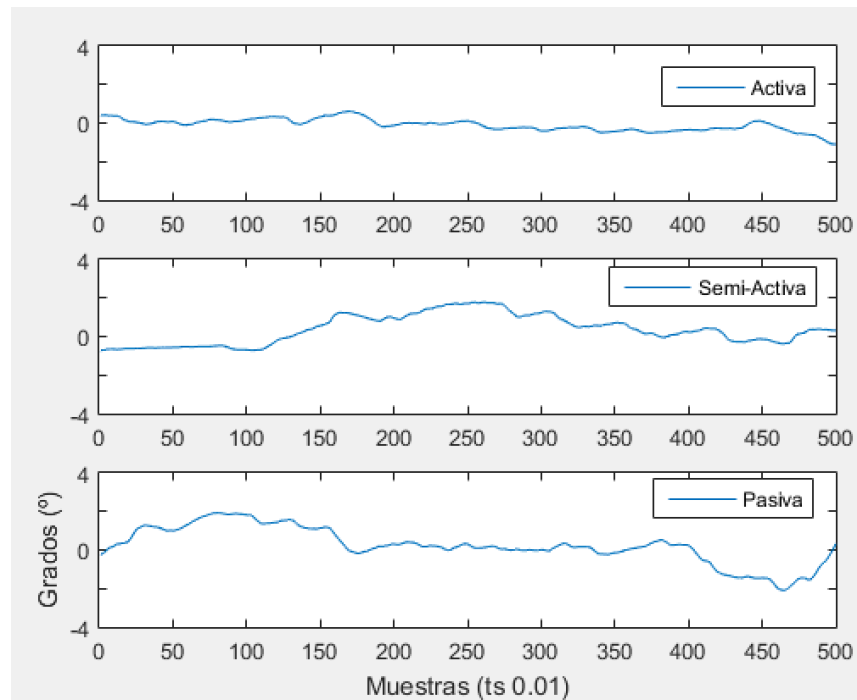


Figura 6.5. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

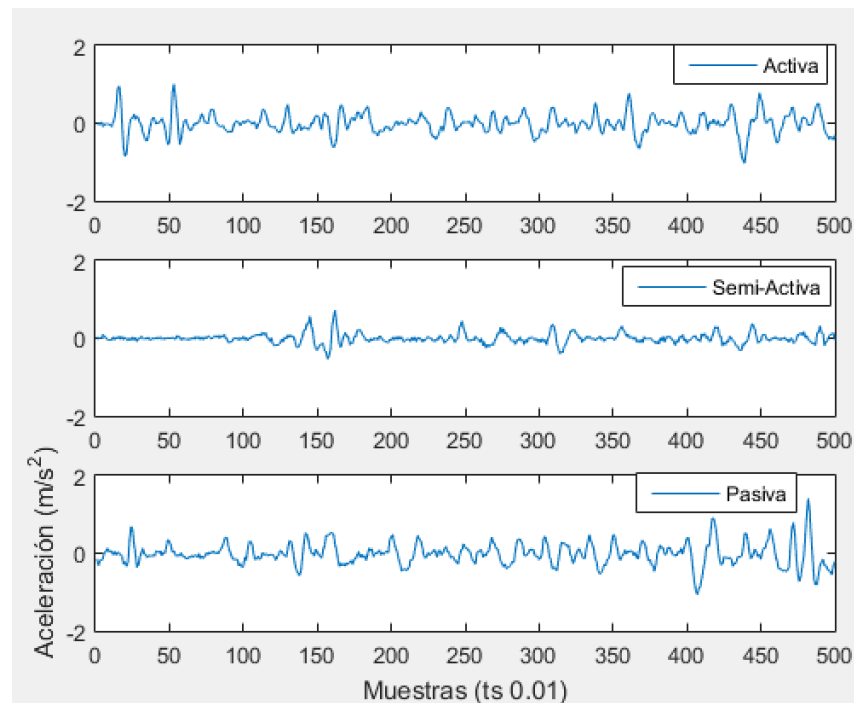


Figura 6.6. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).



6.2 PISTA BAJA

6.2.1 ENSAYO BADENES CONTIGUOS

Comparando la Figura 6.7, la Figura 6.8 y la Figura 6.9, se han obtenido algunos resultados concluyentes calculando el error acumulado a lo largo de la trayectoria y su diferencia entre los tres métodos de suspensión utilizados. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.3.

	Balanceo (%)	Cabeceo (%)	Aceleración vertical (%)
Semi-Activa	59.84	45.17	-13.23
Activa	219.89	100.23	-54.30

Tabla 6.3. Resultados comparativos del ensayo de badenes contiguos sobre pista baja en referencia a la suspensión pasiva.

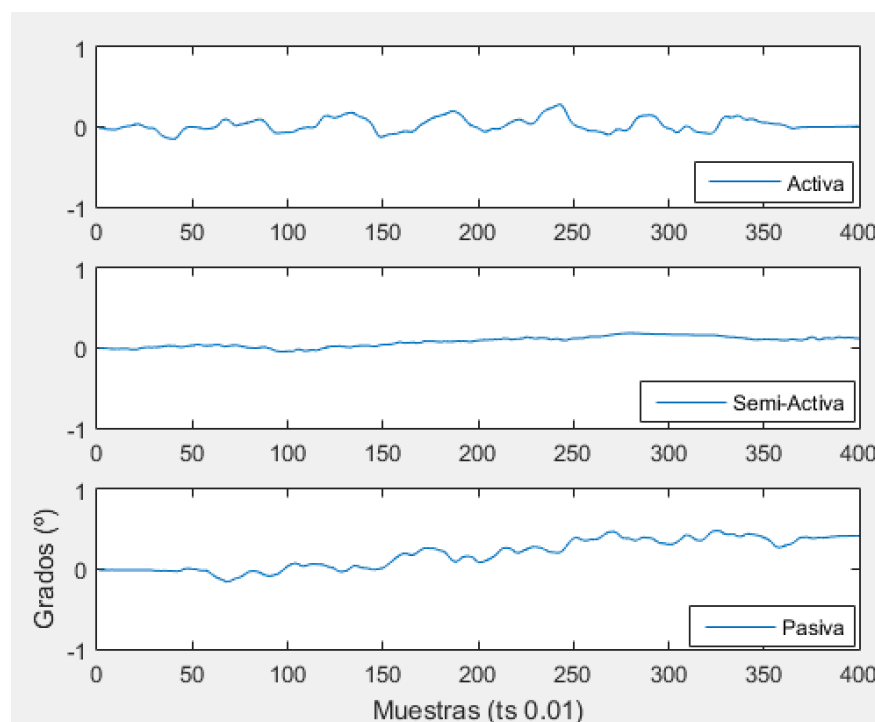


Figura 6.7. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

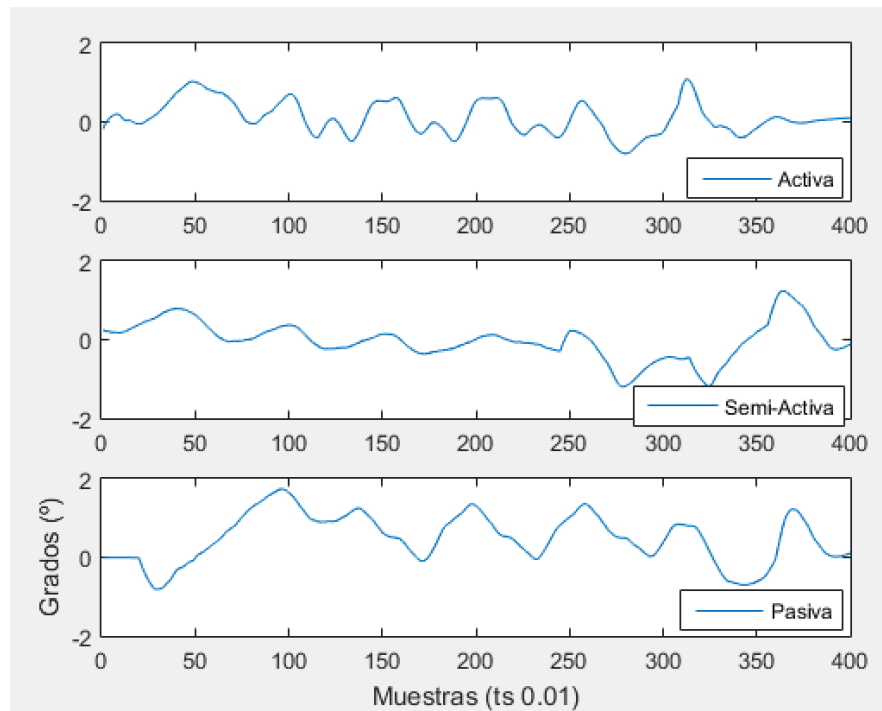


Figura 6.8. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

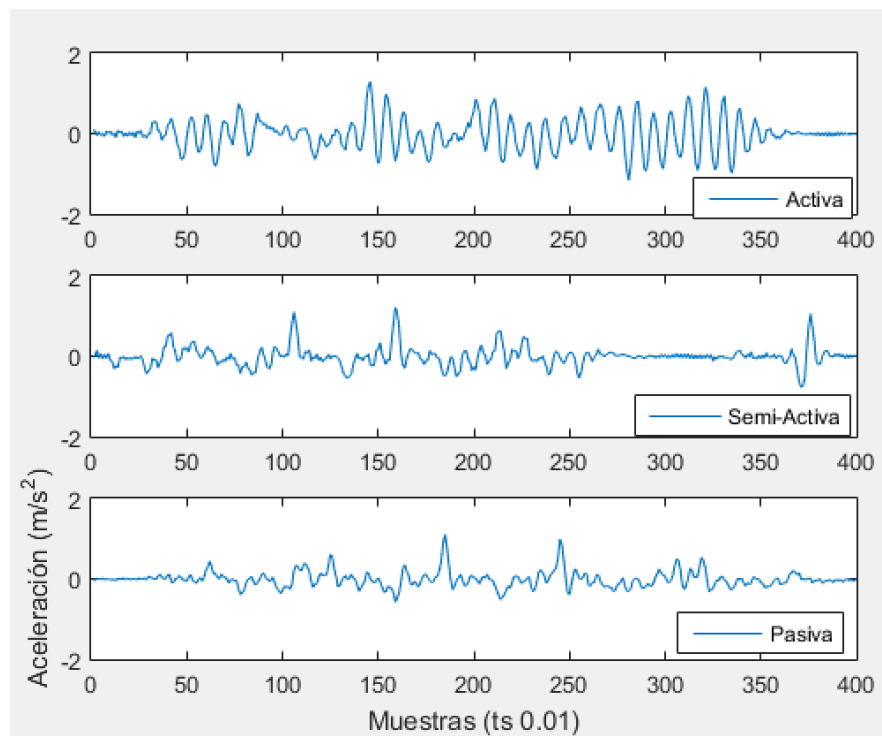


Figura 6.9. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).



6.2.2 ENSAYO TERRENO IRREGULAR

Comparando la Figura 6.10, la Figura 6.11 y la Figura 6.12, se han obtenido algunos resultados concluyentes calculando el error acumulado a lo largo de la trayectoria y su diferencia entre los tres métodos de suspensión utilizados. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.4.

	Balanceo (%)	Cabeceo (%)	Aceleración vertical (%)
Semi-Activa	-11.42	11.66	0.27
Activa	26.32	112.48	-37.25

Tabla 6.4. Resultados comparativos del ensayo de terreno irregular sobre pista baja en referencia a la suspensión pasiva.

