



Máster Universitario en Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Desarrollo de APP's para asistir al diseño de la
dinámica de vehículos y suspensiones de un vehículo
de Formula Student

Autor: Federico Gil Fernández

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DESARROLLO DE APPS PARA ASISTIR AL DISEÑO DE LA DINÁMICA DE...
VEHÍCULOS Y SUSPENSIÓN DE VEHÍCULO DE FORMULA STUDENT.....
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020./21.... 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.: Federico Gil Fernández

Fecha: 14.1.07.1 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Alberto Carnicero López;



Firmado digitalmente por
CARNICERO LOPEZ ALBERTO
- 50442634T,
Nombre de reconocimiento
(DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-504426
34T, givenName=ALBERTO,
sn=CARNICERO LOPEZ,
cn=CARNICERO LOPEZ
ALBERTO - 50442634T
Fecha: 2021.07.13 09:32:28
+02'00'



Máster Universitario en Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Desarrollo de APP's para asistir al diseño de la
dinámica de vehículos y suspensiones de un vehículo
de Formula Student

Autor: Federico Gil Fernández

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

DESARROLLO DE APP'S PARA ASISTIR AL DISEÑO DE LA DINÁMICA DE VEHÍCULOS Y SUSPENSIONES DE UN VEHÍCULO DE FORMULA STUDENT

Autor: Gil Fernández, Federico.

Director: Carnicero López, Alberto.

Entidad Colaboradora: ICAI-Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Dinámica de vehículos, Quarter-Car, Half-Car, suspensión Pushrod, Appdesigner, Ansys.

1. Introducción

Este proyecto está enmarcado en la competición Formula Student, una competición entre universidades que consiste en diseñar, fabricar y competir con vehículos “formula-style” de carreras.

Dentro de la asociación ICAI Speed Club, ISC, se creará el departamento de dinámica vehicular. Este departamento tiene que fijar los parámetros de diseño en el primer mes del proyecto, por lo que necesitan herramientas software que faciliten los estudios dinámicos para alcanzar sus objetivos. Por este motivo en este proyecto se diseñan Apps “Adhoc” que incluyen modelos matemáticos relevantes para hacer un análisis dinámico centrado en los parámetros principales de la dinámica del coche. Las ventajas de disponer de estas Apps son:

- Agilizar la curva de aprendizaje de los nuevos integrantes del departamento.
- Acelerar el análisis dinámico.
- Independencia de licencias patrocinadas por parte de empresas de software.
- Generación de Conocimiento propio del ISC.

Se ha realizado un estudio, redactado en el estado del arte, sobre que modelos matemáticos serían interesantes de desarrollar se llega a la conclusión que los modelo de Quarter-Car, Half-Car y la cinemática de modelo de suspensión son útiles para fijar parámetros de diseño a nivel dinámico. Por otro lado, también conviene tener un sistema de adquisición de datos sobre el que postprocesar los datos de los sensores para analizar posibles mejoras y validar modelos.

Tras dicho estudio los objetivos que se fijaron en este proyecto son:

- Desarrollar una App que facilite el diseño de la geometría de suspensión del FS del ISC.
- Desarrollar una App que facilite la lectura e interpretación de los sensores de adquisición de datos a bordo del FS del ISC.
- Realizar un estudio dinámico del actual vehículo del ISC.
- Marcar un procedimiento a seguir por parte del ISC para el diseño de la próxima temporada.

2. Definición del Proyecto

En este Proyecto se van a realizar 3 Apps desarrolladas en la plataforma Appdesigner de Mathworks. Estas Apps son “App dinámica”, “App suspensión”, “App postprocesado sensores”.

Los pasos que se han realizado en el desarrollo de estas Apps consisten en la elaboración de los modelos matemáticos, diseño de la estructura de la App e implementación del modelo en Appdesigner y finalmente validar las Apps mediante estudios teóricos o simulaciones en Ansys, generando geometría tanto en Spaceclaim como en Solidworks y posteriormente usando el módulo de “Rigid Dynamics”. Un ejemplo de estos pasos, de izquierda a derecha se puede observar en la figura i del Half-Car model.

Una vez se han validado las Apps, se compilan mediante “Matlab Compiler” que las encripta y genera un “.exe”. Al instalar estas Apps en un ordenador si se instala “Matlab Runtime” estas Apps se pueden ejecutar sin necesidad de tener instalado el Matlab ni de tener licencia.

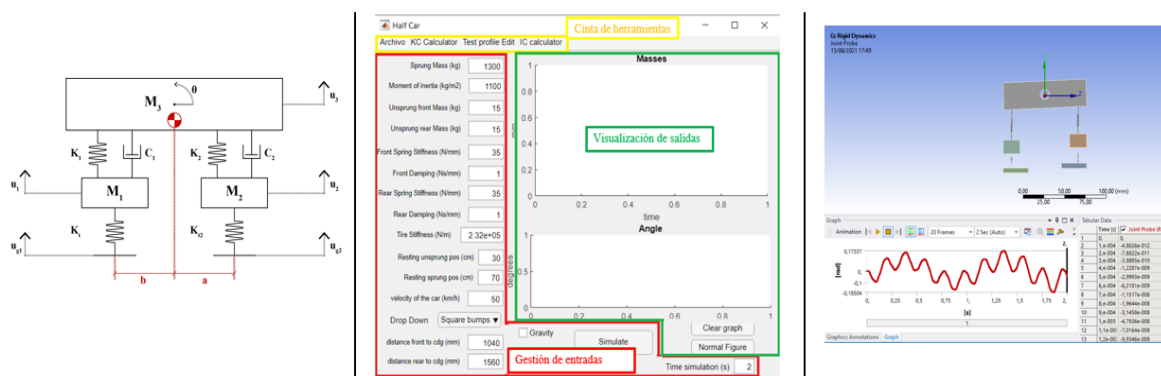


Figura i. Proceso de creación de Apps

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

En este apartado se describen brevemente las capacidades de cada una de las Apps.

App dinámica: alberga los modelos de Simulink tanto del Quarter-Car como del Half-Car que mediante una User Interface se puede cambiar todos los parámetros de entrada tanto los elementos del sistema como el tipo de señal de perturbación de suelo, observar las salidas del sistema y exportar los resultados en “.xls”. También dispone de cálculos que asesoran las decisiones de parámetros de entrada como puede ser “KC calculator”, que, según caída estática, peso y seta de amortiguamiento se propone una característica de rigidez y amortiguamiento al amortiguador. Se representa la App dinámica en la figura ii.

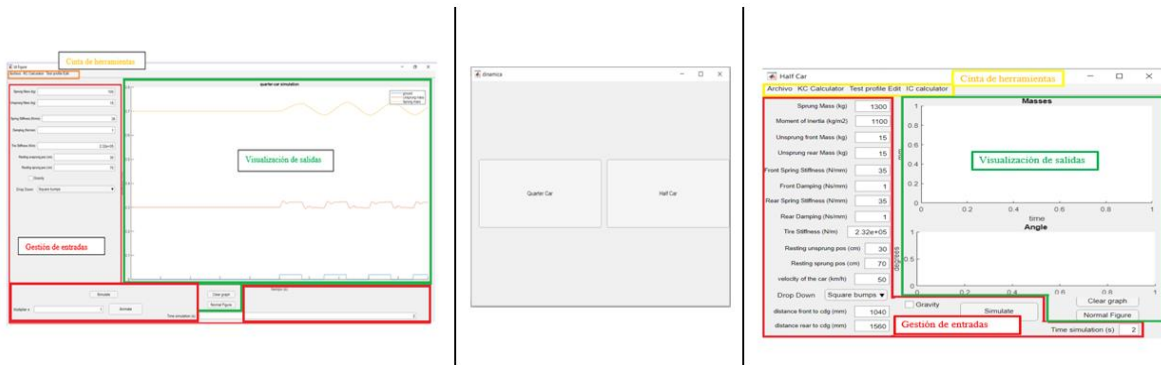


Figura ii. Imágenes App dinámica

App suspensión: Sirve para estudiar la cinemática y la dinámica de un modelo de suspensión pushrod, modelo escogido por el ISC. El usuario mediante un User Interface puede colocar las coordenadas que definen la suspensión y se obtiene un croquis espacial del modelo, su movimiento en todo su recorrido, salidas de parámetros de interés cinemático como el motion ratio, camber y roll center. Finalmente, exportar en “.xls” tanto las coordenadas de entrada como las salidas del modelo. Se representa la App suspensión en la figura iii.

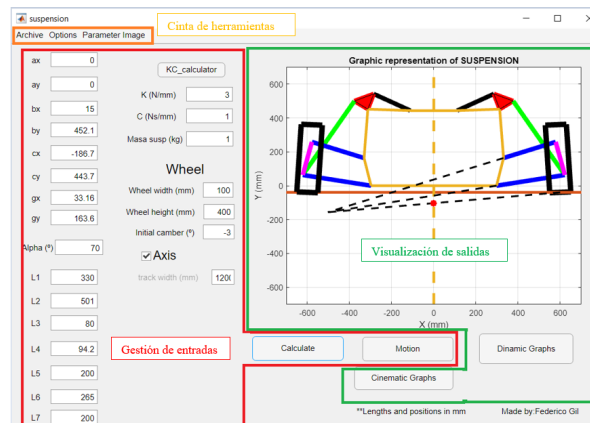


Figura iii. Imagen App suspensión

App postprocesado sensores: Recibe mediante un “.xls” los datos del sensor de velocidad del vehículo y de los sensores lineales de cada amortiguador. Una vez guardados los datos se puede escoger que gráfica de longitud de amortiguador con respecto del tiempo escoger para visualizar. Si se cargan las coordenadas de suspensión delantera y trasera la App es capaz de calcular el Roll delantero y trasero, las fuerzas en las distintas barras de la suspensión y finalmente un vector de movimiento del suelo si se considera infinitamente rígido el sistema de suspensión. Estos resultados son útiles para tomar decisiones sobre los nuevos diseños de vehículos del ISC. Se representa la App postprocesado sensores en la figura iv.

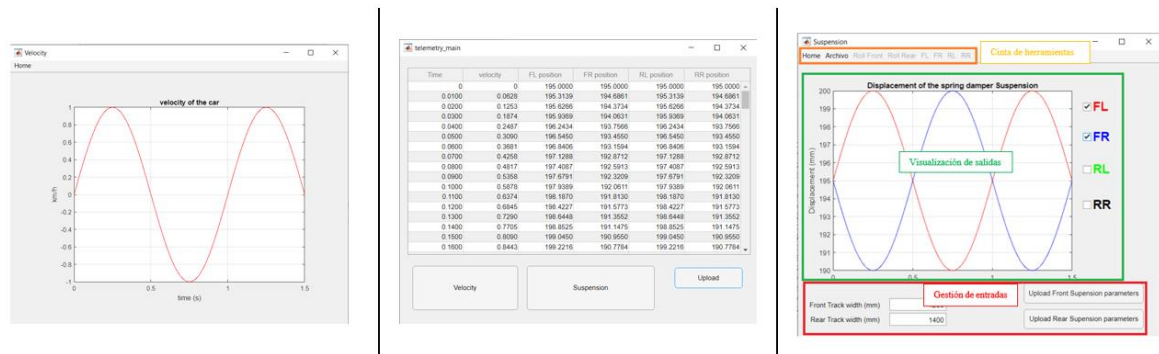


Figura iv. Imágenes App Postprocesado sensores

4. Resultados

Se han desarrollado y validado con éxito las Apps propuestas, posteriormente se ha creado el paquete de las 3 Apps para su distribución en el ISC.

Para demostrar la utilidad que tienen estas Apps, se ha propuesto analizar el vehículo actual del ISC, el IFS-03 e intentar proponer cambios que mejoren el diseño. Se ha comprobado con la App dinámica que es conveniente tener mayor rigidez total en la suspensión y que se debería transmitir una mayor rigidez al eje delantero con respecto al trasero. Posteriormente se analizó con la App suspensión la geometría delantera actual y se propone aumentar ligeramente la progresividad del sistema y conseguir un camber dinámico más pronunciado para conseguir más agarre en curva. En cuanto a la App postprocesado sensores no se ha podido elaborar el estudio ya que el ISC todavía no dispone de datos de los sensores.

Finalmente, se propone un procedimiento de en que fase se deben usar cada una de las Apps y en que orden han de ser usadas.

5. Conclusiones

Se han creado tres Apps distintas y han sido validadas con simulaciones de software profesional. Aparte de ser creadas, se ha estudiado el alcance que tienen los modelos propuestos y han servido para poder proponer mejoras para el nuevo diseño de la siguiente temporada del ISC. Esto demuestra que se han cumplido los objetivos marcados en el proyecto.

Este proyecto tiene la intención de ser una propuesta de valor para el ISC acerca de la importancia de desarrollar herramientas propias para enriquecer a los integrantes del equipo y motivar a los usuarios a seguir formándose en dinámica de vehículos. Todos los modelos de dinámica de vehículos pueden aumentar en complejidad a medida que se entiendan, por lo que estas Apps pueden tener muchas versiones nuevas que aumenten el alcance de sus posibilidades. La intención es que estas Apps evolucionen junto con el conocimiento adquirido con los años de experiencia del equipo, y se conviertan en herramientas muy avanzadas y ajustadas a las necesidades de cada temporada.

Por ello se proponen en el proyecto varias propuestas de trabajos futuros para reforzar las capacidades de las Apps. Unos ejemplos serían añadir características no lineales a los modelos de Simulink de las Apps dinámica o añadir una ventana de filtrado de señales a la App postprocesado sensores.

6. Referencias

- [1] Campbell C. “New directions in suspension design, Making the Fast Car Faster”. Cambridge, Massachusetts: Bentley Publishers; 1981
- [2] Milliken William, Milliken Douglas. “Race Car Vehicle Dynamics”. SAE International; Diciembre, 1994.
- [3] Bastow Donald. “Car Suspension and Handling”. 2th. Londres. Pentech Press; Enero, 2014.
- [4] Mathworks, <https://www.mathworks.com/videos.html>, [citado el 09 de Julio 2021]

APP DEVELOPMENT TO ASSIST THE DINAMIC AND SUSPENSION DESIGN OF A FORMULA STUDENT CAR.

Author: Gil Fernández, Federico.

Supervisor: Carnicero López, Alberto.

Collaborating Entity: ICAI-Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: vehicle dynamics, Quarter-Car, Half-Car, Pushrod suspension, Appdesigner, Ansys.

1. Introduction

This Project is framed in the Formula Student competition, it is a competition between universities that consists of designing, manufacturing, and racing “formula-style” racing vehicles.

Inside the ICAI Speed Club association, ISC, a vehicle dynamics department is going to be established. This department has to set the design parameters of the design of the vehicle in the first month of the project design phase. The department needs software tools that enable a fast dynamic study to reach the deadline. It is the reason why this project is going to focus on the development of Adhoc Apps that include mathematical models relevant for a racing dynamic analysis. The advantages of having such Apps are:

- Speeding the learning curve of the new joiners in the department.
- Speed up the dynamic analysis.
- Gaining licensing sponsor dependance of software tools.
- Generation ISC own knowledge.

A research was performed, documented in state of art, regarding the mathematical models that are considered relevant. It's stated that the Quarter-Car, Half-Car and the kinematics of the ISC suspension model are the most important ones to establish the dynamic parameters of the car. Also, the data extracted from the sensors of the car must be postprocessed to analyze the next upgrade of the car and to validate the mathematical models.

After this research the objectives of the project are:

- Develop an App that assist the design of a suspension geometry for the Formula Student of the ISC.
- Develop an App that simplifies the lecture and interpretation of the sensors on board the vehicle.
- Perform a dynamic analysis of the actual ISC car.
- Set a procedure for the ISC design of the next vehicle.

2. Project definition

This project involves 3 Apps, which are developed in Appdesigner from Mathworks. These Apps are “App dinámica”, “App suspension” and “App postprocesado sensors”.

The steps followed in the development of the Apps consisted of preparing the mathematical model, designing the App structure, and implementing the model in Appdesigner and finally, validate the Apps by theory studies and Ansys simulations. The Ansys simulations were performed by generation the geometry in Spaceclaim and Solidworks and afterwards the “Rigid Dynamic” module was used to simulate. An example of these steps with the Half-Car model , from left to right, are represented in the figure i.

Once the Apps where validated, they were compiled making use of “Matlab Compiler”, which encrypts and generate an “.exe”. Whenever the Apps are installed in a computer, if “Matlab Runtime” is installed the Apps can run without the necessity of having a Matlab licence or the program itself.



Figure i. Creation process of the Apps

3. Model/System/Tool Description

In this section a brief description is made of the capabilities of each App.

App dinámica: This App has the Simulink models of the Quarter-Car and the Half-Car, it makes use of a User Interface that can make input parameter and ground input modifications. It also displays relevant outputs of the model and is able to export all the results in a “.xls”. The App has tabs that perform calculations that asses the parameter decision making, such as “KC calculator”, which stating the ground clearance, weight and the damping coefficient a damper stiffness and damping are recommended. The representation of this App is in figure ii.

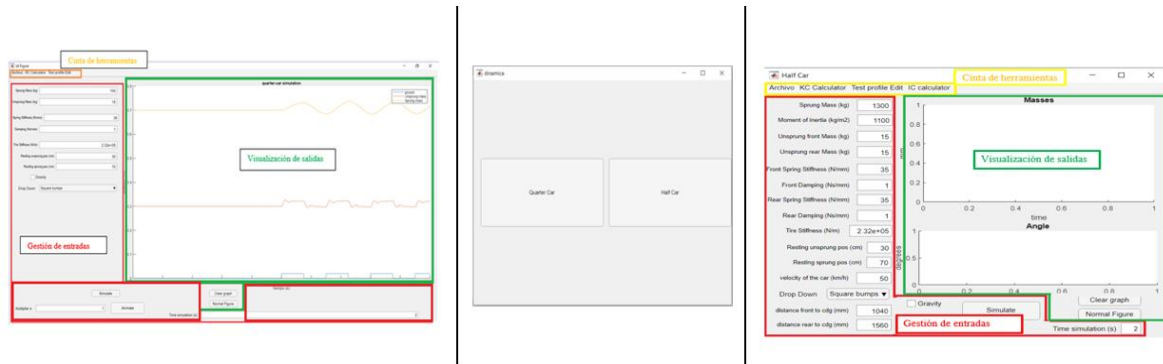


Figure ii. App dinámica images

App suspension: It performs the kinematic and dynamic analysis of a pushrod suspension model, chosen by ISC. The User interface allows the user to set the coordinates of the elements of the suspension and the App returns the drawing of the suspension, an animation of the full compression of the suspension, output parameters such as motion ratio, camber and roll center. Finally, it also exports in “.xls” the input coordinates and the outputs of the model. In figure iii the App suspensión is displayed.



Figura iii. App suspensión Images

App postprocesado sensors: The App receives by an “.xls” the data from the velocity sensor of the vehicle and linear displacement sensors of the dampers. Once the data are stored in the App, the user can choose which data wants to be displayed and if the suspension geometry of both the front and rear suspension, the App is able to display the front and rear Roll, the forces in the different suspension elements and the ground input movement considering that the suspensión is rigid. These results are useful for new design of vehicles in the ISC decision image making. In figure iv the App postprocesado sensors is observed.

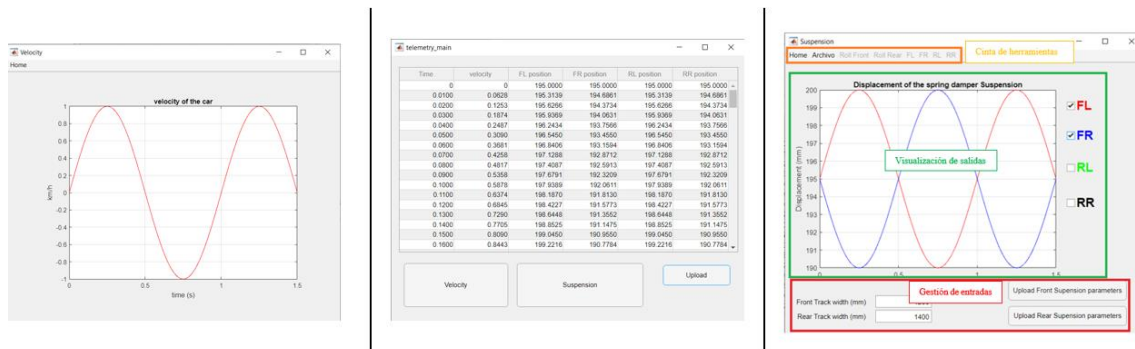


Figure iv. App Postprocesado sensors images

4. Results

The Apps have been developed and validated correctly, afterwards a package with the 3 Apps was created for distribution within the ISC.

An analysis of the actual ISC vehicle, IFS-03, is performed and some improvement proposals are stated. With App dinámica is proposed to increase the total stiffness of the suspension and distributing more stiffness to the frontal axle with respect the rear axle will improve also the behaviour of the car. Afterwards, the geometry of the front suspension is analyzed with App suspensión and new coordinates are proposed that increase mildly the motion ratio and a more dynamic camber is achieved to optimize handling in turns. No analysis was performed with App postprocesado sensores because there is still no data available from the ISC.

Finally, a procedure for the dynamic department is proposed where it explains in which phase of the design each App must be used.

5. Conclusiones

Three different Apps have been created and validated by professional simulation software. The capabilities of the models within the Apps have been studied and resulted to be useful to analyze and propose upgrades in the new vehicle design for the ISC. Therefore, the objectives of this project are considered to be covered.

This project has the intention of manifesting the value for the ISC of developing their own software tools that will improve the knowledge of the team and motivate the associates to keep learning vehicle dynamics. All the mathematical models within this project are subject to increase in complexity therefore the Apps can further evolve in newer versions with more capabilities. The intention is that the Apps grow at the same rate as the team acquire knowledge through experience in the Formula Student and end up being Apps perfectly adjusted to the team needs.

Due to this statement, in this project some future developments have been proposed such as implementing non linear characteristic of the Simulink model of App dinámica or add a tab in App postprocesado sensores that include a filter module.

6. Referencias

7. [1] Campbell C. "New directions in suspension design, Making the Fast Car Faster". Cambridge, Massachusetts: Bentley Publishers; 1981
8. [2] Milliken William, Milliken Douglas. "Race Car Vehicle Dynamics". SAE International; December, 1994.
9. [3] Bastow Donald. "Car Suspension and Handling". 2th. London. Pentech Press; January, 2014.
10. [4] Mathworks, <https://www.mathworks.com/videos.html>, [referenced in 09 de Julio 2021]

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	9
1.1 Motivación del proyecto.....	12
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	14
Capítulo 3. Definición del Trabajo	22
3.1 Justificación.....	22
3.2 Objetivos	22
3.3 Metodología	23
3.3.1 Fases del proyecto.....	23
3.3.2 Creación de Apps	24
3.3.3 Caso de diseño ISC.....	24
3.4 Planificación.....	25
Capítulo 4. plataforma de las apps.....	27
4.1 Selección de la plataforma	27
4.1.1 Accesibilidad	27
4.1.2 Compatibilidad.....	28
4.1.3 Escalabilidad.....	28
4.2 Herramienta dentro de la plataforma matlab.....	28
4.2.1 Guide Matlab.....	29
4.2.2 Appdesigner Matlab	30
4.3 Descripción Appdesigner	31
Capítulo 5. Creación de app dinámica.....	34
5.1 Descripción de la app dinámica	34
5.1.1 Descripción Quarter-car model	34
5.1.2 Descripción de half-car model	35
5.2 Desarrollo del modelo matemático	36
5.2.1 KC Calculator	36
5.2.2 Quarter-car model.....	37
5.2.3 Half-car model.....	39

5.2.4 IC calculator.....	40
5.3 Implementación en appdesigner.....	42
5.3.1 Esquema de la App	42
5.3.2 Main.....	43
5.3.3 Quarter-car.....	44
5.3.4 Half-car	50
5.3.5 KC Calculator	55
5.3.6 IC Calculator.....	56
5.4 Verificación de App dinámica.....	57
5.4.1 Quarter-Car.....	58
5.4.2 Half-Car	68
Capítulo 6. Creación de app Suspensión	85
6.1 Descripción de la app Suspensión.....	85
6.1.1 Progresividad	85
6.1.2 Ground clearance.....	86
6.1.3 Ángulos de la suspensión.....	86
6.1.4 Roll-Center	87
6.2 Desarrollo del modelo matemático	87
6.2.1 Suspensión Pushrod.....	88
6.2.2 Ecuaciones cinemáticas.....	89
6.2.3 Ecuaciones dinámicas:.....	92
6.2.4 Roll center	93
6.3 Implementación en appdesigner.....	94
6.3.1 Esquema de la App	94
6.3.2 Front-end Suspensión.....	94
6.3.3 Esquema de pasos.....	101
6.4 Verificación de App Suspensión.....	103
6.4.1 Geometría.....	104
6.4.2 Condiciones de contorno.....	107
6.4.3 Resultados	109
Capítulo 7. Creación de app Postprocesado Sensores.....	111
7.1 Descripción de la app Postprocesado Sensores.....	111

7.2	Desarrollo del modelo matemático	112
7.2.1	Roll Postprocesado Sensores	112
7.2.2	Fuerzas en la suspensión.....	113
7.3	Implementación en appdesigner.....	115
7.3.1	Esquema de la App	115
7.3.2	Postprocesado Main Front-end.....	116
7.3.3	Velocity Front-end.....	117
7.3.4	Suspension Front-end.....	118
7.4	Verificación de App Adquisición.....	120
Capítulo 8.	Caso de estudio	123
8.1	Recopilación de información por parte del isc.....	123
8.1.1	Quarter Car	123
8.1.2	Half-Car	128
8.1.3	App suspensión	134
Capítulo 9.	Diseño de la nueva Suspensión ISC	143
9.1	Preparación de modelos App dinámica.....	143
9.2	Geometría de suspensión.....	143
9.3	Seguimiento de los parámetros	144
9.4	Mejora continua	144
Capítulo 10.	Conclusiones y Trabajos Futuros.....	145
Capítulo 11.	Bibliografía.....	148
ANEXO I:	ODS	150

Índice de figuras

Figura 1. Tabla de puntuaciones Formula Student	9
Figura 2. Organigrama Temporada 2020/2021	11
Figura 3. Organigrama Temporada 2021/2022	12
Figura 4. Modelos dinámicos simples	16
Figura 5. Suspensión Pullrod. https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/02/09/analisis-push-rod-pull-rod/	20
Figura 6. Suspensión pushrod.....	21
Figura 7. Planificación del proyecto.....	26
Figura 8. Entorno GUIDE [15].....	29
Figura 9. Nota sobre GUIDE [15]	30
Figura 10. Imagen de pantalla de carga de las Apps	32
Figura 11. Esquema de modelo Quarter-Car	37
Figura 12. Diagrama de fuerzas de Quarter-Car.....	38
Figura 13. Esquema de modelo Half-car	39
Figura 14. Estructura APP dinámica	43
Figura 15. Front-end de Main.....	44
Figura 16. Ejemplo código de activación de App	44
Figura 17. Simulink Quarter-Car.....	46
Figura 18. Front-end Quarter-Car.....	48
Figura 19. Animación de Quarter-Car [8]	49
Figura 20. Excel exportado de App Quarter-Car.....	49
Figura 21. Test Profile Edit App	50
Figura 22. Ejemplo de máscara Simulink.....	51
Figura 23. Excitación de suelo Half-Car	52
Figura 24. Simulink Half-Car.....	53
Figura 25. Front-end Half-Car.....	55

Figura 26. Front-end KC Calculator	56
Figura 27. Front-end IC Calculator	57
Figura 28. Resultados Quarter-Car caída estática	60
Figura 29. Resultados Quarter-car Escalón	61
Figura 30. Simulación a frecuencia natural de masa suspendida	63
Figura 31. Simulación a frecuencia natural teórica de la masa no suspendida	63
Figura 32. Modal de Quarter-Car	64
Figura 33. Simulación a frecuencia natural Ansys de la masa no suspendida	65
Figura 34. Árbol Ansys simulación Quarter-Car	67
Figura 35. Resultados simulación Ansys Quarter-Car	67
Figura 36. Resultados Quarter-Car Senoidal	68
Figura 37. Resultados posición Half-Car caída estática centrada	70
Figura 38. Resultados ángulo Half-Car caída estática centrada	71
Figura 39. Resultados posición Half-Car caída estática descentrada	72
Figura 40. Resultados ángulo Half-Car caída estática descentrada	73
Figura 41. Resultados posición Half-Car escalón	74
Figura 42. Resultados ángulo Half-Car escalón	75
Figura 43. Árbol de modal Half-Car	76
Figura 44. Tabla de frecuencias naturales Half-Car	76
Figura 45. Resultados excitación a 3,914 Hz	78
Figura 46. Resultados excitación a 5.0992 Hz	78
Figura 47. Resultados excitación a 21.33 Hz	79
Figura 48. Árbol Ansys simulación Half-Car	81
Figura 49. Resultados simulación Ansys Half-Car	82
Figura 50. Resultados Half-Car Senoidal masas no suspendidas	83
Figura 51. Resultados Half-Car Senoidal masa suspendida	83
Figura 52. Resultados Half-Car Senoidal ángulo masa suspendida	84
Figura 53. Imagen pushrod suspensión ISC	89
Figura 54. Representación Roll-Center	93
Figura 55. Estructura App Suspensión	94

Figura 56. Front-end App Suspensión.....	95
Figura 57. Parameter Image.....	96
Figura 58. Desplegable Archive	97
Figura 59. Ejemplo Motion Ratio.....	99
Figura 60. Ejemplo Relación de compresión.....	99
Figura 61. Ejemplo Camber	100
Figura 62. Ejemplo Roll center.....	100
Figura 63. Ejemplo de fuerza de la suspensión	101
Figura 64. Orden de botones App suspensiones.....	102
Figura 65. Esquema de trabajo App suspensiones	102
Figura 66. Croquis de verificación suspensión.....	103
Figura 67. Placa anclajes Chasis	105
Figura 68. Rocker	106
Figura 69. Barra.....	106
Figura 70. Assembly suspensión	107
Figura 71. Árbol Ansys simulación suspensión	108
Figura 72. Resultados simulación Ansys suspensiones.....	109
Figura 73. Resultados App suspensiones	110
Figura 74. Croquis fuerzas en el Rocker	114
Figura 75. Croquis fuerzas en el triángulo inferior	114
Figura 76. Estructura App Postprocesado Sensores	116
Figura 77. Front-end de Telemetry main.....	117
Figura 78. Front-end de Velocity	118
Figura 79. Front-end Suspension Telemetry	119
Figura 80. Modelo Rigid Dynamic Postprocesado Sensores	120
Figura 81. Resultados de posición amortiguador	121
Figura 82. Resultados de fuerzas amortiguador	121
Figura 83. Resultados de fuerzas de pushrod	122
Figura 84. Resultados de fuerzas triangulo inferior.	122
Figura 85. Caída estática IFS-03	125

Figura 86. Comparativa Frecuencias naturales ISC	126
Figura 87. Comparativa reducción de masa no suspendida	127
Figura 88. Comparativa reducción de masa suspendida.....	127
Figura 89. Resultados de IC ISC	130
Figura 90. Resultados de la propuesta de IC para el ISC	131
Figura 91. Ensayo Half-Car 1600 mm movimiento vertical	132
Figura 92. Ensayo Half-Car 1600 mm pitch	132
Figura 93. Ensayo Half-Car 3200 mm movimiento vertical	133
Figura 94. Ensayo Half-Car 3200 mm pitch	133
Figura 95. Tope de extensión ISC	135
Figura 96. Tope de compresión ISC	136
Figura 97. Compresión vs desplazamiento vertical ISC	136
Figura 98. Motion ratio ISC	137
Figura 99. Roll Center dinámico ISC	137
Figura 100. Camber dinámico ISC	138
Figura 101. Fuerza de suspensión y equilibrio estático ISC	138
Figura 102. Comparativa ISC Motion Ratio	141
Figura 103. Comparativa ISC compresión vs desplazamiento.....	141
Figura 104. Comparativa ISC Camber	142
Figura 105. Objetivos de desarrollo sostenible	150

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros Simulink Quarter-Car	47
Tabla 2. Parámetros Simulink Half-Car	54
Tabla 3. Entradas caída estática Quarter-Car	59
Tabla 4. Entradas Escalón Quarter-Car	61
Tabla 5. Entradas Frecuencia natural	62
Tabla 6. Entradas Senoidal	65
Tabla 7. Entradas caída estática Half-Car	70
Tabla 8. Entradas escalón Half-Car	74
Tabla 9. Entradas Modal Half-Car	77
Tabla 10. Entradas Senoidal Ansys Half-Car	80
Tabla 11. Parámetros Quarter-Car ISC	124
Tabla 12. Parámetros Half-Car ISC	129
Tabla 13. Inputs suspensión ISC	134
Tabla 14. Inputs Nueva Propuesta ISC	140

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto está enmarcado en la competición Formula Student, una competición entre universidades que consiste en diseñar, fabricar y competir con vehículos “formula-style” de carreras.

Al ser una competición de ingeniería no se valora únicamente los resultados en las pruebas dinámicas, sino que también se evalúa la calidad del diseño del vehículo. Esto se puede observar en la Figura 1, se valora en un total de 1000 puntos de los cuales 150 son el Engineering Design en el que se genera un informe con las decisiones de diseño del vehículo y jueces expertos en el motorsport evalúan estas decisiones. Esta puntuación representa un 15% de la puntuación por lo que se tiene que intentar no solo tomar las mejores decisiones de diseño que impactarán directamente en la puntuación de los eventos dinámicos, sino que también poder crear las justificaciones pertinentes para que no se vea resentida la nota del Engineering Design.

	CV & EV	DC
Static Events:		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
Dynamic Events:		
Skid Pad	50 points	-
DV Skid Pad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
DV Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
DV Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

Table 3: Maximum points awarded

Figura 1. Tabla de puntuaciones Formula Student

La asociación dentro de ICAI que participa en dicha competición es el ICAI SPEED CLUB (ISC). Dentro de esta asociación existe un equipo para el diseño de un Formula Student eléctrico, el cual tiene todavía pocos años de vida por lo que aún existen mejoras en el proceso de diseño de cada temporada. Cada año se descubren nuevas tareas que dentro del diseño que deben ser cubiertas por nuevas figuras dentro del organigrama del equipo.

En la temporada 2020/2021 se ha podido observar la falta de un estudio dinámico general del vehículo. Esta carencia ocasionaba que las decisiones de diseño fueran optimizadas independientemente en cada departamento. Estos departamentos se encargan de un subsistema del coche concreto. Se creyó pertinente cambiar este modelo ya que el proceso óptimo es generar unos requisitos dinámicos generales del vehículo que posteriormente se desglosan en requisitos específicos a cada subsistema.

Se llegó a la conclusión de que este método no es efectivo tanto por análisis interno de los integrantes del equipo desarrollando el proyecto, como por las correcciones que ofrecen los jueces de la competición de Formula Student. Esto se debe a una mejora en un subsistema solo puede justificarse si mejora el comportamiento general del vehículo.

Por ello se ha considerado que el organigrama de la temporada de 2020/2021, Figura 2, queda obsoleto.

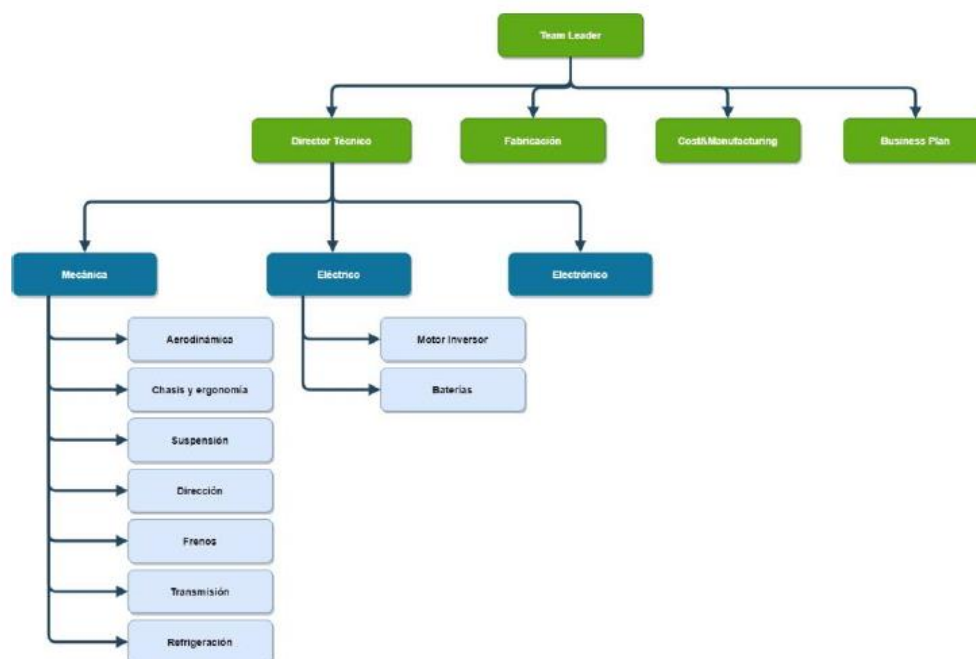


Figura 2. Organigramma Temporada 2020/2021

Se ha propuesto crear un departamento de dinámica que sea capaz de elaborar un estudio dinámico completo del vehículo y que pueda establecer los requisitos generales del vehículo. Una vez finalice el estudio, deben permanecer en contacto con los departamentos de los subsistemas involucrados para cerciorarse que se respetan las premisas establecidas por el departamento de dinámica. Tras esta decisión se generó el nuevo organigrama para la temporada 2020/2021, Figura 3 , que incluye dicho departamento. Inicialmente se ha considerado que trabaje por encima de los departamentos de suspensión, dirección y frenos debido a la gran relevancia que tienen a nivel dinámico, pero a futuro se pretende incluir la totalidad de los departamentos ya que todos parámetros de diseño tienen un impacto en el comportamiento del vehículo. Existe una conexión estrecha con el departamento electrónico ya que son los que tienen las competencias en adquisición de datos, las cuales son necesarias para el análisis de resultados y validación de modelos del departamento de dinámica.

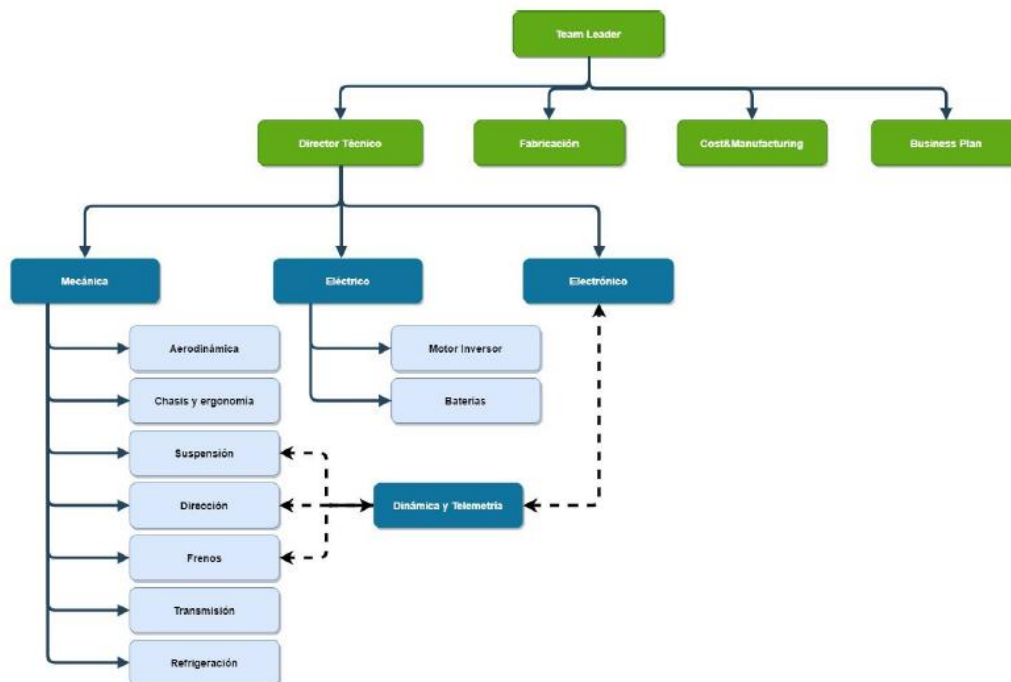


Figura 3. Organigramma Temporada 2021/2022

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El reto que plantea la creación de un departamento de dinámica en el equipo de Formula Student del ISC la elaboración de un estudio dinámico general, ya que no existe un proceso definido de cómo realizarlo. Por ello, es conveniente que se realice un trabajo de estudio previo a la temporada que ayude a enfocar las tareas que debe desarrollar dicho departamento.

Los tiempos para el diseño de un Formula Student en una temporada son muy reducidos y establecer los requisitos dinámicos de cada subsistema es el punto de partida, por lo que se requiere agilidad a la hora de implantarlos. Por esta razón se suele intentar tener herramientas o modelos preparados y validados a la hora de analizar el comportamiento dinámico del coche y definir posibles mejoras.

Existen softwares privados que tienen herramientas para realizar estos estudios, pero suelen ser licencias de alto coste económico de conseguirse patrocinio para el equipo.

Además, son herramientas cuyos modelos tienen un alcance muy superior al buscado por el ISC, lo que genera una curva de aprendizaje muy lenta en los integrantes del equipo. Esto es agravado por el hecho de que el equipo del ISC sufre rotaciones de integrantes cada dos años, lo que conlleva un esfuerzo importante a la hora de transmitir el conocimiento y formar en dichas herramientas.

La motivación del proyecto es diseñar Apps “Adhoc” que incluyan modelos matemáticos útiles para hacer un análisis de dinámica de vehículos que estén centrados en parámetros concretos y permitan analizar dinámicamente el comportamiento de un vehículo. Las ventajas de tener dichas APP serían:

- Agilizar la curva de aprendizaje de los nuevos integrantes del departamento.
- Acelerar el análisis dinámico.
- Independencia de licencias patrocinadas por parte de empresas de software.
- Generación de Conocimiento propio del ISC

El último punto es destacado porque la finalidad del ISC no es únicamente competir, sino que en última instancia es ser capaces de innovar en el mundo de la competición de vehículos y formarse en las competencias que exige dicho sector. Para ello es necesario generar propiedad intelectual del equipo que sea un valor añadido a la formación académica de los integrantes de la asociación, enriqueciendo tanto al equipo como a la universidad.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

A la hora de diseñar un vehículo para un Formula Student se debe empezar por la dinámica vehicular. Un vehículo no deja de ser una masa en movimiento por lo que en un diseño preliminar es necesario aplicar las leyes de la dinámica antes de entrar en un diseño de detalle.

La dinámica de vehículos es un estudio basado en la mecánica clásica. Con el cual se puede establecer la implicación que tienen las variables de diseño de un vehículo en el comportamiento dinámico del mismo. Destacan tres ramas principales de la dinámica de vehículos en las cuales intervienen partes del vehículo con una mayor relevancia pero que suelen estar relacionadas.

- Dinámica longitudinal: Orientada a la aceleración y frenada.
- Dinámica vertical: Orientada a la absorción de perturbaciones en el terreno buscando agarre de neumático y confort de los pasajeros.
- Dinámica lateral: Orientada a la distribución correcta del peso ante curvas y cambios de dirección para la estabilidad y saturación del neumático.

Desde el primer vehículo de combustión interna en 1886 diseñado por Karl Friedrich Benz, los coches han evolucionado drásticamente hasta nuestros días en todas sus prestaciones. Esta evolución en las prestaciones genera una mayor complejidad en el diseño. Esto genera que cada vez el estudio dinámico más complejo. Es necesario que no solo sea un estudio de mecánica clásica, sino que también sea necesaria la mecánica de fluidos (aerodinámica), transmisión de calor (refrigeración), la resistencia de materiales e incluso la química (combustión y baterías). Llega a ser tan completo el estudio dinámico de un vehículo que cuando uno se decide por empezar a diseñar un coche puede llegar a perderse y no saber por dónde empezar. Por ello en este apartado se recopila como enfocar dicho diseño.

Este Capítulo se va a centrar en el estado del arte usado por los equipos de Formula Student de todo el mundo ya que la aspiración del ISC es alinearse en ámbito con los equipos de mayor madurez para posteriormente poder proponer innovación. Para realizar este estado de la cuestión se ha hecho un estudio de TFG's y TFM's disponibles en los repositorios de las distintas universidades que tienen equipos de Formula Student. También se ha hecho un estudio de las empresas que proponen herramientas para elaborar estudios de dinámica de vehículo que patrocinen a equipos de Formula Student.

Para empezar a diseñar la dinámica de un vehículo se debe seguir la premisa “divide y vencerás” ya que se debe empezar por un problema simple al que ir añadiendo complejidad. De esta manera, el vehículo se debe discretizar en un modelo matemático del cual se puedan extraer conclusiones que ayuden a la mejora del diseño del vehículo. Un modelo simple, del que se conocen todas las variables y conclusiones, puede llegar a ser más útil que disponer del modelo más avanzado y complejo, del cual conocemos las conclusiones.

Por lo tanto, el estado del arte en el ámbito de la dinámica de vehículos ha de ser analizado teniendo en cuenta que los modelos crecen en variables y complejidad exponencialmente. No conviene ser ambicioso a la hora de usar el modelo más completo, sino que se debe definir el alcance que se quiere obtener con el estudio y determinar qué modelo es el adecuado para dicho alcance, ya que los objetivos buscados a veces pueden resolverse de manera más simple y rápida en un modelo con menos variables.

El uso del modelo puede no ser únicamente de diseño sino de entrenamiento del piloto. Por ejemplo, los simuladores de tiempo real exigen tener una complejidad reducida para ser capaces de ejecutarse a la velocidad exigida. Por otro lado, los simuladores de paso por vuelta buscan una optimización de parámetros para diseño, por lo que suelen tener mayor complejidad para conseguir resultados más precisos en detrimento del tiempo de simulación que requiere.

Los objetivos con los que se usan los modelos pueden ser distintos. Un ejemplo es que el estudio dinámico de un vehículo de competición no tiene las mismas variables de interés

que un estudio dinámico de un vehículo turismo. Los objetivos de un vehículo de competición se orientan a conseguir los mejores tiempos en un circuito, mientras que los objetivos de un turismo son maximizar confort y eficiencia del combustible. Por ello, los modelos necesitan variables distintas y optimizarse de manera diferente.

Destacadas las razones por las que existen distintos modelos, se utilizan en este proyecto aquellos que han resultado útiles para el diseño de un Formula Student del ISC en cuanto a la dinámica vehicular. Estos modelos los podemos dividir entre modelos simples y complejos.

El primer grupo de modelos que se ha encontrado se clasifican como modelos matemáticos simples por ser modelos dinámicos de masas y elementos elásticos y dinámicos que resultan útiles para el diseño preliminar del vehículo. Estos modelos crecen en complejidad a medida que se caracterizan de manera más exacta, pero permiten abarcar más comportamientos del vehículo a tener en cuenta. Se puede observar la evolución en la Figura 4.

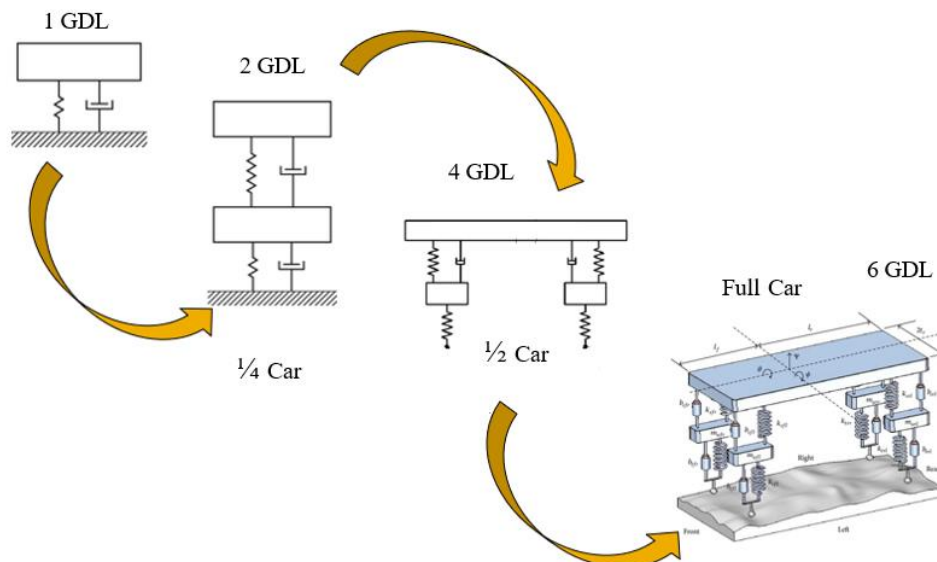


Figura 4. Modelos dinámicos simples

A la hora establecer el primer modelo, se considera el vehículo como una masa puntual que únicamente tiene un grado de libertad en el eje vertical y está conectado al suelo mediante un elemento elástico y otro viscoso. Este modelo responde a la dinámica vertical con la premisa de que es necesaria una suspensión y que se debe escoger de manera correcta la rigidez y amortiguamiento del vehículo para el comportamiento de este.

Posteriormente, conviene ser capaces de distinguir entre la masa suspendida y no suspendida. Esto se debe a que los elementos elástico y viscoso únicamente trabajan sobre la masa suspendida, mientras que la rueda y parte de la suspensión están en contacto con el suelo por la rigidez del neumático. Ambas masas únicamente se pueden mover de manera vertical. Este modelo, conocido como el Quarter-car, avanza sobre las conclusiones de la dinámica vertical en la que se puede estudiar el efecto del reparto de masa y que se debe tener en cuenta la excitación de ambas masas en el comportamiento del vehículo.

Un coche tiene dos ejes, por lo que todavía se puede avanzar en la caracterización del modelo creando el modelo Half-Car. Mediante la consideración de dos masas no suspendidas puede estudiarse el efecto del pitch del vehículo junto con su desplazamiento vertical según el reparto de rigidez y amortiguamiento en los ejes. Este modelo responde a la dinámica vertical y parte de la longitudinal debido al pitch. También se han encontrado estudios en los que este modelo es usado para sacar conclusiones sobre la dinámica lateral, considerando como masas no suspendidas las ruedas izquierdas y derechas. Esto permite poder estudiar el Roll del vehículo introduciendo conclusiones de la dinámica lateral.

Finalmente, para expandir el modelo matemático, se puede desarrollar el Full-Car. Un modelo que tiene en cuenta las 4 ruedas por separado pudiendo estudiar el pitch y el roll de manera conjunta y poder relacionar la dinámica vertical y lateral.

Un vehículo es mucho más complejo, ya que cada masa de los modelos anteriores son subsistemas complejos en sí mismos y que pueden hacer que el comportamiento del coche sea distinto al establecido en estos modelos simples. La geometría de la suspensión genera no linealidad en los elementos elásticos y viscosos. En estos modelos no se tiene en cuenta más que la perturbación del asfalto, obviando las transferencias de pesos según se mueve el

vehículo. La carga aerodinámica tiene un papel importante en la dinámica del vehículo y es dependiente de la velocidad y la posición de las masas. En definitiva, todos los subsistemas del coche aportan a la dinámica del vehículo, aunque solo sea por desplazar el centro de gravedad y añadir peso. Por ello, los modelos matemáticos han evolucionado a una complejidad en la que intervienen cientos de variables de diseño del coche que son desarrollados por empresas de software que ofrecen sus modelos como negocio. Estos modelos son capaces de tener en cuenta todos los subsistemas y al optimizar al máximo el vehículo, y se puede observar su comportamiento en circuitos de manera simulada. Estos programas son el estado del arte de la dinámica de vehículos, pero conlleva que el ingeniero que haga uso de estas herramientas tenga una alta cualificación en la materia. Se dispone de cientos de variables a optimizar y la gran mayoría están relacionadas entre ellas, por lo que, o bien se conoce correctamente la implicación de dichas variables con ayuda de los modelos simples, o no se consigue extraer conclusiones de dichos programas. Varios ejemplos de estos programas podrían ser MSC Adams-Car o IPG Carmaker.

Adams-Car es un programa que es utilizado por varios equipos ya que tiene plantillas de ensayos típicos de coches y geometrías de suspensión. Es un programa de dinámica multicuerpo con el módulo “Adams-Car” que acelera el diseño de los vehículos y sería interesante que el ISC estudiara si conviene hacer uso de dicho software.

El IPG Carmaker es un simulador de vehículos que permite cargar todos los parámetros del coche y observar su comportamiento en un ambiente determinado. Incluye variables como la geometría de la suspensión, Powertrain, geometría del circuito, aerodinámica, condiciones meteorológicas, comportamiento no lineal del neumático.

Aunque estas herramientas son muy útiles, las licencias son caras por lo que los equipos de Formula Student deben buscar patrocinios para conseguirlas, y tienen tantos parámetros de entrada que lograr lanzar una simulación requiere un gran esfuerzo inicial por medir y conocer todos los parámetros implicados en la simulación. Se considera que el ISC debe avanzar en el uso de estos programas pero que todavía no está preparado para poder sacarle

todo el partido posible por lo que se debe conseguir plasmar en el equipo los modelos simples antes de poder dar el salto a los modelos complejos.

Un subsistema muy relacionado con la dinámica de vehículos es la suspensión, ya que es el subsistema encargado de dimensionar en la realidad el elemento elástico y viscoso de los modelos simples que unen la masa suspendida a la masa no suspendida. Esto se hace mediante un mecanismo de barras y un amortiguador, que es el elemento que posee la característica elástica y viscosa. La geometría del mecanismo de barras de la suspensión ha evolucionado con el tiempo, ya que con una geometría concreta se puede obtener una no linealidad en la rigidez del amortiguador conveniente desde el punto de vista dinámico. También existen ángulos en el neumático que optimizan el agarre de éste, los cuales se obtienen gracias a la geometría de la suspensión. Por ello, es necesario introducir la tipología de suspensión utilizada dentro del ISC y describir los distintos elementos y ángulos de la suspensión en el estado del arte.

Los mayores avances en los vehículos de competición se encuentran en los coches de F1. Por lo que es conveniente observar que geometrías de suspensión destacan en esta competición y cuáles son las razones para ello. La primera observación se encuentra en que se deciden por suspensiones independientes en las que el sistema de suspensión no es común a ambos ejes y permite el desplazamiento de cada rueda de manera individual. Existe un elemento, llamado barra de torsión, que establece una rigidez lateral cuando ambas ruedas del mismo eje tienen movimientos distintos. Este elemento no afecta a la dinámica vertical si ambas ruedas se mueven síncronas.

Dentro de las suspensiones independientes en la F1 se destacan los modelos Pushrod y Pullrod. Ambos destacan por tener libertad de diseño para poder ajustar los ángulos de la suspensión, por lo que son sistemas perfectos para competición maximizando las fuerzas de la rueda en cada situación para conseguir un mayor agarre. Esta libertad viene dada por el mecanismo de 4 barras que consta de mangueta y dos triángulos de suspensión, los cuales permiten ajustar ángulos como el camber. Después, uno de los dos triángulos es conectado a otro sistema de 4 barras, que es el encargado de incluir el elemento

amortiguador para dotar a la suspensión de movimiento. La diferencia entre estos dos sistemas reside en este segundo mecanismo.

El mecanismo de suspensión consiste en una barra diagonal que transmite el movimiento a un balancín que está conectado al amortiguador. Dependiendo de cómo trabaja la barra diagonal, a compresión (push-rod) o a tracción (Pull-rod), podemos distinguir los dos tipos de sistemas de suspensión.

La ventaja de un sistema Pull-rod, Figura 5, es que al trabajar la barra diagonal a tracción esta no sufre pandeo, por lo que se encuentra menos cargada. El sistema de suspensión Push-rod, requiere una barra diagonal más solicitada, pero en los finales de carrera del recorrido de suspensión la Pull-rod es más frágil. Esto hace que los sistemas Push-rod sean considerados más robustos, ya que ante imprevistos de grandes perturbaciones tienen más aguante.

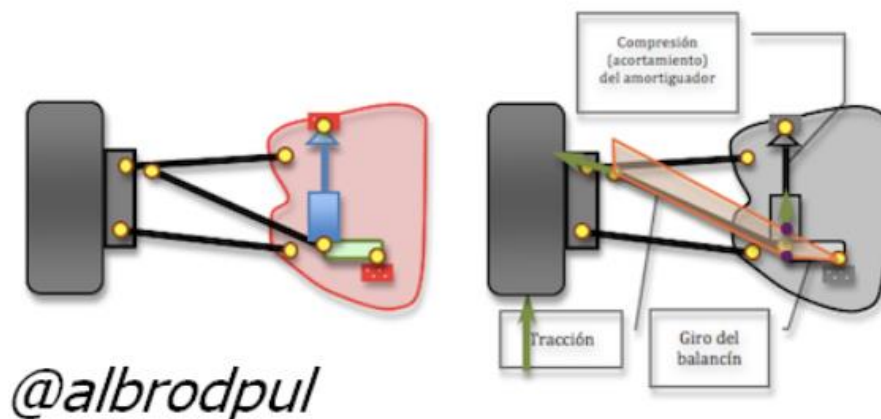


Figura 5. Suspensión Pullrod. <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/02/09/analisis-push-rod-pull-rod/>

El equipo del ISC ha optado esta temporada por enfocar su diseño a la robustez y tener un coche que sea capaz de aguantar una carrera larga, por lo que el sistema Push-rod es el seleccionado por el equipo para sus futuros diseños. La suspensión delantera que ha diseñado el equipo del ISC para la temporada 2020/21 se puede observar en la Figura 6.



Figura 6. Suspensión pushrod

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

Tras hacer la revisión de los modelos matemáticos que serían útiles para el equipo ISC se ha comprobado que no es fácil obtener una herramienta sencilla de usar que permita a todos los integrantes del equipo usarla sin ser de pago.

Por ello se ha establecido que este proyecto desarrollará las herramientas que permitan a los integrantes del ISC que aprendan rápidamente de una manera intuitiva los comportamientos dinámicos del vehículo y que sean capaces de extraer conclusiones justificadas en la toma de decisiones de los parámetros del vehículo. Gracias a la transmisión de dichas herramientas y las posibles mejoras que se propongan a lo largo de las temporadas por parte del ISC, el equipo conseguirá un paquete de herramientas ajustadas a sus necesidades y que tengan un alto valor para todo aquel que quiera participar de esta asociación.

3.2 OBJETIVOS

Los objetivos marcados para este proyecto son los siguientes:

- Desarrollar una APP que facilite el diseño de la geometría de suspensión del FS del ISC:

Para establecer el croquis de las barras de suspensión se diseñará una APP que permita establecer una geometría, evaluarla según los parámetros que mide actualmente el ISC y generar cambios de geometría de manera ágil.

- Desarrollar una APP que facilite la lectura e interpretación de los sensores de adquisición de datos abordo del FS del ISC:

Actualmente se está trabajando en la sensorización de determinados parámetros del vehículo como son aceleraciones y recorridos de suspensión mediante Arduino. La

intención de esta APP es agilizar el post-procesado de los datos para una rápida interpretación de estos.

- Realizar un estudio dinámico del actual vehículo del ISC:

Con la intención de demostrar el uso de las APPs, se estudiarán que modelos son adecuados para el equipo. Se establecerá que parámetros se pueden determinar en el vehículo actual y que parámetros convendría explorar en el futuro para mejorar el diseño.

- Marcar un procedimiento a seguir por parte del ISC para el diseño de la próxima temporada:

Debido a que la temporada 2021/2022 será la primera vez que el equipo afronte un estudio dinámico, recopilar el conocimiento adquirido en la elaboración de este proyecto y elaborar una propuesta de procedimiento a seguir por el departamento de dinámica.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 FASES DEL PROYECTO

El proyecto ha sido desarrollado en tres fases diferenciadas:

1. Estudio previo: Investigar que modelos serían útiles para desarrollar APPs para el equipo del ISC. Esta fase se ha desarrollado en el estado del arte.
2. Creación de APPs: Desarrollar e implementar los modelos escogidos de la fase anterior y validar las Apps.
3. Caso de diseño ISC: Hacer uso de las Apps generadas con el fin de validarlas y demostrar su utilidad.

Cada una de estas fases será ampliada con más detalle en los siguientes apartados a excepción del estudio previo.

3.3.2 CREACIÓN DE APPS

Esta fase es la que más contenido tiene de todo el proyecto. Por ello, se desgrana en distintos apartados.

1. Seleccionar con que programa se van a realizar las Apps: Esta es una fase importante en la que se deben tener en cuenta varios factores:
 - a. Escalabilidad: Debe ser una herramienta que los futuros integrantes del ISC sean capaces de acceder y mejorar sin excesiva dificultad.
 - b. Accesibilidad: Debe ser una herramienta que los integrantes del ISC puedan usar sin necesidad de descargarse un exceso de programas para hacer que funcione.
 - c. Compatibilidad: El ISC desarrolla modelos y cálculos en otros departamentos y se quiere intentar tener una plataforma que permita combinar modelos fácilmente.
2. Desarrollo de Apps: Una vez seleccionado y explorado el programa en el que se desarrollarán las Apps y seleccionados los modelos que se desarrollarán en la fase anterior, se debe proceder al desarrollo de estas. Cada una de las Apps va a tener un esquema de fases idéntico, pero en cada una de ellas estas fases tendrán contenidos distintos. Las fases son las siguientes:
 - a. Descripción de la utilidad y objetivos de la APP
 - b. Desarrollo del modelo matemático
 - c. Implementación del modelo matemático en forma de APP
 - d. Verificación del modelo matemático y del funcionamiento de la APP

3.3.3 CASO DE DISEÑO ISC

En esta fase se pretende demostrar la utilidad de dichas Apps para el ISC. Se analizan ciertos aspectos del diseño del IFS-03 que es el último vehículo diseñado del ISC con respecto a la dinámica de vehículos. Una vez analizado el vehículo actual se proponen algunas mejoras que se puedan observar en el estudio. El objetivo no es hacer un estudio

exhaustivo y entrar en el detalle de la dinámica de vehículos, sino poder observar que mediante las Apps se puede llegar a observar comportamientos del vehículo propios de la teoría de dinámica de vehículos y comprobar de manera iterativa los distintos parámetros y su efecto en el modelo. Las mejoras propuestas son aisladas para mejorar las respuestas dinámicas, no se valora su impacto con respecto a todo el sistema o la posibilidad de materializar la propuesta. Un ejemplo es que una nueva propuesta de puntos de suspensión no se comprueba si el chasis es posible triangularlo mediante normativa con dichas coordenadas.

Para desarrollar la fase se ha pedido la información disponible del ISC sobre los parámetros del IFS-03 y se ha trabajado sobre estos datos. Los datos que el ISC no tenga de los modelos se intentarán aproximar para poder estimar la respuesta del coche. Se hará uso de cada App en esta sección a excepción de la App Postprocesado Sensores ya que el equipo todavía no tiene un sistema de adquisición de datos desarrollado.

3.4 PLANIFICACIÓN

En este apartado se expresa la planificación del proyecto. Se ha usado un Gantt para monitorizar los tiempos del proyecto y al tratarse de un diseño de software se ha seguido un método Agile en el que se proponían avances en cada App en sprints de 15 días. Se estimó que en 3 sprints se conseguiría realizar una App con funcionalidad suficiente a excepción de la App Postprocesado Sensores que al empezar más tarde se consideró que se elaboraría en un tiempo menor debido al aprendizaje en las otras Apps. Este método ha resultado ser el acertado, ya que permite evaluar el coste de añadir y eliminar requisitos según la dificultad de la implementación dentro de la App, así como no tener que definir unos requisitos iniciales fijos.

Es por esto por lo que se pueden apreciar 3 bloques de diseño uno para cada App, los cuales se solapan para que ante un problema en el diseño de una App se tenga otra sobre la que trabajar. La planificación se puede observar en la Figura 7.

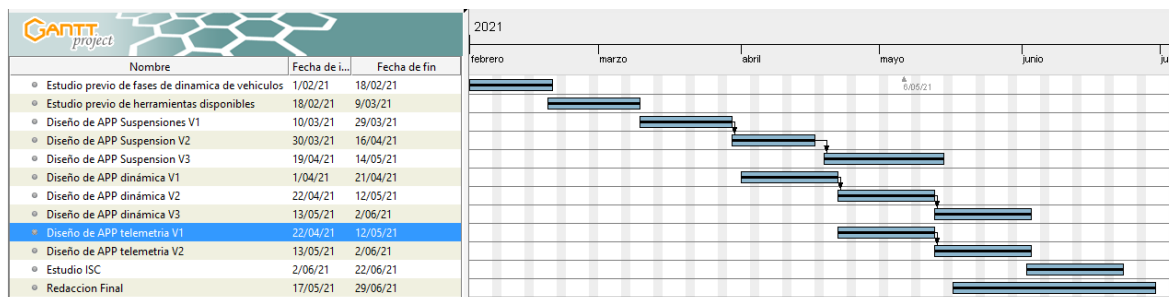


Figura 7. Planificación del proyecto

Capítulo 4. PLATAFORMA DE LAS APPS

En este capítulo se refleja el proceso de selección de la plataforma para la App según los criterios definidos en 3.3.2, así como las características y capacidades que tiene la plataforma seleccionada.

4.1 SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA

En este apartado se describe el proceso de decisión sobre la plataforma escogida acogiéndose a los requisitos establecidos en la metodología. Lo que se busca es una plataforma que facilite la creación de GUI (Grafical User Interface) en la que el usuario interactúe con el modelo matemático de una manera sencilla e intuitiva.

4.1.1 ACCESIBILIDAD

En la primera característica en la que se va a analizar la selección es la accesibilidad, ya que es considerado un pilar esencial que los integrantes del ISC no tengan que hacer un esfuerzo extra por descargarse programas específicos para esta APP también que estén familiarizados con el lenguaje y entorno, puesto que la intención de este proyecto es que en un futuro los integrantes del ISC que quieran puedan ampliar las funcionalidades que estas Apps ofrecen.

Los integrantes del ISC principalmente conocen C y Matlab como lenguajes de programación debido al plan de estudios de la universidad. Matlab ofrece licencias de estudiante para los alumnos de ICAI, por lo que prácticamente todo alumno de la universidad tiene descargado el programa. Esto hace atractivo diseñar las Apps en alguno de estos lenguajes debido a la gran accesibilidad que tendrían. Además, Matlab patrocina la competición de Formula Student, por lo que ofrece paquetes de aprendizaje sobre vehículos Formula Student como puede ser el “Racing Lounge”. Este compromiso con la

competición muestra que es una plataforma sólida de la que se dispondrá de licencia en el futuro.

Esta decisión hace que lenguajes de programación open-source que ofrecen más facilidad de diseño de Apps sean descartados, como por ejemplo Python o Java. En el caso de creación de Apps, Java es un lenguaje muy común, y al ser un lenguaje multiplataforma permite que la App pueda ser abierta desde prácticamente cualquier dispositivo, pero es un lenguaje que ICAI no enseña.

4.1.2 COMPATIBILIDAD

En cuanto a la compatibilidad con otros modelos o trabajos realizados por el ISC Matlab parece la opción más acertada. Como se ha expresado en el apartado anterior, Matlab ofrece licencias patrocinadas para los alumnos de ICAI, por lo que los desarrollos matemáticos del ISC han sido llevados a cabo previamente en Matlab. Desde el punto de vista de evolucionar a un vehículo autónomo se necesitan hacer controles electrónicos los cuales se enseñan mediante Simulink en la universidad. Por ello, se concluye que Matlab sería el entorno idóneo según la compatibilidad.

4.1.3 ESCALABILIDAD

Finalmente, se debe analizar la posibilidad que brinda la plataforma en términos de escalabilidad. Para ello se debe tener en cuenta que, pese a la plataforma evolucionar a versiones superiores, se permita poder seguir trabajando sobre los modelos desarrollados.

Matlab permite leer códigos de versiones anteriores en nuevas por lo que permitiría seguir desarrollando las Apps en el futuro. Cumpliendo la premisa de escalabilidad.

4.2 HERRAMIENTA DENTRO DE LA PLATAFORMA MATLAB

Una vez escogida la plataforma Matlab, queda definir qué herramientas dentro de esta pueden ser explotadas para crear Apps con entorno GUI. Tras un análisis de la oferta de Matlab se ha observado que existen dos maneras de crear Apps: Guide y Appdesigner.

A continuación, se va a desarrollar brevemente cada una de ellas junto con la decisión de cuál va a usarse en este proyecto.

4.2.1 GUIDE MATLAB

Guide es una herramienta de Matlab que permite diseñar GUI a partir de generación de código. Existe una GUI que ayuda al diseño del Front-end de la App, se ha encontrado dicho entorno anticuado. Esto se puede observar en la Figura 8.

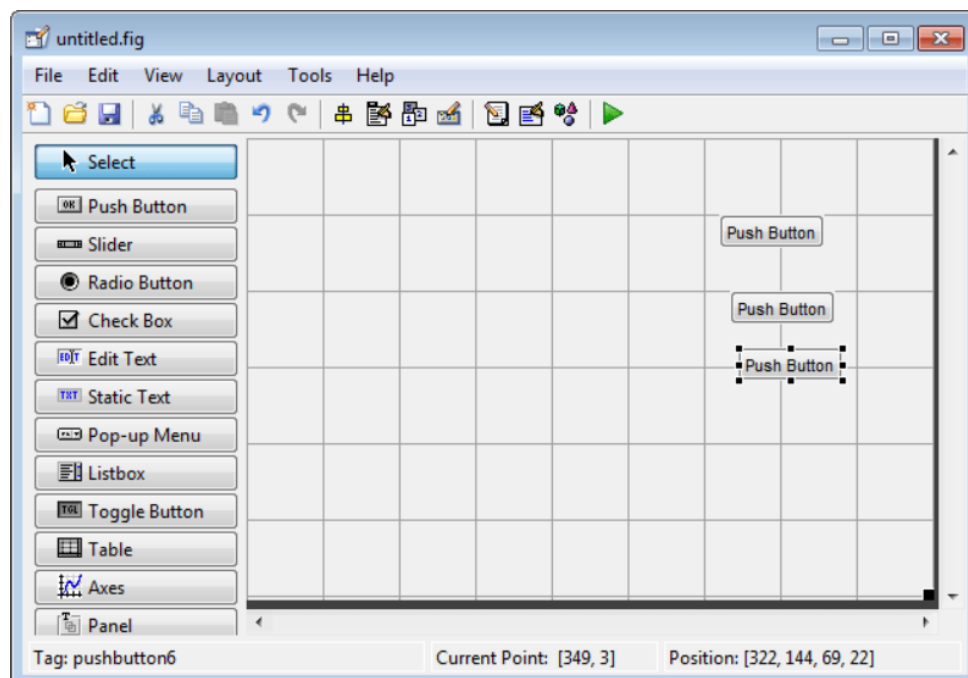


Figura 8. Entorno GUIDE [15]

Esta herramienta requiere un aprendizaje exhaustivo sobre el diseño de GUI, ya que la estructura ha de ser programada por el usuario y existen comandos específicos para GUIDE.