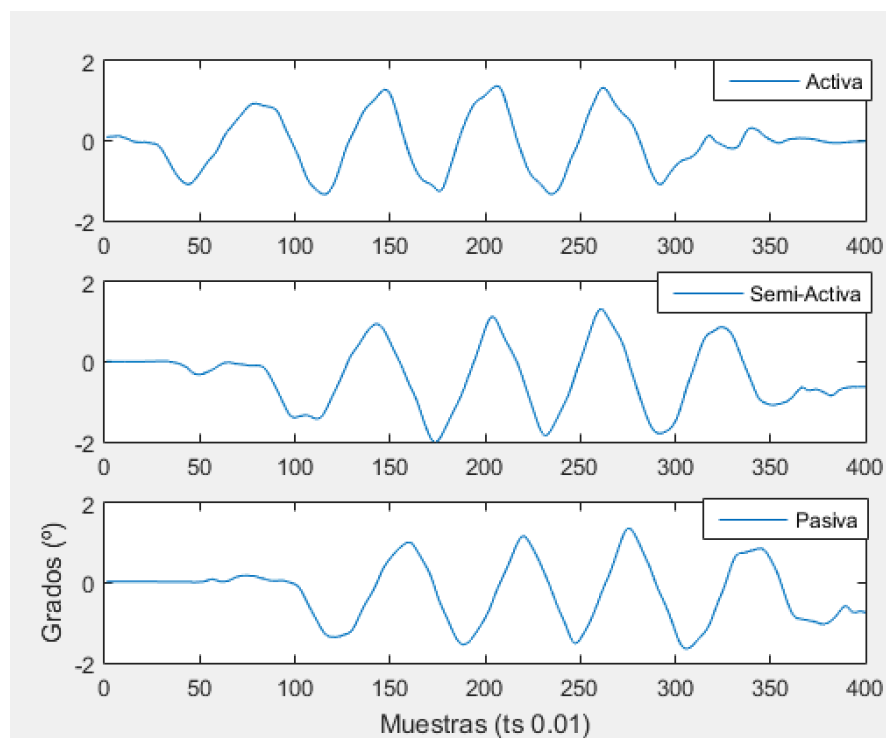


Figura 6.10. Comparativa del ángulo de balanceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

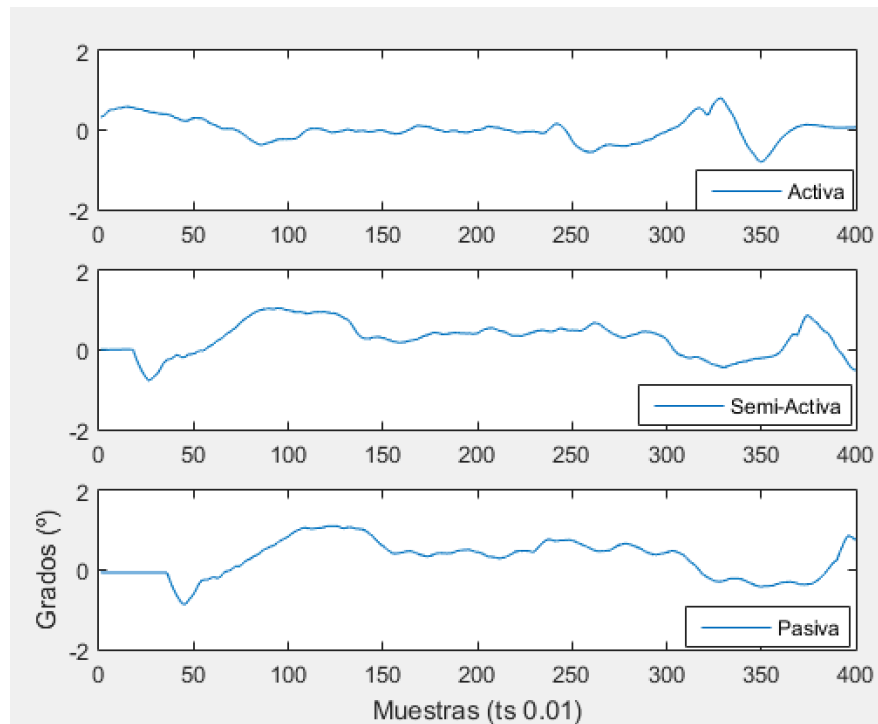


Figura 6.11. Comparativa del ángulo de cabeceo con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semi-activa (medio) y pasiva (abajo).

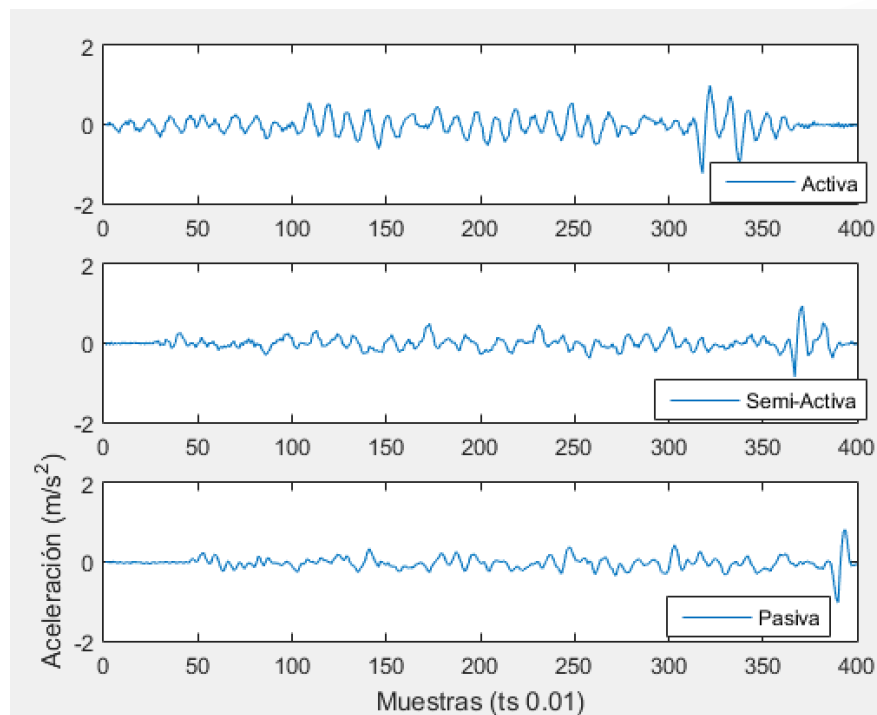


Figura 6.12. Comparativa de la aceleración vertical con los tres métodos de suspensión utilizados: activa (arriba), semiactiva (medio) y pasiva (abajo).





Capítulo 7 CONCLUSIONES

A raíz de los resultados explicados en el apartado anterior se puede afirmar que todos los objetivos de este proyecto se han cubierto satisfactoriamente.

El principal y la motivación del mismo era demostrar que un control digital puede mejorar las prestaciones de estabilidad y confort de un vehículo, y en este ámbito se ha conseguido una mejora de incluso más de un 200% en algunos casos si se toman los ángulos de inclinación del chasis como referencia. Además, se ha demostrado que un control PID no es lo suficientemente sofisticado para la actuación sobre la aceleración vertical de este chasis, ya que aunque este conseguía hacer la respuesta más normalizada, en el proceso también aumentaba dicha aceleración, algo contrario a su objetivo.

Por otro lado, el sistema mecánico de suspensión activa (y semi-activa) ha sido implantado y utilizado con total eficacia, lo que avala su gran diseño inicial.

Por último, los controles PID que actúan sobre los ángulos de alabeo y cabeceo han sido diseñados y mejorados consiguiendo respuestas muy satisfactorias y un gran control de los mismos, lo que conllevaría en un coche real un gran confort para los pasajeros, tanto ante posibles desperfectos de la calzada como en curvas cerradas en las que la relación entre las fuerzas centrípeta y centrífuga [35] intentara inclinar el vehículo.

Con esta línea de trabajo se espera dar a la Universidad Pontificia de Comillas experiencia en el ámbito de la suspensión activa, consiguiendo tanto la formación de estudiantes en este sector en futuro auge como la instauración de nuevas líneas de investigación que permitan desarrollar esta tecnología de cara al futuro, facilitando su extensión al uso cotidiano.





Capítulo 8 FUTUROS DESARROLLOS

Existen varios futuros proyectos que se podrían realizar como continuación de este, mejoras del mismo o utilidades paralelas relacionadas. Algunos ejemplos son:

- Diseño de controles más sofisticados (como LQR [36], predictivos [37] o realimentación de estados [38]) para el sistema mecánico de suspensión activa de este proyecto.
- Creación de un simulador que permita obtener datos reales acerca de este tipo y otros de amortiguación.
- Diseño de sistemas de amortiguación activa y semi-activa más complejos, como hidráulicos o electromagnéticos.
- Ensayos sobre una amortiguación real de un coche turismo, con el objetivo de modificar esta para hacerla activa, aunque sea sólo de una rueda.





BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morrillu, "¿Qué es la suspensión activa? - Circula Seguro", *Circula Seguro*, 2012. [Online]. Available: <http://www.circulaseguro.com/que-es-la-suspension-activa/>. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [2] C. Zhou, S. Zhang, P. Shi and P. Zhang, "Research on Active Suspension Control Strategy Based on the Model with Parameters of Hydraulic System", 2013 *Fourth Global Congress on Intelligent Systems*, 2013.
- [3] W. Sun, H. Gao and O. Kaynak, "Vibration Isolation for Active Suspensions With Performance Constraints and Actuator Saturation", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 675-683, 2015.
- [4] J. Ezeta, A. Mandow and A. Cerezo, "Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 10, no. 2, pp. 121-132, 2013.
- [5] E. Esmailzadeh and H. Bateni, "Optimal Active Vehicle Suspensions with Full State Feedback Control", *SAE Technical Paper Series*, 1992.
- [6] D. Giancoli, *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. México: Prentice Hall International, 2009.
- [7] S. Mateos Díaz, *Conformado de la chapa por plegado*. [Oviedo]: Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones, 2000.
- [8] S. Vorkoetter, "An Electronic Speed Control Primer", <http://www.stefanv.com>, 1997. [Online]. Available: <http://www.stefanv.com/electronics/escprimer.html>. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [9] R. Bez, E. Camerlenghi, A. Modelli and A. Visconti, "Introduction to flash memory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 4, pp. 489-502, 2003.
- [10] A. Burns and A. Wellings, *Real-time systems and their programming languages*. Wokingham, England: Addison-Wesley Pub. Co., 1990.
- [11] P. PP, "COM Port Based Distributed System", *Journal of Computer Science & Systems Biology*, vol. 06, no. 01, 2013.



-
- [12] S. Tatham, "PuTTY User Manual", *The.earth.li*, 2013. [Online]. Available: <http://the.earth.li/~sgtatham/putty/0.63/htmldoc/>. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [13] S. Mansfield-Devine, "Interview: Tatu Ylönen, SSH Communications Security", *Computer Fraud & Security*, vol. 2012, no. 5, pp. 13-16, 2012.
- [14] C. M. Kozierok, "The TCP/IP Guide - Telnet Connections and Client/Server Operation", *Tcpipguide.com*, 2005. [Online]. Available: http://www.tcpipguide.com/free/t_TelnetConnectionsandClientServerOperation.htm. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [15] "Vulnerability in rlogin", *Network Security*, vol. 1997, no. 11, pp. 2-3, 1997.
- [16] C. Nilsson and S. Mobile, "TCP and UDP Socket API", *W3.org*, 2015. [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/tcp-udp-sockets/>. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [17] J. Chen, S. Lee and D. DeBra, "Gyroscope free strapdown inertial measurement unit by six linear accelerometers", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 17, no. 2, pp. 286-290, 1994.
- [18] "Mechanics of the Gyroscope", *Nature*, vol. 128, no. 3225, pp. 289-289, 1931.
- [19] "Piezoelectric accelerometer", *Ultrasonics*, vol. 7, no. 2, p. 140, 1969.
- [20] R. Mahony, T. Hamel and J. Pflimlin, "Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 5, pp. 1203-1218, 2008.
- [21] "Application of Kalman Filter", *Econ Theory*, vol. 1, no. 01, pp. 144-145, 1985.
- [22] "Mission Planner Overview — Mission Planner documentation", *Arduipilot.org*, 2016. [Online]. Available: <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>. [Accessed: 17- Jul- 2016].
- [23] A. McAulay, "Optical analog to digital converter using optical logic and table look-up", *Optical Engineering*, vol. 29, no. 2, p. 114, 1990.
- [24] P. Jackson, "PRBS cross-correlation measurements by hybrid computational techniques", *The Computer Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 49-54, 1971.
- [25] A. Giordano and F. Hsu, *Least square estimation with applications to digital signal processing*. New York: Wiley, 1985.
- [26] P. Milner, "Optimised digital positional encoder patterns", *Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 87-90, 1995.
-



-
- [27] L. Lévesque, "Nyquist sampling theorem: understanding the illusion of a spinning wheel captured with a video camera", *Physics Education*, vol. 49, no. 6, pp. 697-705, 2014.
- [28] M. Nagao and K. Harada, "Inductor commutation soft-switched PWM inverter driven by frequency-modulated PWM signal", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 67-74, 1998.
- [29] F. Wagner, *Modeling software with finite state machines*. Boca Raton, FL: Auerbach, 2006.
- [30] R. Darus and Y. Sam, "Modeling and control active suspension system for a full car model", *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 2009.
- [31] H. Lee and D. Rivera, "CR-IDENT: A MATLAB TOOLBOX FOR MULTIVARIABLE CONTROL-RELEVANT SYSTEM IDENTIFICATION", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 1, pp. 708-713, 2006.
- [32] L. Pagola, *Regulación automática*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2006.
- [33] E. Foster, "Active low-pass filter design", *IEEE Transactions on Audio*, vol. -13, no. 5, pp. 104-111, 1965.
- [34] L. Koenig, "The bode diagram: An approach to regulating-system stability fundamentals", *Electr. Eng.*, vol. 78, no. 6, pp. 653-658, 1959.
- [35] W. Emerson, *The laws of centripetal and centrifugal force*. [London]: [publisher not identified], 1769.
- [36] S. Saifullah, S. Ma and S. Bdran, "The Design of Hopping Angle Control by Using PID and LQR Techniques", *AMM*, vol. 419, pp. 693-700, 2013.
- [37] S. Bououden, M. Chadli and H. Karimi, "A Robust Predictive Control Design for Nonlinear Active Suspension Systems", *Asian Journal of Control*, vol. 18, no. 1, pp. 122-132, 2015.
- [38] M. Bello, A. Akramin Shafie and R. Khan, "Active Vehicle Suspension Control Using Full State-Feedback Controller", *AMR*, vol. 1115, pp. 440-445, 2015.





Parte II ESTUDIO

ECONÓMICO





Capítulo 1 ESTUDIO ECONÓMICO

Como se ha narrado en el estado del arte del proyecto, el campo de investigación de la suspensión activa y semi-activa es un campo en constante desarrollo, en el cual se centran tanto los más importantes equipos de competición deportiva (como por ejemplo los de la Fórmula 1) como las grandes marcas de fabricación de vehículos utilitarios mundiales: Audi, Mercedes Benz, BMW, Renault, etc.

Esto hace que este proyecto esté abierto a un mercado enorme en ebullición, una de las grandes características de rentabilidad de cualquier producto, ya que hoy en día las últimas estadísticas afirman que en Europa hay una media de un coche cada dos habitantes.

Además, todas estas grandes empresas están diseñando nuevos sistemas constantemente, ya aunque se demuestra que estos sistemas mejoran la estabilidad del coche de forma brillante ninguno de ellos todavía es rentable para comercializarse en serie: su coste de diseño, fabricación e instalación conlleva demasiados gastos y hace subir demasiado el coste del vehículo, por no hablar de que en general se usan sensores delicados de altas prestaciones que requieren mantenimiento o cuidados.

Por ello necesitan ingenieros formados en el ámbito, que sean capaces de investigar modelos prácticos y viables, algo que la Universidad Pontificia Comillas puede aportar a raíz de este proyecto y sus venideros, creando una nueva área de inserción laboral en empresas multinacionales y de gran prestigio.





Parte III ANEXOS





Capítulo 1 ANEXO A

En este anexo se recoge el código del fichero maestro *Config_SIMULATOR.m*. Este archivo contiene lo necesario para inicializar la IMU y que esta funcione sin errores.

```
clc
clear
format short e

% Gravity (m/s^2)
Gravity=9.81;

%% Sampling times
% Sampling time for RC transmitter
ts_PPM=20e-3;
% Sampling time for IMU and STATE ESTIMATION
ts_IMU=5e-3;
% Sampling time for UART
ts_UART=20e-3;
% Sampling time for ATTITUDE CONTROL
ts_ATT_CONTROL=5e-3;
% Sampling time for NAVIGATION CONTROL
ts_NAV_CONTROL=20e-3;

%% SIMULATION PARAMETERS
% Simulation final time
tfin=400;

%% HARDWARE COMPONENTS
% BATTERY
BATTERY_CELLS=2;
BATTERY_NOMINAL_VOLTAGE=3.7*BATTERY_CELLS;
BATTERY_MAXIMUM_VOLTAGE=4.2*BATTERY_CELLS;
BATTERY_MINIMUM_VOLTAGE=3.5*BATTERY_CELLS;
% IMU
run('..\HARDWARE_COMPONENTS\config_MPU60X0')
% COMPASS
run('..\HARDWARE_COMPONENTS\config_HMC5883L')

%% Model parameters
ModelParameters

%% Bus definitions
BusDefinitionUAV;
BusDefinitionMotor;
BusDefinitionCommand;
```



```
BusDefinitionSensors;
BusDefinitionEnvironment
BusDefinitionStates;

%% Variants Conditions
% Add enum structure for the Variants

Simulink.defineIntEnumType('Variants',{ 'Command','Vehicle','Environment',...

'Sensors','Visualization','Actuators','Controller','Estimator','Navigation','NavEst'},[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0]);
% Command: 0-Signal Builder / 1-Joystick / 2-Data
Variants.Command = 0;
% Sensors: 0-Outdoors
Variants.Sensors = 0;
% Environment: 0-Constant / 1-Variable
Variants.Environment = 0;
% Visualization: 0-Scopes / 1-Workspace / 2-Flightgear / 3-MAVLink
Variants.Visualization = 3;
% Actuators:0-Feedthrough / 1-Linear 1st Order / 2-Linear 2nd Order / 3-Nonlinear 2nd Order
Variants.Actuators = 0;
% Vehicle: 0-Detallado / 1-Euler / 2-Quaternion
Variants.Vehicle = 0;
% Controller: 0-PID / 1-SFC / 2-PD_Voos
Variants.Controller = 0;
% Attitude estimator
% 0 - Divided Difference Filter NO FUNCIONA
% 1 - EKF desacoplado no lineal OK
% 2 - EKF desacoplado lineal OK
% 3 - EKF (Extended Kalman Filter) OK
% 4 - Filtro complementario no lineal OK GOLD
% 5 - Multiplicative extended Kalman Filter (MEKF) OK SILVER
% 6 - Quaternion complementary Filter OK
Variants.Estimator =4;
% Navigation Control: 0-PID / 1-SFC / 2-Height PID
Variants.Navigation = 2;
% Navigation Estimator: 0-GPS Height
Variants.NavEst = 0;

%% Initial values
% Initial date
InitialValues = struct('Date',[2015 1 1 0 0 0]);
% Madrid GPS coordinates
InitialValues.PosLLA = [40.4167754 -3.70379019999999576 646.4];
% NED frame coordinates
InitialValues.PosNED = [0 0 0];
% Body velocity
InitialValues.Vb = [0 0 0];
% NED Velocity
InitialValues.VelNED = [0 0 0];
% Euler angles
InitialValues.Euler = [0 0 0];
% Quaternions
```



```
InitialValues.Quaternion = [1 0 0 0];
% Angular rates
InitialValues.AngRates = [0 0 0];
% Earth Reference frame
InitialValues.Greenwich = 0;
% Throttle para compensar el peso
InitialValues.StationaryThrottle =
sqrt(UAV.Mass*Gravity/4/Motor.ThrustFactor)*60/2/pi/Motor.KV/BATTE
RY_NOMINAL_VOLTAGE;

%% Control Design
switch Variants.Controller
    case 0
        Control=PIDAttitudeControl(UAV,Motor,ts_ATT_CONTROL);
        param_control_orientacion=[Control.K_roll
Control.invTi_roll Control.Td_roll Control.b_roll ...
Control.K_pitch
Control.invTi_pitch Control.Td_pitch Control.b_pitch ...
Control.K_yaw
Control.invTi_yaw Control.Td_yaw Control.b_yaw'];
    case 1
        Control=StateFeedbackAttitudeControl(ts_ATT_CONTROL);
        param_control_orientacion=[Control.tc Control.kad_Phi
Control.kad_Theta Control.kad_Shi Control.alfa Control.beta]';
    case 2
        Control=PDVoosAttitudeControl(UAV,Motor,ts_ATT_CONTROL);
        param_control_orientacion=[Control.Kp_Phi Control.Kd_Phi
Control.Kp_Theta Control.Kd_Theta Control.Kp_Shi Control.Kd_Shi
InitialValues.StationaryThrottle]';
end
% Maximun angle for RC channel (rad)
Control.ang_max = 35*pi/180;
% Maximun yaw rate for RC channel (rad/s)
Control.yaw_rate_max = 35*pi/180;
switch Variants.Navigation
    case 0
        Navigation=PIDNavigationControl(ts_NAV_CONTROL);
    case 1
        Navigation=StateFeedbackNavigationControl(ts_NAV_CONTROL);
        param_control_navegacion=[Navigation.tc Navigation.kad_x
Navigation.kad_y Navigation.kad_z Navigation.alfa
Navigation.beta]';
    case 2
        % Modelo 1/m/s^2 => Control = K*(1+Td*s) => Lazo cerrado:
1+G(s) =
        % = m*s^2 + K*Td*s + K => K = m*wn^2 ; Td = 2*seta/wn
wn_height=1;
seta_height=1.4;
K_height=1.2*UAV.Mass*wn_height^2;
Ti_height=200;
% Derivada filtrada en tiempo discreto (regla trapezoidal)
% 2*Td*N/(2*Td+N*ts)*(1-z^-1)/(1+(ts-
2*Td)/((2*Td+N*ts)*z^-1)
Td_height=2*seta_height/wn_height;
b_height=1;
N_height=5;
```



```
param_control_navegacion=[K_height Ti_height Td_height  
b_height N_height]';  
end  
  
%% Parameters  
% Model  
param_modelo=[UAV.Mass UAV.ArmLength Motor.ThrustFactor  
Motor.DragFactor UAV.Inertia(1,1) UAV.Inertia(2,2)  
UAV.Inertia(3,3) Motor.Resistance Motor.KV Motor.Inertia  
UAV.Frame]';  
% Calibration filter for IMU  
alfa_CAL_IMU=0.995;  
  
%% Sensor dynamics parameters  
SensorParameters  
  
%% MAVLink  
% Magic or seed byte for version checking  
MAVLINK_MESSAGE_CRCS =uint8([...  
50 124 137 0 237 217 104 119 0 0 ...  
0 89 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
214 159 220 168 24 23 170 144 67 115 ...  
39 246 185 104 237 244 222 212 9 254 ...  
230 28 28 132 221 232 11 153 41 39 ...  
214 223 141 33 15 3 100 24 239 238 ...  
30 200 183 0 130 0 148 21 0 52 ...  
124 0 0 0 20 0 152 143 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 231 ...  
183 63 54 0 0 0 0 0 0 0 ...  
175 102 158 208 56 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...  
49 170 44 83 46 0 ]);  
  
return
```




Capítulo 2 ANEXO B

En este anexo se recoge el código del fichero maestro *IMU_param_prep_datos.m*. Este archivo sirve como base para inicializar el ajuste de datos usado en varias partes del proyecto, pero concretamente inicializa el ajuste de datos usado para calibrar la IMU.

```
IMU_Datos_doble_ac
TF_Ensayos

plot([Alaveo,Cabeceo,Up1,Up2])
grid
disp('Hacer zoom en la zona de interés de la figura')
disp('Después, pulsar cualquier tecla')
pause
[aux1,aux2]=ginput(2);
aux1=round(aux1);
N=aux1(2)-aux1(1)+1;
time=(0:N-1)*tr;
time=time(:);
ent=[x1(aux1(1):aux1(2)),x2(aux1(1):aux1(2)),x3(aux1(1):aux1(2)),x
4(aux1(1):aux1(2)),x5(aux1(1):aux1(2)),x6(aux1(1):aux1(2))];
%ent=ent-ent(1);
%ent=ent-mean(ent(1:30));
sal=[Alaveo(aux1(1):aux1(2)),Cabeceo(aux1(1):aux1(2))];
%sal=sal-sal(1);
%sal=sal-mean(sal(1:30));
plot(time,[sal ent])
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('y(t) y u(t)')
grid
```





Capítulo 3 ANEXO C

En este anexo se recoge el código del fichero maestro *IMU_param_ajuste.m*. Este archivo sirve como base para realizarel ajuste de datos usado en varias partes del proyecto, pero concretamente realiza el ajuste de datos usado para calibrar la IMU.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%   ALGORITMO DE ESTIMACION DE PARAMETROS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%   POR MINIMOS CUADRADOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear theta thaux dgn J
format compact
format short e
%set_param('sistema','MaxConsecutiveZCMsg','none');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%   PARAMETROS Y VALORES INICIALES %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% modelo motor: th = [Km Tm Offset]
th=[0.98];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
theta=th;
Np=length(theta);           % Numero de parametros
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%   PARAMETROS DEL ALGORITMO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ts=time(2)-time(1); % Periodo de muestreo
tfin=time(end); % Tiempo final de simulacion
Tsamp=ts; % Intervalo fijo de integracion
Nd=tfin/Tsamp; % Numero de datos en el ajuste
tol1=1; % Tolerancia (variacion de la funcion objetivo 'V')
tol2=1; % Tolerancia (variacion de los parametros 'theta')
```



```
V=1; % Inicializacion del valor anterior la funcion objetivo
Vaux=0.01; % Inicializacion del valor nuevo de la funcion objetivo
dgn=ones(1,Np); % Direccion de Gauss-Newton (incremento de los
parametros)
niter=0; % Numero de iteraciones
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ALGORITMO DE AJUSTE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% El algoritmo se ejecuta mientras (bucle while) la variacion de
% la funcion objetivo en % es mayor que 'tol1' o el maximo
incremento
% en % de los parametros es mayor que 'tol2'.
% Tambien se puede usar como criterio el numero de iteraciones.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

while (100*(V-Vaux)/Vaux>tol1 || 100*max(abs(dgn./theta))>tol2) %&
niter<10

    niter=niter+1; % Se incrementa el numero de iteraciones

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Actualizacion de los parametros
    th=theta;
    %h0=theta(2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Simulacion del sistema
    % [t,x,ys,ym,error]=sim('sistema',tfin);
    sim('IMU_param_sistema')
    ym=[ymed(:,2);ymed(:,3)];
    ys=[ysim(:,2);ysim(:,3)];
    error=ys-ym;
    % Funcion objetivo (error cuadratico medio)
    V=sqrt(sum((error).^2)/Nd);
    % Construcccion de la matriz Jacobiana por diferencias finitas
    for i=1:Np
        thaux=theta;
        h=.001*abs(theta(i)); % Incremento para las derivadas
        if abs(theta(i))<10*sqrt(eps)
            h=.01*sqrt(eps);
        end
        thaux(i)=theta(i)+h;
        % Actualizacion de los parametros
        th=thaux;
        % Simulacion
        sim('IMU_param_sistema')
```



```
ym=[ymed(:,2);ymed(:,3)];
yaux=[ysim(:,2);ysim(:,3)];
error=yaux-ym;
% Matriz de sensibilidades
J(:,i)=(yaux-ys)/h;
end

% Representacion grafica de 'ys', 'ym' y del error=ys-ym
clf
plot(ymed(:,1),ymed(:,2),'-r',ysim(:,1),ysim(:,2),'-b')
xlabel('Tiempo (s)')
legend('Salida medida','Salida simulada')
grid
% disp('PULSA UNA TECLA PARA CONTINUAR')
% pause

dgn=(J\ (ym-ys))'; % Direccion de Gauss-Newton

% BUSQUEDA DE 'MU' (ajuste del paso en la direccion de Gauss-
% Newton para garantizar una disminucion de la funcion
objetivo
mu=2; % Inicializacion de mu
Vaux=V+10; % Inicializacion de la funcion objetivo en el nuevo
punto
stb=1; % Flag de estabilidad del sistema (0-inestable: 1-
estable)