Este método se ha quedado obsoleto, por lo que Matlab ha desarrollado una nueva herramienta que se describirá en el siguiente apartado. Ha sido tal la mejora que cuando se busca información sobre GUIDE actualmente en la página de MATHWORKS especifican

que dejará de estar soportado en las siguientes versiones de Matlab y que las Apps han de ser migradas a APPDESIGNER. Esto se puede observar en la Figura 9.

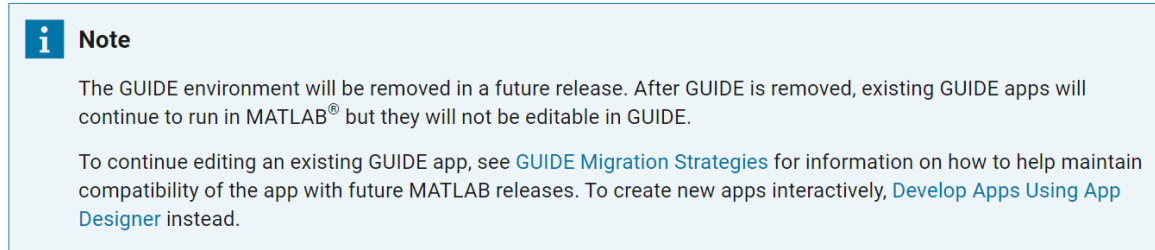


Figura 9. Nota sobre GUIDE [15]

4.2.2 APPDESIGNER MATLAB

Como se ha expresado en el apartado anterior, APPDESIGNER es la nueva herramienta de Matlab para diseños de GUI's.

Las dos ventajas principales de Appdesigner con respecto de Guide son su simpleza a la hora de programar acciones y la facilidad de compilar la App como “standalone” o modo web para compartirlo incluso con gente que no utiliza Matlab.

Al arrastrar cualquier tipo de botón se configura automáticamente todo el código necesario para hacerlo funcionar. Esto hace que únicamente nos dediquemos a crear la estructura y el código que desarrolla cada botón, permitiendo ser capaz de desarrollar Apps de gran funcionalidad sin necesidad de saber cómo crear el código de la programación de Apps.

La ventaja de compilar la App y permitir su uso a gente que no tenga Matlab es bastante relevante dentro del contexto de este proyecto. Se ha definido como objetivo no depender de software de licencia por motivos de patrocinio. Sí que es cierto que para poder ampliar la funcionalidad de las Apps se necesita el software, pero de perder el patrocinio de Matlab los integrantes del ISC podrían seguir usando dichas Apps.

4.3 DESCRIPCIÓN APPDESIGNER

En este apartado se va a realizar una descripción concreta del uso en este proyecto de Appdesigner. Cabe destacar que toda la información expresada en este apartado está referenciada a la información que proporciona Mathworks en el “help” de Matlab. Todo lo aprendido referente a este proyecto del diseño de apps en APPDESIGNER ha sido mediante la información disponible en el “help” y en la web de mathworks. Por lo que ante cualquier duda o necesidad de investigar sobre dicho software es conveniente hacer uso de estas fuentes ya que en este apartado solo se describirán las características que hacen que Appdesigner fuera la plataforma seleccionada.

En cuanto a la exportación de la App se hace mediante “Matlab Compiler” este programa permite crear ejecutables que usuarios sin Matlab puedan utilizar las Apps. También tiene una modalidad en modo web que combinada con “Matlab Web App Server” permite que usuarios accedan a las Apps via internet. Se ha descartado la versión del buscador en internet ya que requiere la apertura de un servidor para cargarlos y dado que el año que viene no se dispone de licencia estudiante no tendría sentido el trabajo de hacer funcionar el servidor para unos meses.

Al exportar la App en modo “Standalone” se crea una estructura de carpetas que incluyen todos los archivos necesarios y un .exe que es el que permite al usuario instalar el programa y si poseen “Matlab Runtime” ejecutar la App sin problemas. El método de compilación está redactado en el help de Matlab y es un proceso sencillo en el que se especifica la carpeta, nombre de la app , datos del creador y una imagen de carga de la App si se necesita que temporalmente como prueba de concepto para este trabajo se ha seleccionado la Figura 10.



MADE BY: FEDERICO GIL FERNÁNDEZ



Figura 10. Imagen de pantalla de carga de las Apps

Gracias a este método se ha podido realizar una carpeta que incluye las subcarpetas de cada programa y compilarla. De esta manera a cualquier integrante del ISC se le puede proporcionar dicho zip e instalarse las Apps para usarlas sin límites. También se dará a la dirección del equipo los archivos en código Matlab para que puedan generar las siguientes versiones con capacidades ampliadas.

A nivel de facilidad a la hora de programar, Appdesigner permite mediante arrastrar componentes predeterminados a la pantalla generar un “User Interface” de manera rápida y sencilla. Appdesigner tiene una gran cantidad de componentes, algunos ejemplos son botones, menús desplegables, figuras, sliders, etc. Una vez se ha configurado el User Interface se configura automáticamente por detrás en el “code view” el código con la estructura necesaria. De esta manera, si se selecciona la callback function de cada componente, el programa te dirige a la parte del código que ejecuta dicho componente.

Las demás funcionalidades que se han usado han sido redactadas en los apartados de las Apps en las que se han utilizado.

Capítulo 5. CREACIÓN DE APP DINÁMICA

Este Capítulo, en el cual se va a documentar el proceso de diseño de la APP dinámica, está dividido según los apartados descritos en 3.3.2.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA APP DINÁMICA

Esta App pretende ser el punto de partida del estudio dinámico del vehículo, y principalmente cubre el diseño de los parámetros de la dinámica vertical. Como se ha descrito en el estado del arte en esta App se pretenden crear los modelos simples de dinámica de vehículos para que los integrantes del ISC puedan usarlos para comprender la dinámica.

De los modelos planteados en el estado del arte se ha considerado que el sistema masa-muelle, de 1 grado de libertad, es muy sencillo y no aporta información relevante como para ser incluida dentro de la APP. De la misma manera se ha considerado que un Full-Car model es demasiado complejo debido a la cantidad de parámetros de entrada que requiere y no aportaría beneficio en el estado actual del equipo ISC.

Por ello se ha considerado que en esta APP se encuentren los modelos Quarter-Car model y Half-Car model.

5.1.1 DESCRIPCIÓN QUARTER-CAR MODEL

El Quarter-Car model, Figura 11, es un modelo de 2 grados de libertad que nos permite simplificar el vehículo como dos masas concretas. La primera es la masa suspendida, entendida como toda la masa que se encuentra aguas arriba del sistema de suspensión. La segunda masa es la masa no suspendida, sería la masa aguas abajo de la suspensión.

Dichas masas se encuentran unidas por un muelle y un amortiguador que vienen a caracterizar la característica elástica y viscosa de la suma de los cuatro amortiguadores

dispuestos en el vehículo. Finalmente, el sistema se une al suelo mediante un elemento muelle que viene a representar la característica elástica del neumático.

El modelo nos permite observar el comportamiento vertical del vehículo con sus respectivas características del amortiguador. También se puede estudiar el efecto que tiene reducir la masa suspendida y la masa no suspendida para observar que masa tiene mayor impacto en la dinámica vertical.

Por último, hay ciertos parámetros de confort del piloto que se pueden observar gracias a este modelo. Estos son las HRV (Human Response to Vehicle) que mediante el RMS de la aceleración de la masa suspendida estimar el confort a la hora de conducir el coche.

5.1.2 DESCRIPCIÓN DE HALF-CAR MODEL

El Half-Car model, Figura 13, es una evolución del Quarter-Car. El Quarter-Car es un modelo que nos permite estudiar en primera aproximación la dinámica vertical de un vehículo. Pero existen otros fenómenos relevantes en el estudio dinámico que no están representados por este modelo. Existen los movimientos de Pitch y Roll que reflejan la transmisión de fuerzas entre el eje delantero y trasero en el caso del Pitch y entre lateral izquierdo y derecho en el caso del Roll. Para poder representar dichos ángulos se necesita pasar a un modelo de 4 grados de libertad conocido como Half-Car. Este modelo nos permite dividir la masa no suspendida del Quarter-Car en dos masas distintas situadas a cierta distancia del cdg de la masa suspendida. Este modelo permite el desplazamiento vertical de las 3 masas y el ángulo de rotación de la masa suspendida, y tiene una mayor complejidad tanto en el número de ecuaciones como en el número de parámetros.

El modelo nos permite observar el Pitch si se considera que las masas suspendidas son los ejes y el Roll, y las masas no suspendidas las ruedas de cada lado del vehículo. Centrándose en el Pitch es importante repartir la rigidez vertical entre el eje delantero y trasero, ya que existen dos modos propios de vibración que son el “bounce” y el “pitch”, bote y cabeceo respectivamente, estos deben de ser ajustados en las frecuencias correctas para que el vehículo sea fácil de controlar para el piloto. Esto se puede observar gracias al

modelo y con el uso de la creación de la App “IC Calculator” que nos permite estimar el reparto de rigidez y estimar su comportamiento a distintas frecuencias.

Con este modelo podemos estudiar más en detalle las aceleraciones y desplazamientos que sufre el piloto, ya que no solo tienen componente vertical sino también una componente de rotación relevante.

5.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

5.2.1 KC CALCULATOR

Se debe encontrar una manera rápida de poder hacer una primera estimación de rigidez y amortiguamiento para nuestro vehículo. Por ello se pretende desarrollar una App con un cálculo rápido que nos permita estimar dicha rigidez.

Esta estimación se puede hacer mediante la caída estática del vehículo. Una limitación técnica de la suspensión en Formula Student es el Ground Clearance que no puede ser inferior a 30 mm. Otra limitación técnica es que tiene que haber un mínimo de 25 mm de recorrido de compresión y los amortiguadores típicos de Formula Student tienen entorno 50 mm de recorrido útil. Esto nos hace ver que por restricciones geométricas y peso del vehículo la caída estática quede prácticamente definida. Sabiendo dicha caída estática y que se cumple la relación [1] podemos obtener la rigidez de toda la suspensión.

$$x_{st} = \frac{m * g}{K} \quad [1]$$

Una vez se sabe la rigidez de la suspensión, lo más cómodo para definir el amortiguamiento es establecer una seta de amortiguamiento y con ella se obtiene el amortiguamiento de la suspensión. Por lo tanto, la C es despejada de la ecuación [2].

$$\zeta = \frac{c}{2 * \sqrt{K * m}} \quad [2]$$

5.2.2 QUARTER-CAR MODEL

En el modelo de Quarter-Car model se va a hacer uso del método de los desplazamientos para sacar las ecuaciones diferenciales que rigen este modelo. Para ello se ha definido las siguientes variables reflejadas en Figura 11. Este modelo tiene dos grados de libertad, correspondientes al movimiento vertical de cada masa, ya que u_g es considerado una entrada del sistema que será usado para excitarlo. Las constantes expresadas se explicarán cada una de ellas en el apartado 5.3.3.

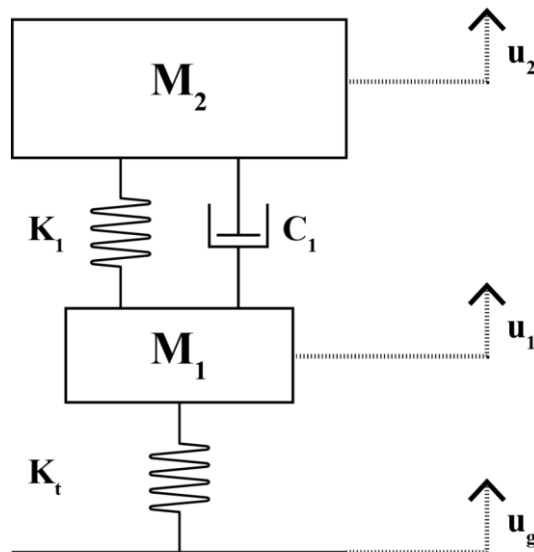


Figura 11. Esquema de modelo Quarter-Car

A continuación, se sacan las ecuaciones del movimiento de cada masa teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

$$\sum F_y = 0 \quad [3]$$

$$\sum M_{\sigma} = 0 \quad [4]$$

Conociendo dichas relaciones se busca obtener que fuerzas actúan en este modelo, se puede observar en la Figura 12.

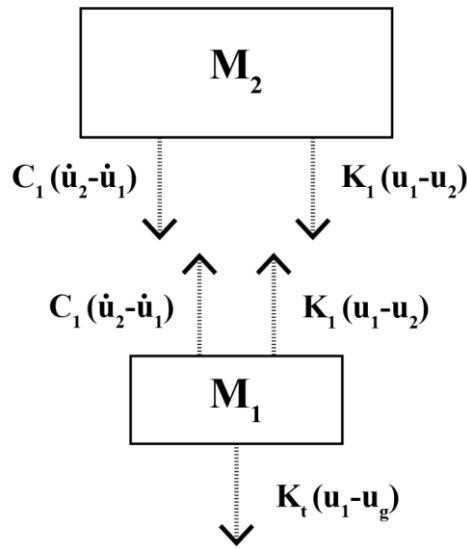


Figura 12. Diagrama de fuerzas de Quarter-Car

Quedando las siguientes ecuaciones:

$$m_2 * \ddot{u}_2 = -K_1 * (u_1 - u_2) - C_1 * (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - m_2 * g \quad [5]$$

$$m_1 * \ddot{u}_1 = K_1 * (u_2 - u_1) + C_1 * (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - K_t * (u_1 - u_g) - m_1 * g \quad [6]$$

Las ecuaciones [5] y [6] son las que se implementarán en Appdesigner para poder obtener el desplazamiento, velocidad y aceleración de las masas a distintas excitaciones de suelo.

5.2.3 HALF-CAR MODEL

Similarmenle al Quarter-Car model se va a usar el método de los desplazamientos para hallar las ecuaciones que rigen este movimiento. Las variables usadas en las ecuaciones se reflejan en la Figura 13. Este modelo tiene 4 grados de libertad, los desplazamientos verticales de las tres masas y la rotación de la masa suspendida. El movimiento del suelo siendo u_{g1} y u_{g2} se consideran entradas del sistema con el que se excitará.

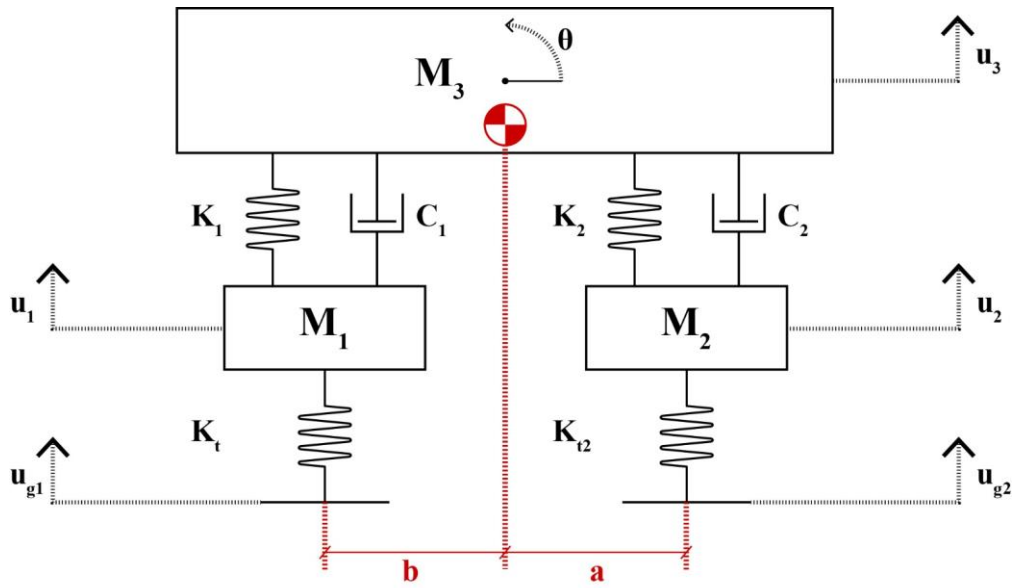


Figura 13. Esquema de modelo Half-car

A continuación, se desarrollan las ecuaciones de cada masa siguiendo los principios físicos [3] y [4] de igual forma en el Quarter-Car.

Obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$m_1 * \ddot{x}_1 = C_1 * (\dot{u}_3 - \dot{u}_1 - b * \dot{\theta}) - k_{t1} * (u_1 - u_{g1}) + k_1 * (u_3 - u_1 - b * \theta) - m_1 * g \quad [7]$$

$$m_2 * \ddot{x}_2 = C_2 * (\dot{u}_3 - \dot{u}_2 + a * \dot{\theta}) - k_{t2} * (u_2 - u_{g2}) + k_2 * (u_3 - u_2 + a * \theta) - m_2 * g \quad [8]$$

$$m_3 * \ddot{x}_3 = -C_1 * (\dot{u}_3 - \dot{u}_1 - b * \dot{\theta}) - C_2 * (\dot{u}_3 - \dot{u}_2 + a * \dot{\theta}) - K_2 * (u_3 - u_2 + a * \theta) - K_1 * (u_3 - u_1 - b * \theta) - m_3 * g \quad [9]$$

$$I_y * \ddot{\theta}_3 = b * C_1 * (\dot{x}_3 - \dot{x}_1 - b * \dot{\theta}) - a * C_2 * (\dot{x}_3 - \dot{x}_2 + b * \dot{\theta}) + b * K_2 * (x_3 - x_2 - b * \theta) - a * K_1 * (x_3 - x_1 + a * \theta) \quad [10]$$

Las ecuaciones [7] a la [10] son las que se implementarán en la App dinámica para obtener los movimientos de las masas a distintas excitaciones del suelo.

5.2.4 IC CALCULATOR

Cuando se pasa a un modelo de Half-Car en el que se representan dos ejes surgen dos modos de vibración en el chasis, masa suspendida. Estos son conocidos como “bounce” y “pitch”. Siendo “bounce” un modo de vibración predominante en movimiento vertical y menor ángulo de rotación y en el caso de “pitch” siendo predominante el ángulo de rotación con respecto al movimiento vertical.

Se puede realizar un estudio por el que obtener a que frecuencias ocurren dichos modos y estimar cual es el IC, el punto sobre el que rota el modo de vibración. Estas distancias y las frecuencias son dependientes del reparto de peso en cada eje y de las rigideces establecidas para cada eje. Por ello este cálculo puede ayudar a decidir qué amortiguadores colocar en el eje delantero o trasero.

Siempre ocurre que el IC del modo de “pitch” ocurre dentro de la batalla del vehículo, mientras que el modo de “bounce” el IC se encuentra fuera de la batalla.

Para calcular los IC se necesitan 3 parámetros cuyas definiciones son [11], [12] y [13] . Las definiciones de frecuencias naturales son [14] y [15] y finalmente las distancias son [16] y [17].

$$\alpha = \frac{(K_f + K_r)}{M} \quad [11]$$

$$\beta = \frac{(K_r * c - K_f * b)}{M} \quad [12]$$

$$\gamma = \frac{(K_f * b^2 + K_r * c^2)}{I_y} \quad [13]$$

$$w_1 = \sqrt{\frac{\alpha + \gamma}{2}} + \sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \frac{\beta^2}{r_y^2}} \quad [14]$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{\alpha + \gamma}{2}} - \sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \frac{\beta^2}{r_y^2}} \quad [15]$$

$$\frac{z}{\theta 1} = \frac{-\beta}{(\alpha - w^2)} \quad [16]$$

$$\gamma = \frac{r_y^2 * (\gamma - w^2)}{\beta} \quad [17]$$

Estos cálculos serán introducidos dentro de la App IC calculator para conocer las frecuencias de excitación de estos dos modos y estudiar la relación fn-front/fn-rear. Esta ratio es importante ya que se recomienda tener una ratio superior a 1 para que el vehículo sea intuitivo para el piloto.

5.3 IMPLEMENTACIÓN EN APPDESIGNER

En este apartado se describe cómo se ha creado la App en el entorno de Appdesigner. Se resaltan las metodologías que se hayan considerado complejas de formarse mediante la herramienta “help” de Matlab.

5.3.1 ESQUEMA DE LA APP

En Appdesigner se podría considerar que cada ventana es una App independiente, de manera que, si se quiere crear una APP que navega entre ventanas, se tiene que crear una App superior que subordina a las otras Apps. A partir de este momento los niveles inferiores se consideran ventanas. Por ello, es necesario plantear el esquema de la App y qué ventanas la componen y su jerarquía, para posteriormente describir cada una de las ventanas individualmente.

La App dinámica, como se ha explicado en el apartado 5.1, debe acomodar los dos modelos Quarter-Car y Half-Car, los cuales es conveniente dividir en dos ventanas independientes con sus respectivos inputs y outputs. Es por esta razón que surge la necesidad de crear una ventana en una jerarquía superior a estos modelos que permita al usuario navegar entre modelos dependiendo de cual se quiera estudiar.

Posteriormente, cada uno de los modelos tiene necesidad de abrir otras ventanas de distintos cálculos que asisten a la cesión de parámetros. Algunos de estos cálculos son comunes, como “KC Calculator”, otros son específicos de un modelo, como “IC calculator” para Half-Car model.

Para desarrollar los modelos matemáticos de los apartados 5.2.2 y 5.2.3 se ha decidido generarlos en Simulink. Las razones por la que se ha tomado esta decisión son las siguientes:

- Se quiere explorar el alcance de Simulink a la hora de generar plantas de sistemas dinámicos y si es posible correr el modelo en modo “batch” desde las aplicaciones de appdesigner.

- Si en un futuro se intenta hacer un control activo de dichos modelos mediante controladores en Simulink tenerlo implementado directamente en esta herramienta es útil.

Una vez descritas las dependencias se puede definir la estructura de la App, la cual se puede observar en la Figura 14. En los siguientes apartados se explica cada ventana por separado.

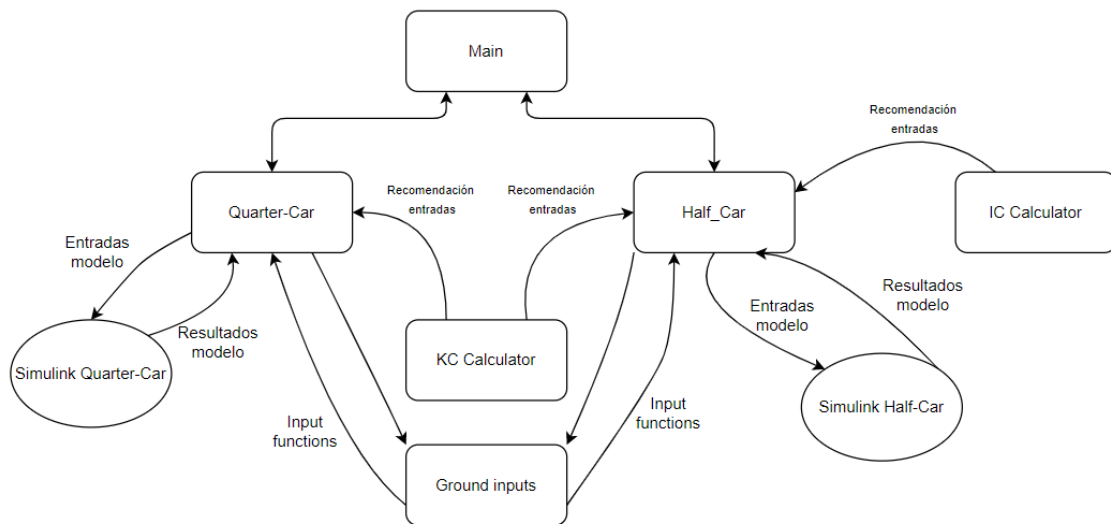


Figura 14. Estructura APP dinámica

5.3.2 MAIN

Esta ventana es la que se encarga de poder navegar entre el modelo de Quarter-Car y el modelo de Half-Car. El Front-end de esta ventana es muy sencillo ya que solo nos permite abrir el modelo deseado una sola vez. Se puede observar en la Figura 15.

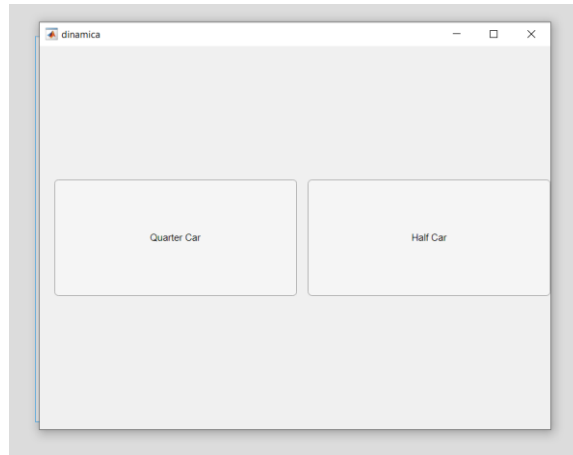


Figura 15. Front-end de Main

A nivel programación esta ventana únicamente ejecuta estos comandos cuando se pulsa cualquiera de los botones de cada modelo el código de la Figura 16. Esto supone que no se permita abrir el modelo más de una vez al mismo tiempo.

```
% Button pushed function: QuarterCarButton
function QuarterCarButtonPushed(app, event)
% Disable Quarter car button while dialog is open
set(app.QuarterCarButton, 'enable', 'off')

% Call dialog box with input values

quarter_car_app_v1(app);
end
```

Figura 16. Ejemplo código de activación de App

5.3.3 QUARTER-CAR

Esta ventana es la que se encarga de recoger las entradas al modelo Quarter-car que desea el usuario y enviarlas al Simulink para ejecutarlo en modo batch. Posteriormente se encarga de recuperar del Simulink las variables de interés para el usuario y mostrarlas de una manera conveniente para entender la respuesta del modelo.

5.3.3.1 Simulink

Como se ha expresado anteriormente se crea un modelo de Simulink a partir de las ecuaciones del modelo matemático. Este se puede observar en la Figura 17. Este modelo lo

podríamos dividir en 3 bloques, las ecuaciones, la excitación del sistema y el envío de señales. Cada apartado se explica por separado.

El “modelo” consiste en reproducir las ecuaciones que se han calculado, para lo cual se generan las variables de posición, velocidad y aceleración mediante integradores y posteriormente se construyen mediante sumadores y ganancias las ecuaciones.

A continuación, se aborda la “excitación del suelo”, por la que el modelo debe ser excitado mediante señales. En el caso de un Quarter-Car es interesante ver la respuesta del vehículo a distintas entradas de suelo, por lo que se ha generado un selector de señales de entrada. Esto se puede conseguir ya que a cada señal deseada se le asigna una ganancia y la entrada de suelo es la suma de todas estas señales. Colocando las ganancias a 0 se puede conseguir insertar solo una de ellas. Se explica en el apartado siguiente como se seleccionan los parámetros de dichas señales. Estas señales son:

- Square bumps: Señal cuadrada en la que se puede seleccionar la amplitud, periodo, porcentaje de pulso de dicho periodo y retraso de la señal.
- Test Sequence: Este ensayo concatena una señal senoidal y una señal de cuadrada. De esta señal se pueden escoger las amplitudes de ambas señales.
- Plain: Esta entrada es un suelo plano, es útil para poder medir la caída estática cuando se aplica la gravedad.
- Sine: Señal senoidal de la que se puede seleccionar amplitud, frecuencia y fase de la señal.

Finalmente, para el “envío de resultados”, se generan los elementos necesarios para las salidas del sistema. En esta sección se encuentran los “scopes”, que sirven para analizar los resultados desde el propio Simulink sin necesidad de operarlo desde la App, y en el caso que este quiera ser ampliado poder comprobar los resultados sin necesidad de tener correctamente actualizada la APP. También se encuentra el envío de resultados y postprocesado de las señales al “workspace” de la sesión, el “workspace” nos permite posteriormente usarse en la App para representar de manera correcta los resultados para el usuario.

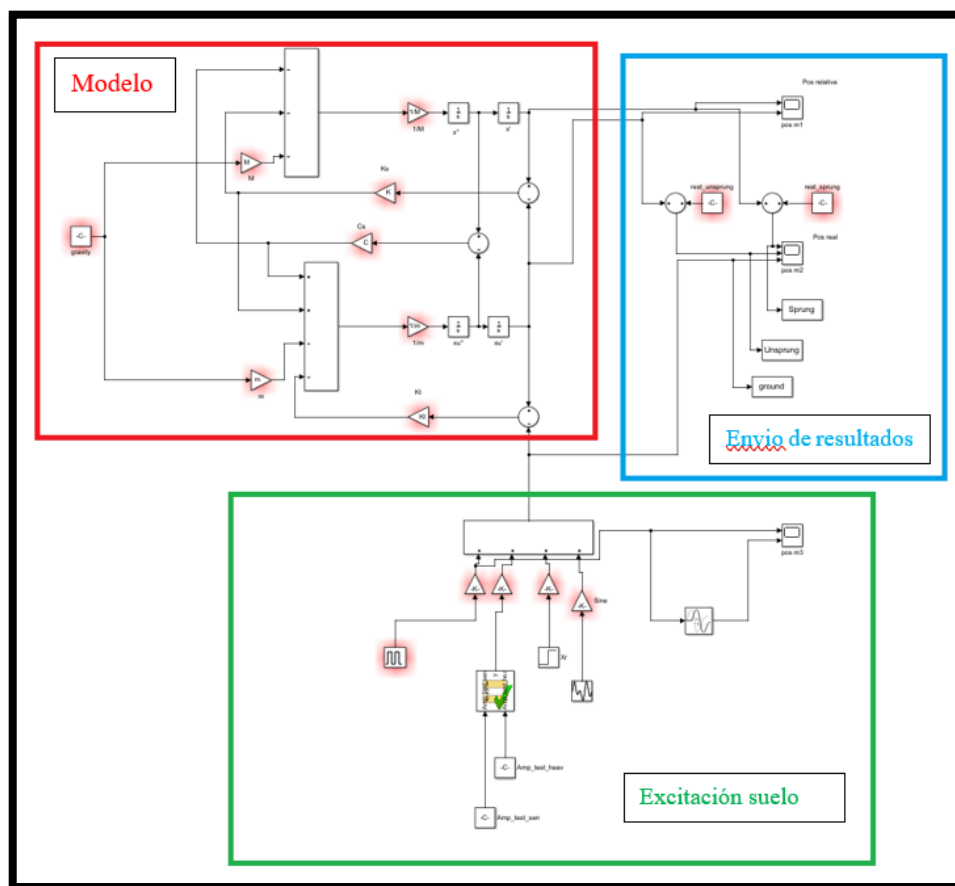


Figura 17. Simulink Quarter-Car

5.3.3.2 Front-end Quarter Car

En esta ventana se deben poder gestionar todas las entradas al sistema dinámico, acceder a las Apps de la cinta de herramientas y visualizar las salidas representadas en la ventana. El Front-end se puede observar en la Figura 18.

La visualización de salidas consiste en una figura de Matlab que muestra el movimiento del suelo y ambas masas. Cada simulación queda escrita en dicha figura de manera que se puede observar el cambio de comportamiento en cada cambio de entradas. Existe el botón “Clear graph” que deja vacía la figura para nuevas simulaciones. También se encuentra

“Normal Figure”, el cual nos permite cargar la figura en una ventana separada pudiendo usar todas las herramientas de figura de Matlab.

La gestión de entradas consiste en escribir los parámetros a definir de las ecuaciones de Quarter-Car que serán enviadas al Simulink para lanzar la simulación.

Los parámetros de las ecuaciones a configurar se encuentran en la Tabla 1.

Parámetros	Modelo
Sprung Mass (kg)	M2
Unsprung Mass (kg)	M1
Spring Stiffness (N/mm)	K1
Spring Damping (Ns/mm)	C1
Tire Stiffness (N/m)	Kt

Tabla 1. Parámetros Simulink Quarter-Car

También se encuentran el parámetro “multiplier”, el botón “simulate” y el botón “animate”.

El botón “simulate” sirve para mandar los parámetros al workspace y correr en batch el Simulink. Posteriormente se representarán los movimientos de las masas y el suelo en la figura de la ventana.

El botón “animate” genera una figura aparte con una animación de las masas en movimiento según la simulación generada. El parámetro “multiplier” permite amplificar el movimiento en la animación si se desea porque sea un movimiento poco perceptible. Se ha extraído una función de representación de Quarter-Car de File Exchange de Mathworks [8], esta ha sido adaptada para las entradas de esta App y hacerlo compatible. Una imagen de esta animación se puede observar en la Figura 19.



Figura 18. Front-end Quarter-Car

A continuación, se explica el ground input. Se ha considerado que las entradas que interesan en dicho sistema son entradas senoidales, cuadradas, combinación de ambas y plano.

Una entrada plana ha sido considerada para poder estudiar con la gravedad activada la caída estática que generan los parámetros especificados.

Dentro de estas entradas se debe poder controlar la frecuencia, amplitud y desfase. Esta gestión se llevará desde la cinta de herramientas, mientras que en la gestión de entradas se seleccionará el tipo de señal con la que se va a excitar el modelo.

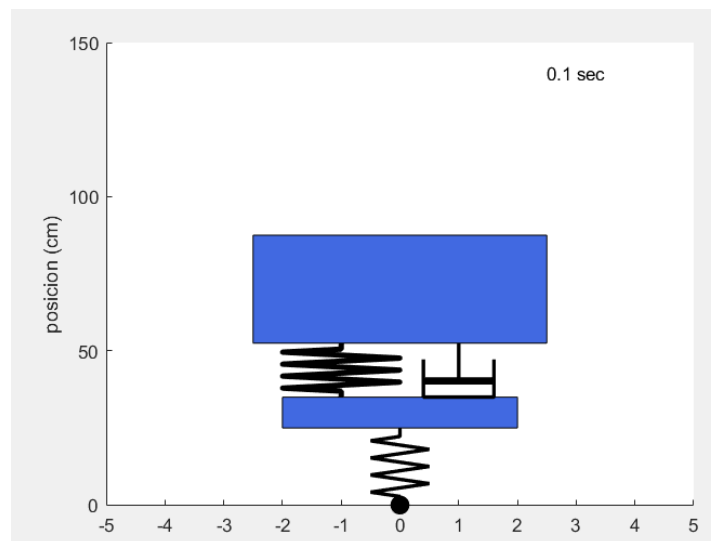


Figura 19. Animación de Quarter-Car [8]

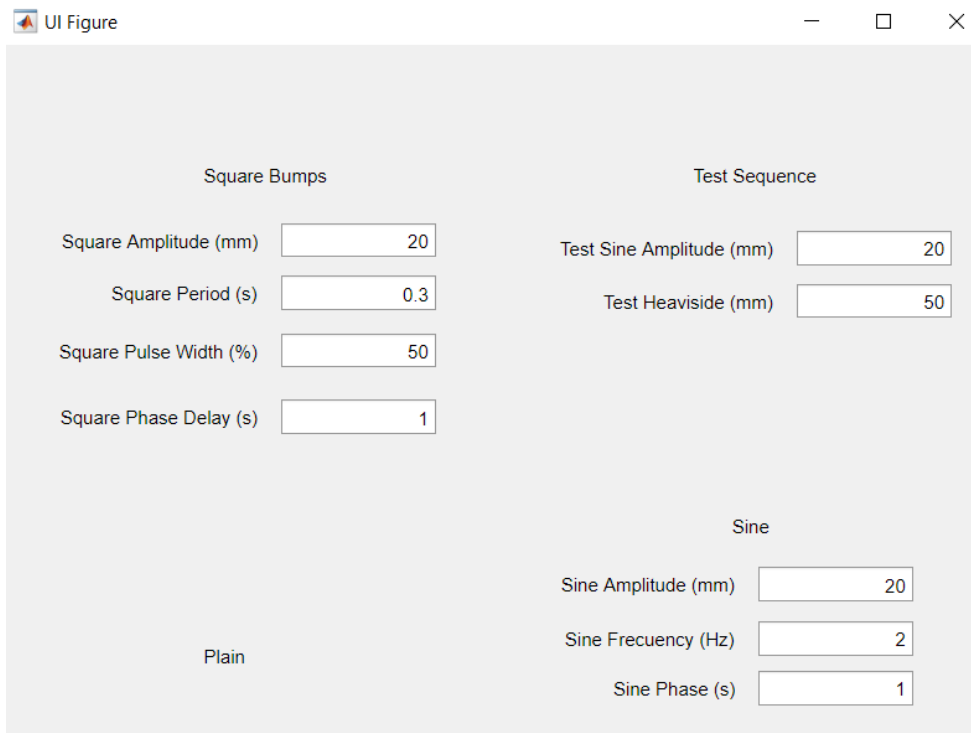
La cinta de herramientas pretende aportar funcionalidades extra a la App activando otras ventanas que complementan las entradas, pero que en una única pantalla no caben. Dentro de esta cinta de herramientas se encuentran las 3 funcionalidades principales:

- Archivo, este permite exportar un Excel o txt a elección del usuario con los resultados relevantes del modelo para poder analizar y comparar los resultados mediante otras vías. Esto da flexibilidad a la App ya que se pueden expandir el postprocesado de salidas a gusto del usuario con respecto a las que ofrece la App. Se pueden observar las variables exportadas en la Figura 20. Estas son el movimiento de entrada y de cada masa la posición, velocidad y aceleración.

t_sec_	ground_meters_	unsprung_meters_	sprung_meters_	unsprung_meters_sec_	sprung_meters_sec_	unsprung_meters_sec2_	sprung_meters_sec2_
0	0,02	0,3	0,7	0	0	309,3333333	309,3333333
0,001	0,02	0,30015123	0,700000516	0,29836804	0,001525185	286,8531253	286,8531253
0,002	0,02	0,300588986	0,700004042	0,572558489	0,005988742	261,087497	261,087497
0,003	0,02	0,301287556	0,700013424	0,819610385	0,013199388	232,6854225	232,6854225
0,004	0,02	0,302218592	0,700031299	1,03721303	0,022931141	202,2966329	202,2966329
0,005	0,02	0,303351759	0,700060063	1,223701229	0,034929389	170,5607177	170,5607177
0,006	0,02	0,304655373	0,700101844	1,378040057	0,048917041	138,0971217	138,0971217
0,007	0,02	0,306097024	0,700158486	1,499800125	0,064600641	105,496145	105,496145
0,008	0,02	0,307644158	0,700231534	1,589124383	0,081676347	73,31102989	73,31102989
0,009	0,02	0,309264637	0,700322226	1,646687576	0,09983569	42,05119354	42,05119354
0,01	0,02	0,310927243	0,70043149	1,673649529	0,118771021	12,17664421	12,17664421
0,011	0,02	0,312602141	0,700559951	1,671603441	0,138180588	-15,90640572	-15,90640572

Figura 20.Excel exportado de App Quarter-Car

- **KC Calculator:** activa la ventana KC Calculator y devuelve a Quarter-Car la recomendación de rigidez y amortiguamiento. Será desarrollada en el apartado 5.3.5.
- **Test Profile Edit:** activa la ventana que permite cambiar los parámetros de las señales de entrada del suelo. Esta ventana se puede observar en la Figura 21.



The screenshot shows a window titled "UI Figure" with three main sections for configuring test profiles:

- Square Bumps:**
 - Square Amplitude (mm): 20
 - Square Period (s): 0.3
 - Square Pulse Width (%): 50
 - Square Phase Delay (s): 1
- Test Sequence:**
 - Test Sine Amplitude (mm): 20
 - Test Heaviside (mm): 50
- Sine:**
 - Sine Amplitude (mm): 20
 - Sine Frequency (Hz): 2
 - Sine Phase (s): 1

There is also a "Plain" option visible in the bottom left area of the configuration panel.

Figura 21. Test Profile Edit App

5.3.4 HALF-CAR

Esta ventana tiene la misma funcionalidad que la ventana Quarter-Car para el modelo matemático Half-Car. Esta ventana también tiene asociada un modelo de Simulink del modelo matemático que será ejecutado en modo batch con las entradas especificadas por el usuario y mostrar las salidas de una manera sencilla para el usuario.

5.3.4.1 Simulink

En este apartado se describe el modelo de Simulink del Half-Car. Se sigue el mismo procedimiento de diseño que en el Simulink del Quarter-Car, aunque en este caso se van a usar más máscaras para englobar elementos comunes a varias ecuaciones con el objeto de intentar simplificar la creación de este. Se van a distinguir los mismos 3 bloques que en Quarter-Car, que son las ecuaciones, la excitación del sistema y el envío de señales que se pueden observar en la Figura 24. En este apartado se incluirá únicamente información adicional de diseño con respecto al Quarter-Car.

En el “modelo” cabe destacar las máscaras a la hora de organizar el Simulink. Un ejemplo de termino repetido en varias ecuaciones es el siguiente: $K_1 * (x_3 - x_2 + a * \theta)$. Se añade una máscara como en la Figura 22.

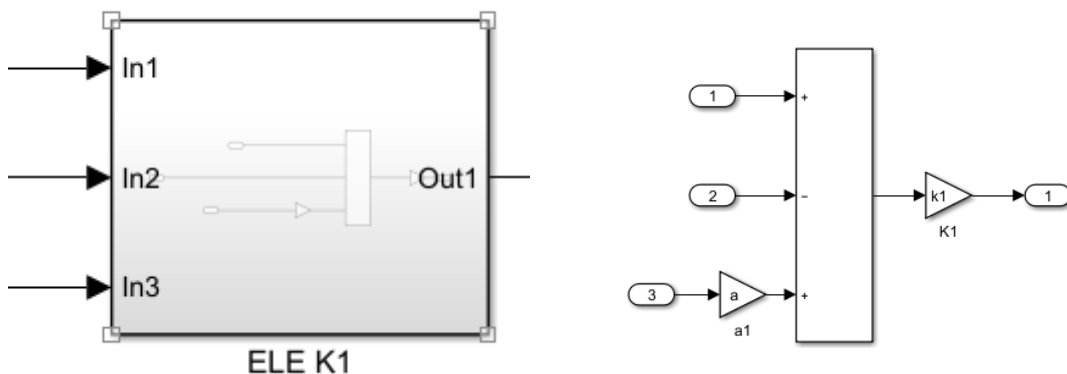


Figura 22. Ejemplo de máscara Simulink

En cuanto a la “excitación del suelo”, se introduce la misma lógica de señal que en el Quarter-Car, admitiendo la misma tipología de señal. La ampliación radica en tener que retrasar la señal de la rueda trasera ya que esta ve la perturbación en el suelo en distinto momento. Esto se pudo realizar mediante un bloque de Simulink llamado “Transport delay”, el cual permite retrasar un cierto tiempo una señal y se puede observar en la Figura 23. Para hacer uso de este bloque se debía calcular previamente que tiempo de retraso sufre la señal, ya que este es dependiente de la velocidad que lleva el vehículo. De ahí que se necesite definir la velocidad que lleva el vehículo. El cálculo elaborado por la App sería el

tiempo que tarda el vehículo a una velocidad determinada en recorrer la batalla de este, [18].

$$Time\ offset = \frac{batalla\ (m)}{velocidad\ (\frac{m}{s})} \quad [18]$$

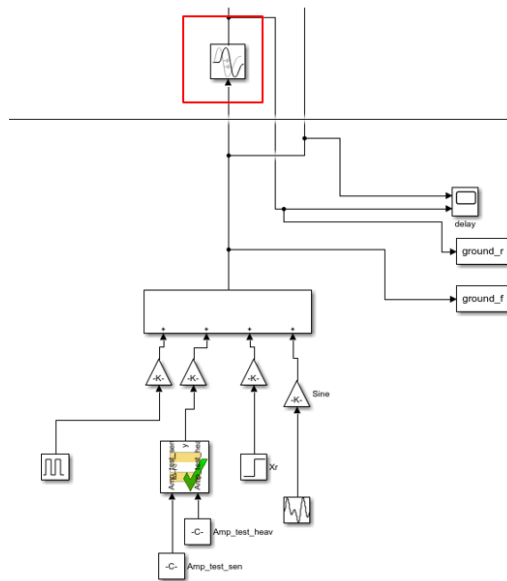


Figura 23. Excitación de suelo Half-Car

Finalmente, el “envío de resultados”. Esta sección es idéntica a la de Quarter-Car salvo en que tiene una mayor cantidad de salidas, ya que debe pasar a la App la posición, velocidad y aceleración tanto de las tres masas como el ángulo, velocidad y aceleración angulares.

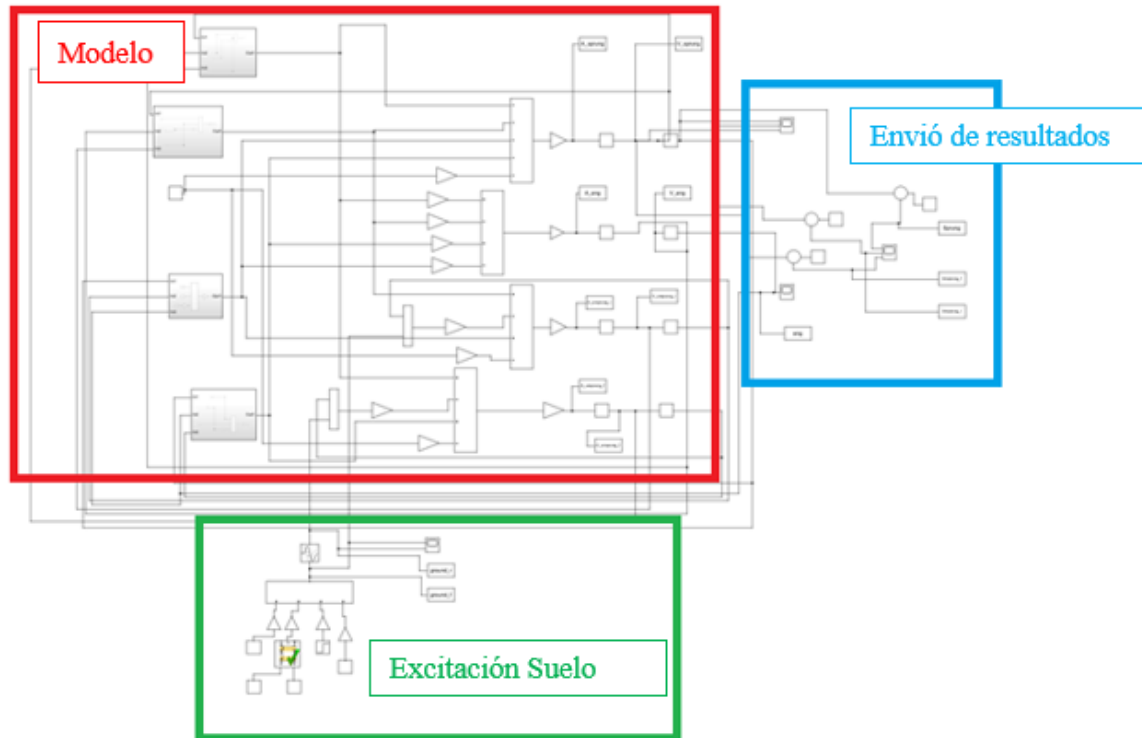


Figura 24. Simulink Half-Car

5.3.4.2 Front-end Half-Car

Esta ventana tiene la misma funcionalidad que la ventana Quarter-Car. Debe gestionar las entradas al modelo de Simulink, acceder a las ventanas de la cinta de herramientas y visualizar las salidas del modelo de Simulink. El Front-end se puede observar en la Figura 25.

La visualización de salidas difiere de Quarter-Car en que tiene dos figuras de Matlab representando por separado los movimientos de las masas y el ángulo de la masa suspendida. También se superponen nuevas simulaciones a las anteriores para poder visualizar el cambio. Existen los botones de “Clear Graphs” para limpiar las figuras de la pantalla y “Normal Figure” para representar en figuras externas los resultados y poder usar toda la funcionalidad de tratamientos de figuras que ofrece Matlab.

La gestión de entradas sigue el concepto de Quarter-Car únicamente con más parámetros para cambiar. Los parámetros del modelo de Half-Car son los de la Tabla 2.

Parametros	Modelo
Sprung mass (kg)	M3
Moment of inertia (kg/m ²)	I _y
Unsprung Front Mass (kg)	M1
Unsprung Rear Mass (kg)	M2
Front Spring Stiffness (N/mm)	K1
Front Damping (Ns/mm)	C1
Rear Spring Stiffness (N/mm)	K2
Rear Damping (Ns/mm)	C2
Tire Stiffness (N/m)	K _t y K _{t2}
distance front to cdg (mm)	b
distance rear to cdg (mm)	a

Tabla 2. Parámetros Simulink Half-Car

En este caso no existe el botón “Animate” ya que no se ha elaborado una animación de dicho modelo. Mediante el botón de “Simulate” se envían los parámetros de la App al Simulink para que este simule en modo batch y regrese los resultados de la simulación a la App.

En cuanto al ground input, es el mismo que en Quarter-Car pero añadiendo el retraso de la señal a la rueda trasera comentado en el apartado 5.3.4.1.

En esta App la cinta de herramientas no sólo incluye archivo para poder exportar los resultados de las simulaciones, KC Calculator y Test Profil Edit, sino que también se incluye la ventana IC Calculator que va a permitir asesorar el reparto de rigidez entre eje delantero y trasero. Esta ventana permite saber en qué frecuencias se excita cada modo de vibración, y será desarrollada en el apartado 5.3.6.

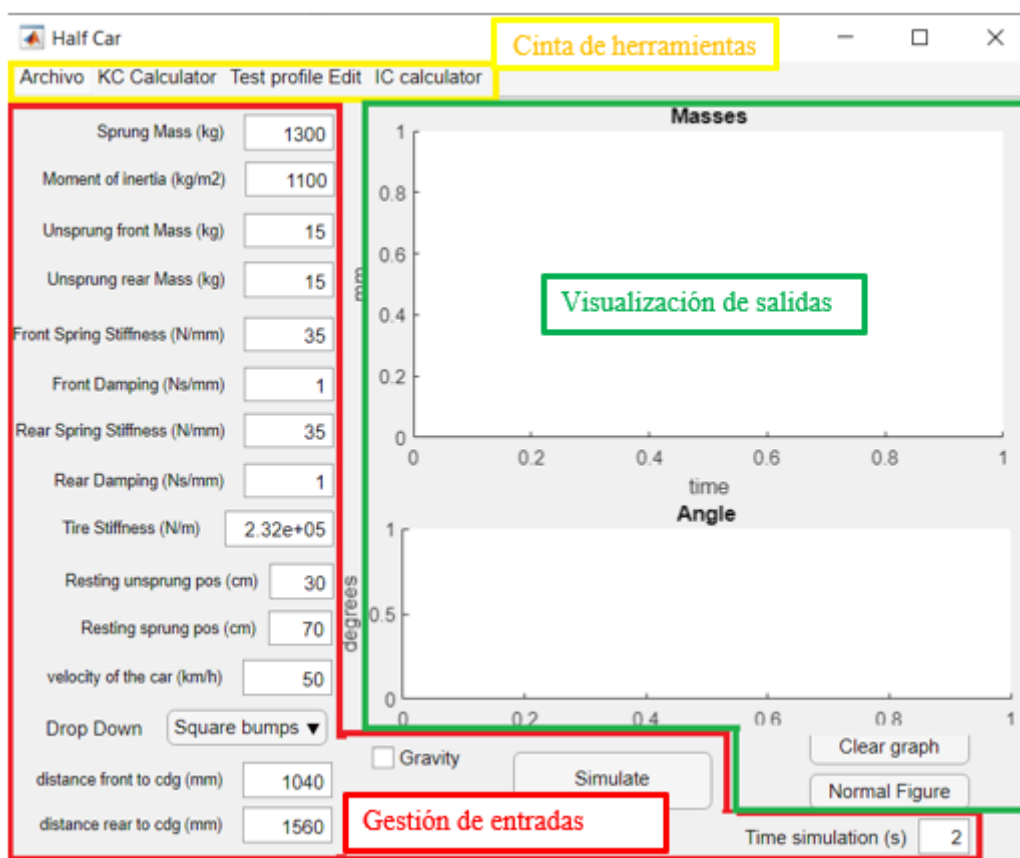


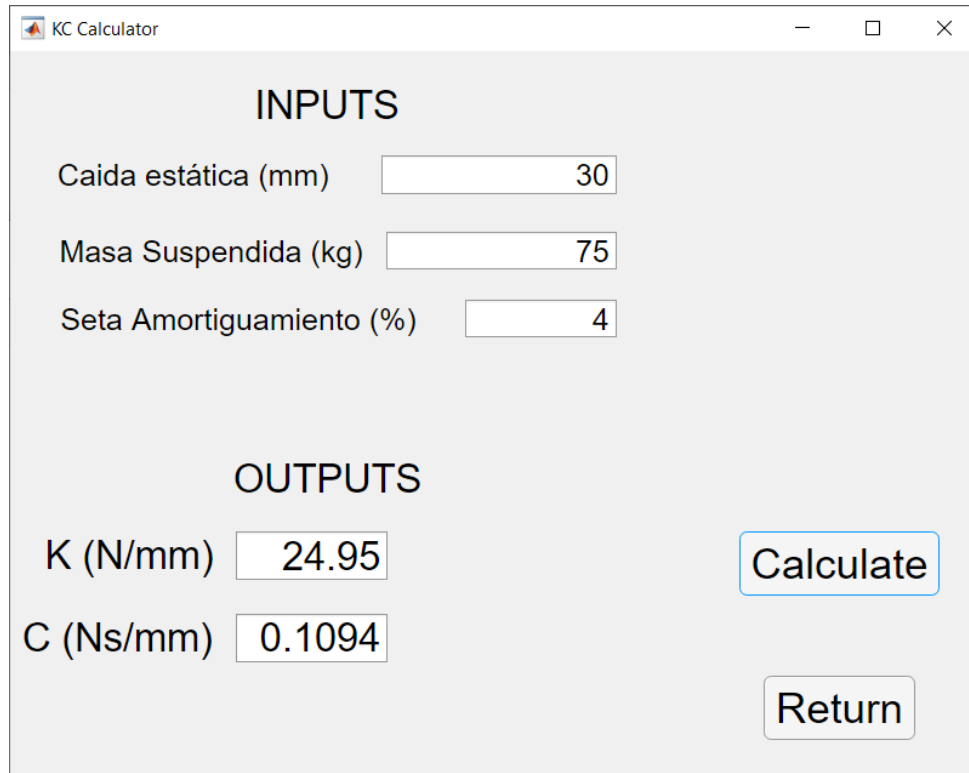
Figura 25. Front-end Half-Car

5.3.5 KC CALCULATOR

Esta ventana pretende reflejar la aproximación de Rigidez y amortiguamiento de la suspensión con las ecuaciones del apartado 5.2.1. El funcionamiento de esta ventana es sencillo ya que tiene 3 entradas: caída estática, masa suspendida y seta de amortiguamiento. Las salidas son la rigidez y el amortiguamiento propuestos. Se puede observar el Front-end de la App en la Figura 26.

Esta ventana está pensada para incluirse en la cinta de herramientas de Quarter-Car y Half-Car, por lo que tiene que poder ser llamada mediante éstas y las salidas generarlas como variables públicas para que puedan leerlas Quarter-Car y Half-Car. El botón “Calculate”

sirve para leer las entradas establecidas por el usuario y calcular las salidas. El botón “Return” envía las salidas a la App de la que es llamada.



INPUTS	
Caida estática (mm)	30
Masa Suspendida (kg)	75
Seta Amortiguamiento (%)	4

OUTPUTS	
K (N/mm)	24.95
C (Ns/mm)	0.1094

Buttons: Calculate, Return

Figura 26. Front-end KC Calculator

5.3.6 IC CALCULATOR

En esta ventana se va a implementar el cálculo del apartado 5.2.4 para asistir en el diseño del vehículo y determinar sus rigideces. El funcionamiento de la ventana consiste en introducir todos los parámetros de entrada para resolver las ecuaciones de IC y mediante el botón “Calculate” resolver dichas ecuaciones y mostrar el resultado. Esto permite al usuario tomar decisiones sobre las rigideces de cada eje. El Front-end de esta ventana se encuentra en la Figura 27.

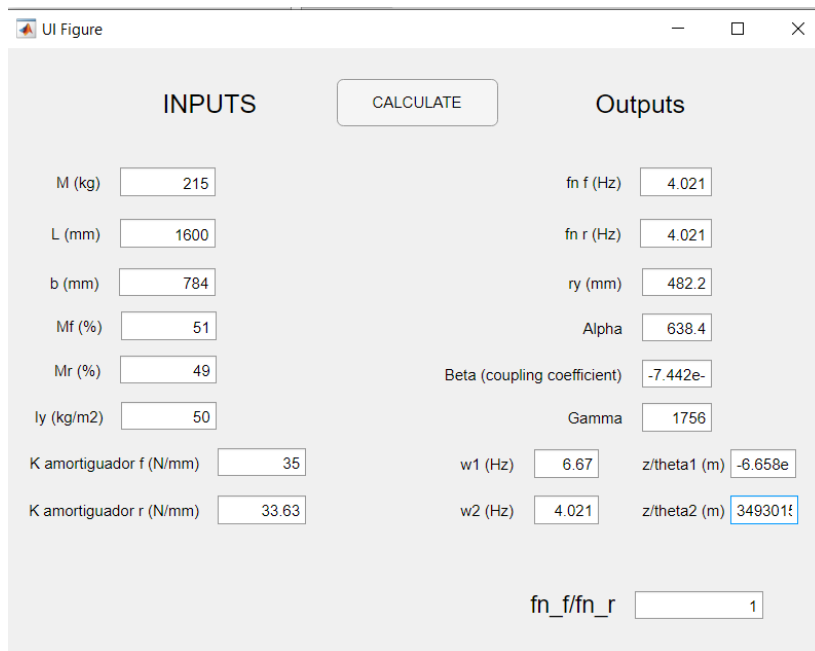


Figura 27. Front-end IC Calculator

Esta ventana se ha decidido que sea independiente de la App Half-Car y se deben introducir todos los parámetros, al no estar conectada por variables se puede probar cualquier valor de entrada para observar su efecto y proponer cambios.

5.4 VERIFICACIÓN DE APP DINÁMICA

En este apartado se pretende verificar los modelos matemáticos calculados e implementados y garantizar que no se han cometido errores que modifiquen los resultados. Se pretende hacer uso de herramientas distintas a las utilizadas para verificar los fallos, así como comportamientos sencillos de los cuales se conozca la respuesta del sistema y está pueda ser comprobada.

5.4.1 QUARTER-CAR

En el caso de Quarter-Car se pretende inicialmente comprobar que ciertas entradas al sistema de las que se conoce previamente la respuesta se cumplan antes de buscar una herramienta paralela en la que implementar el modelo.

Posteriormente se decidió hacer un modelo en una herramienta paralela para observar el mismo comportamiento.

Los ensayos que se van a comprobar son los siguientes:

- Caso 1: Ante una entrada de suelo plano y la gravedad activa el sistema se comprimirá la caída estática. En este caso la ecuación que determina la compresión de los muelles es la siguiente:

$$u = \frac{m * g}{K} \quad [19]$$

- Caso 2: Ante un escalón continuado en el tiempo sin gravedad se espera a que el sistema se estabilice las masas deben alcanzar un desplazamiento igual al escalón introducido.
- Caso 3: Excitación a frecuencia natural de ambas masas.
- Caso 4: La herramienta seleccionada es Ansys y se generará un modelo de Quarter-Car que se excitará mediante una senoidal y observar que las masas tienen el mismo desplazamiento tanto en Ansys como en la App.

5.4.1.1 Caso 1: Caída estática

En este caso las entradas al modelo seleccionadas fueron las representadas en la Tabla 3. Los parámetros relevantes para este caso son las masas, las rigideces y fijar las masas en la

posición inicial 0 m. Esto permite observar el desplazamiento generado en ambas masas debido al efecto de la gravedad.

SP: Sprung Mass (kg)	100
UM: Unsprung Mass (kg)	15
Spring Stiffness (N/mm)	35
Damping (Ns/mm)	1
Tire Stiffness (N/m)	2,32E+05
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting sprung pos (cm)	0
Gravity	ON
Input Ground	Plain
Time of simulation (s)	15

Tabla 3. Entradas caída estática Quarter-Car

Conocidos los parámetros de la simulación se realizan los cálculos del desplazamiento de ambas masas:

$$disp_{UM} = -\frac{(m_{UM} + m_{SP}) * g}{Tire\ Stiffness} = -\frac{(100 + 15) * 10}{232000} = -0.004957\ m \quad [20]$$

$$\begin{aligned} disp_{SP} &= -\frac{(m_{UM} + m_{SP}) * g}{Tire\ Stiffness} - \frac{m_{SP} * g}{Spring\ Stiffness} = \\ &= -\frac{(100 + 15) * 10}{232000} - \frac{100 * 10}{35000} = -0.03353\ m \end{aligned} \quad [21]$$

Se puede observar en la Figura 28 que los resultados teóricos coinciden con los resultados de la App Quarter-Car.

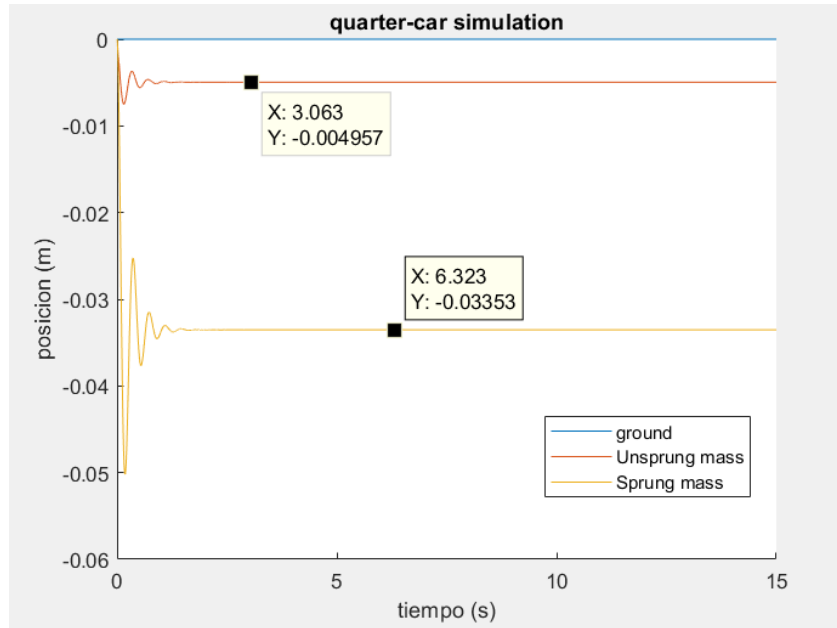


Figura 28. Resultados Quarter-Car caída estática

5.4.1.2 Caso 2: Escalón

En este caso las entradas al modelo seleccionados fueron las representadas en la Tabla 4. Los parámetros relevantes para este caso son las características del escalón y fijar las masas en la posición inicial 0 m. Esto permite observar el desplazamiento generado en ambas masas por el efecto del escalón.

Sprung Mass (kg)	100
Unsprung Mass (kg)	15
Spring Stiffness (N/mm)	35
Damping (Ns/mm)	1
Tire Stiffness (N/m)	2,32E+05
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting sprung pos (cm)	0
Gravity	OFF
Input Ground	Square bumps
Time of simulation (s)	5
Square Amplitude (mm)	200
Square Period (s)	15
Square Pulse Width (%)	99
Square Phase Delay (s)	0,1

Tabla 4. Entradas Escalón Quarter-Car

Debido a que la amplitud del escalón son 0,2 m se debería observar que el desplazamiento de ambas masas se estabiliza en 0,2 m. Esto se puede observar en la Figura 28, por lo que queda validado el modelo de manera teórica.

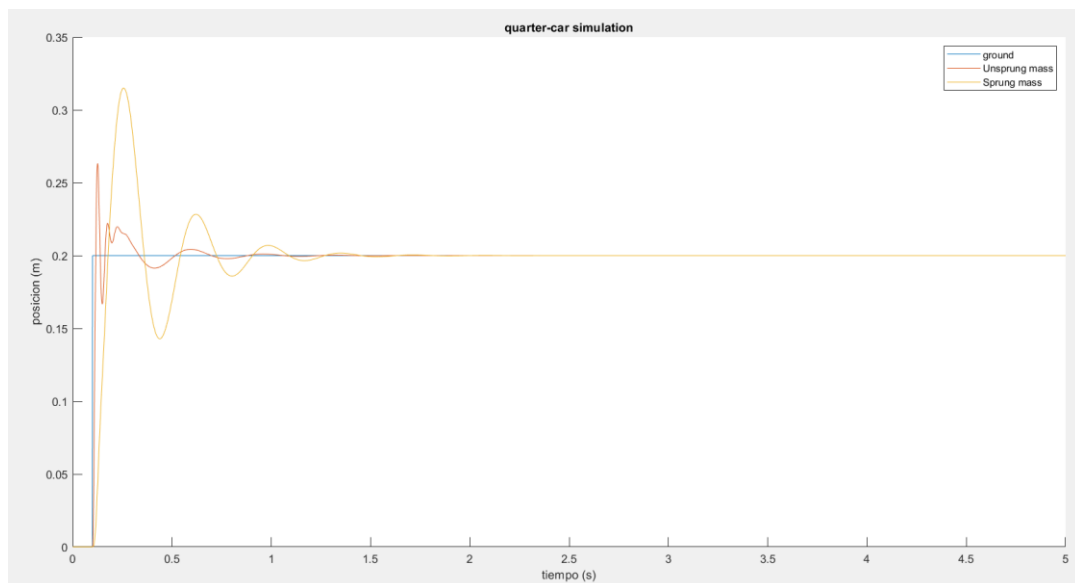


Figura 29. Resultados Quarter-car Escalón

5.4.1.3 Caso 3: Excitación a frecuencia natural

En este caso se van a calcular matemáticamente las frecuencias naturales de ambas masas y se va a comprobar si las masas entran en resonancia según las especificaciones. Para este modelo se van a utilizar las siguientes entradas, Tabla 5.

Sprung Mass (kg)	100
Unsprung Mass (kg)	15
Spring Stiffness (N/mm)	35
Damping (Ns/mm)	0
Tire Stiffness (N/m)	2,32E+05
Resting unsprung pos (cm)	30
Resting sprung pos (cm)	70
Gravity	OFF
Input Ground	Sine
Time of simulation (s)	3

Tabla 5. Entradas Frecuencia natural

En el caso de la masa no suspendida la frecuencia natural es directa:

$$fn_{UM} = \frac{\sqrt{\frac{K_{rueda}}{M_{UM}}}}{2 * \pi} = 19.793 \text{ Hz} \quad [22]$$

Mientras que la frecuencia natural de la masa suspendida debe tener en cuenta que la rigidez es el paralelo de la rigidez de los amortiguadores y la rigidez de la rueda:

$$fn_{SM} = \frac{\sqrt{\frac{K_{rueda} * K_{amor}}{K_{rueda} + K_{amor}}}}{2 * \pi} = 2.775 \text{ Hz} \quad [23]$$

Se consideró una entrada senoidal de amplitud 20 mm y las frecuencias correspondientes para ver si resonaban las masas en dichas frecuencias. Esto se puede observar en la Figura 30 y Figura 31. Se puede observar un fenómeno de “beat” en la Figura 31, esto significa que la frecuencia aplicada es cercana a la frecuencia natural pero no es la natural. Se hace un modal en Ansys para verificar si es problema de la App o de la aproximación teórica.