% Busqueda de 'mu' mientras no se reduzca la funcion objetivo
o
% el sistema sea inestable
thaux=theta;

while Vaux > V %|| any(thaux<0)
    mu=mu/2; % Reduccion del paso
    thaux=theta+mu*dgn; % Actualizacion de parametros

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Actualizacion de los parametros del regulador
th=thaux;
%h0=thaux(2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Simulacion con los nuevos parametros

[t,x,yaux,ym,error]=sim('sistema',tfin);
if any(thaux<0)
    Vaux=inf;
else
    sim('IMU_param_sistema')
    ym=[ymed(:,2);ymed(:,3)];
    yaux=[ysim(:,2);ysim(:,3)];
    error=yaux-ym;
```



```
% Actualizacion de la funcion objetivo
Vaux=stb*sqrt(sum((yaux-ym).^2)/Nd);
    end
end

% Parametros y funcion objetivo en pantalla
theta=thaux;
disp('PAR;METROS')
disp(theta)
disp('FUNCIÓN DE COSTE')
disp(Vaux)
end

% Matriz de covarianzas de los parametros (Sensibilidades)
%P=Vaux^2*inv(J'*J);
%disp('Coeficientes de dispersión')
%disp(100*sqrt(diag(P)') ./theta)
```



Parte IV DATASHEETS





Capítulo 1 SENSOR INFRARROJO

SHARP

GP2Y0A51SK0F

GP2Y0A51SK0F

Distance Measuring Sensor Unit
Measuring distance : 2 to 15 cm
Analog output type



■Description

GP2Y0A51SK0F is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IR-LED (infrared emitting diode) and signal processing circuit. The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method. This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

■Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2002/95/EC)

■Applications

1. Cleaning robot
2. Personal robot
3. Sanitary

■Features

1. Distance measuring sensor is united with PSD, infrared LED and signal processing circuit
2. Short measuring cycle (16.5ms)
3. Distance measuring range : 2 to 15 cm
4. Compact size (27.0 × 10.8 × 12.0mm)
5. Analog output type

Notice The content of data sheet is subject to change without prior notice.

In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.

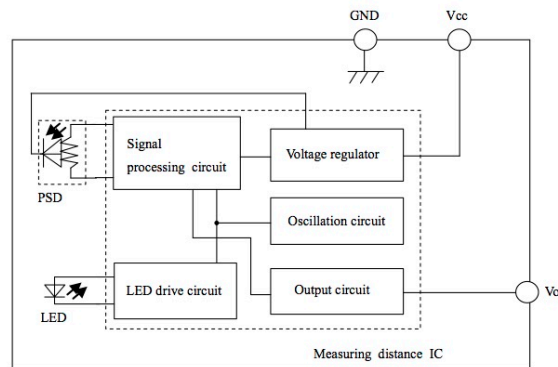
Sheet No.: OP13007EN



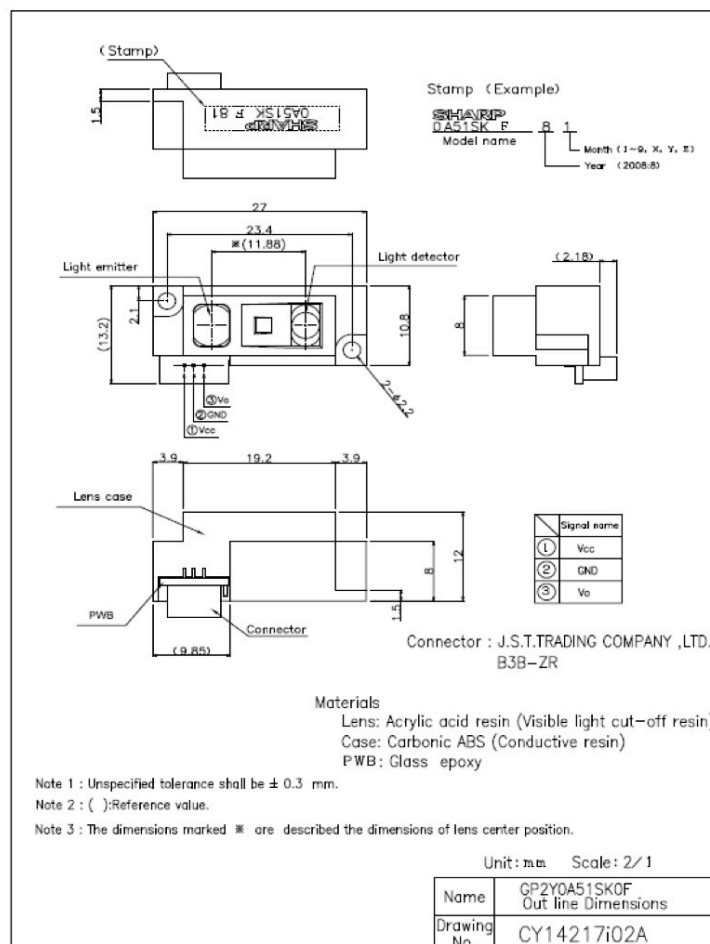
SHARP

GP2Y0A51SK0F

■Schematic



■Outline





SHARP

GP2Y0A51SK0F

■Absolute maximum ratings

(Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Ratings	Unit	Remark
Supply voltage	Vcc	-0.3 to +7	V	-
Output terminal voltage	Vo	-0.3 to Vcc+0.3	V	-
Operating temperature	Topr	-10 to +60	°C	-
Storage temperature	Tstg	-40 to +70	°C	-

■Operating supply voltage

Symbol	Rating	Unit	Remark
Vcc	4.5 to 5.5	V	-

■Electro-optical Characteristics

(Ta=25°C, Vcc=5V)

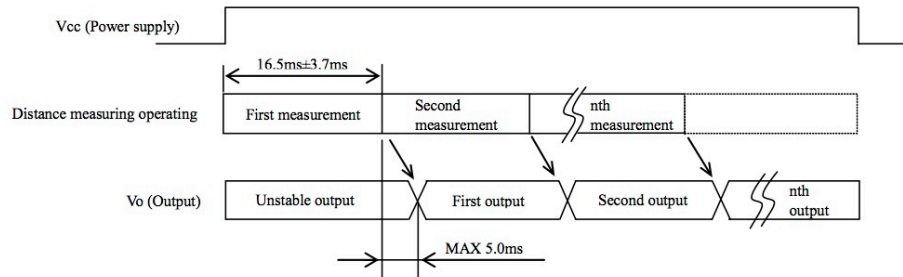
Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Measuring distance range	ΔL	(Note 1)	2	-	15	cm
Output terminal voltage	Vo	L=15cm (Note 1)	0.25	0.4	0.55	V
Output voltage difference	ΔVo	Output change at L change (15cm → 2cm) (Note 1)	1.35	1.65	1.95	V
Average supply current	Icc	L=15cm (Note 1)	-	12	22	mA

※L : Distance to reflective object

(Note 1) Using reflective object : White paper

(Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27 • white face, reflective ratio ; 90%)

■Timing Chart



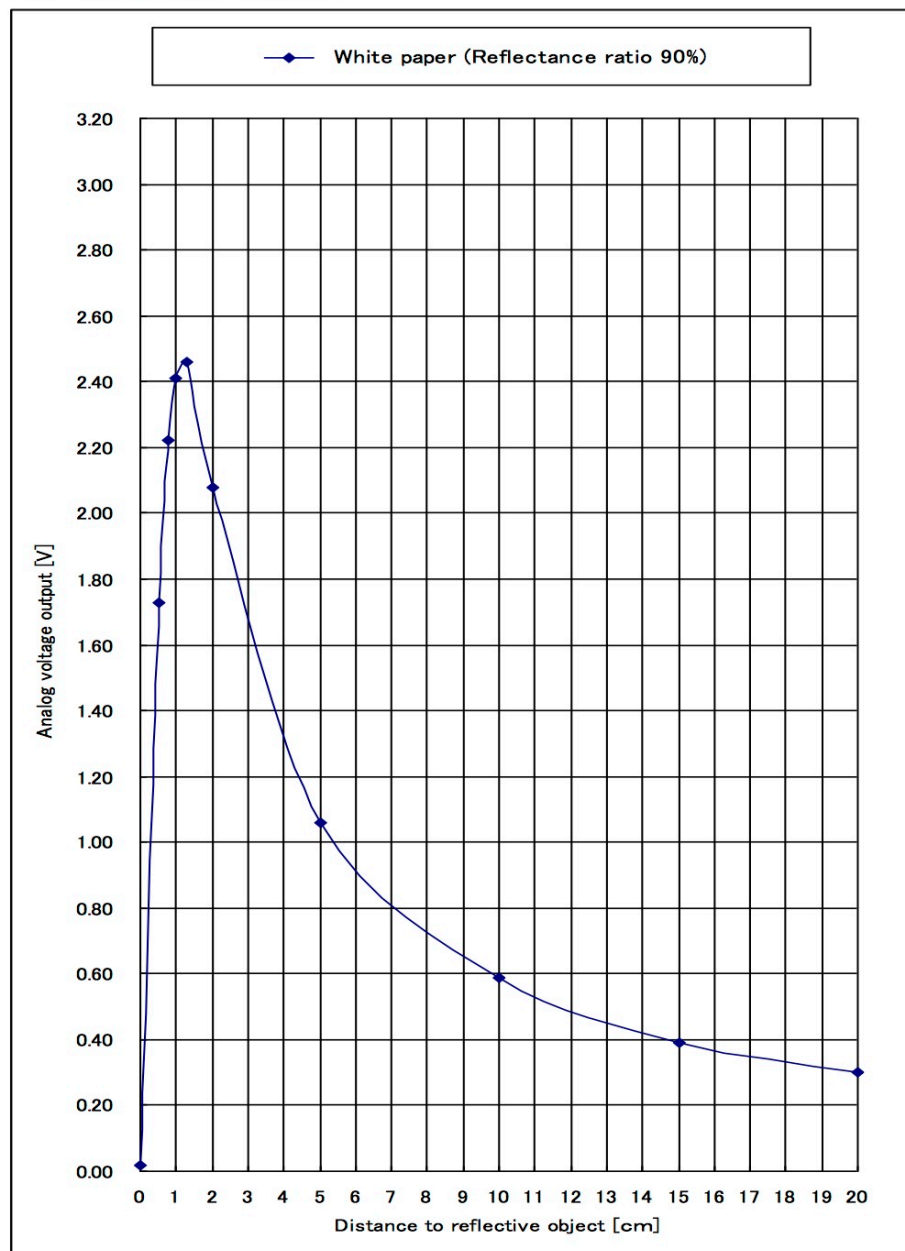


SHARP

GP2Y0A51SK0F

■Supplements

- Example of output distance characteristics



Capítulo 2 MOTOR BRUSHLESS 3900KV

Sensor motors and controllers („SE“ marking).

25 / 38

X-series V7

Sensor motors (BLDC motors with sensors) can have, generally, various connectors for sensors. When your motor matches EFRA specification, situation is simpler.

When your motor has with EFRA specification connector or not or you are not 100% sure that sensor connector matches EFRA specifications or you are not sure which wires is „A“, which „B“ etc., necessary make „Automatic sensor setting“ first ! This means before any tests – first start with sensor motor must be make always in “Automatic sensor setting” mode ! Otherwise, risk destruction or damage of the controller.

Nevertheless, this (Automatic sensor setting) is very advantageous make in all cases, i.e. also for EFRA compatible motors – some of them have sensors not in optimal positions – and needless losses rise from this. **Automatic sensor setting** eliminates this imperfection and optimizes sensors setting also for these motors.

When you change motor, make this setting again.

IMPORTANT: When motor rotate to other side than you need, necessary change rotation direction **ONLY** by controller setting, in parameter P54, “Reversal of motor revolution”. No permit swap two motor wires (phases) as for sensorless motor !!!

In all cases is necessary observe all pin specification, as show in follow figure:

SENSOR MOTORS:

Sensor motor according to EFRA specification:

- must have 6-pin JST ZH connector model ZHR-6 or equivalent, marked as SZH-002TP0.5 26-28 awg. for sensors and heat sensor connection