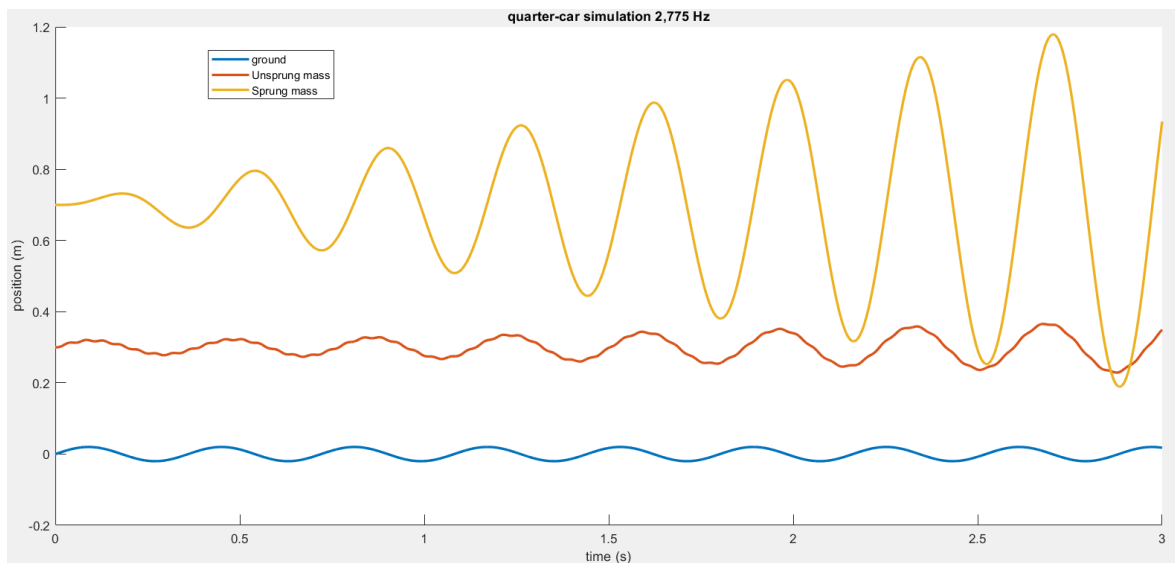


Figura 30. Simulación a frecuencia natural de masa suspendida

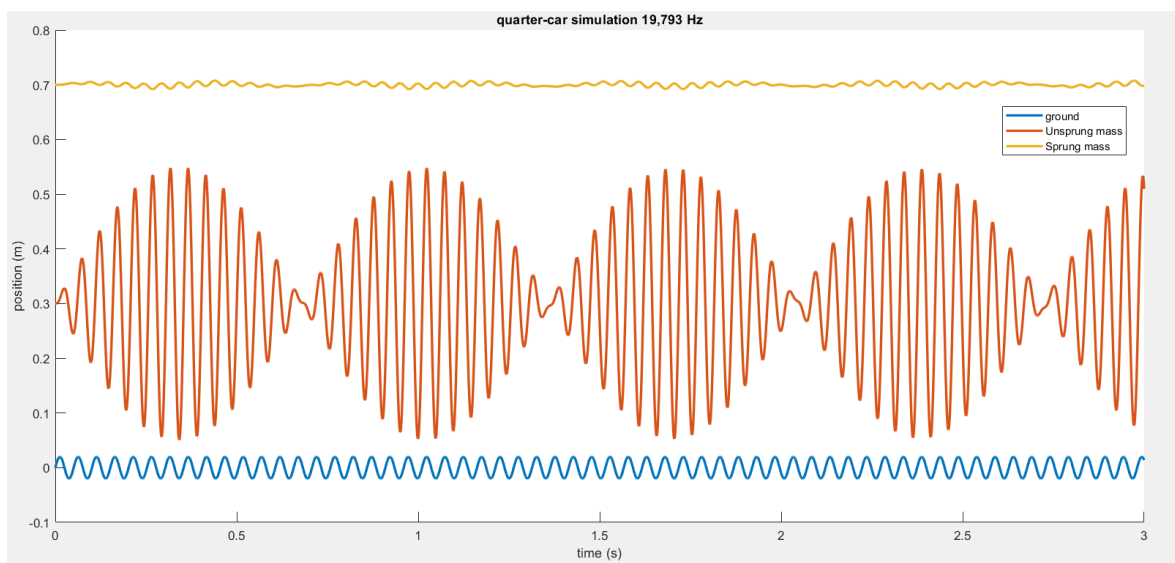


Figura 31. Simulación a frecuencia natural teórica de la masa no suspendida

Posteriormente se quiso comprobar que dichas frecuencias estaban bien calculadas por lo que se desarrolló en Ansys el modelo que se explica en el apartado siguiente y se realizó un modal de este obteniendo las frecuencias naturales de la Figura 32. El primer modo corresponde a la frecuencia de la masa suspendida mientras que el segundo modo corresponde a la masa no suspendida. Ansys da una frecuencia natural de la masa no suspendida de 21.262 Hz, un resultado distinto a la frecuencia natural teórica. Por lo que se asume que el error se encuentra en la aproximación teórica y no en la App. Se puede observar en la App que cuando se excita a 21.262 Hz la masa no suspendida entra en resonancia.

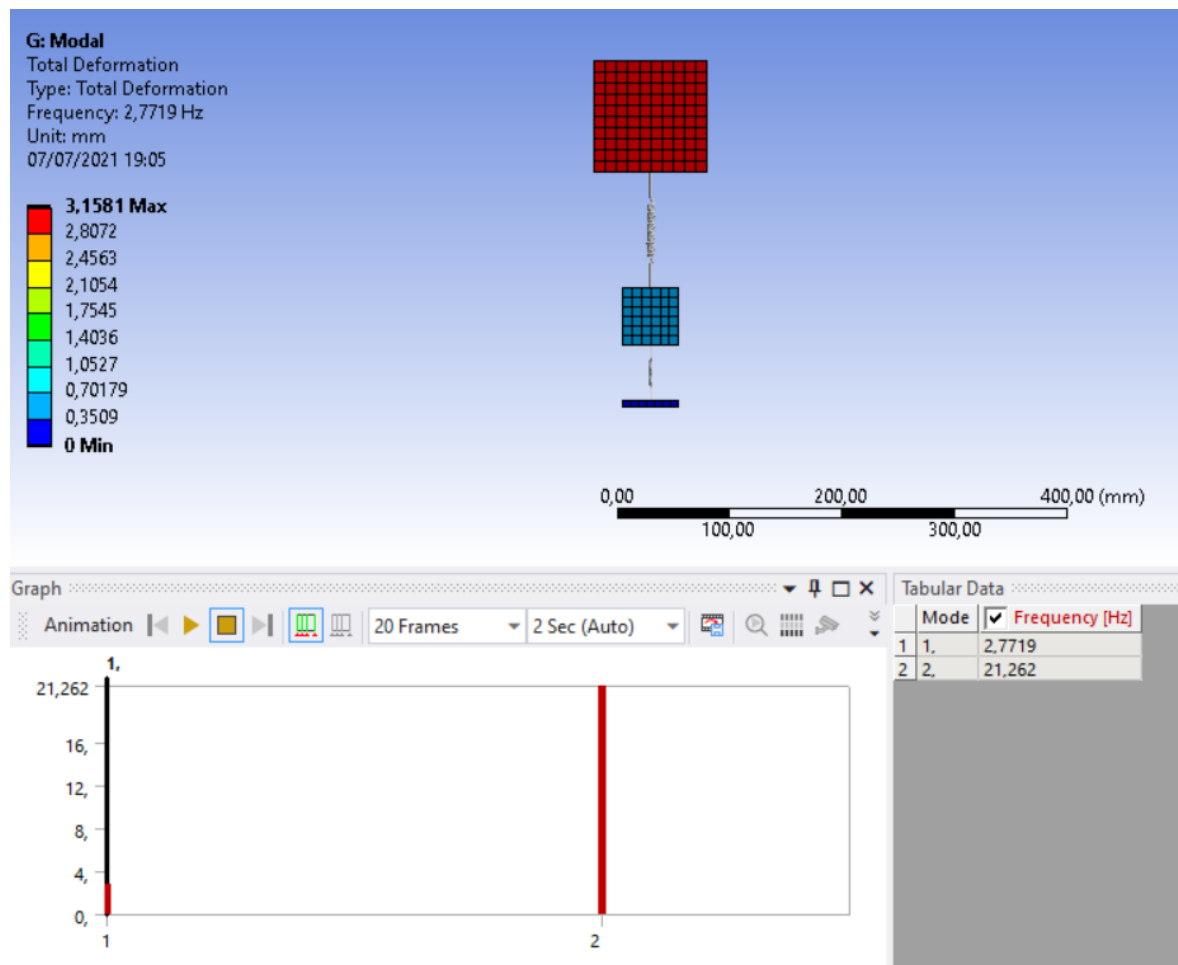


Figura 32. Modal de Quarter-Car

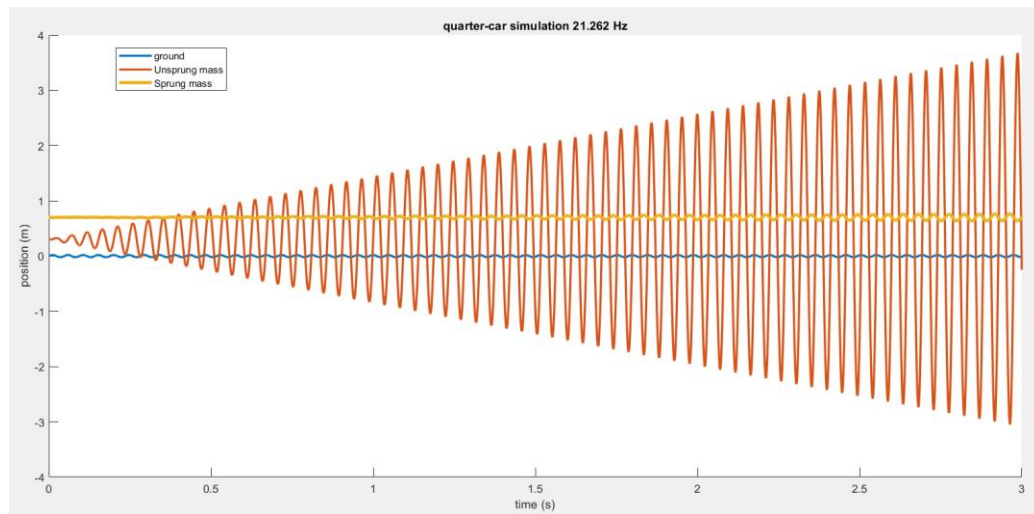


Figura 33. Simulación a frecuencia natural Ansys de la masa no suspendida

5.4.1.4 Caso 4: Senoidal Ansys

En este caso se generó el modelo en Ansys por lo que se documentará en este apartado el desarrollo del modelo de Ansys para contrastarlo con el modelo de la APP. Las entradas de este caso se pueden observar en la Tabla 6.

Sprung Mass (kg)	100
Unsprung Mass (kg)	15
Spring Stiffness (N/mm)	35
Damping (Ns/mm)	0
Tire Stiffness (N/m)	2,32E+05
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting sprung pos (cm)	0
Gravity	OFF
Input Ground	Sine
Time of simulation (s)	1
Sine Amplitude (mm)	5
Sine Frequency (Hz)	3
Sine Phase (s)	0

Tabla 6. Entradas Senoidal

Los pasos a seguir para el desarrollo del modelo en Ansys son los siguientes:

1. Creación de las masas: Para la creación de la geometría se ha optado por usar el módulo de geometría de Ansys “Spaceclaim”. En esta geometría se han extruido dos bloques que representarán la masa suspendida (SM), no suspendida (UM) y un bloque que representa el suelo del sistema. El bloque de UM es de 50x50x50 mm y el bloque de SM es de 100x100x50 mm. Se ha querido ajustar dichas masas a las condiciones de UM=15 kg y SM=100 kg.

Esto se ha ajustado creando materiales en “Engineering data” con la densidad necesaria según los volúmenes del cubo:

$$\rho_{UM} = \frac{m_{UM}}{V_{UM}} = \frac{15}{0,05^3} = 1.2 * 10^5 \text{ kg/m}^3 \quad [24]$$

$$\rho_{SM} = \frac{m_{SM}}{V_{SM}} = \frac{100}{0,1 * 0,1 * 0,05} = 2 * 10^5 \text{ kg/m}^3 \quad [25]$$

2. Condiciones de contorno: Una vez preparadas las masas se genera el modelo con los muelles y amortiguadores y se excita con una señal senoidal. Para ello se ha escogido una simulación de “Transient Structural”. Los muelles y amortiguadores se representan mediante la “Connection spring”, que permite especificar rigidez y amortiguamiento. Se han colocado condiciones “Displacement” para crear un problema 2D y excitar la plataforma suelo. Finalmente, se han seleccionado los desplazamientos de las masas como postprocesado, quedando el árbol de la Figura 34.

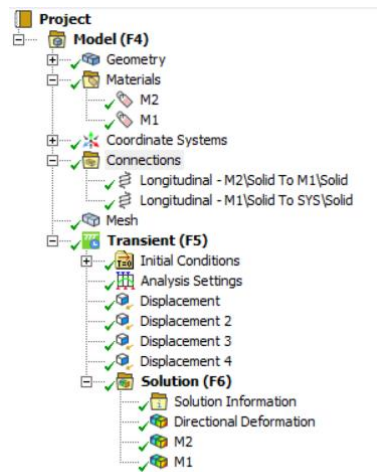


Figura 34.Árbol Ansys simulación Quarter-Car

3. **Resultados:** Una vez generada la simulación se visualizan los resultados, Figura 35, y se exportan las variables de desplazamiento para poder verificar el modelo de la APP.

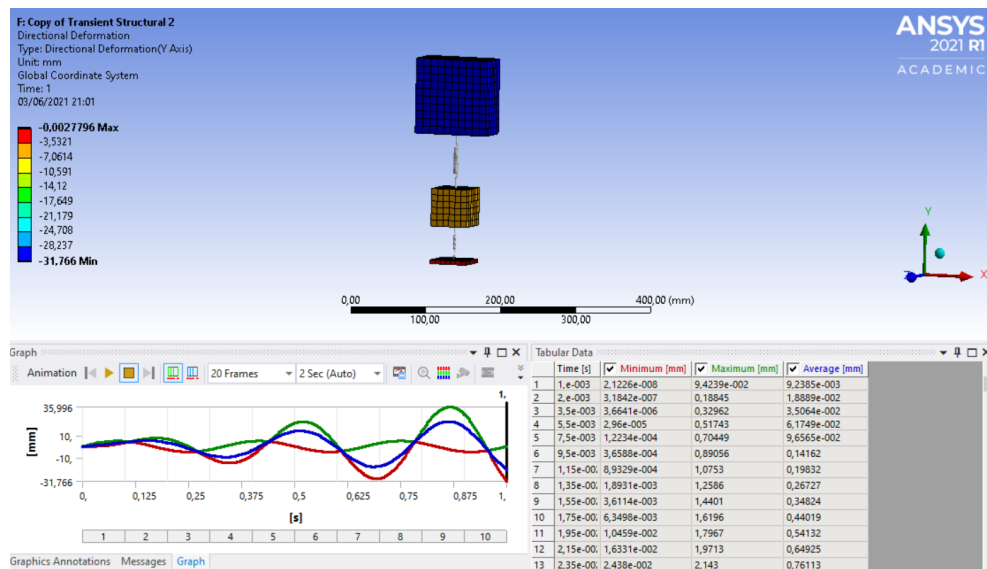


Figura 35. Resultados simulación Ansys Quarter-Car

Se introducen las entradas en la APP y se exportan en Excel las variables del modelo. Posteriormente se exportaron al Excel los resultados de Ansys y se verificaron los resultados que se encuentran en la Figura 36. Con este último caso queda verificada y operativa la App.

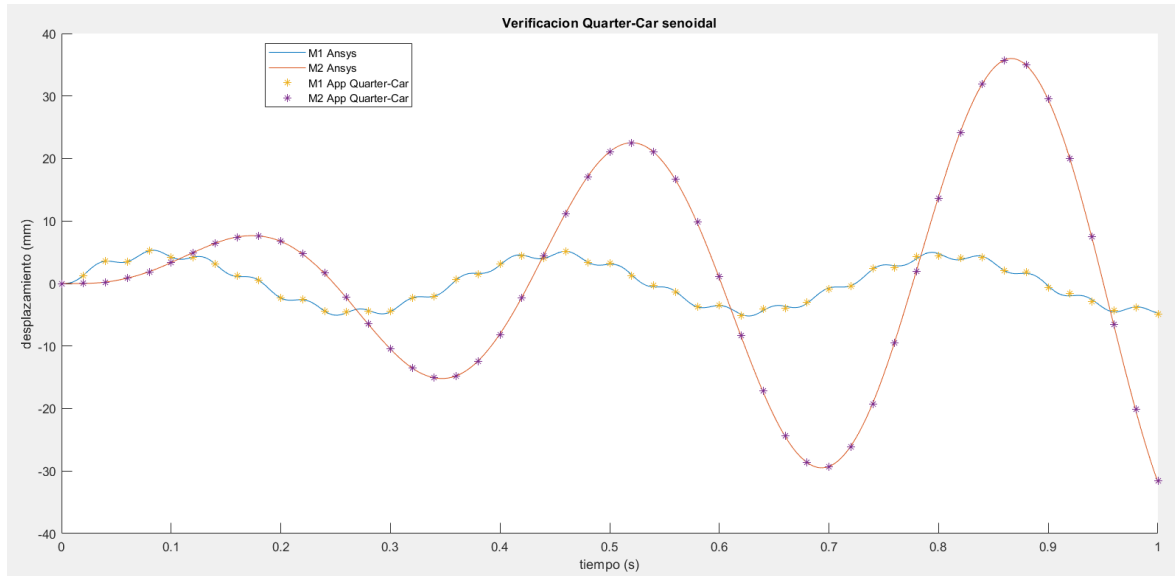


Figura 36. Resultados Quarter-Car Senoidal

5.4.2 HALF-CAR

En este apartado se redacta la verificación de la App Half-Car. De la misma manera que en el Quarter-Car se empezará mediante ensayos con entradas controladas de las que se conozca la respuesta del sistema para posteriormente evolucionar a un modelo en otra herramienta.

Los ensayos que se van a comprobar son los siguientes:

- Caso 1: Ante una entrada de suelo plano y gravedad activa, el sistema se comprimirá hasta la caída estática.

- Caso 2: Ante un escalón continuado en el tiempo sin gravedad el sistema debe estabilizarse con las masas desplazadas deben alcanzar la misma distancia que el escalón de entrada.
- Caso 3: Excitación a frecuencia natural de las masas y el pitch
- Caso 4: La herramienta seleccionada es Ansys y se generará un modelo de Half-Car que se excitará mediante una senoidal y observar que las masas tienen el mismo desplazamiento tanto en Ansys como en la App.

5.4.2.1 Caso 1: Caída estática

Dentro de este caso se distinguen dos simulaciones. La primera se basa en verificar con el mismo caso que Quarter-Car. Para ello se ajustarán los parámetros de entrada para que tengan la misma masa y rigidez y esté a la misma distancia el cdg del eje delantero y trasero. Estos parámetros se pueden observar en la Tabla 7 . Se comprobó que este modelo arrojará los mismos resultados en posición de masas y se alcanzará un ángulo 0 como se observa en la Figura 37 y Figura 38.

Sprung mass (kg)	100
Moment of inertia (kg/m ²)	1100
Unsprung Front Mass (kg)	7,5
Unsprung Rear Mass (kg)	7,5
Front Spring Stiffness (N/mm)	17,5
Front Damping (Ns/mm)	10
Rear Spring Stiffness (N/mm)	17,5
Rear Damping (Ns/mm)	10
Tire Stiffness (N/m)	116000
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting usprung pos (cm)	0
Velocity of the car (km/h)	50
Ground input	Plain
distance front to cdg (mm)	1000
distance rear to cdg (mm)	1000
Gravity	ON
Time simulation (s)	10

Tabla 7. Entradas caída estática Half-Car

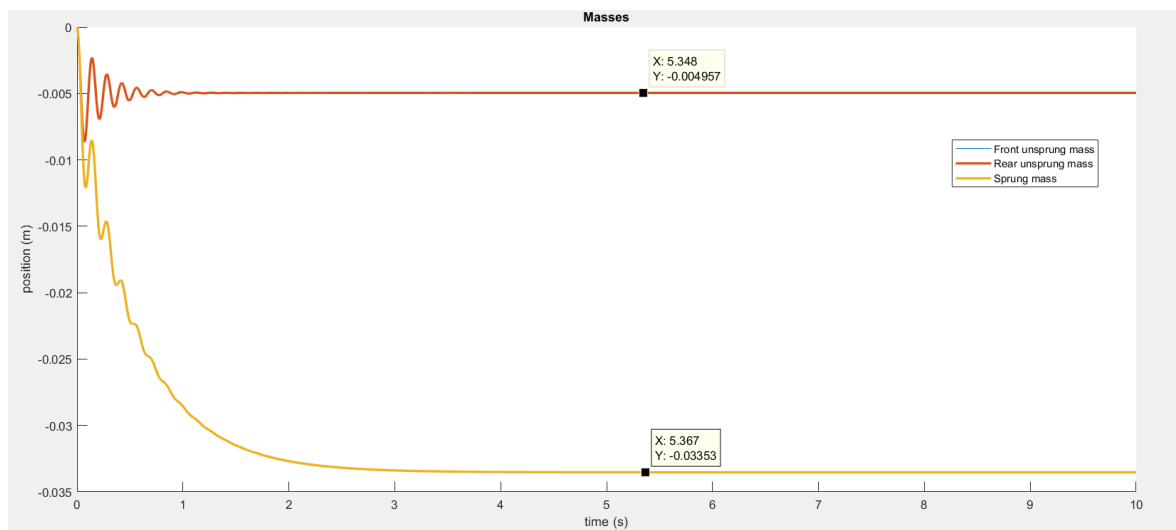


Figura 37. Resultados posición Half-Car caída estática centrada

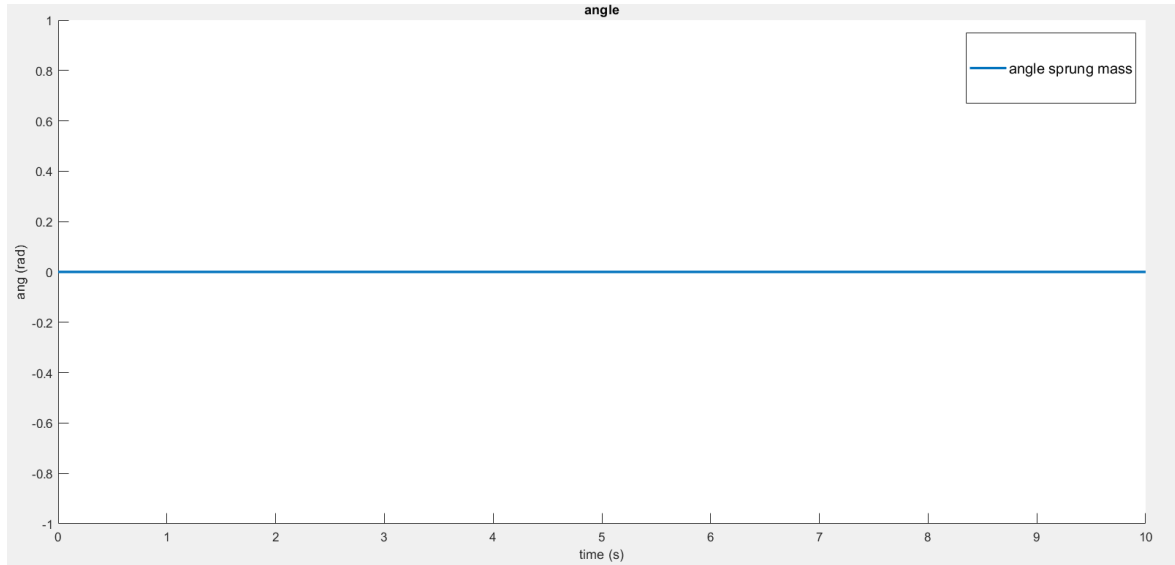


Figura 38. Resultados ángulo Half-Car caída estática centrada

Una vez comprobada dicha simulación se estudia el efecto que tiene desplazar el cdg de la masa suspendida y comprobar que el ángulo funciona correctamente. Por ello, se cambió “distance front to cdg” a 500 mm y “distance rear to cdg” a 1000 mm. Los resultados esperados para las masas no suspendidas se calculan aproximando que parte del peso de la masa suspendida se lleva cada una y se aproxima a un Quarter-Car. Con esto podemos encontrar un resultado muy parecido al real. El eje delantero se lleva 66,66 kg mientras que el trasero se lleva 33,33kg.

$$\begin{aligned} disp_{UM-f} &= -\frac{\left(m_{UM-f} + \frac{2}{3} * m_{SM}\right) * g}{Tire\ Stiffness\ front} = -\frac{(66.66 + 7.5) * 10}{116000} \\ &= -0.006393\ m \end{aligned} \quad [26]$$

$$\begin{aligned} disp_{UM-r} &= -\frac{\left(m_{UM-r} + \frac{1}{3} * m_{SM}\right) * g}{Tire\ Stiffness\ rear} = -\frac{(33.33 + 7.5) * 10}{116000} \\ &= -0.0035198\ m \end{aligned} \quad [27]$$

En el caso de la masa suspendida y el ángulo el cálculo no es tan directo debido al acoplamiento de ambas ecuaciones. Por ello, es necesario resolver el sistema de ecuaciones, teniendo en cuenta que no hay términos de velocidad ni aceleración, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones que comprueba la implementación del sistema completo.

$$0 = -k_{t1} * (x_1) + k_1 * (x_3 - x_1 - a * \theta) - m_1 * g \quad [28]$$

$$0 = -k_{t2} * (x_2) + k_2 * (x_3 - x_2 + b * \theta) - m_2 * g \quad [29]$$

$$0 = -K_2 * (x_3 - x_2 + b * \theta) - K_1 * (x_3 - x_1 - a * \theta) - m_3 * g \quad [30]$$

$$0 = b * K_2 * (x_3 - x_2 - b * \theta) - a * K_1 * (x_3 - x_1 + a * \theta) \quad [31]$$

Los resultados de este sistema de ecuaciones son los mismos que los expresados en la Figura 39 y Figura 40. $x_1 = -0.006394 \text{ m}$, $x_2 = -0.00352 \text{ m}$, $x_3 = -0.0371 \text{ m}$, $\theta = -0.014614 \text{ rad}$. Estos resultados coinciden con los resultados de la APP.

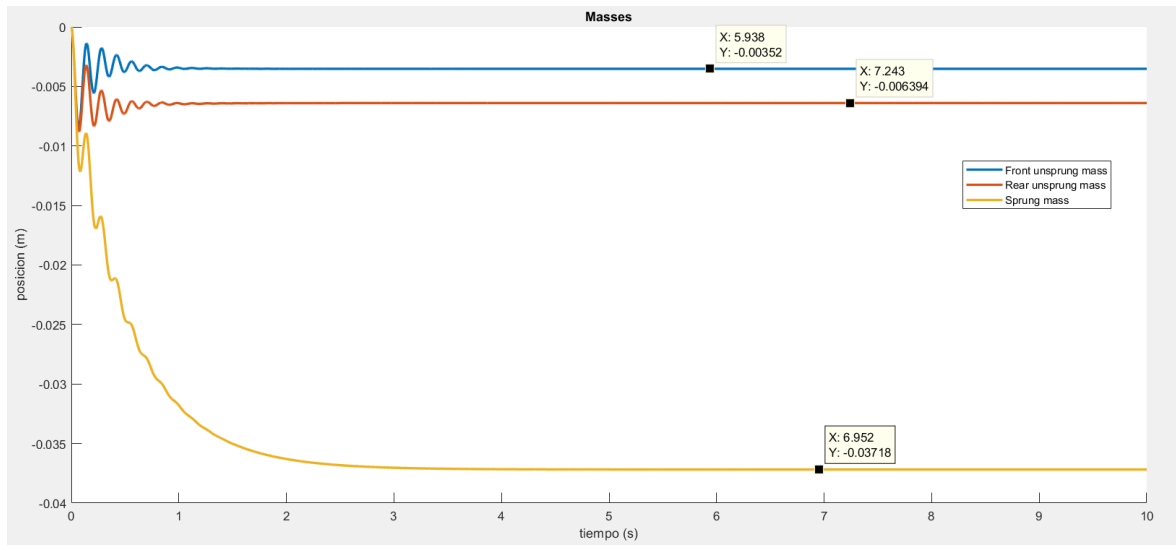


Figura 39. Resultados posición Half-Car caída estática descentrada

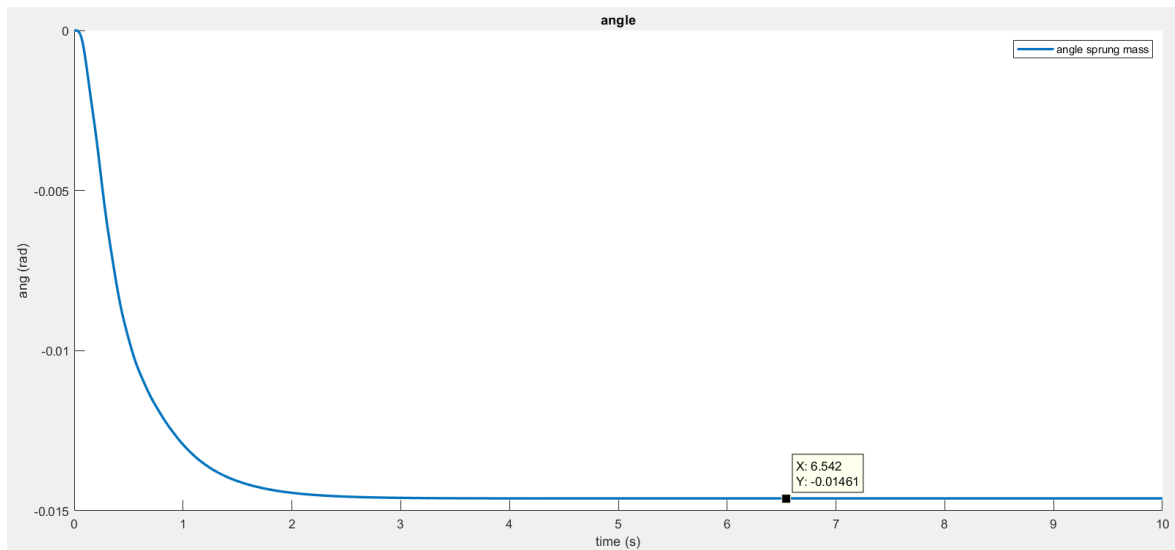


Figura 40. Resultados ángulo Half-Car caída estática descentrada

5.4.2.2 Caso 2: Escalón

Este caso es similar al Caso 2 del Quarter-Car. Se introduce un escalón continuado en el tiempo sin gravedad y se verifica que todas las masas llegan a la altura del escalón y el ángulo es 0. En la Tabla 8 se pueden observar las entradas de esta simulación y en la Figura 41 y Figura 42 se verifica el funcionamiento del sistema.

Sprung mass (kg)	100
Moment of inertia (kg/m ²)	1100
Unsprung Front Mass (kg)	7,5
Unsprung Rear Mass (kg)	7,5
Front Spring Stiffness (N/mm)	17,5
Front Damping (Ns/mm)	10
Rear Spring Stiffness (N/mm)	17,5
Rear Damping (Ns/mm)	10
Tire Stiffness (N/m)	116000
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting usprung pos (cm)	0
Velocity of the car (km/h)	50
Ground input	Square bumps
distance front to cdg (mm)	1000
distance rear to cdg (mm)	1000
Gravity	OFF
Time simulation (s)	10
Square Amplitude (mm)	200
Square Period (s)	10
Square Pulse Width (%)	99
Square Phase Delay (s)	0,1

Tabla 8. Entradas escalón Half-Car

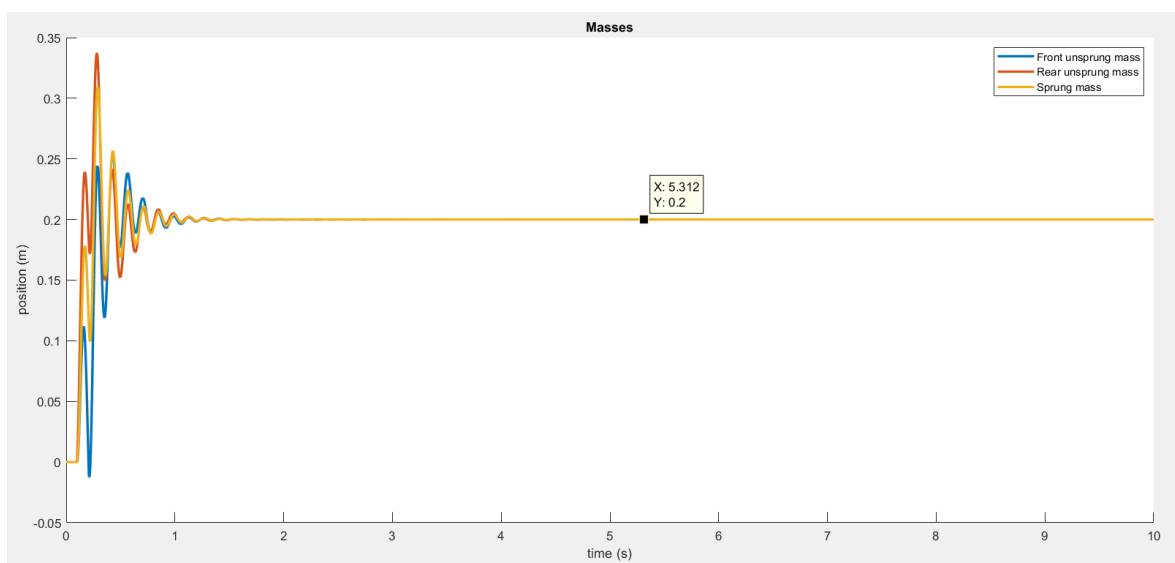


Figura 41. Resultados posición Half-Car escalón

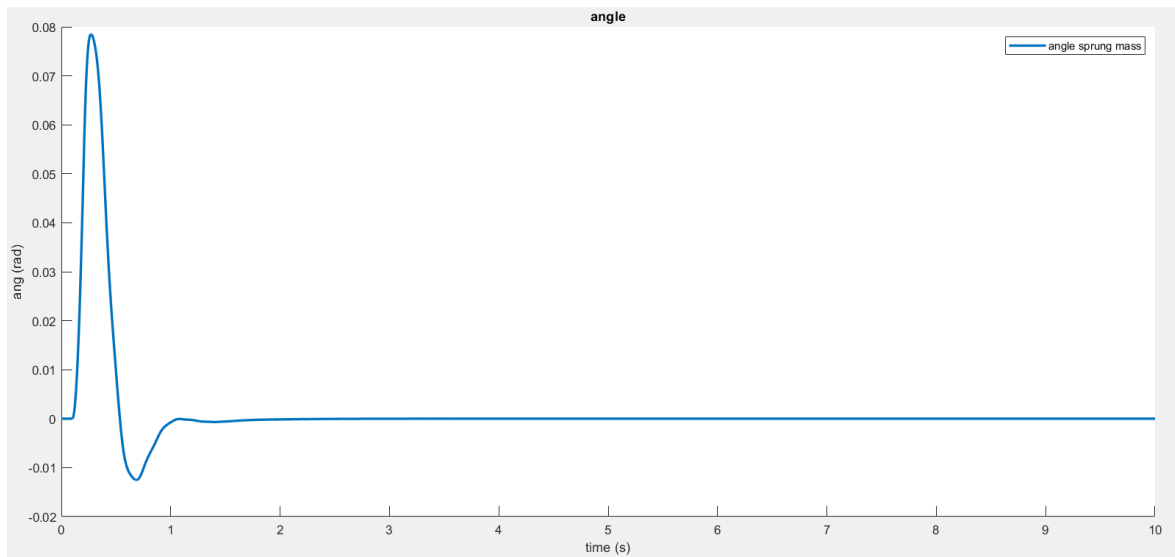


Figura 42. Resultados ángulo Half-Car escalón

5.4.2.3 Caso 3: Excitación a frecuencia natural

En este apartado se comprueba que los distintos elementos de la App entran en resonancia mediante las frecuencias correctas. Para poder calcular las frecuencias naturales del Half-Car se ha optado por crear el modelo en Ansys y realizar un modal de este, aprovechando que ya se iba a desarrollar el modelo para el apartado siguiente. En el apartado 5.4.2.4 se explica cómo se ha generado la geometría y cómo se han establecido las condiciones de contorno necesarias para excitar con senoidales.

Existen ciertas diferencias las condiciones de contorno de ambos modelos. En el caso del modal se usan “Displacement” para bloquear los movimientos de las masas no suspendidas y se usa “Fixed support” para las plataformas del suelo, mientras que en el caso de la masa suspendida se usa una “General Joint” como se describe en 5.4.2.4. Se postprocesan los modos de vibración para entender a qué movimiento le corresponde cada una de las frecuencias. El árbol del modelo modal se encuentra en la Figura 43.

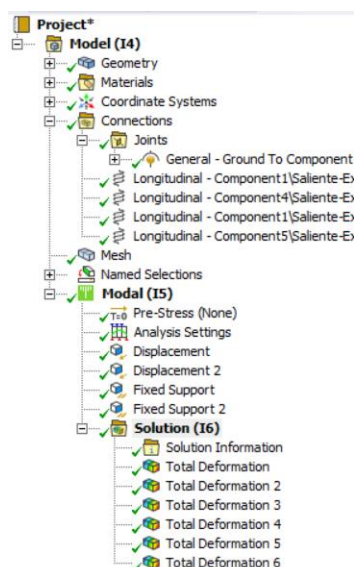


Figura 43. Árbol de modal Half-Car

Se obtiene la Figura 44 de frecuencias naturales en las que 3,9 Hz corresponde a una resonancia de la masa suspendida en vertical, 5,09 Hz a una resonancia en el ángulo que coge la masa suspendida y finalmente 21,33 Hz la resonancia de las masas no suspendidas en vertical. El resto de las frecuencias consisten en resonancias de la propia elasticidad de los bloques de las masas que no son interesantes para este estudio.

Tabular Data		
	Mode	Frequency [Hz]
1	1,	3,9145
2	2,	5,0992
3	3,	21,29
4	4,	21,333
5	5,	1246,1
6	6,	1838,7

Figura 44. Tabla de frecuencias naturales Half-Car

Por ello se va a introducir en la App las frecuencias y observar que entran en resonancia las masas correspondientes. Los parámetros de entrada se encuentran en la Tabla 9. La velocidad se coloca en 5000 km/h para que no sufra retraso la señal y excitar a la vez ambas masas.

Sprung mass (kg)	100
Moment of inertia (kg/m ²)	0,0994
Unsprung Front Mass (kg)	15
Unsprung Rear Mass (kg)	15
Front Spring Stiffness (N/mm)	35
Front Damping (Ns/mm)	0
Rear Spring Stiffness (N/mm)	35
Rear Damping (Ns/mm)	0
Tire Stiffness (N/m)	232000
Resting unsprung pos (cm)	30
Resting usprung pos (cm)	70
Velocity of the car (km/h)	5000
Ground input	Square Bumps
distance front to cdg (mm)	40
distance rear to cdg (mm)	40
Gravity	OFF
Time simulation (s)	4

Tabla 9. Entradas Modal Half-Car

Los resultados de excitar con ondas cuadradas de 20 mm de amplitud y las correspondientes frecuencias naturales se pueden observar de la Figura 45 a la Figura 47. Se concluye que entran en resonancia de manera correcta por lo que la App queda validada.

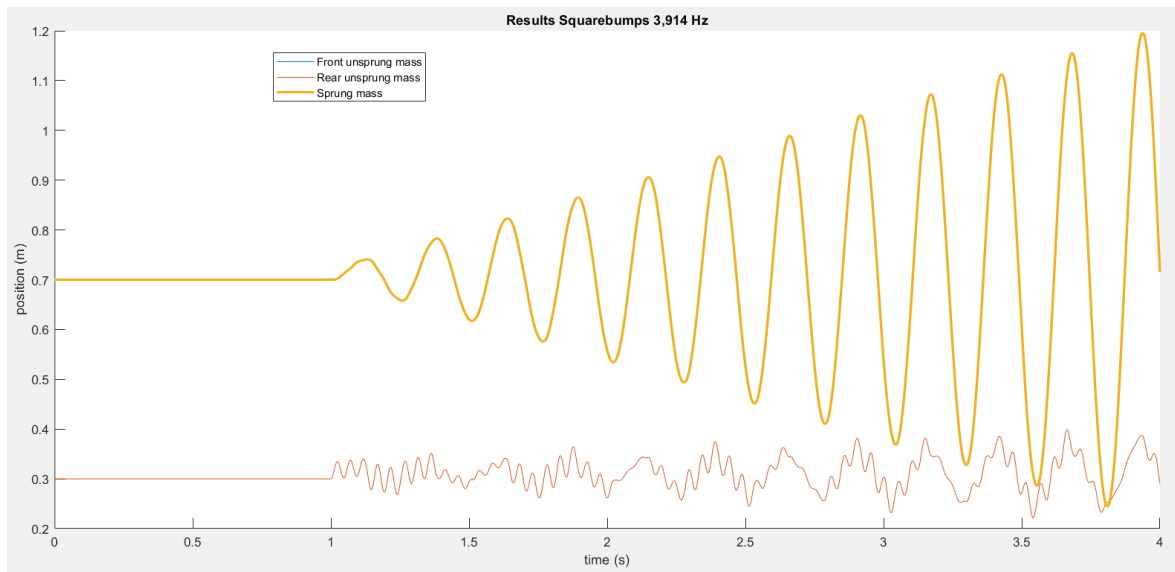


Figura 45. Resultados excitación a 3,914 Hz

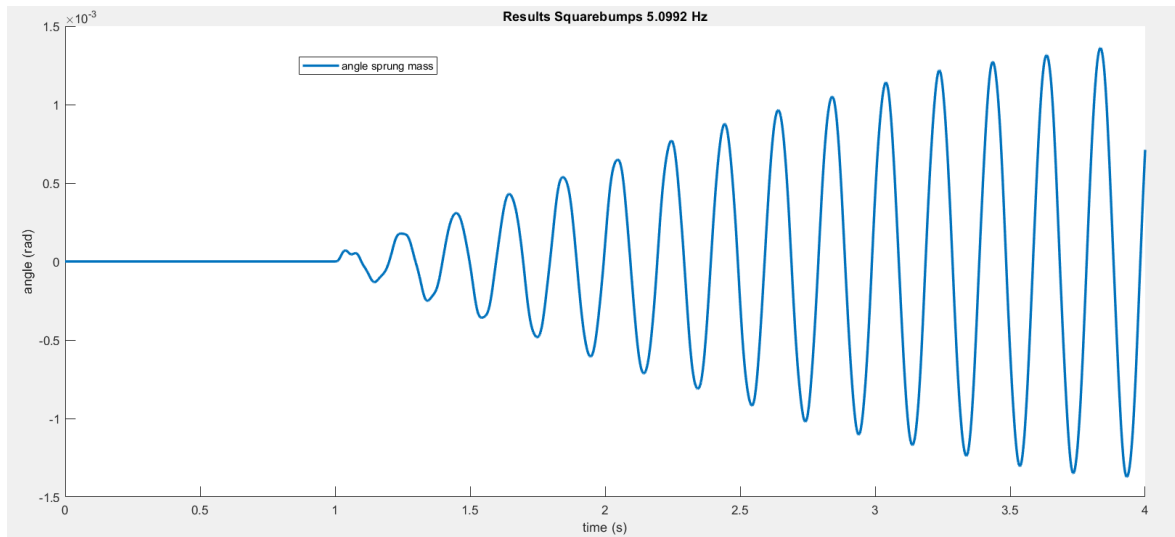


Figura 46. Resultados excitación a 5.0992 Hz

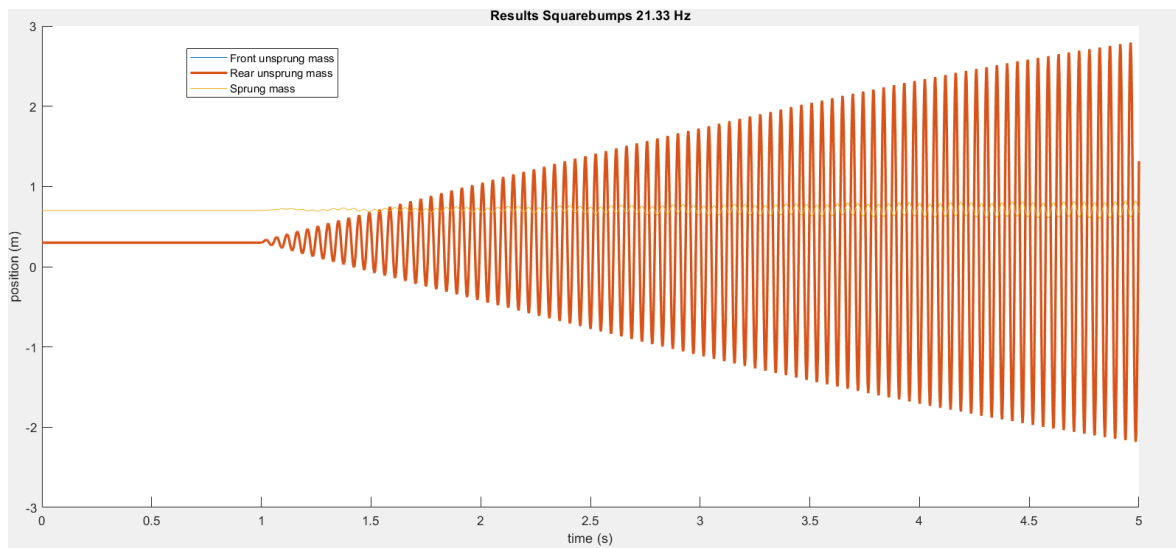


Figura 47. Resultados excitación a 21.33 Hz

5.4.2.4 Caso 4: Senoidal Ansys

En este caso se genera el modelo en Ansys por lo que se documenta en este apartado el desarrollo del modelo de Ansys para contrastarlo con el modelo de la APP. Las entradas de este caso se pueden observar en la Tabla 10.

Sprung mass (kg)	100
Moment of inertia (kg/m ²)	0,0994
Unsprung Front Mass (kg)	15
Unsprung Rear Mass (kg)	15
Front Spring Stiffness (N/mm)	35
Front Damping (Ns/mm)	0
Rear Spring Stiffness (N/mm)	35
Rear Damping (Ns/mm)	0
Tire Stiffness (N/m)	232000
Resting unsprung pos (cm)	0
Resting usprung pos (cm)	0
Velocity of the car (km/h)	0
Ground input	Sine
distance front to cdg (mm)	40
distance rear to cdg (mm)	40
Gravity	OFF
Time simulation (s)	2
Sine Amplitude front (mm)	5
Sine Frecuency front (Hz)	2
Sine Phase front (s)	0
Sine Amplitude rear (mm)	5
Sine Frecuency rear (Hz)	2
Sine Phase rear (s)	0,25

Tabla 10. Entradas Senoidal Ansys Half-Car

Los pasos a seguir para el desarrollo del modelo en Ansys son los siguientes:

1. Creación de las masas: De la misma manera que en el apartado del Quarter-Car model se ajustaron las densidades de los materiales para conseguir que las masas pesarán 100 kg la masa suspendida y 15 kg las masas no suspendidas.
2. Condiciones de contorno: Una vez preparadas las masas se debe generar el modelo con los muelles y amortiguadores y poder excitarlo con una señal senoidal. En este caso no se escogió “Transient Structural”, ya que el tiempo de simulación es superior que en “Rigid Dynamics” debido a introducir más grados de libertad al sistema, por lo que se optó por realizar una simulación en “Rigid Dynamics”, que al

considerar rígidas las masas ahorran tiempo de cálculo. Los muelles y amortiguadores se representan mediante la “Connection spring”, que permite especificar rigidez y amortiguamiento. En “Rigid Dynamics” es conveniente realizar las entradas de movimiento mediante “Joints” en vez de mediante “Remote Displacements”, Por lo que se estudió qué tipo de “Joints” podrían equiparar las condiciones de contorno del modelo Half-Car, siendo la masa suspendida más compleja, ya que únicamente se permite el desplazamiento vertical y una rotación. Se probaron combinaciones de varios tipos de “Joints” en la masa suspendida sin éxito. Se toma la decisión de que la mejor manera consiste en aplicar un agujero en la geometría y colocar una “General Joint”, en la que se puede especificar de los 3 desplazamientos y 3 rotaciones cuales se quedan libres y cuales bloqueadas. En el caso de las masas no suspendidas, con una “Translational Joint” era suficiente para reproducir el modelo. Finalmente se han seleccionado los desplazamientos de las masas y el ángulo relativo de la “General Joint” como postprocesado, quedando el árbol de la Figura 48.

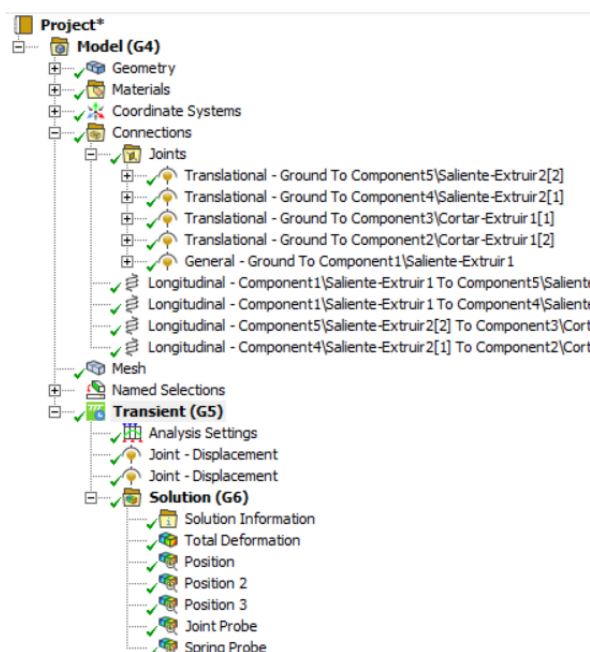


Figura 48.Árbol Ansys simulación Half-Car

3. **Resultados:** Una vez generada la simulación se visualizan los resultados, Figura 49, y se exportan las variables postprocesadas para poder verificar el modelo de la APP. Los resultados se encuentran de la Figura 50 a la Figura 52 . Los resultados se muestran en figuras distintas para establecer la comparativa con las salidas de la App. Se puede observar que, mientras que en las variables de las masas no suspendidas no hay error, en las variables de las masas suspendidas hay un ligero error. Este error es debido a que Ansys, al ser un modelo realista, en inclinaciones de ángulo grandes los muelles tienen cierta inclinación, lo que hace que la característica de fuerza sea distinta en el modelo de la App y la simulación de Ansys. Pese a este error se valida la App ya que es un modelo simplificado que cuenta con la verticalidad de los muelles y en la realidad el pitch no afecta a la verticalidad de los vehículos por la geometría de la suspensión por lo que el modelo de la App es válido.

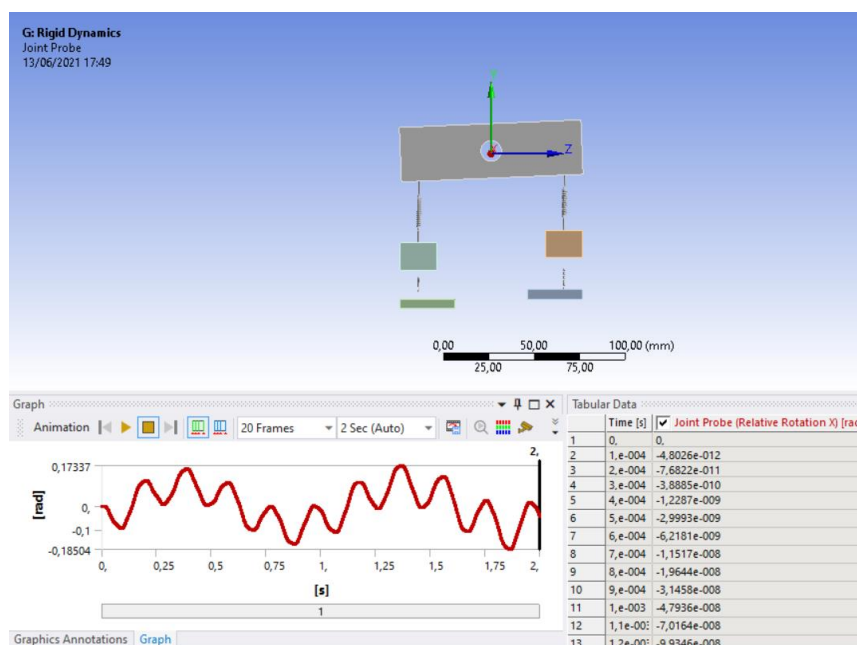


Figura 49. Resultados simulación Ansys Half-Car

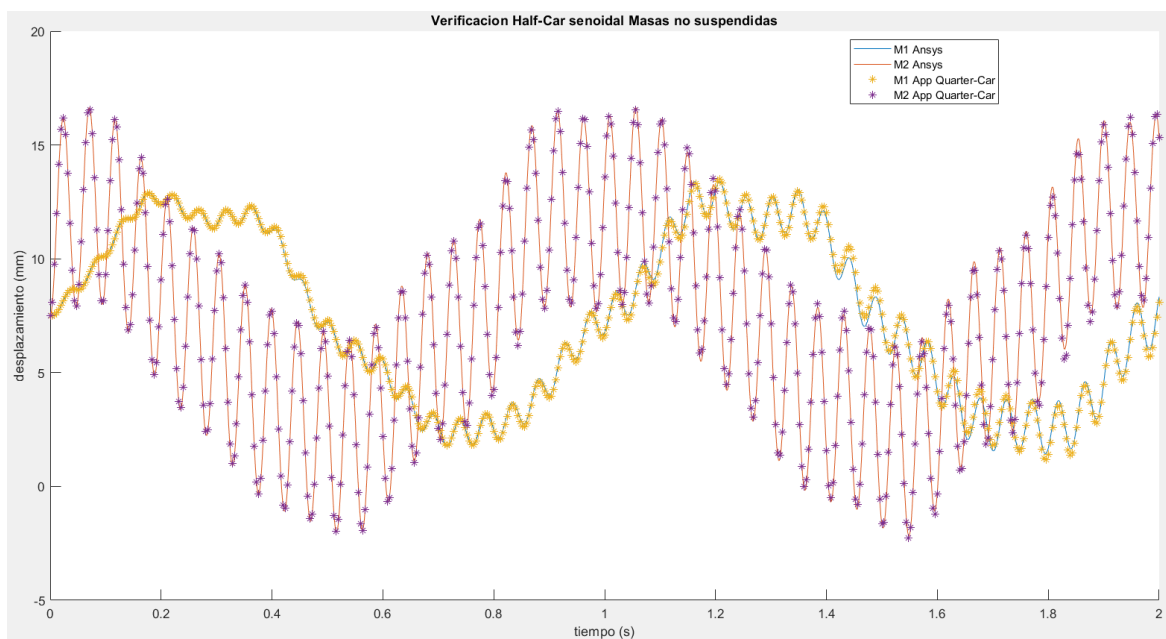


Figura 50. Resultados Half-Car Senoidal masas no suspendidas

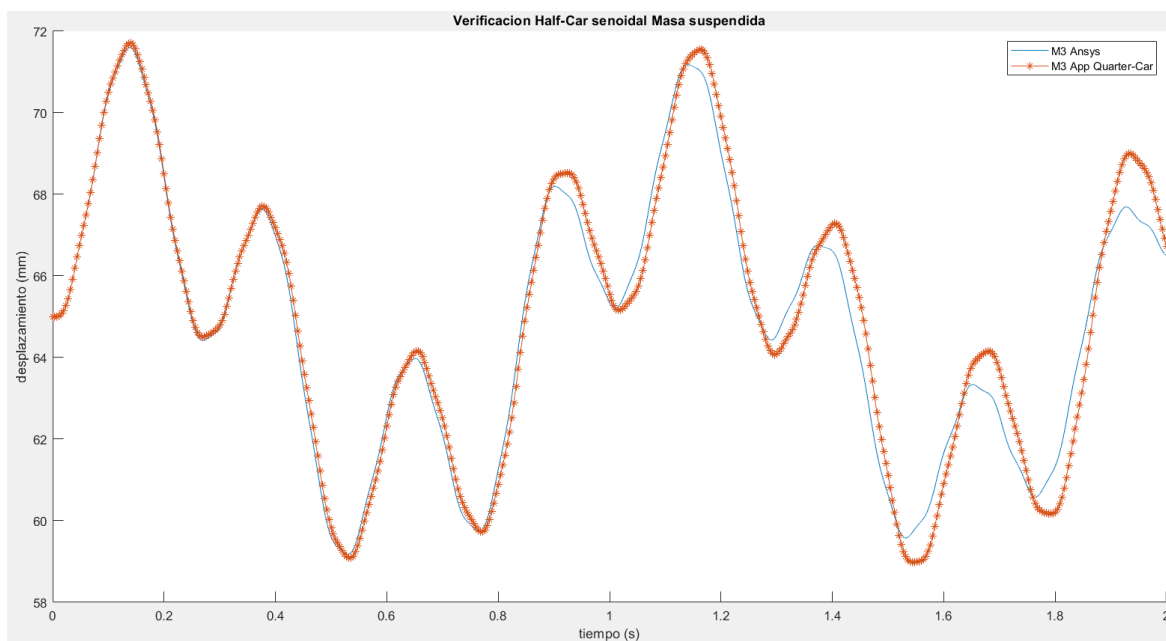


Figura 51. Resultados Half-Car Senoidal masa suspendida

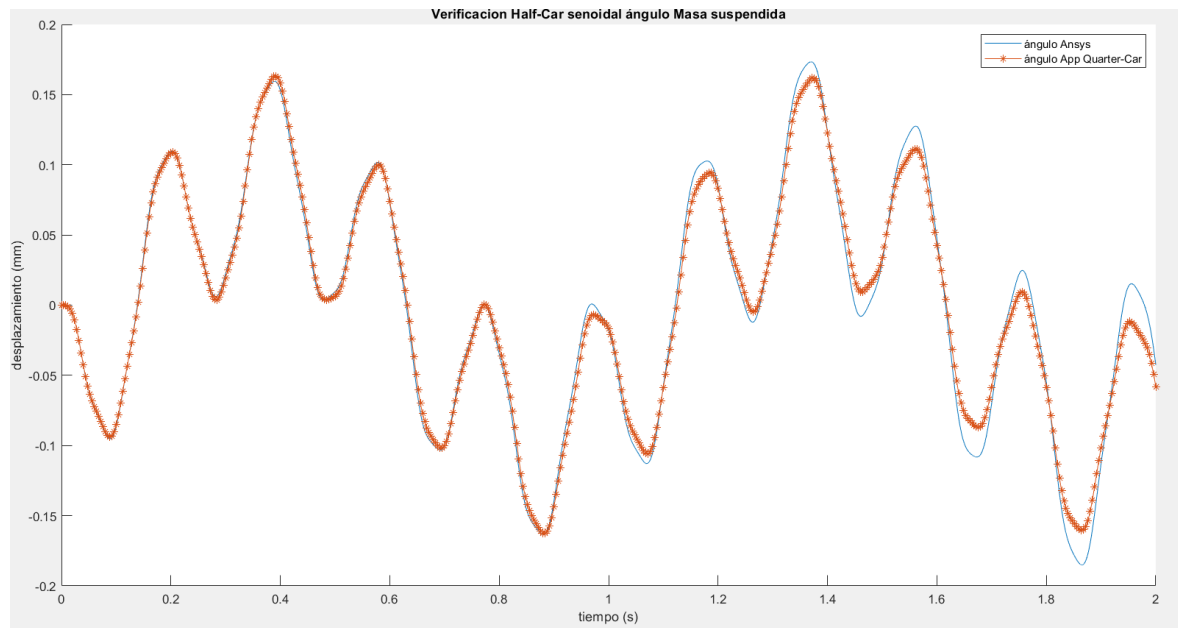


Figura 52. Resultados Half-Car Senoidal ángulo masa suspendida

Capítulo 6. CREACIÓN DE APP SUSPENSIÓN

En este Capítulo se va a documentar el proceso de diseño de la APP Suspensión. Está dividido según los apartados descritos en 3.3.2.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA APP SUSPENSIÓN

La App dinámica ha permitido establecer las características de rigidez y amortiguamiento de la suspensión. Primero la rigidez total del vehículo con el Quarter-Car y después, como distribuir dicha rigidez entre el eje delantero y trasero. No obstante, la simplificación en estos modelos se basa en la consideración de que la rigidez es lineal en toda la compresión de la suspensión y esto no es realista. La geometría de la suspensión juega un papel muy importante en la dinámica del vehículo y no solo introduciendo no linealidad en la rigidez de suspensión. Los elementos relevantes para estudiar a nivel dinámico de la suspensión son los siguientes:

- Progresividad de la suspensión.
- Ground clearance, caída estática.
- Ángulos de suspensión.
- Roll-center.

Estos elementos se desarrollarán en los siguientes apartados.

6.1.1 PROGRESIVIDAD

En suspensiones de competición es conveniente generar suspensiones con características progresivas. Una suspensión progresiva en compresiones de suspensión bajas, como puede ser en recta, es más blanda, lo que permite mayor agarre en aceleración, mientras que en curvas que ocurre una mayor compresión esta se vuelve más rígida evitando excesivo roll.

Esta progresividad es la relación de movimiento vertical de rueda con la compresión del amortiguador, que se consigue mediante el correcto diseño de las barras de suspensión. Jugando con los puntos de anclaje de la suspensión y las longitudes de los distintos elementos se consiguen cinemáticas con ventajas mecánicas que aumentan la ratio de compresión del amortiguador con respecto al movimiento vertical, motion ratio.

6.1.2 GROUND CLEARANCE

Es importante saber qué parte del recorrido del amortiguador agotamos únicamente para igualar el peso del vehículo. Se debe a dos razones, el Ground Clearance y recorrido de compresión.

El Ground Clearance representa la distancia entre el punto más bajo del vehículo y el suelo en posición estática. Es un parámetro a tener en cuenta ya que si el terreno tiene cambios de elevación podría llegar a chocar el chasis con el suelo. En el caso de la Formula Student existe una norma que establece un Ground Clearance mínimo de 30 mm.

El recorrido de compresión es importante ya que tiene que ser suficiente para que la suspensión amortigüe las perturbaciones del terreno y no haga tope final de carrera. En el caso de la Formula Student existe una norma que establece que se tiene que tener disponible al menos 25mm de recorrido de compresión.

Debido a la normativa explicada, es importante que la App nos permita comprobar estos parámetros al diseñar la geometría de suspensión. Se debe conseguir extraer la fuerza estática en el recorrido y establecer cuantos milímetros de compresión del amortiguador hacen falta para igualar el peso.

6.1.3 ÁNGULOS DE LA SUSPENSIÓN

Existen gran variedad de ángulos que controlar en la suspensión. La mayoría se encargan de posicionar el neumático de manera óptima en cada situación del circuito para optimizar el agarre. Hay una amplia literatura sobre estudios de neumático y de suspensión sobre la

que informarse sobre ellos por lo que únicamente se redactará en este apartado sobre el ángulo que se tiene en cuenta en la App Suspensión, Camber.

El Camber, ángulo de caída, es el ángulo que forma el eje vertical de la rueda con el eje vertical del vehículo. En el caso de ser en la dirección del chasis se considera negativo y hacia fuera del vehículo positivo.

Este ángulo sirve para optimizar el parche de contacto del neumático dando mayor agarre en curva. Por ejemplo, un ligero ángulo negativo permite maximizar la fuerza lateral de un neumático exterior en curva, mientras que en las ruedas interiores convendría conseguir un ángulo positivo. Esta es una de las razones por la que se buscan suspensiones independientes y modelos de suspensión que dejen libertad de diseño para controlar estos ángulos permitiendo optimizar el agarre del neumático.

6.1.4 ROLL-CENTER

El Roll-Center es el centro de rotación del vehículo cuando ocurre Roll debido a perturbaciones distintas en cada lado del vehículo o al entrar en curva por el reparto de fuerzas.

Cuanto menor sea la distancia entre este centro de rotación y el centro de gravedad del vehículo menos movimiento de Roll sufrirá. Al tener menor transmisión de fuerzas se cargan menos los neumáticos exteriores en curva y nos permite entrar a mayor velocidad en ella. Este parámetro debería poder ser calculado por la App para realizar la geometría de suspensión.

6.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se desarrollarán las ecuaciones y desarrollos matemáticos usados en la App de suspensión. Para cubrir los elementos relevantes de la suspensión se necesitan elaborar las ecuaciones cinemáticas y las ecuaciones dinámicas del modelo de suspensión

del ISC. Este modelo es una suspensión Pushrod que ha sido explicada en el Estado del Arte y será ampliada la descripción en este apartado.

6.2.1 SUSPENSIÓN PUSHROD

Pese a haberse redactado la descripción de la suspensión Pushrod en este apartado se va a revisar que son cada elemento de dicha suspensión. Para esta descripción se va a hacer uso de la Figura 53, esta imagen es extraída del assembly del IFS-03 del equipo ISC.

Existen dos mecanismos de barras conectados dentro de la suspensión. El primero es un cuadrilátero articulado que se encarga de soportar la rueda y fija los ángulos dinámicos de la rueda como el camber. Dicho cuadrilátero está formado por la mangueta, L7, triángulo inferior, L1, y el triángulo superior, L6.

El segundo es un mecanismo que se encarga de transformar el movimiento vertical de rueda en compresión del amortiguador, L5. Este está formado por el triángulo inferior, L1, pushrod, L2, y rocker. El rocker tiene los parámetros L3, L4 y α que definen el balancín conocido como rocker. El nexo entre los dos mecanismos es L1, generando el mecanismo llamado suspensión. Controlando los valores de dichos elementos se puede controlar la compresión de la suspensión y la posición de la rueda.

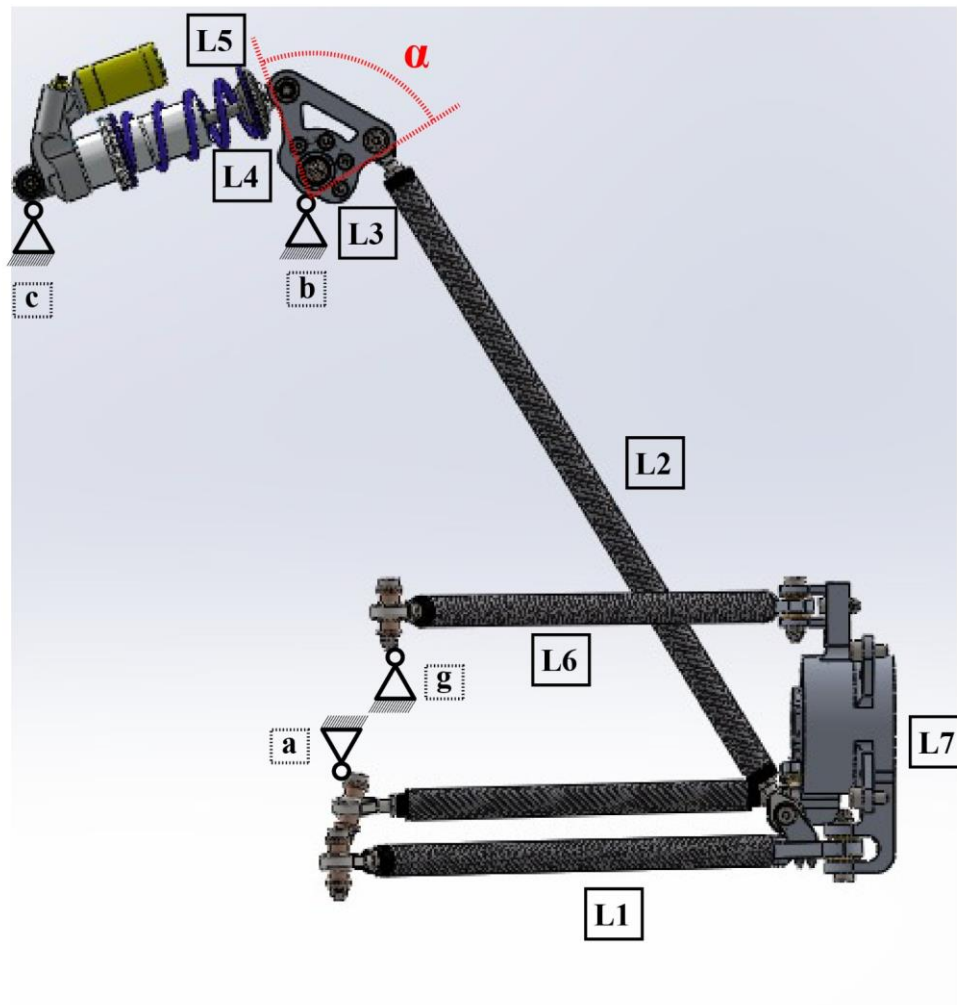


Figura 53. Imagen pushrod suspensión ISC

6.2.2 ECUACIONES CINEMÁTICAS

Se necesitan generar dos paquetes de ecuaciones cinemáticas para la APP.

- Ecuaciones a partir de la longitud del amortiguador. Cinemática directa
- Ecuaciones a partir de un desplazamiento de 50 mm del suelo. Cinemática inversa

La cinemática directa se elabora ya que se debe garantizar un recorrido total de 50mm de rueda por lo que es conveniente que la APP coloque inicialmente la suspensión con el amortiguador completamente extendido y posteriormente comprimir los 50 mm necesarios por normativa y verificar que no se ha agotado el recorrido útil del amortiguador. Por esto

se utiliza la cinemática directa como cálculo de la posición inicial y posteriormente las ecuaciones de cinemática inversa para calcular el movimiento completo de la suspensión. Esto nos permite conocer el Camber y motion ratio de la suspensión.

6.2.2.1 Ecuaciones cinemática directa:

Estas ecuaciones establecen la posición de tope de extensión del sistema. Todos los elementos de la suspensión descritos en el apartado 6.2.1 son incluidos como parámetros de estas ecuaciones con los símbolos de la Figura 53.

De estos parámetros se piden como entradas los siguientes:

- Las longitudes de todos los elementos de la suspensión, representados como LX.
- El ángulo que forma el Rocker.
- Los anclajes de la suspensión al chasis, siendo estos los puntos a, b, c y g.

Con estas entradas las ecuaciones deben ser capaces de hallar tanto las coordenadas de los puntos d, e, f, h, como los ángulos de interés para el comportamiento de la suspensión.