Pins specification of this connector:

Pin #1 – black wire, ground potential (minus)

Pin #2 – orange wire, sensor phase C

Pin #3 – white wire, sensor phase B

Pin #4 – green wire, sensor phase A

Pin #5 – blue wire, motor temperature sensing, 10 k Ω NTC
(other end of sensor is on ground potential, pin #1)

Pin #6 – red wire, sensors feeding, +5.0 V $\pm$ 10%.

(supply voltage for sensors provide controller, don't connect external voltage !)

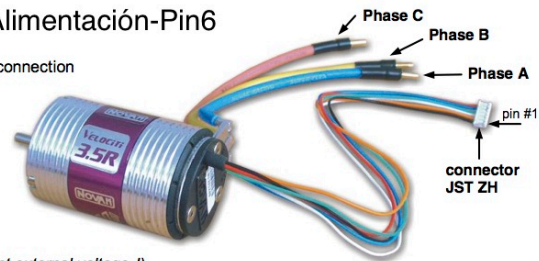
- power wires are marked A, B, C – connect to phases of controller, with the same name.

A for phase A

B for phase B

C for phase C

Alimentación-Pin6

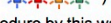


Example: Motor by NOVAK,
Velocity 3.5R Brushless Motor

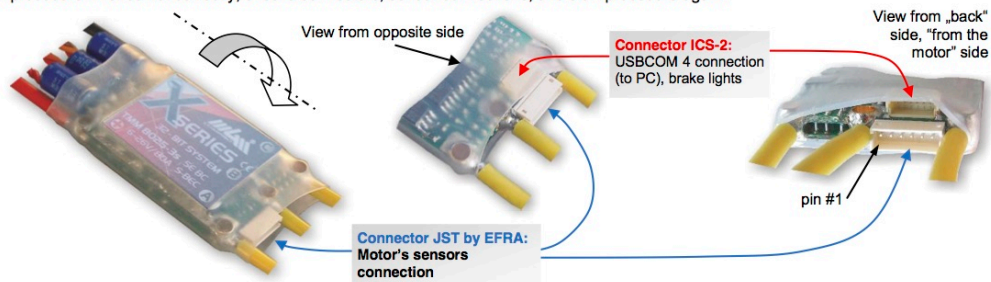
Sensor supply wires (pin #1 and pin #6) and temperature sensor wire (pin #5) no possible change ! Connection of Sensor outputs for phases (pin #2, pin #3, pin #4) aren't so strict – this can be connect in other order, providing that you make Automatic sensor setting first.

Automatic sensor setting procedure.

This setting is necessary make on the not loaded motor – i.e. without propeller or pinion for gear !

- 1) connect motor to controller, include sensor cable, connect to PC and turn on controller.
- 2) in program „Controller 2“ set parameter P46, **Motor type** to „Sensor motor – Automatic sensor setting“
- 3) write this setting to controller by button „Write setting“
- 4) turn off controller (USBCOM 4 is possible disconnect)
- 5) turn on transmitter
- 6) when controller is not connected to receiver, connect now, to throttle channel (for OPTO version also turn on receiver supply)
- 7) turn on controller again, **if you don't set throttle limits (= you have automatic limits), must go through the initial setup limits procedure, i.e.** until state of lighting **blue LED** and **yellow LED** (throttle in Neutral position) 
- 8) move throttle stick to full throttle forward, controller start run motor and automatically stop  or 
- 9) LED indicate correct finishing of this operation by **blinking of blue LED** 
(in case of some problem start **blinking all LEDs** )
- 10) if you don't see LEDs (controller is somewhere inside model) you can check correct finishing of this procedure by this way:
move throttle stick back to STOP position and try increase throttle again → motor must not start run now
- 11) switch-off controller, sensors position and phase are correct and optimize, after correct finishing procedure controller automatically switch **Motor type** parameter to “sensors” – you can check this also by read data via program **Controller 2**.
- 12) when you turn on controller now, working with sensors – you can connect load to motor (propeller, pinion, ..)

When procedure finishes not correctly, checks connectors, sensor connections, and start procedure again.





UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

29 / 38

X-series V7

Technical data. (valid for 25°C environment temperature)

Temperature of the environment: 0°C to 40°C
Motor controlling: PWM: from 8 up to 32 kHz
Number of regulation steps: 2048 / full throttle range
Max. rpm for 2 poles motor: 250 000 rpm
Suitable for motors: 2 to 40 pole motors of classical conception (rotor inside) and also for outrunners (rotor is on the outer side)
(sensors + sensorless) FreeAir, Hacker, Kontronik, Lehner, Mega AC, Model Motors, MP JET, MVVS, Neu, PJS, Plettenberg, Überall model, etc.
Control signal: Positive pulses 1.5 ± 0.8 ms, period 3 up to 30 ms
S-BEC (switching BEC) : 5V, 6V / 2A cont., 6A max. (10 sec.), input voltage = 6 up to 35V by type (OPTO versions haven't BEC !)
HV-BEC (switching BEC) : 5V, 6V, 7V, 8V / 2A cont., 6A max. (10 sec.), input voltage = 6 up to 35V by type (OPTO versions haven't BEC !)
Feeding: only from batteries: NiCd, NiMH, Li-Ion, Li-Pol, A123, acid (Pb) or others cells (using of power supplies is prohibited !)
Servocables: with JR gold connectors, 0.25mm²

Weight is defined for basic modification, i.e. **internal cooling plate, shrinking tube, OPTO, input PWM driving (servocable #1), without switch.**

In case of use additional parts as external heat sinks, fans, ... weight increase :

dimension HT (ribbed heatsink) : +3,5 mm +7,5 gram (single heatsink = 37,5 × 31 × 5 mm / 11 gram), take off internal cooling plate
dimension HTW (1 × water cooler) : +9 mm +16,5 gram (single heatsink = 37,5 × 31 × 6 mm / 15 gram, pipes Ø 4 / Ø 3, length 13 mm)
dimension HTW (2 × water cooler) : +6 mm +15 gram
dimension F (fan) : +10 mm +10 gram (30 × 30 × 10 mm / include screws / 10 gram)
switch (with wire) : +2 gram
servocable #2 - #5 (each one) : +3,2 gram
S-BEC, HV-BEC : +3 gram

Dimensions are relate to pictures in chapter "Available versions"

Note: by shortening of power cables to motor and battery (power supply) weight decrease proportionally

X-series TMM® xxxx-3	V 7.xx	6026-3	8026-3	12026-3	16026-3	28026-3	8017-3LV	16017-3LV
Maximal continuous power:		1,56 kW	2,08 kW	3,12 kW	4,16 kW	7,28 kW	1,36 kW	2,72 kW
Basic dimensions see picture [mm]								
Dimension CL (Filtering capacitors) [mm]:		Ø 8 × 17	Ø 8 × 17	Ø 10 × 17	Ø 10 × 17	Ø 10 × 17	Ø 8 × 17	Ø 10 × 17
Dimension CT (Controller thickness) [mm]:		13	14	17	19	25	14	19
Dimension D (M3 threads distance) [mm] *):		--	--	22	24	30	--	24
Weight without power cables:		34 g	36 g	48 g	56 g	82 g	36 g	56 g
Weight with power cables:		47 g	49 g	77 g	91 g	125 g	46 g	91 g
Feeding voltage:		6 – 26 V	6 – 26 V	6 – 26 V	6 – 26 V	6 – 26 V	4.5 – 17 V	4.5 – 17 V
No. of feeding cells NiCd / NiMH:		6 – 18	6 – 18	6 – 18	6 – 18	6 – 18	6 – 12	6 – 12
No. of feeding cells Li-Ion / Li-Pol:		2 – 6	2 – 6	2 – 6	2 – 6	2 – 6	2 – 4	2 – 4
No. of feeding cells A123:		3 – 7	3 – 7	3 – 7	3 – 7	3 – 7	2 – 4	2 – 4
Max. continuous current:		60 A	80 A	120 A	160 A	280 A	80 A	160 A
Peak current for max. 5 seconds:		75 A	100 A	150 A	200 A	340 A	100 A	200 A
On-state FET resistance at 25 °C:		2×0,8 mΩ	2×0,7 mΩ	2×0,4 mΩ	2×0,35 mΩ	2×0,18 mΩ	2×0,55 mΩ	2×0,28 mΩ
Possible modification:		BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO
Possible BEC version:		S / HV	S / HV	S / HV	S / HV	S / HV	S	S
Cables cross section to batt. ■ ■ / motor ■ ■ ■ ■ *):		2,5/2,5 mm ²	2,5/2,5 mm ²	4/4 mm ²	6/4 mm ²	6/4 mm ²	2,5/2,5 mm ²	6/4 mm ²

X-series TMM® xxxx-3	V 7.xx	7035-3	14035-3	25035-3	6245-3	12545-3	7063-3	14063-3
Maximal continuous power:		2,45 kW	4,90 kW	8,75 kW	1,79 kW	5,62 kW	4,41 kW	8,82 kW
Basic dimensions see picture [mm]								
Dimension CL (Filtering capacitors) [mm]:		Ø 8 × 17	Ø 10 × 17	Ø 10 × 17	Ø 10 × 31	Ø 10 × 31	Ø 8 × 31	Ø 10 × 31
Dimension CT (Controller thickness) [mm]:		14	19	25	19	25	13	17
Dimension D (M3 threads distance) [mm] *):		--	24	30	24	30	--	22
Weight without power cables:		36 g	56 g	77 g	51 g	76 g	37 g	63 g
Weight with power cables:		49 g	91 g	120 g	65 g	105 g	51 g	98 g
Feeding voltage:		6 – 35 V	6 – 35 V	6 – 35 V	9 – 45 V	9 – 45 V	9 – 63 V	9 – 63 V
No. of feeding cells NiCd / NiMH:		6 – 24	6 – 24	6 – 24	9 – 32	9 – 32	9 – 44	9 – 44
No. of feeding cells Li-Ion / Li-Pol:		2 – 8	2 – 8	2 – 8	3 – 10	3 – 10	3 – 15	3 – 15
No. of feeding cells A123:		3 – 9	3 – 9	3 – 9	4 – 12	4 – 12	4 – 17	4 – 17
Max. continuous current:		70 A	140 A	250 A	62 A	125 A	70 A	140 A
Peak current for max. 5 seconds:		90 A	180 A	300 A	77 A	155 A	90 A	180 A
On-state FET resistance at 25 °C:		2×1,1 mΩ	2×0,55 mΩ	2×0,28 mΩ	2×1,0 mΩ	2×0,50 mΩ	2×0,65 mΩ	2×0,33 mΩ
Possible modification:		BEC/OPTO	BEC/OPTO	BEC/OPTO	OPTO	OPTO	OPTO	OPTO
Possible BEC version:		S / HV	S / HV	S / HV	--	--	--	--
Cables cross section to batt. ■ ■ / motor ■ ■ ■ ■ *):		2,5/2,5 mm ²	6/4 mm ²	6/4 mm ²	2,5/2,5 mm ²	4/4 mm ²	2,5/2,5 mm ²	6/4 mm ²

***) Notice:** possibly also 2×2,5 mm² or 2×4,0 mm² upon request

The appearance and the technical data may be changed without prior notice.

„Low voltage versions“ of the controllers, marking „LV“ are suitable for application with low voltage supply (for example. 2x Lipol etc..) and high current consumption, which evoke extremely voltage drops on the internal resistance of the battery as well as on the power cables. Supply voltage can drop up to value around 4.5V.

Important: In case traction battery voltage drops below BEC voltage (not depend if continuous or in motor PWM pulses), not possible provide correct BEC voltage ! and receiver and/or servos must this situation (lower or pulsed BEC voltage) tolerate. Should this bring problem for receiver or servos, necessary supply these components from other source (separate cells for example).

Recommendations: If you use controller for currents higher than ca half of the maximal values, we do recommend intensive cooling by air flow or use of heat sinks (possibly also active cooling using fans or water cooling for boats). This will not only prevent possible overheating of the controller, but you will also gain higher efficiency of the drive unit (cooler controller has lower losses than warm one).



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

PLANOS

Autor:

Fº de Borja Jiménez Valverde

Directores:

Juan Luis Zamora Macho

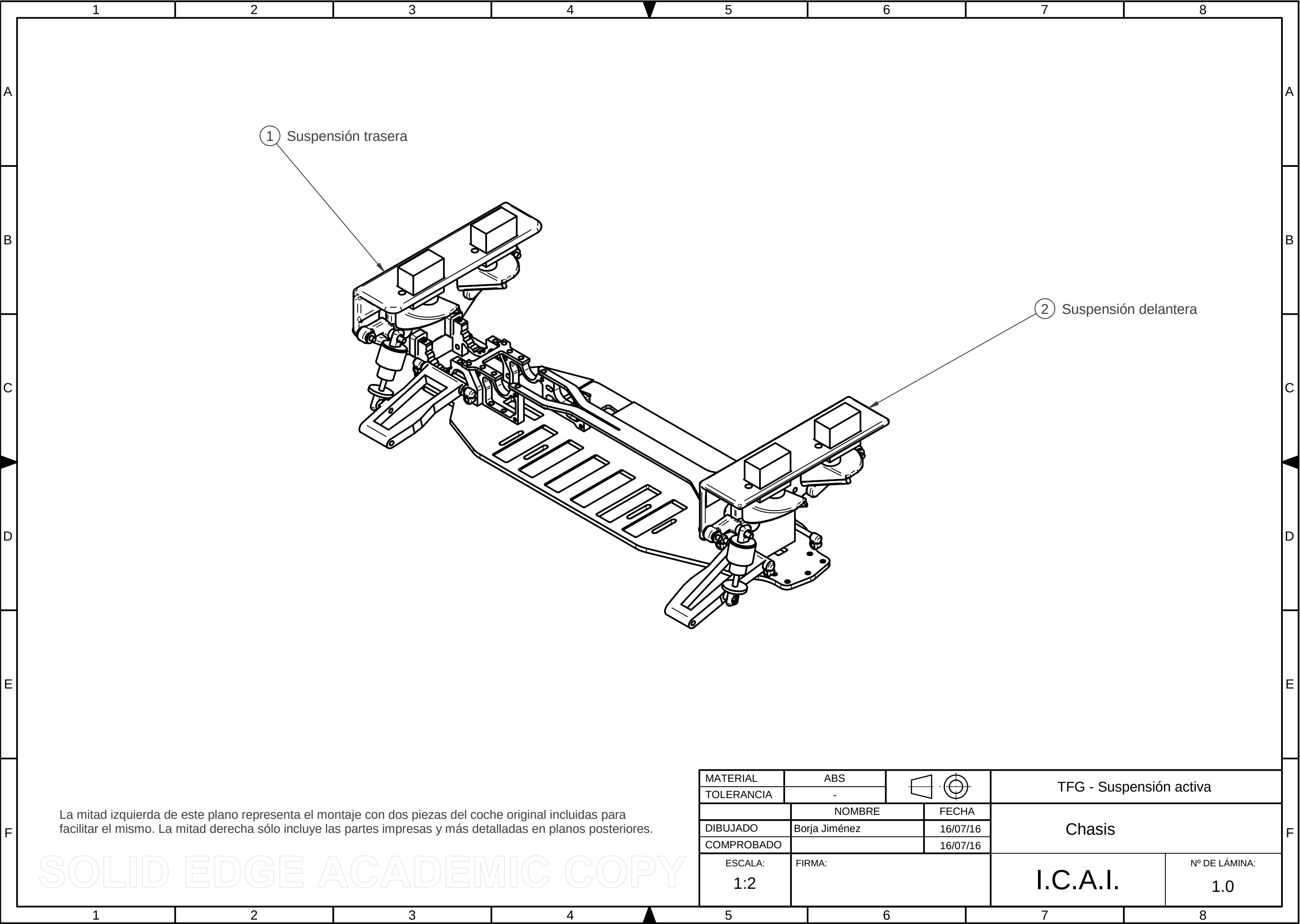
José Porras Galán

18 de julio de 2016

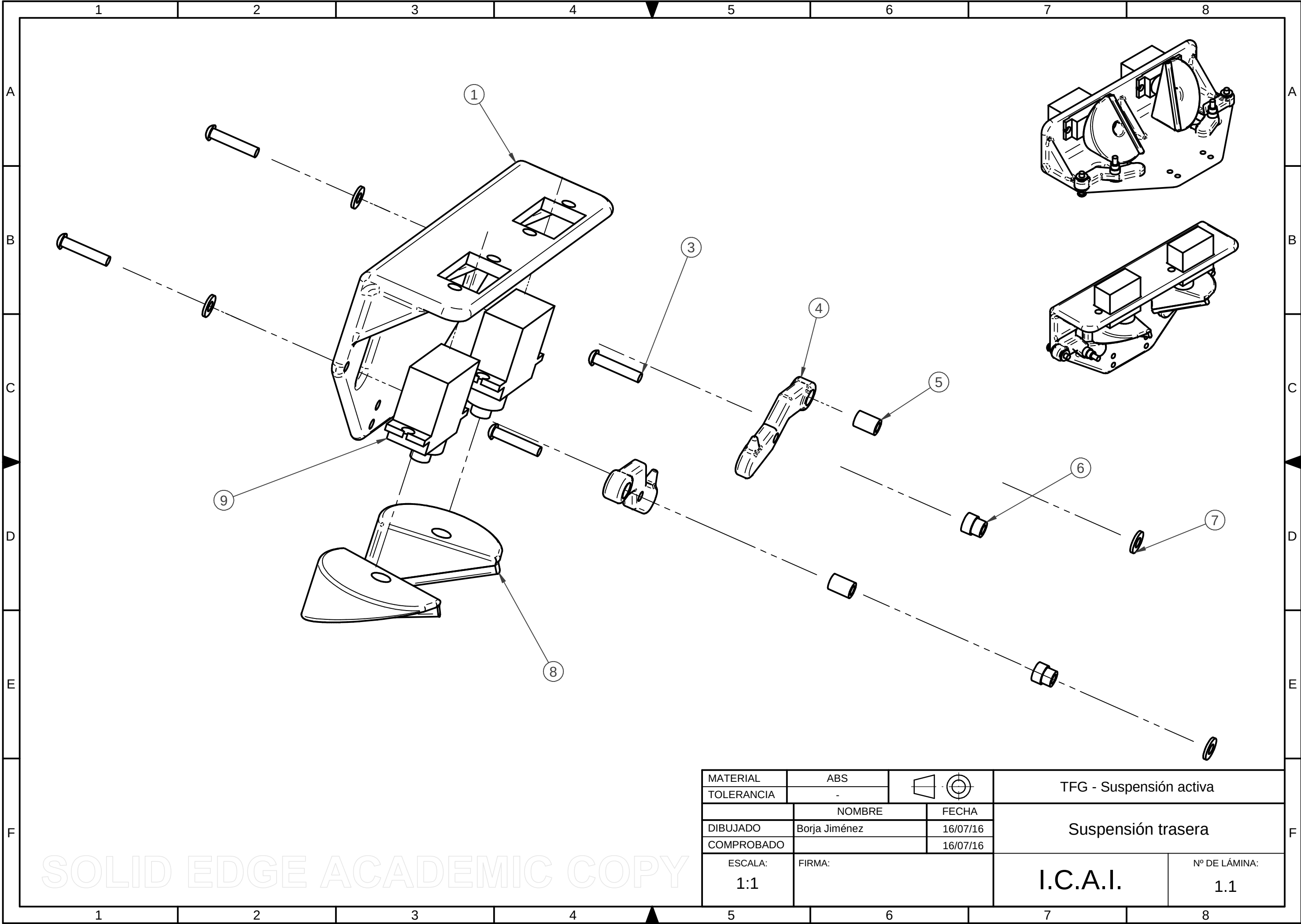


Índice de los planos

<i>Parte I Chasis</i>	<i>3</i>
<i>Capítulo 1 Suspensión trasera</i>	<i>4</i>
<i>Capítulo 2 Suspensión delantera</i>	<i>5</i>
<i>Capítulo 3 Lista de materiales.....</i>	<i>6</i>