Para desarrollar estas ecuaciones matemáticas se necesita hacer un uso continuado de las ecuaciones de la intersección de dos circunferencias. Se ha optado por crear una función matemática en Matlab que tenga de entradas los centros de las circunferencias y los radios de estas. Posteriormente, devuelve la solución positiva o negativa de las ecuaciones según se especifique. La creación de esta ecuación ha supuesto una simplificación de código y ahorro de tiempo de diseño.

```
function [x,y]= inter_circun_pos(x1,y1,r1,x2,y2,r2)
```

Una vez desarrollada la función “inter_circun”, se procede a describir el proceso de la elaboración de las ecuaciones matemáticas:

1. Hallar punto f: Se halla mediante la intersección de la circunferencia con centro “c” y radio “L5” con la circunferencia con centro “b” y radio “L4”.
2. Hallar punto e: Se halla mediante trigonometría con la geometría del rocker:

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{x_b - x_f}{L_4}\right) \quad [32]$$

$$\theta_2 = 180 - \theta_1 - \alpha \quad [33]$$

$$x_e = x_b + L_3 * \cos(\theta_2) \quad [34]$$

$$y_e = y_b + L_3 * \cos(\theta_2) \quad [35]$$

3. Hallar punto d: Se halla mediante la intersección de la circunferencia con centro “e” y radio “L2” y la circunferencia de centro “a” y radio “L1”.
4. Hallar punto h: Se halla mediante la intersección de la circunferencia con centro “g” y radio “L6” con la circunferencia de centro “d” y radio “L7”.

6.2.2.2 Ecuaciones cinemática inversa:

Una vez calculada la posición inicial se desarrollan las ecuaciones a partir de la coordenada y del punto D.

El primer paso sería crear el vector del punto D en todas sus posiciones de la compresión. Se incrementa el valor de la coordenada Dy hasta 50 mm en intervalos de 1 mm. De esta manera se calcula de manera vectorial las ecuaciones de cinemática inversa.

Mediante la ecuación de la circunferencia se puede conocer la coordenada Dx.

$$D_x^2 + D_y^2 + A * D_x + B * D_y + C = 0 \quad [36]$$

Una vez se obtienen las coordenadas de D se puede encontrar el punto E mediante la función de intersección de circunferencias de centros B y D y radios L3 y L2 respectivamente.

Posteriormente mediante la geometría del rocker se puede establecer el punto F.

$$\sigma_2 = \arccos\left(\frac{E_x - B_x}{L_3}\right) \quad [37]$$

$$\sigma_1 = 180 - \alpha - \sigma_2 \quad [38]$$

$$F_x = B_x - \cos(\sigma_1) * L_4 \quad [39]$$

$$F_y = B_y - \sin(\sigma_1) * L_4 \quad [40]$$

Con el punto F y el anclaje C se puede sacar la longitud del amortiguador en cada posición pudiendo conocer la compresión que sufre en todo su recorrido.

$$L_5 = \sqrt{(F_x - C_x)^2 + (F_y - C_y)^2} \quad [41]$$

Faltan por definir la posición de la mangueta y del triángulo superior. El punto H se haya con la función de intersección de circunferencias de centros G y D y radios L6 y L7 respectivamente.

6.2.3 ECUACIONES DINÁMICAS:

Para conocer la posición estática de la suspensión se debe saber qué fuerza está ejerciendo la suspensión en todo su recorrido y establecer en qué compresión la fuerza elástica del amortiguador se iguala con el peso del vehículo. Permitiendo establecer que milímetros se recogen las ruedas cuando el vehículo se apoya en el suelo.

Se necesita para ello monitorizar la variación de longitud del amortiguador y usar la siguiente ecuación:

$$F_{susp} = K_{amortiguador} * \Delta L_{5_{amortiguador}} \quad [42]$$

6.2.4 ROLL CENTER

El parámetro de Roll Center es importante de calcular ya que únicamente depende de la geometría de la suspensión y establece el brazo de palanca sobre el que rota el vehículo al girar en curva.

Por ello se debe diseñar teniendo en cuenta dicho parámetro y ser capaces de monitorizarlo en el recorrido de suspensión. En un sistema pushrod se calcula de la siguiente manera:

Se extienden las rectas que forman los triángulos de la suspensión y se busca la intersección de ambas rectas. Posteriormente, se une con una recta este punto de intersección con la huella de contacto del neumático y donde corte dicha recta con el centro del vehículo se encuentra el Roll-Center. Esto se puede observar en la Figura 54. Debido a la definición de este, el Roll-Center, éste es dinámico, ya que a medida que se comprime la suspensión las rectas de los triángulos tienen la intersección en distinto punto.

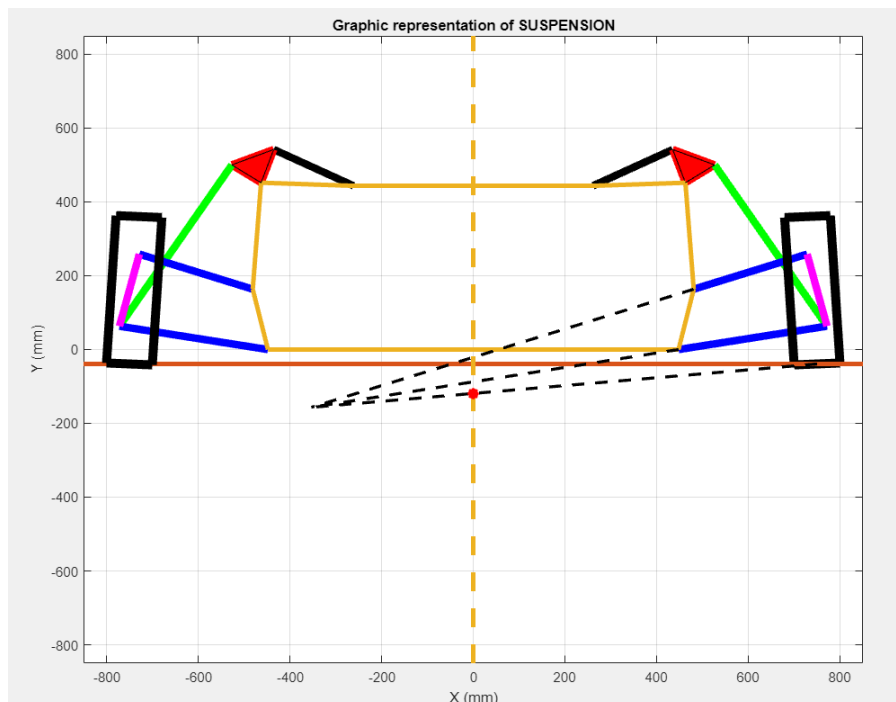


Figura 54. Representación Roll-Center

6.3 IMPLEMENTACIÓN EN APPDESIGNER

En este apartado se describe el proceso de diseño de la APP suspensión en el entorno Appdesigner. Se redacta de manera más resumida con respecto a la App dinámica ya que existen procesos como la comunicación de ventanas que ya han sido cubiertos en el apartado 5.3.

6.3.1 ESQUEMA DE LA APP

En esta App se ha decidido implementar las ecuaciones mediante código por lo que no hace falta comunicarse con ninguna otra aplicación en modo “batch”, lo cual simplifica el esquema y la estructura interna de la APP. Las variables son privadas y se gestionan dentro de la APP sin pasar por el Workspace de la sesión. Sí que se ha considerado relevante comunicar la APP suspensión con la ventana KC calculator, ya que a un usuario que quiera saltar directamente a la APP suspensión sin haber seleccionado la rigidez de la suspensión en la APP dinámica le puede resultar útil. El esquema de la App se puede observar en la Figura 55.

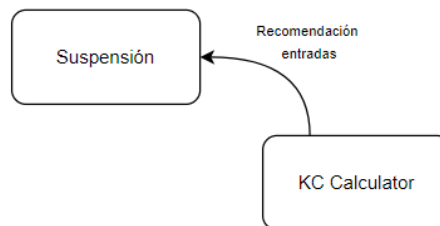


Figura 55.Estructura App Suspensión

6.3.2 FRONT-END SUSPENSIÓN

En este apartado vamos a describir el Front-end de la App Suspensión y la funcionalidad de los botones. Como en las ventanas Quarter-Car y Half-Car vamos a dividir la App en

tres bloques: Cinta de herramientas, Gestión de entradas y Visualización de salidas. El Front-end de la App Suspensión se puede observar en la Figura 56.

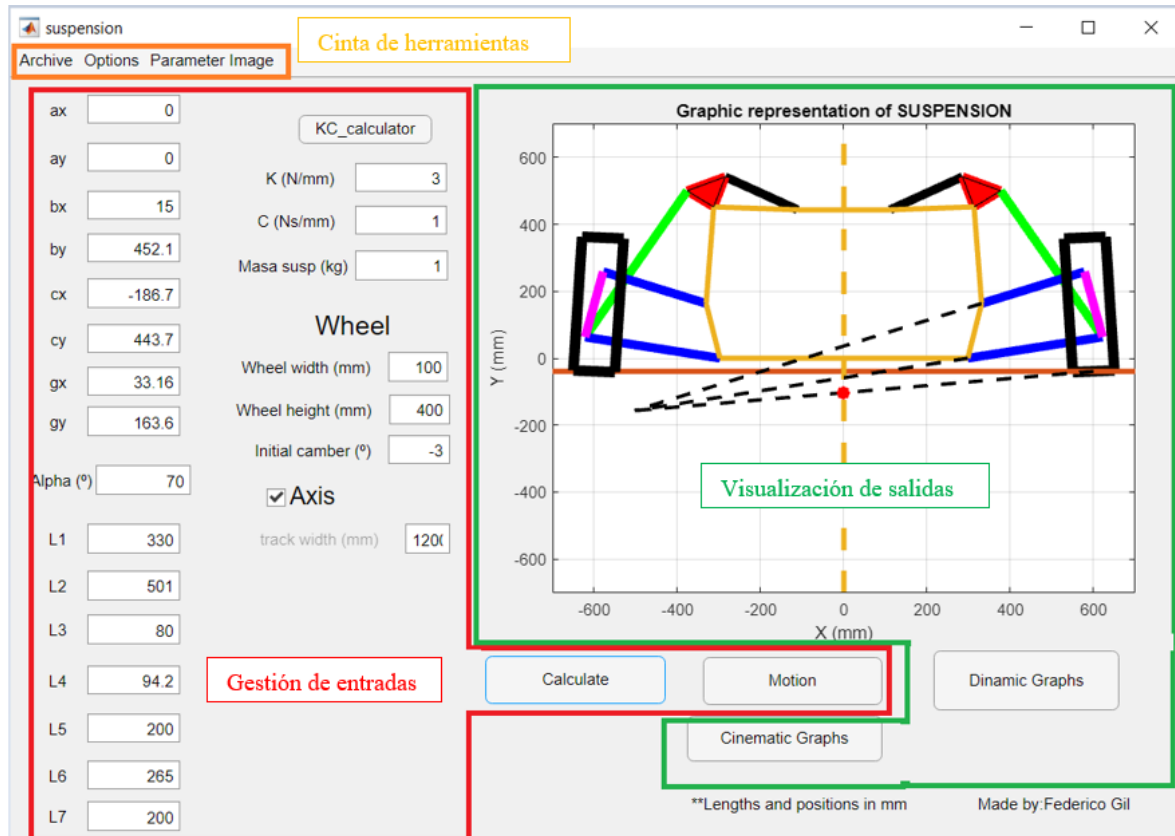


Figura 56. Front-end App Suspensión

6.3.2.1 Cinta de herramientas

En esta App la cinta de herramientas se compone de tres desplegables.

En “archive” se encuentran los botones que gestionan la lectura y guardado de datos. Encontramos “Open”, que permite abrir un archivo con los parámetros de entrada guardados de una sesión anterior. También se encuentra el botón “Export” el cual nos permite guardar archivos tanto de los resultados de las variables de interés “Movement and Force vectors” como los parámetros de entrada “Susp coordinates” para poder reproducir de nuevo la configuración. Ambos botones permiten guardar el archivo en Excel y txt

dependiendo de la preferencia del usuario. Estos botones se pueden observar en la Figura 58.

En “Options”, se encuentra el archivo de help.pdf, en el que se encuentran las instrucciones de uso de esta App. Dicho archivo será esta memoria adjunta como pdf en la estructura de la App.

Finalmente se encuentra “Parameter Image”, este botón muestra una imagen en pantalla de la suspensión agenciando a cada elemento su nombre de parámetro correspondiente para que al usuario le sea fácil saber qué parámetro quiere cambiar. Esta imagen se encuentra en la Figura 57.

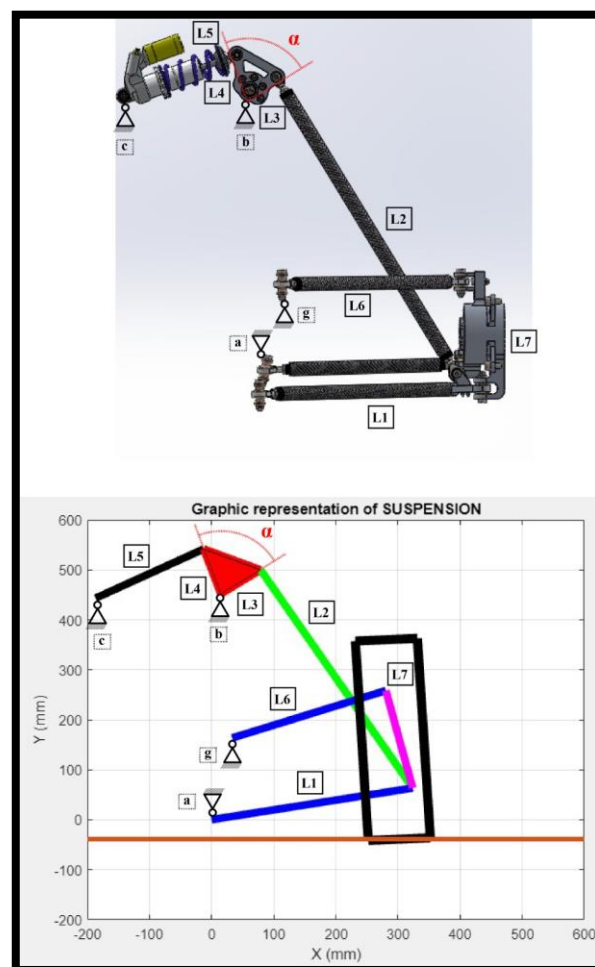


Figura 57. Parameter Image

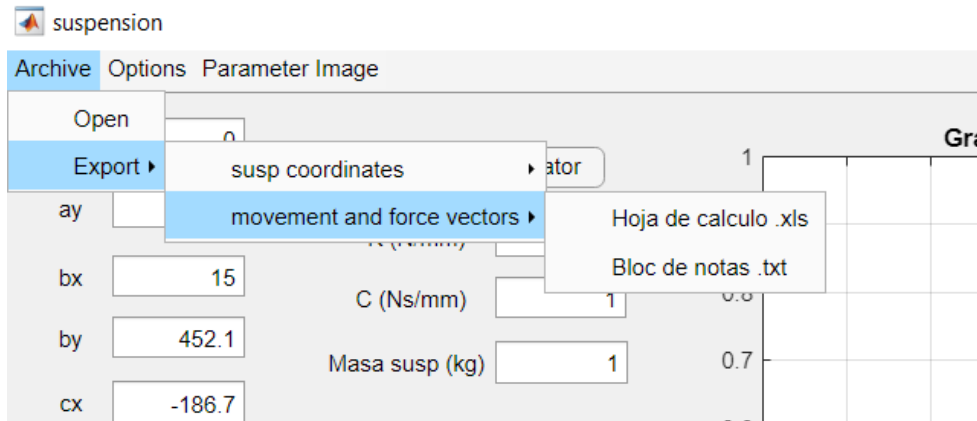


Figura 58. Desplegable Archive

6.3.2.2 Gestión de entradas

La gestión de entradas es muy similar a las del Quarter-Car y Half-Car. Consiste en recoger las variables de los parámetros del usuario. Los parámetros de la primera columna están recogidos en el botón de parameter image, por lo que no hace falta describirlos en este apartado.

Los parámetros de la segunda columna se dividen en la caracterización del amortiguador, que incluye el acceso a KC Calculator, los parámetros de la rueda y finalmente la opción de incluir un eje completo realizando el espejo y para ello especificando el ancho de vía del eje representado. Si no se escoge el botón “Axis” al no activarse el ancho de vía el Roll-Center no es calculado.

El botón “Calculate” sirve para que la App lea los parámetros actuales en pantalla y calcule la cinemática directa y mostrar la geometría extendida. El botón “motion” sirve para ejecutar el cálculo del movimiento de compresión de la rueda y permite observar la animación en la visualización de salidas del movimiento en todo su recorrido.

6.3.2.3 Visualización de salidas

En la visualización de salidas encontramos una figura en la que se visualizan los resultados de la geometría de la suspensión. Dependiendo de si se selecciona el botón “Axis” se mostrará un cuarto de vehículo o medio vehículo en un eje. Mediante el botón “calculate” únicamente se muestra la suspensión extendida y con el botón “motion” se aprecia el movimiento de la suspensión y el cálculo en cada posición del Roll-Center. Esta visualización sirve para tener una intuición del movimiento que hace la suspensión y poder descartar movimientos no deseados sin necesidad de observar los indicadores de dicha geometría.

Una vez se verifica el movimiento se puede hacer uso del botón “Cinematic Graphs” y “Dinamic Graphs”, mediante los cuales podemos observar los indicadores que serán los que el usuario debe analizar para validar el correcto funcionamiento de su suspensión. A continuación, se van a mostrar figuras ejemplo para entender qué indicador muestra cada uno de los botones.

En la Figura 59 podemos observar que se obtiene la gráfica de “motion ratio”, que consiste en el cociente del movimiento vertical de rueda y la compresión del amortiguador. Similarmente, se obtiene la Figura 60, que representa la misma información, pero en ella se observa de manera más sencilla la progresividad de la suspensión en la que se observa que a medida que se va agotando el recorrido de la suspensión el amortiguador se comprime más que lo que sube la rueda verticalmente. Se representa la relación 1:1 en línea roja discontinua. Si la línea azul queda por encima de la roja nos encontramos con una suspensión progresiva, mientras que si se encuentra por debajo nos encontramos con una suspensión regresiva.

En la Figura 61 podemos observar el camber dinámico de la suspensión. Se observa que por la geometría de los brazos y mangueta el camber aumenta en sentido negativo hasta los 6 grados.

Finalmente, en la Figura 62 se aprecia el Roll center dinámico. éste se aleja del vehículo a medida que se comprime, por lo que indica que a medida que se toma una curva cerrada el centro de rotación del Roll está más bajo, cargando mayormente las ruedas exteriores a la curva.

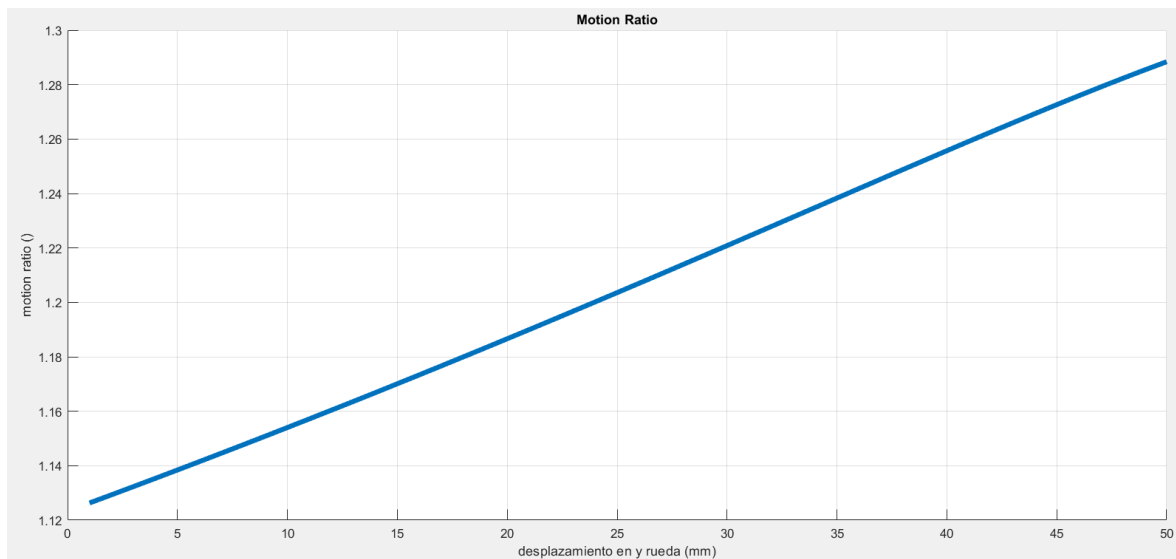


Figura 59. Ejemplo Motion Ratio

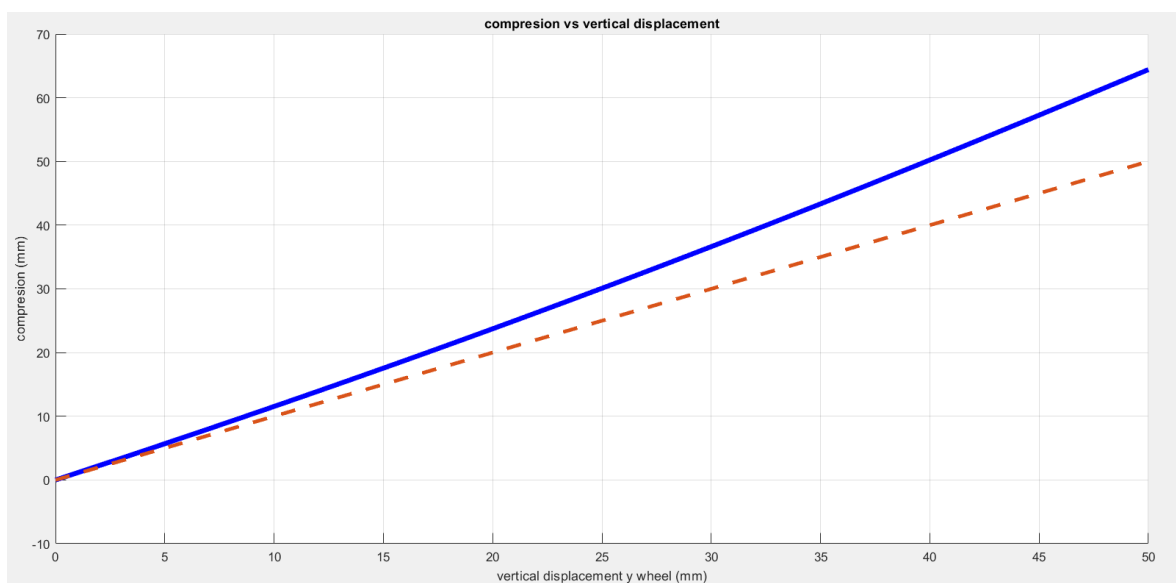


Figura 60. Ejemplo Relación de compresión

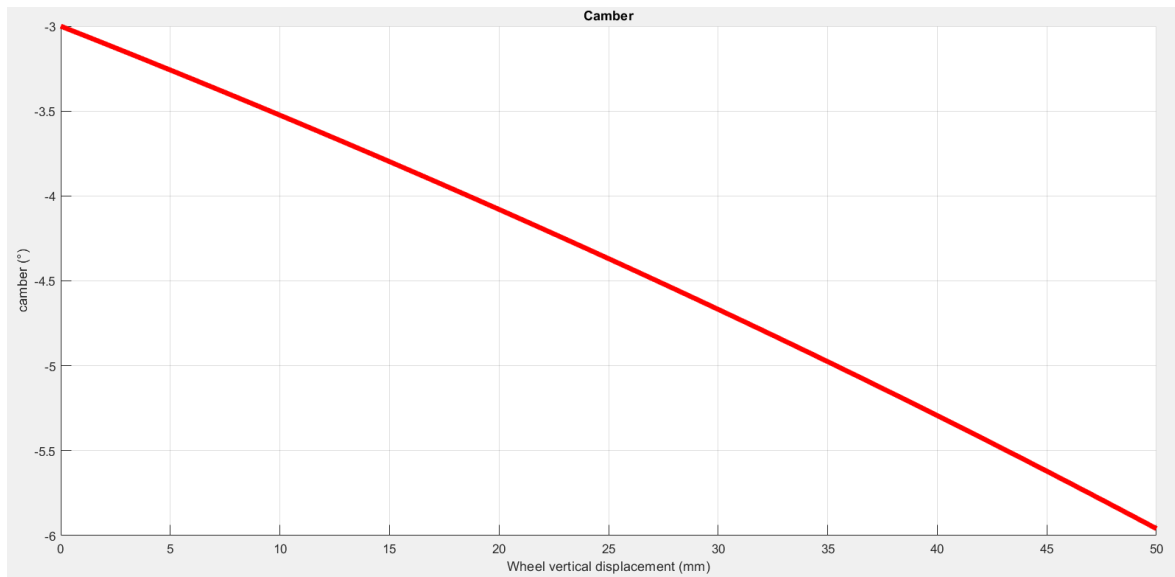


Figura 61. Ejemplo Camber

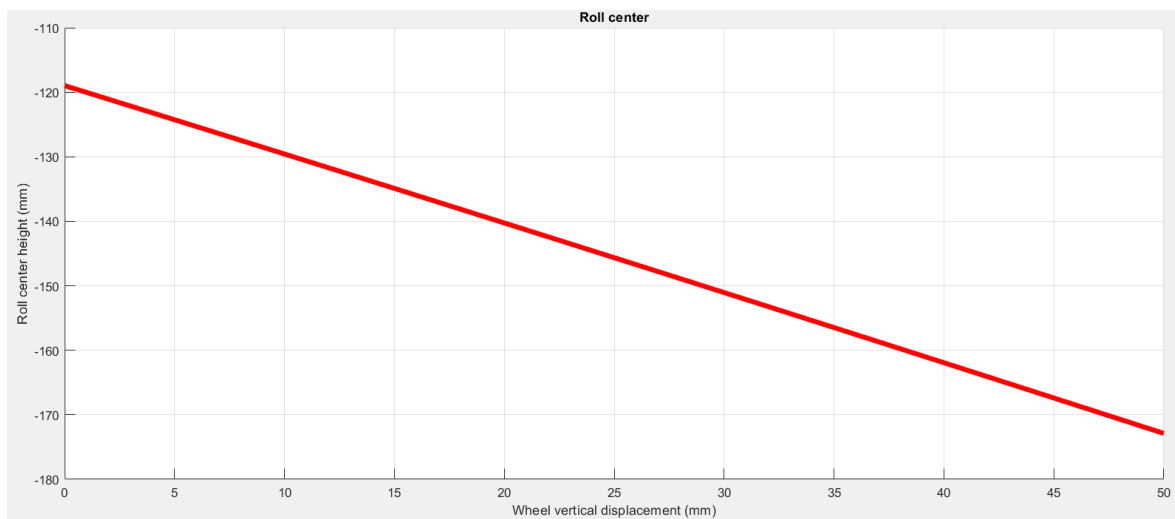


Figura 62. Ejemplo Roll center

Mediante el botón “Dinamic Graphs” obtenemos la Figura 63, en la que se puede observar a medida que sube la rueda qué fuerza está generando la suspensión, (línea azul). En rojo se encuentra los newtons equivalentes al peso que recibe dicha suspensión. en este caso 750N. La intersección de ambas rectas dictamina la caída estática, por lo que se puede asegurar que una vez el coche se apoya sobre el suelo el vehículo cae 18mm por su propio peso. Dejando 32 mm de compresión y 18 mm de extensión.

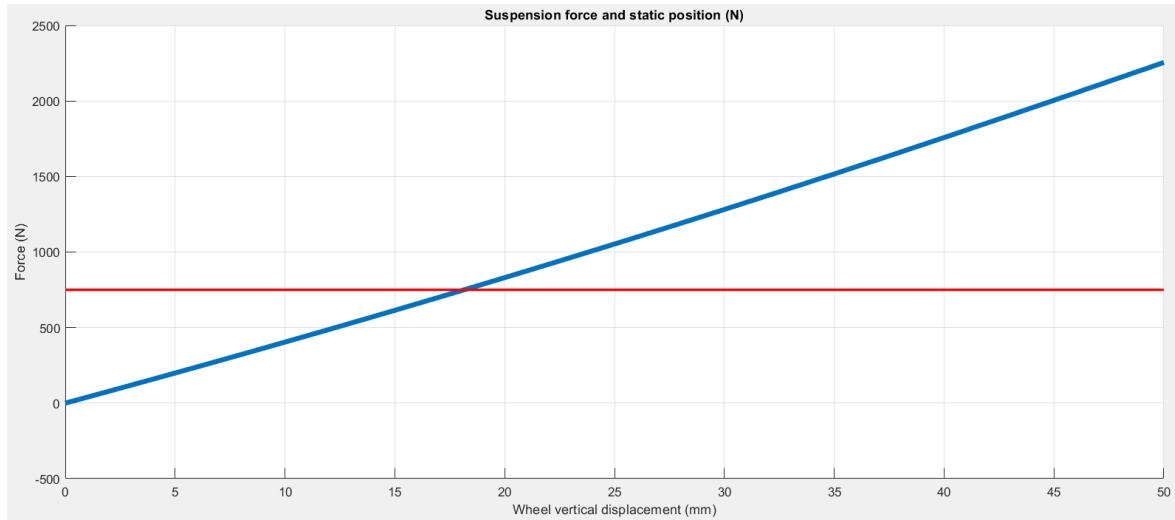


Figura 63. Ejemplo de fuerza de la suspensión

6.3.3 ESQUEMA DE PASOS

En este apartado se va a explicar cómo se debe hacer uso de la App. Debido a la programación de la App, cierta combinación de botones puede no dar el resultado esperado ya que no se han generado las variables correspondientes. Al establecer un cambio de geometría siempre se debe pulsar el botón “Calculate”. Esto calcula la cinemática directa y prepara la programación para la dinámica inversa. Posteriormente, se puede pulsar “Motion” para ejecutar el movimiento de la suspensión y obtener los resultados de la cinemática inversa. Esto permite generar las gráficas cinemáticas y dinámicas siempre que se haya especificado las características del amortiguador.

Este ciclo nada más arrancar la App es fácil de seguir ya que se ha generado una lógica en la App que bloquea los botones que no se pueden pulsar sin ejecutar el botón previo y se desbloquean a medida que se siguen los pasos. No obstante, una vez hecha la primera iteración, este sistema de bloqueo no se efectúa. En la Figura 64 y Figura 65 se pueden observar los pasos a llevar a cabo en el orden correcto.

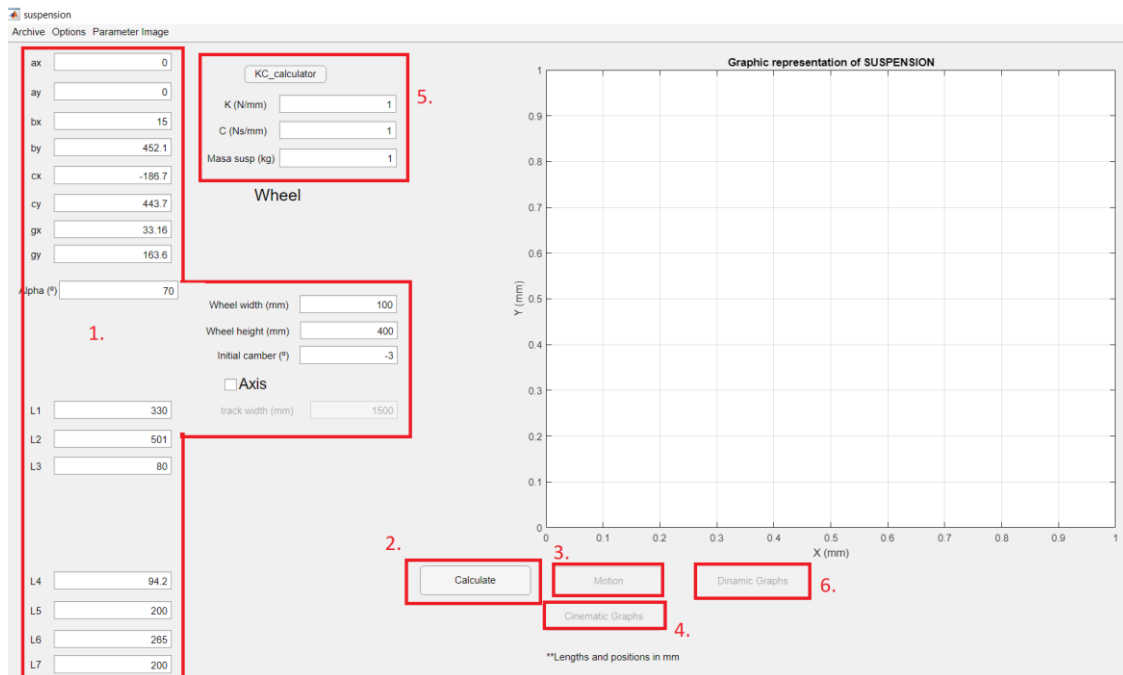


Figura 64. Orden de botones App suspensiones

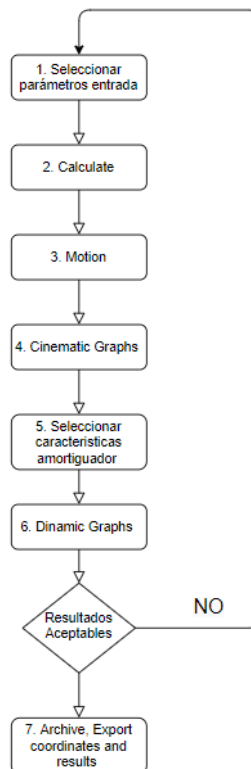


Figura 65. Esquema de trabajo App suspensiones

6.4 VERIFICACIÓN DE APP SUSPENSIÓN

Similarmente a la App Dinámica se debe verificar la correcta elaboración de ecuaciones e implementación dentro de la App.

El primer método para comprobar las ecuaciones cinemáticas se lleva a cabo mediante un croquis de Solidworks como el representado en la Figura 66. De esta manera, dando valores fijos, se podía comprobar que los ángulos y coordenadas de los puntos coincidían con los calculados mediante las ecuaciones.

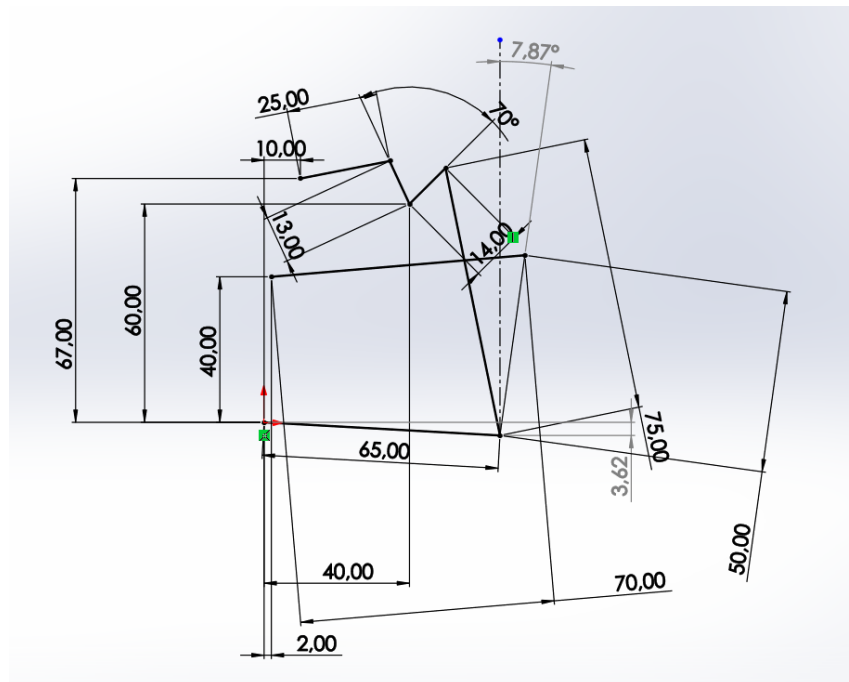


Figura 66. Croquis de verificación suspensión

Aun con este método se quiere proponer un método más elaborado, por lo que se va a implementar una simulación en Ansys con Rigid Dynamics.