<i>Parte II Piezas individuales.....</i>	<i>7</i>
<i>Capítulo 1 Balda trasera</i>	<i>8</i>
<i>Capítulo 2 Balda delantera</i>	<i>9</i>
<i>Capítulo 4 Brazo.....</i>	<i>11</i>
<i>Capítulo 5 Casquillo.....</i>	<i>12</i>
<i>Capítulo 8 Cilindro actuador</i>	<i>15</i>
<i>Capítulo 10 Parachoques</i>	<i>17</i>

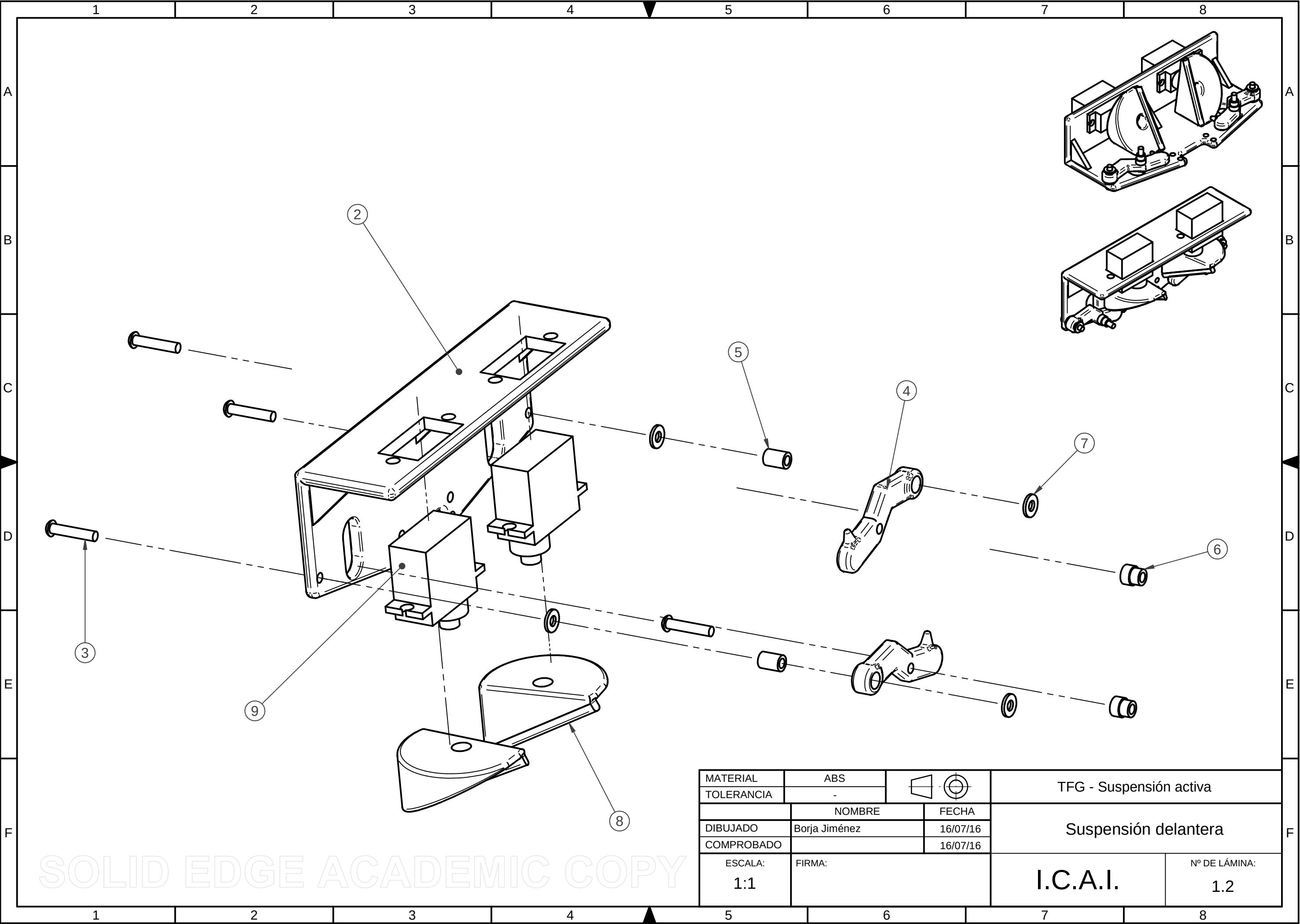


MATERIAL	ABS		TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA	-			
	NOMBRE	FECHA	Chasis	
DIBUJADO	Borja Jiménez	16/07/16		
COMPROBADO		16/07/16		
ESCALA: 1:2	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: 1.0



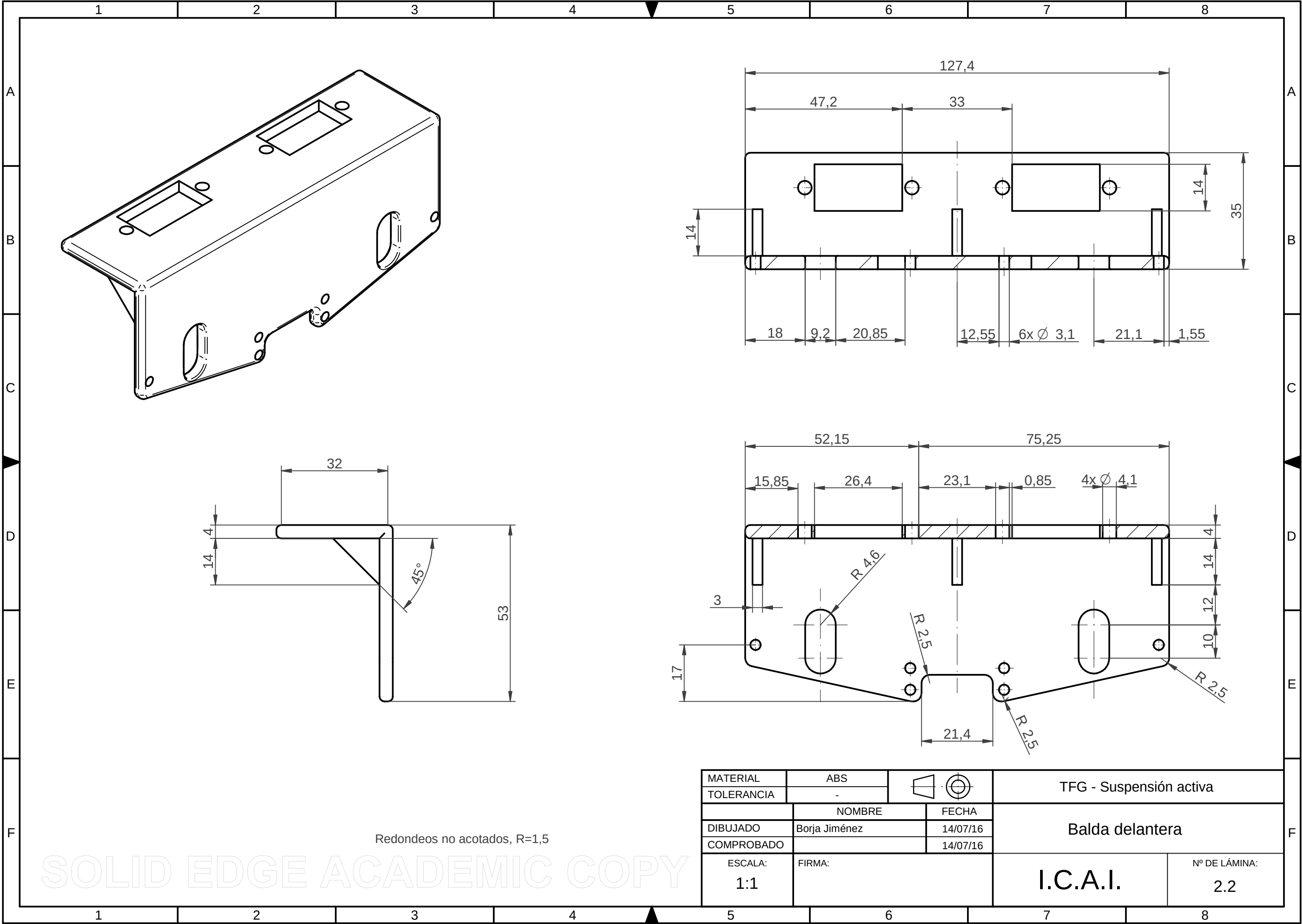
MATERIAL	ABS		TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA	-		Suspensión trasera	
	NOMBRE	FECHA	I.C.A.I.	
DIBUJADO	Borja Jiménez	16/07/16		
COMPROBADO		16/07/16	Nº DE LÁMINA:	
ESCALA:	FIRMA:		1.1	
1:1				

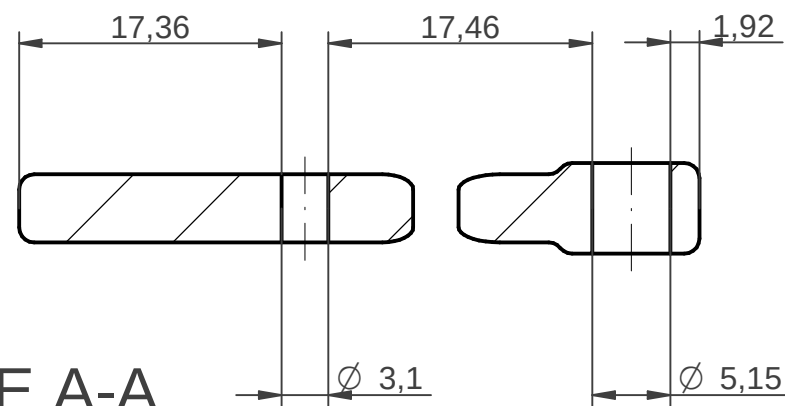
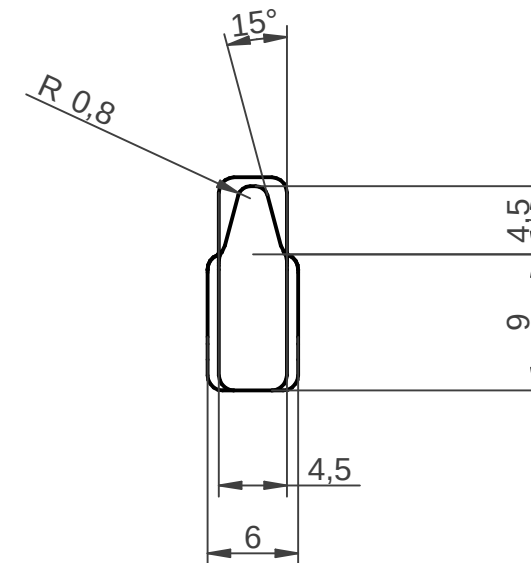
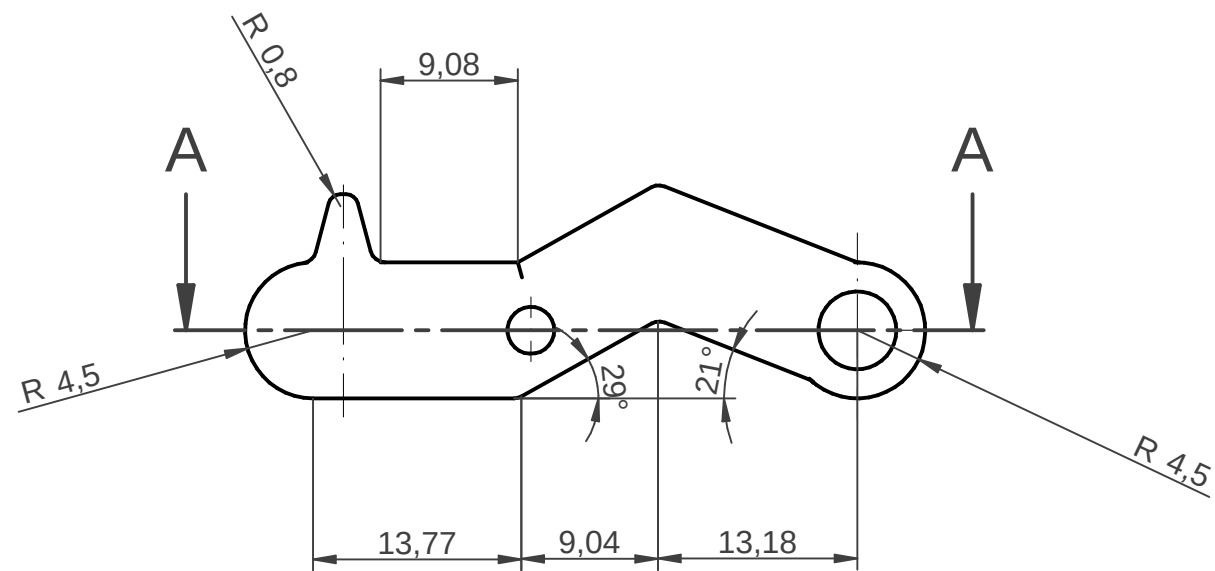
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	ABS		TFG - Suspensi3n activa	
TOLERANCIA	-		Suspensi3n delantera	
DIBUJADO	Borja Jim3nez	FECHA	I.C.A.I.	
COMPROBADO		16/07/16		
ESCALA:	FIRMA:		N3 DE L3MINA:	
1:1			1.2	

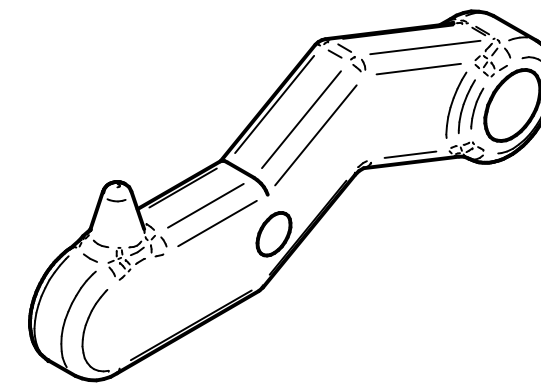
1		2		3		4	
Marca	Nº Pieza	Designación		Norma		Material	
1	1	Balda trasera				ABS	
2	2	Balda delantera				ABS	
3	8	Tornillo $\phi 3 \times 15$		DIN 7985		Acero	
4	4	Brazo				ABS	
5	4	Casquillo				Bronce	
6	4	Apoyo suspensión				Acero	
7	8	Arandela plana $\phi 3$		DIN 125		Acero	
8	4	Cilindro actuador				ABS	
9	4	Mini servomotor				Acero	
MATERIAL		-				TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA		-					
		NOMBRE		FECHA		Lista de materiales	
DIBUJADO		Borja Jiménez		14/07/16			
COMPROBADO		Profesor		14/07/16			
ESCALA:		FIRMA:		I.C.A.I.		Nº DE LÁMINA:	
1:1						1.3	





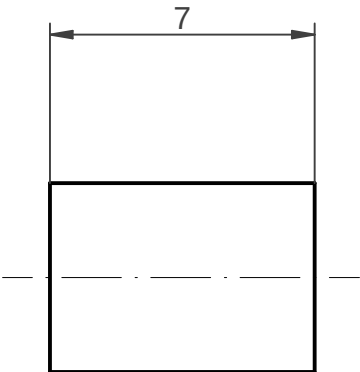
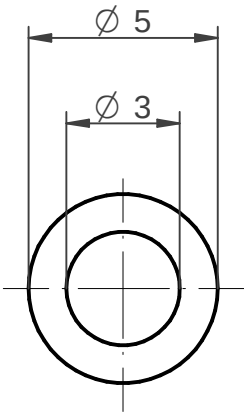
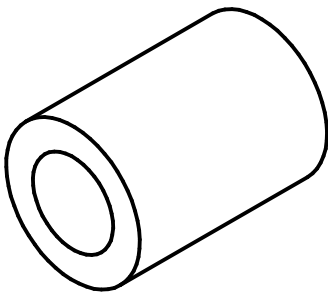
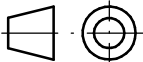
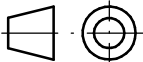
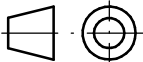
CORTE A-A

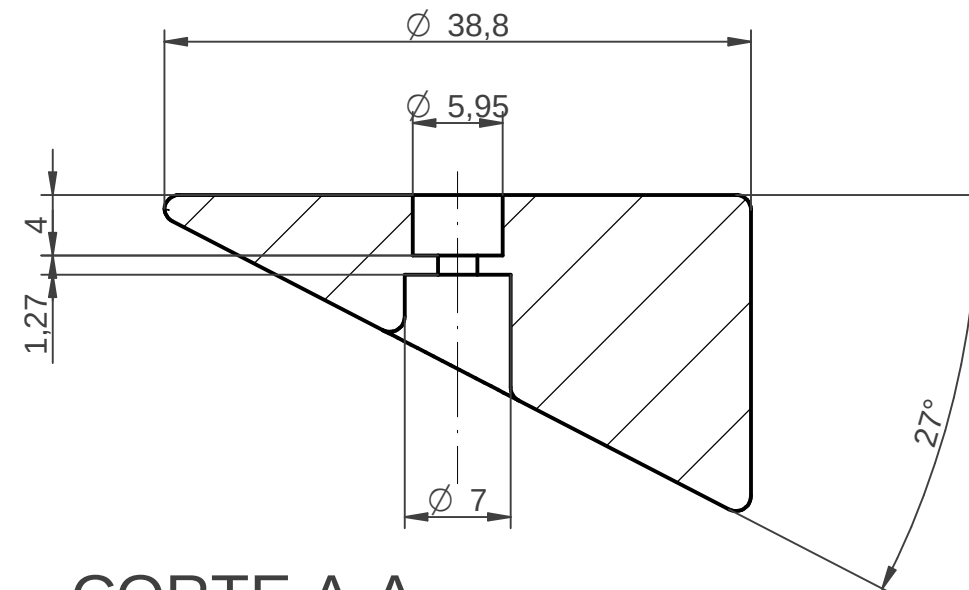
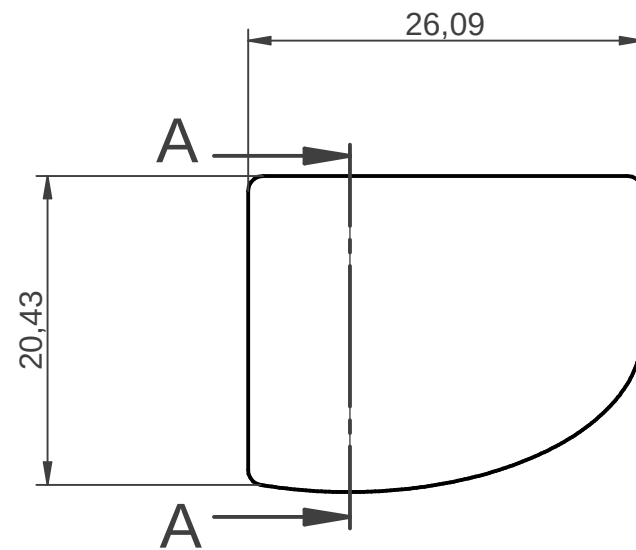
Redondeos no acotados R=1



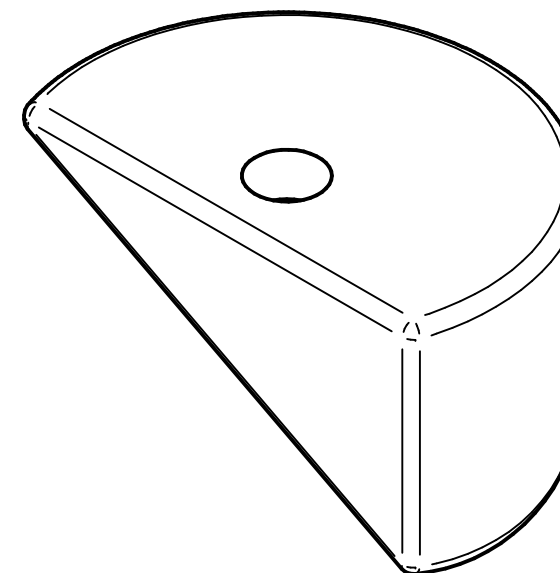
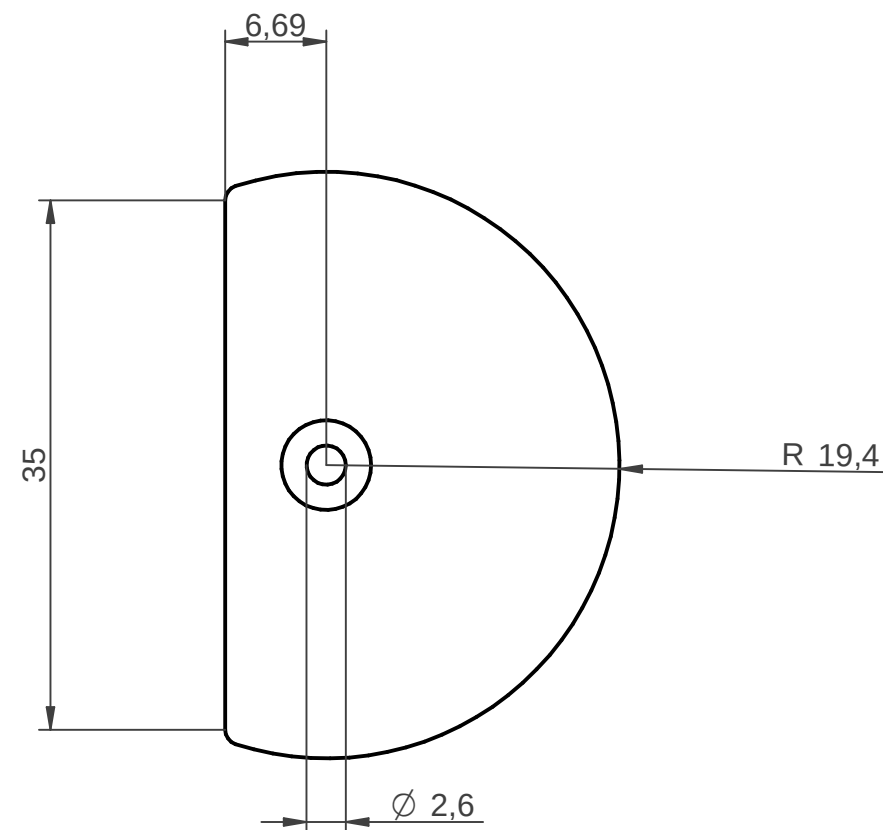
MATERIAL	ABS		TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA	-			
	NOMBRE	FECHA	Brazo	
DIBUJADO	Borja Jiménez	14/07/16		
COMPROBADO		14/07/16		
ESCALA:	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA:
2:1				2.4

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	1	2	3	4																														
A																																		
B																																		
C																																		
D																																		
E																																		
F	<table border="1"><tr><td>MATERIAL</td><td>Bronce</td><td rowspan="2"></td><td colspan="2">TFG - Suspensión activa</td></tr><tr><td>TOLERANCIA</td><td>-</td><td colspan="2"></td></tr><tr><td></td><td>NOMBRE</td><td>FECHA</td><td colspan="2" rowspan="3">Casquillo</td></tr><tr><td>DIBUJADO</td><td>Borja Jiménez</td><td>14/07/16</td></tr><tr><td>COMPROBADO</td><td></td><td>14/07/16</td></tr><tr><td>ESCALA:</td><td>FIRMA:</td><td colspan="2">I.C.A.I.</td><td>Nº DE LÁMINA:</td></tr><tr><td>2:1</td><td></td><td colspan="2"></td><td>2.5</td></tr></table>				MATERIAL	Bronce		TFG - Suspensión activa		TOLERANCIA	-				NOMBRE	FECHA	Casquillo		DIBUJADO	Borja Jiménez	14/07/16	COMPROBADO		14/07/16	ESCALA:	FIRMA:	I.C.A.I.		Nº DE LÁMINA:	2:1				2.5
MATERIAL	Bronce		TFG - Suspensión activa																															
TOLERANCIA	-																																	
	NOMBRE	FECHA	Casquillo																															
DIBUJADO	Borja Jiménez	14/07/16																																
COMPROBADO		14/07/16																																
ESCALA:	FIRMA:	I.C.A.I.		Nº DE LÁMINA:																														
2:1				2.5																														
	1	2	3	4																														



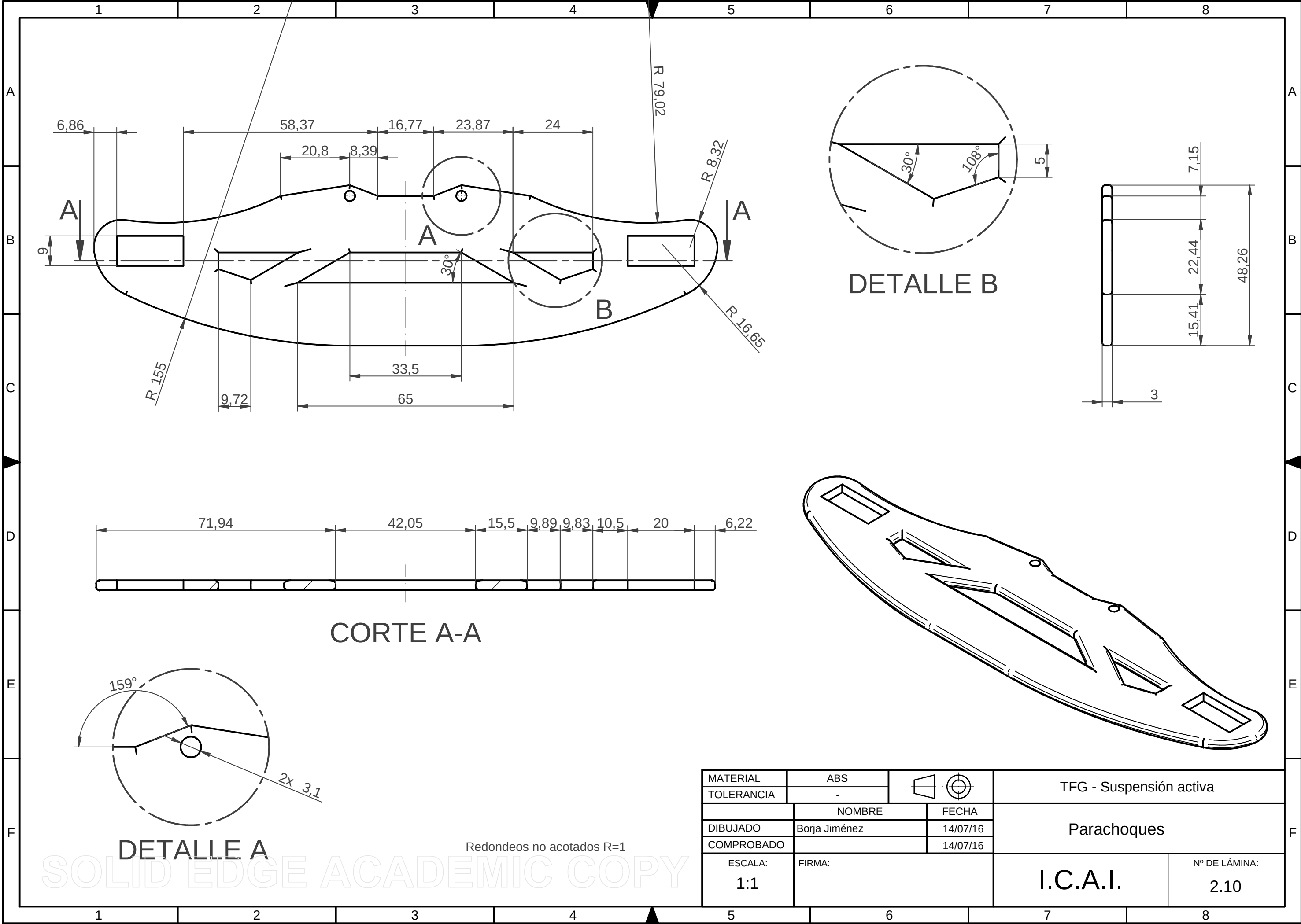
CORTE A-A



Redondeos no acotados, R=1,5

MATERIAL	ABS		TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA	-		Cilindro actuador	
	NOMBRE	FECHA		
DIBUJADO	Borja Jiménez	14/07/16		
COMPROBADO		14/07/16		
ESCALA:	FIRMA:		I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: 2.8
2:1				

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	ABS		TFG - Suspensión activa	
TOLERANCIA	-			
	NOMBRE	FECHA	Parachoques	
DIBUJADO	Borja Jiménez	14/07/16		
COMPROBADO		14/07/16		
ESCALA:	FIRMA:			Nº DE LÁMINA:
1:1				2.10



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA PARA UN VEHÍCULO A ESCALA

PRESUPUESTO

Autor:

Fº de Borja Jiménez Valverde

Directores:

Juan Luis Zamora Macho

José Porras Galán

18 de julio de 2016

Índice

Capítulo 1 Recursos Empleados

1.1 Componentes Principales.....	3
1.2 Herramientas y Software	3
1.3 Mano de Obra	3

Capítulo 2 Costes Unitarios

2.1 Componentes.....	4
2.2 Herramientas y Software	4
2.3 Mano de Obra	4

Capítulo 3 Sumas Parciales

3.1 Componentes Principales.....	5
3.2 Herramientas y Software	5
3.3 Mano de Obra	6

Capítulo 4 Presupuesto General

Capítulo 1

Recursos Empleados

En este capítulo se calculará la cantidad de recursos que se han dedicado al proyecto, tanto materiales como equipo, software o humanos.

1.1 Componentes Principales

Componentes	Cantidad
Coche RC Turnigy TD10 1/10 4WD	1
Turnigy Trackstar 80A Sensored ESC	1
Motor Brushless XK3650-3900KV	1
Batería Lipo ZIPPY 4000mAh	1
Arduino Mega 2560	1
Sensor IR GP2Y0A51SK0F	4
Turnigy 380MG Micro MG Servo 3,6kg	4
Conjunto piñones 15T/17T/19T-3,175mm	3
Emisora Walkera WK-2801 Pro 8CH 2,4GHz	1
Receptor Walkera RX-2801 Pro	1

1.2 Herramientas y Software

Componentes	Cantidad	Horas de proyecto	Horas de uso al año
Ordenador	1	400	1000
Cargador de Baterías	3	20	40
Cable USB-microUSB	1	5	200
Polímetro	3	5	250
Destornillador, alicates y otras	1	10	1000
Matlab/Simulink	7	300	1500
Microsoft Office	1	50	1000

1.3 Mano de Obra

Actividad	Horas
Diseño y modelado del sistema mecánico de suspensión activa	30
Montaje del prototipo RC y adición del sistema de suspensión activa	10
Cálculo de las plantas y desarrollo de los controles	150
Ensayos y Depuración	130
Redacción de documentación	60

Capítulo 2

Costes Unitarios

En esta sección se detallan los costes y precios de cada uno de los elementos previamente analizados con los que se han llevado a cabo este proyecto.

2.1 Componentes

Componentes	Precio (€/Ud)
Coche RC Turnigy TD10 1/10 4WD	64.83
Turnigy Trackstar 80A Sensored ESC	33.02
Motor Brushless XK3650-3900KV	31.76
Batería Lipo ZIPPY 4000mAh	29.18
Arduino Mega 2560	41.00
Sensor IR GP2Y0A51SK0F	7.16
Turnigy 380MG Micro MG Servo 3,6kg	12.10
Conjunto piñones 15T/17T/19T-3,175mm	2.47
Emisora Walkera WK-2801 Pro 8CH 2,4GHz	170
Receptor Walkera RX-2801 Pro	38.95

2.2 Herramientas y Software

Componentes	Precio (€/Ud)
Ordenador	800.00
Cargador de Baterías	40.00
Cable USB-microUSB	1.99
Polímetro	40.00
Destornillador, alicates y otras	65.00
Matlab/Simulink	200
Microsoft Office	89.00

2.3 Mano de Obra

Actividad	Precio (€/hora)
Diseño y modelado del sistema mecánico de suspensión activa	30
Montaje del prototipo RC y adición del sistema de suspensión activa	15
Cálculo de las plantas y desarrollo de los controles	30
Ensayos y Depuración	35
Redacción de documentación	15

Capítulo 3

Sumas Parciales

3.1 Componentes Principales

En este capítulo se calcula el coste total de cada uno de los recursos empleados a partir de las mediciones y los precios unitarios.

Componentes	Cantidad	Coste (€/Ud)	Coste Total (€)
Coche RC Turnigy TD10 1/10 4WD	1	64.83	64.83
Turnigy Trackstar 80A Sensored ESC	1	33.02	33.02
Motor Brushless XK3650-3900KV	1	31.76	31.76
Batería Lipo ZIPPY 4000mAh	1	29.18	29.18
Arduino Mega 2560	1	41.00	41.00
Sensor IR GP2Y0A51SK0F	4	7.16	28.64
Turnigy 380MG Micro MG Servo 3,6kg	4	12.10	48.40
Conjunto piñones 15T/17T/19T-3,175mm	3	2.47	7.42
Emisora Walkera WK-2801 Pro 8CH 2,4GHz	1	170	170
Receptor Walkera RX-2801 Pro	1	38.95	38.95
		Total	493.20 €

3.2 Herramientas y Software

Para calcular el coste de los bienes de equipo, herramientas y software dedicados a este proyecto, se ha supuesto un tiempo de amortización típico de 4 años y se ha repartido de forma proporcional en función del número de horas empleadas

Componentes	Cantidad	Horas de Proyecto	Horas de uso al año	Precio (€/Ud)	Amortización anual	Coste (€)
Ordenador	1	400	1000	800.00	25%	80.00
Cargador de Baterías	3	20	40	40.00	25%	15.00
Cable USB-microUSB	1	5	200	1.99	25%	0.012
Polímetro	3	5	250	40.00	25%	0.60
Destornillador, alicates y otras	1	10	1000	65.00	25%	0.16
Matlab/Simulink	1	300	500	200	25%	30.00
Microsoft Office	1	100	1000	89.00	25%	2.25
					Total	128.02 €

3.3 Mano de Obra

Actividad	Horas	Precio (€/h)	Precio total (€)
Diseño y modelado del sistema mecánico de suspensión activa	30	30	900
Montaje del prototipo RC y adición del sistema de suspensión activa	10	15	150
Cálculo de las plantas y desarrollo de los controles	150	30	4500
Ensayos y Depuración	130	35	4550
Redacción de documentación	60	15	900
Total			11000 €

Capítulo 4

Presupuesto General

Sumando todas las contribuciones, se concluye que el coste del proyecto asciende a:

Concepto	Coste (€)
Componentes Principales	493.20
Herramientas y Software	128.02
Mano de Obra	11000.00
Total	11621.22 €

Si además se tienen en cuenta los gastos generales (12%) y el IVA del conjunto (21%):

Concepto	Coste (€)
Presupuesto general	11621.22
Gastos generales	1394.54
IVA	2733.31
Total	15749.07 €