Para dicha simulación los pasos son similares al modelo creado en Ansys que verifica la App dinámica. La principal diferencia es la generación de una geometría más compleja y

una mayor cantidad de condiciones de contorno. Los pasos son la elaboración de la geometría, implementación de condiciones de contorno y resultados.

6.4.1 GEOMETRÍA

Para crear el modelo de esta App se debe reproducir una geometría idéntica a la suspensión propuesta en la App. Esto conlleva un Assembly de varias piezas, por lo que el módulo de geometría de Ansys Spaceclaim no es la herramienta idónea para esta geometría. Se hace uso del software Solidworks.

El modelo CAD está compuesto por 3 geometrías principales:

- Plataforma de chasis, se necesita una geometría para acomodar los puntos de anclaje de la suspensión.
- Barras de suspensión, se creará un modelo de barra paramétrico que permita después crear las distintas barras de la suspensión con sus longitudes.
- Rocker, el balancín de la geometría de suspensión pushrod.

Con estos tres modelos se puede generar un Assembly que reproduzca la geometría de la App suspensiones para poder exportarla en extensión “.step” y después crear el modelo de Ansys.

Una consideración importante en el diseño de estas piezas es el estudio de la versatilidad de elaborar la geometría de suspensión con Ansys para poder demostrar que la creación de una App era más efectiva. Por ello, se han parametrizado las piezas para que sea lo más rápido posible acomodar una nueva geometría y cargarla a Ansys en el menor tiempo posible.

6.4.1.1 Plataforma de chasis

Debido a que es un modelo de verificación y estudio, debe ser una pieza que únicamente tenga los enganches en la posición correcta, así como una superficie que pueda ser anclada al espacio fijo en Rigid Dynamics.

Por ello, es una plancha que contiene agujeros en los anclajes y la situación geométrica de estos agujeros está parametrizada para cambiar sus posiciones. Los parámetros que incluye dicha pieza son las coordenadas de los puntos “b”, “c” y “g”. El punto “a” queda definido como eje de coordenadas por lo que se sitúa en el 0,0 y las coordenadas de los otros puntos están referenciados al mismo. Se puede observar la geometría y los parámetros en la Figura 67.

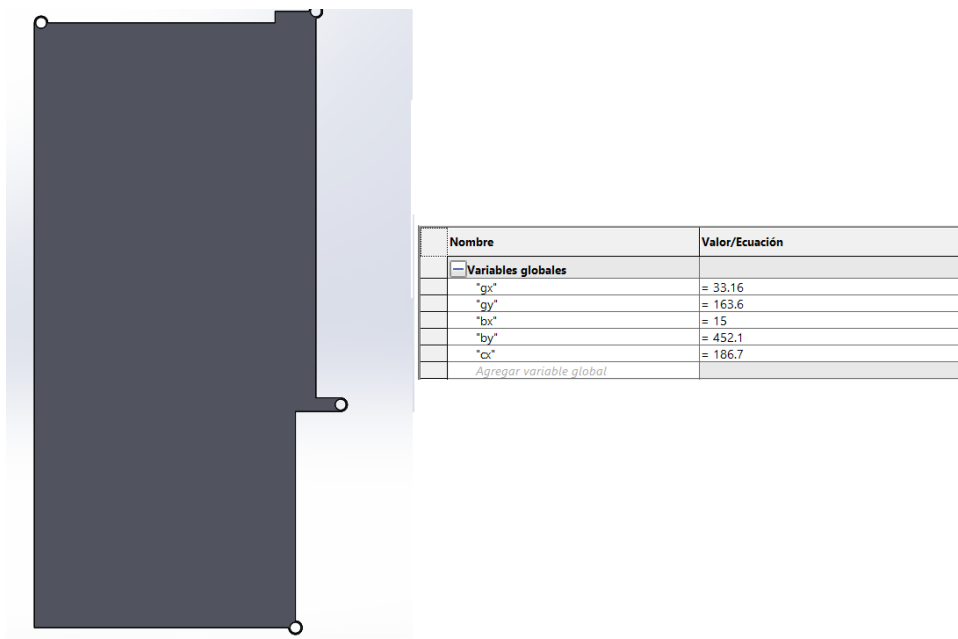


Figura 67. Placa anclajes Chasis

6.4.1.2 Rocker

Esta pieza de manera simplificada se ha considerado un triángulo con 3 agujeros que posicionan el anclaje con el chasis, el amortiguador y la pushrod. Por ello tiene los parámetros L4, L3 y α . Se puede observar la geometría y los parámetros en la Figura 68 .

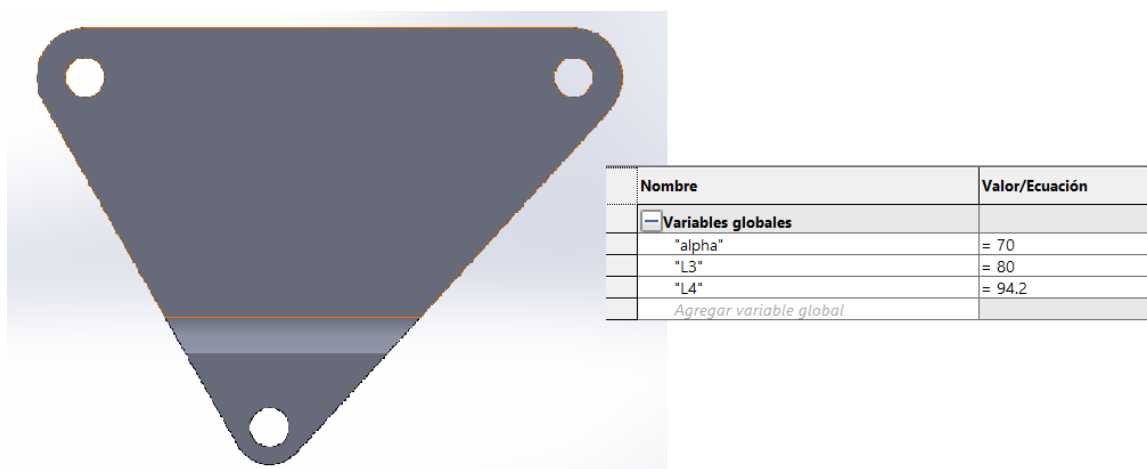


Figura 68. Rocker

6.4.1.3 Barras

Es la pieza más simple, pero representa al mayor número de piezas de la suspensión. Queda parametrizada la longitud de dicha barra para poder crear las barras necesarias con sus longitudes correspondientes. Se observa la geometría y parámetros en la Figura 69.

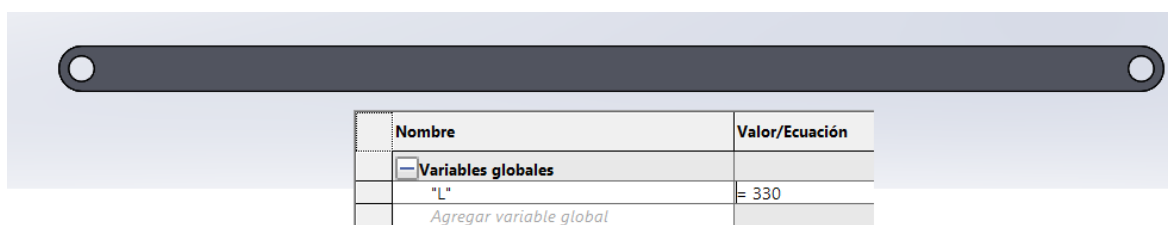


Figura 69. Barra

6.4.1.4 Assembly

Una vez generadas todas las piezas, se unen mediante constraints en un product de Solidworks. De esta manera se puede acceder a las piezas desde éste y cambiar los parámetros para actualizar la geometría. Posteriormente se guarda en “.step”. El assembly se puede observar en la Figura 70.

La barra del amortiguador existe para colocar en la posición extendida la suspensión al entrar en Ansys. Una vez en Ansys se sustituirá por un amortiguador. Se puede ver

interferencia entre la pushrod y el triángulo superior. Esta interferencia no es un problema ya que en Ansys, si no se define contacto entre ellas, el programa entiende que son elementos separados que no colisionan entre sí.

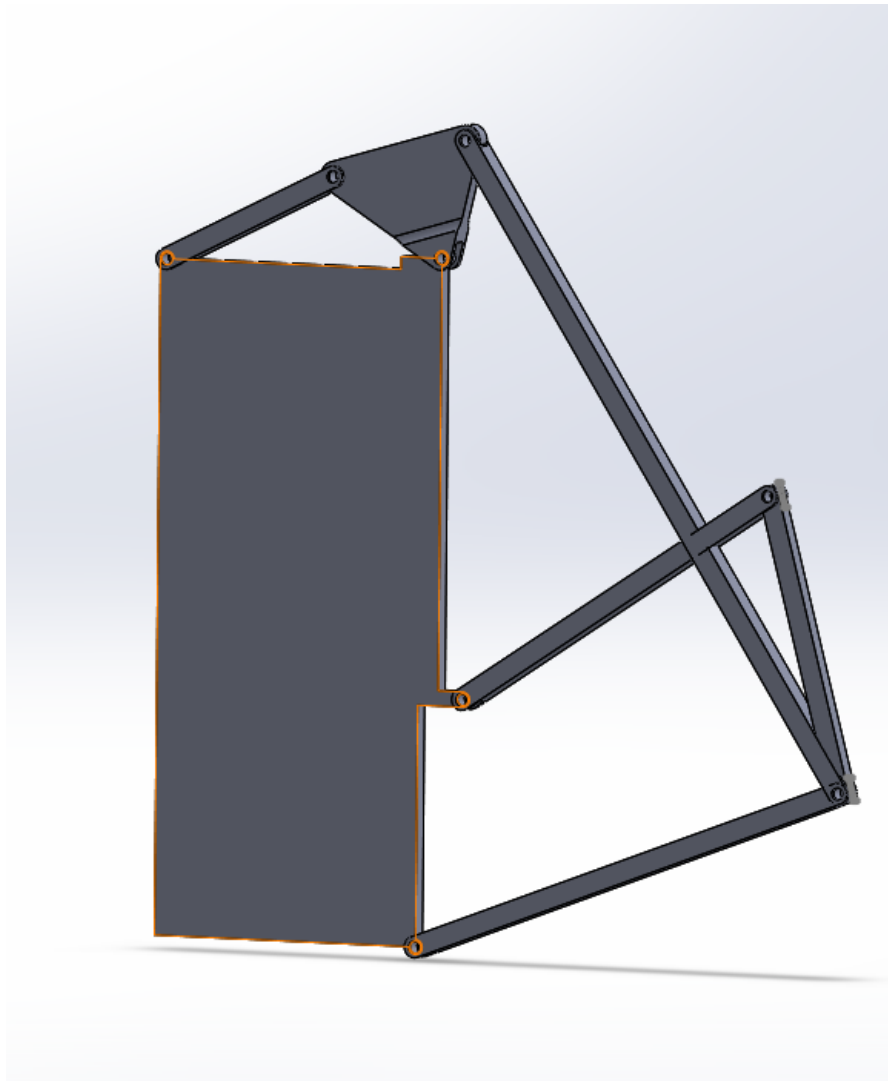


Figura 70. Assembly suspensión

6.4.2 CONDICIONES DE CONTORNO

En este apartado se va a describir cómo se genera el modelo de Ansys en Rigid Dynamics para simular la suspensión.

En Rigid Dynamics es necesario establecer las uniones entre elementos mediante Joints. Al ser un modelo de movimiento en 2D se selecciona la Revolute Joint como elemento de unión entre elementos. Se suprime en la simulación la barra que equivale al amortiguador para colocar un Spring en el que se le puede especificar la rigidez y amortiguamiento, igual que en el modelo de Quarter-Car. En el caso de la placa de anclajes se selecciona una Fixed Body-Ground para poder anclar al mundo el sistema de suspensión.

Para establecer el mismo movimiento que se genera en la App en el Ansys colocamos un remote displacement en el punto D y desplazamos el punto 50 mm hacia arriba. De esta manera hemos definido el modelo de la suspensión completamente. El árbol del modelo se puede observar en la Figura 71.

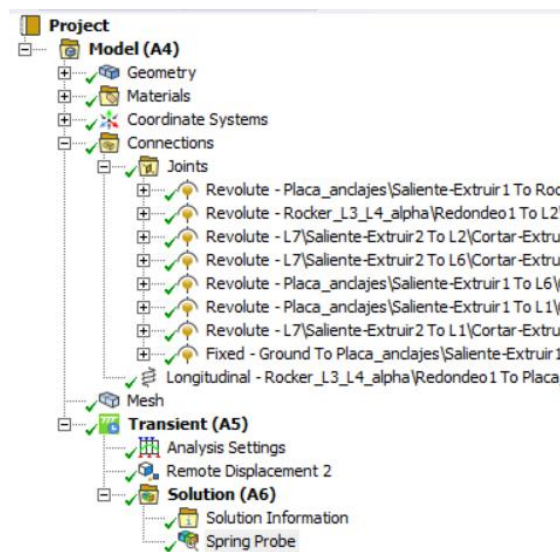


Figura 71. Árbol Ansys simulación suspensión

El postprocesado de esta simulación es sencillo. Debido a que el resultado de la ecuación dinámica depende del resultado cinemático comprobar la función de fuerza según desplazamiento verifica todos los pasos anteriores y por lo tanto la App completa.

6.4.3 RESULTADOS

Se pueden observar los resultados de la simulación en la Figura 72. Se debe tener en cuenta que la fuerza que calcula Ansys tiene el criterio de signos contrario que la App, por lo que al exportar la gráfica de fuerza se debe cambiar de signo para poder comprobar las soluciones.

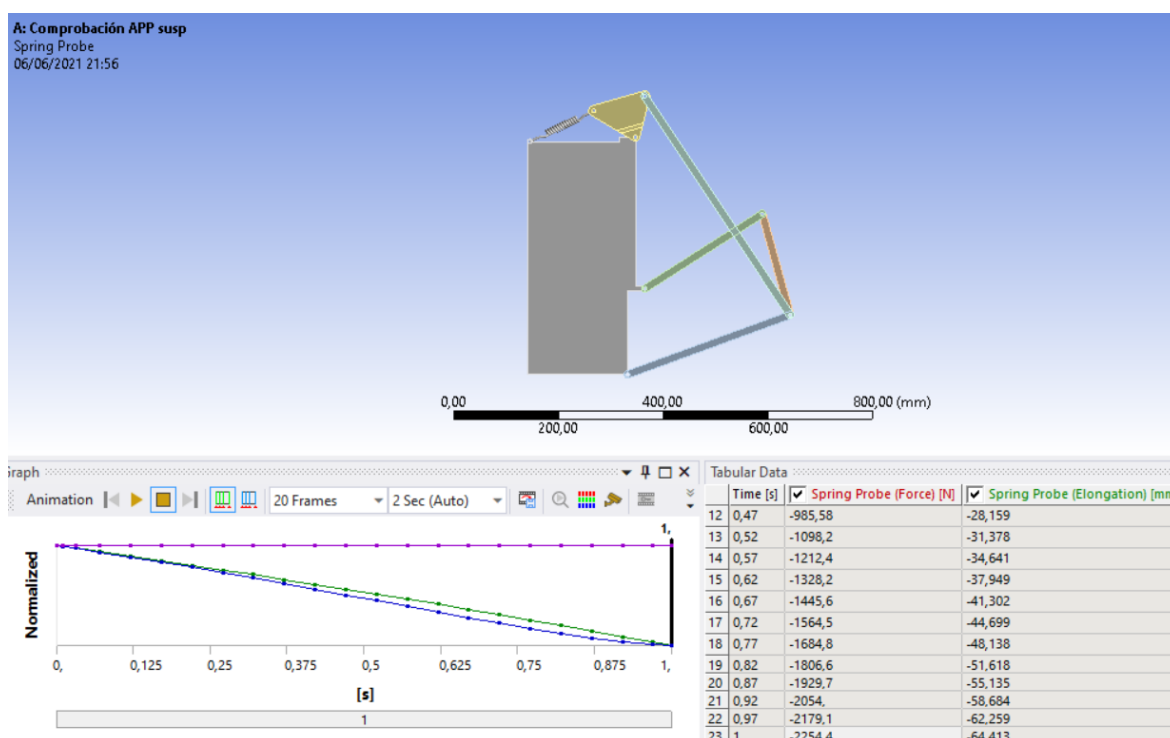


Figura 72. Resultados simulación Ansys suspensiones

Una vez postprocesados ambos resultados se cargan a un script de Matlab para poder crear una figura conjunta y observar si tienen los mismos resultados. En la Figura 73 se observa que los resultados coinciden, por lo que queda verificada la App.

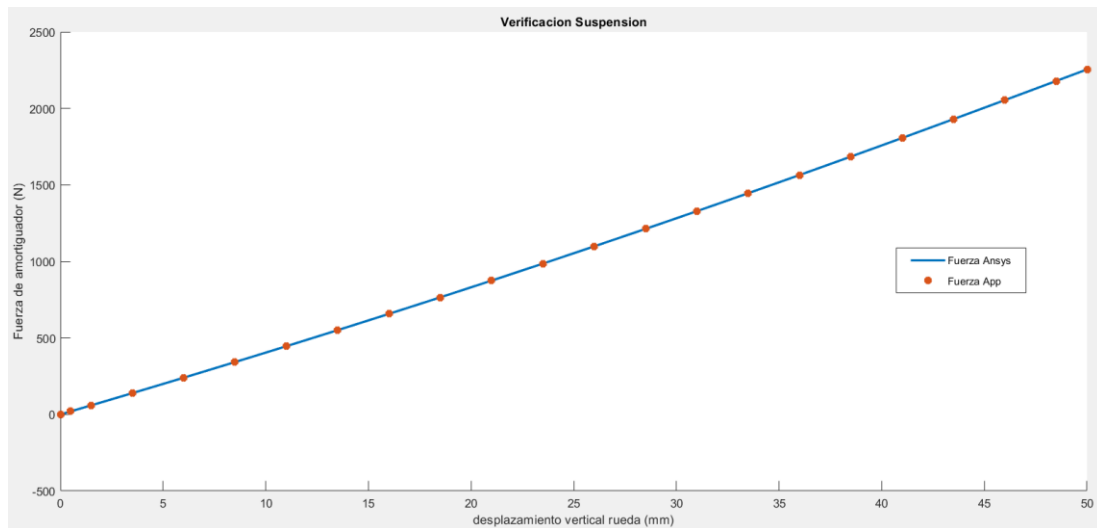


Figura 73. Resultados App suspensiones

En cuanto al estudio de si compensa el uso de Ansys para el diseño de la suspensión se concluye que es un método ineficiente ya que cada cambio de geometría obliga a entrar en Solidworks para ejecutar los cambios y producir un “.step”. Al cargar esta nueva geometría las condiciones de contorno se rompen, por lo que se tiene que volver a configurar el modelo en cada intento. Si se cuenta con todo el proceso se estima que como mínimo llevaría 15 minutos tener los resultados por este método, mientras que con la App un cambio de parámetros lleva menos de un minuto.

Capítulo 7. CREACIÓN DE APP POSTPROCESADO

SENSORES

En este capítulo se va a documentar el diseño de la App Postprocesado Sensores. Está dividido según los apartados descritos en 4.3.3.

7.1 DESCRIPCIÓN DE LA APP POSTPROCESADO SENSORES

En el Formula Student se valora muy positivamente ser capaz de recabar datos mediante sensores y de interpretar los datos para mejorar los siguientes modelos de vehículos y validar los modelos de cálculo. Para ello, se necesita recabar información mediante un sistema de adquisición de datos y hacer un postprocesado correcto para poder interpretarlos. Mediante esta App se pretende acelerar el proceso de postprocesado para la interpretación de los resultados. Se realiza una interfaz en la que cargar los datos recabados y posteriormente extraer de esta información relevante.

En la actualidad el ISC únicamente tiene un sistema de adquisición de datos de la velocidad del vehículo y la posición de los amortiguadores con respecto del tiempo, mediante 4 sensores lineales colocados en paralelo a los amortiguadores. Se pretende dar solución al postprocesado de dichos canales.

En el caso de la velocidad es muy sencillo, ya que únicamente es útil hacer una gráfica de velocidad vs tiempo del ensayo. Esta gráfica es muy útil ya que en las bajadas de velocidad se puede asumir una frenada previa a una curva, por lo que se puede intuir un comportamiento de la suspensión en curva.

Mediante los datos de los sensores lineales se ha establecido que se van a sacar dos conclusiones. La primera es el roll tanto delantero como trasero del vehículo. Gracias a este tratamiento de datos se va a poder observar el roll real en circuito del vehículo para

estudiar si conviene aumentar la rigidez lateral en alguno de los dos ejes para mejorar la dinámica del vehículo.

La segunda conclusión se centra en las fuerzas en las barras de suspensión. Estos datos son interesantes para estimar las fuerzas con mayor exactitud en las barras para optimizar las secciones y conseguir aligerar la masa no suspendida del vehículo y tener la seguridad de que no van a partir.

7.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se van a desarrollar los cálculos efectuados en el postprocesado que ejecuta la App Postprocesado Sensores. Se hace uso de las ecuaciones de cinemática directa de la suspensión, 6.2.2.1, para poder establecer las posiciones de la suspensión en las distintas medidas del sensor lineal con respecto del tiempo. La implementación de dichas ecuaciones ha sido modificada para poder calcularse de manera vectorial para todas las posiciones. Los cálculos añadidos en esta App no explicados con anterioridad son Roll y Fuerzas en la suspensión.

7.2.1 ROLL POSTPROCESADO SENSORES

El cálculo del Roll se realiza una vez se ha conseguido obtener la posición vertical del suelo de cada una de las 4 ruedas mediante las ecuaciones de la cinemática directa. Con estas posiciones y los anchos de vía de ambos ejes es posible calcular el Roll con la siguiente ecuación:

$$Roll = \text{atan} \left(\frac{Suelo y_R - Suelo y_L}{\text{ancho de vía}} \right) \quad [43]$$

Este cálculo, haciendo uso de los datos por separado del eje delantero y trasero se puede calcular y establecer qué rigidez lateral y torsional que posee el vehículo, asesorando para el año siguiente mejoras en las barras de torsión y rigidez torsional del chasis.

7.2.2 FUERZAS EN LA SUSPENSIÓN

Este cálculo consiste en obtener las ecuaciones dinámicas de una geometría de suspensión. Para ello es necesario tener todos los parámetros de caracterización de una suspensión y las características elástica y viscosa de los amortiguadores.

El primer paso es recabar los datos de posición de los sensores lineales y derivarlos para obtener la velocidad de los amortiguadores. Esto es posible hacerlo de manera numérica en Matlab y conociendo el tiempo de muestreo del sistema de adquisición de datos.

Una vez se obtienen la posición y velocidad, se puede establecer que fuerza ejerce el amortiguador con sus características en cada posición.

$$F_{amor} = K_{amor} * pos_{amor} + C_{amor} * vel_{amor} \quad [44]$$

Posteriormente, haciendo uso de la cinemática y las ecuaciones estáticas, se puede transmitir dicha fuerza por los distintos elementos. Esta distribución se encuentra en la Figura 74 y en la Figura 75.

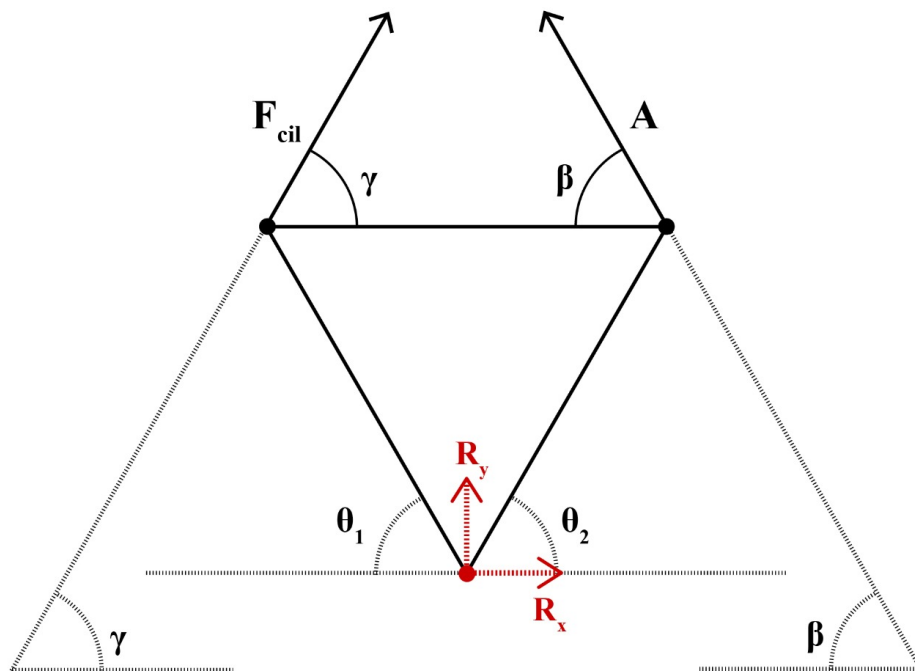


Figura 74. Croquis fuerzas en el Rocker

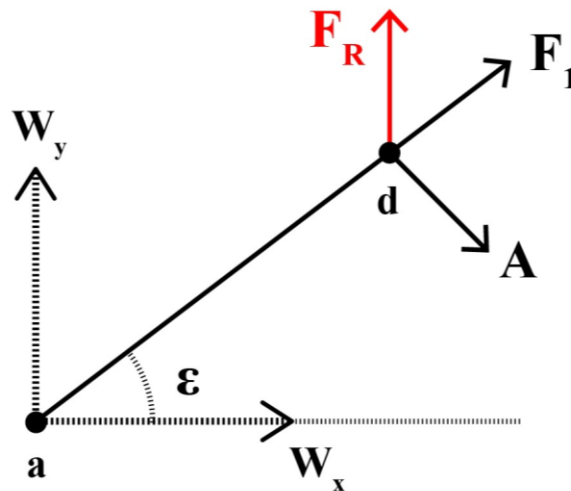


Figura 75. Croquis fuerzas en el triángulo inferior

Las ecuaciones dinámicas son las siguientes:

$$\tan \gamma = \frac{f_y - c_y}{f_x - c_x} \quad [45]$$

$$\tan \beta = \frac{e_y - d_y}{d_x - e_x} \quad [46]$$

$$A = \frac{F_{cil} * (\sin \gamma * \cos \theta_1 * L_4 + \sin \theta_1 * \cos \gamma * L_4)}{(\sin \beta * \cos \theta_2 * L_3 + \sin \theta_2 * \cos \beta * L_3)} \quad [47]$$

$$R_y = -F_{cil} * \sin \gamma - A * \sin \beta \quad [48]$$

$$R_x = A * \cos \beta - F_{cil} * \cos \gamma \quad [49]$$

$$F_1 = \frac{A * \cos \beta}{\cos \varepsilon} \quad [50]$$

$$F_r = A * \sin \beta - F_1 * \sin \varepsilon \quad [51]$$

7.3 IMPLEMENTACIÓN EN APPDESIGNER

En esta sección se describe el diseño de la App Postprocesado Sensores en Appdesigner. Se usa el mismo esquema de las anteriores Apps y únicamente se resaltan las nuevas herramientas que se hayan usado en esta App.

7.3.1 ESQUEMA DE LA APP

En esta App se deben añadir bastantes datos externos, por lo que la estructura está diseñada para recibir prácticamente todos los inputs mediante archivos externos que se concretarán en los siguientes apartados. De esta manera, la App únicamente se encarga de lectura y postratamiento de cálculos con los datos de dicha lectura. Posteriormente, se comunican dichos resultados por las distintas ventanas para poder mostrar los resultados del postprocesado de manera cómoda para su interpretación por parte del usuario. El esquema de esta App se puede observar en la Figura 76. En esta App existen 3 Apps internas para poder mostrar todos los resultados por lo que existirán 3 apartados de Front-end.

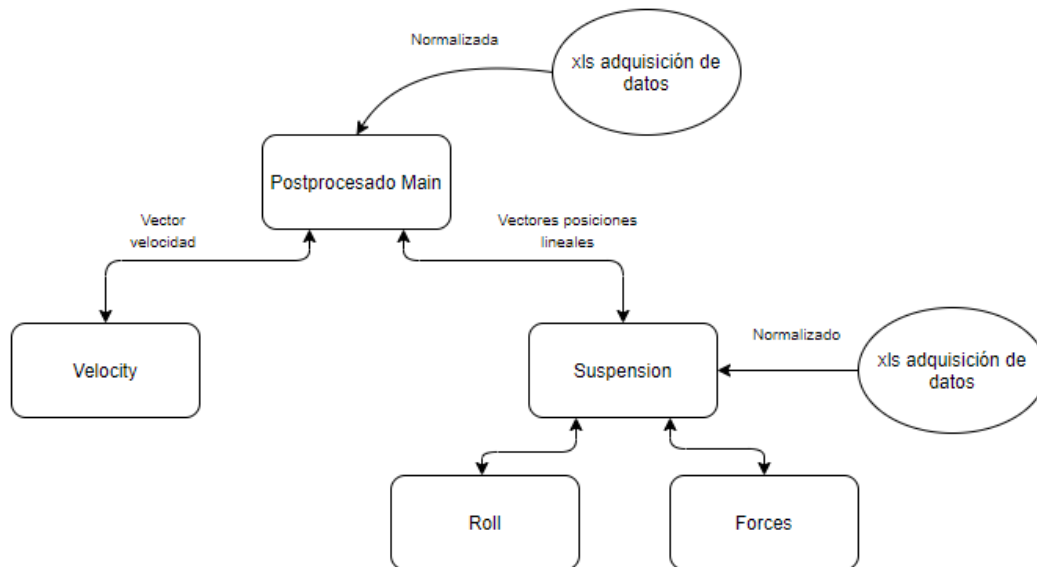
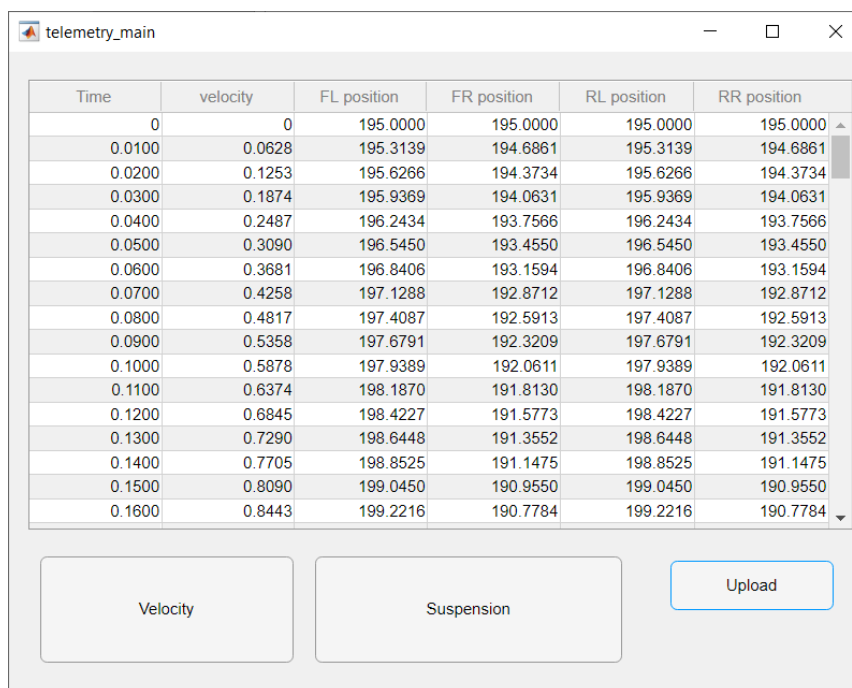


Figura 76. Estructura App Postprocesado Sensores

7.3.2 POSTPROCESADO MAIN FRONT-END

Esta App es la ventana principal y es la encargada de la lectura de los datos de adquisición de datos, así como de guardarlos en los vectores correctos para comunicarlos al resto de las Apps. Una característica especial de los datos de entrada es que según lo que dure el ensayo que se quiera analizar se encontrarán archivos con longitudes de vectores variables, por lo que se debía encontrar un método de lectura acorde con dicha característica. Este comando es “readtable()”, el cual es capaz de interpretar una tabla en Excel y establecer una matriz de los datos de dicho Excel. De esta manera se puede mostrar la tabla en la App para que el usuario verifique que ha cargado los datos correctamente antes de pasar a las siguientes Apps. Esto se puede observar en la Figura 77.



Time	velocity	FL position	FR position	RL position	RR position
0	0	195.0000	195.0000	195.0000	195.0000
0.0100	0.0628	195.3139	194.6861	195.3139	194.6861
0.0200	0.1253	195.6266	194.3734	195.6266	194.3734
0.0300	0.1874	195.9369	194.0631	195.9369	194.0631
0.0400	0.2487	196.2434	193.7566	196.2434	193.7566
0.0500	0.3090	196.5450	193.4550	196.5450	193.4550
0.0600	0.3681	196.8406	193.1594	196.8406	193.1594
0.0700	0.4258	197.1288	192.8712	197.1288	192.8712
0.0800	0.4817	197.4087	192.5913	197.4087	192.5913
0.0900	0.5358	197.6791	192.3209	197.6791	192.3209
0.1000	0.5878	197.9389	192.0611	197.9389	192.0611
0.1100	0.6374	198.1870	191.8130	198.1870	191.8130
0.1200	0.6845	198.4227	191.5773	198.4227	191.5773
0.1300	0.7290	198.6448	191.3552	198.6448	191.3552
0.1400	0.7705	198.8525	191.1475	198.8525	191.1475
0.1500	0.8090	199.0450	190.9550	199.0450	190.9550
0.1600	0.8443	199.2216	190.7784	199.2216	190.7784

Velocity Suspension Upload

Figura 77.Front-end de Telemetry main

Mediante el botón “Upload” se puede seleccionar el archivo de Excel que se pretende cargar. Se dispondrá de una plantilla de Excel sencilla para colocar los datos en la que se debe colocar los vectores de la adquisición de datos en el orden en el que se puede observar en la Figura 77.

Posteriormente, el usuario puede optar por navegar a la App Velocity o Suspension.

7.3.3 VELOCITY FRONT-END

Esta App se encarga de coger el vector tiempo y velocidad del vehículo y representarlo para observar en qué tiempos han ocurrido las curvas. Dispone de un botón de Home para poder volver a la App Telemetry Main. Se puede observar el Front-end en la

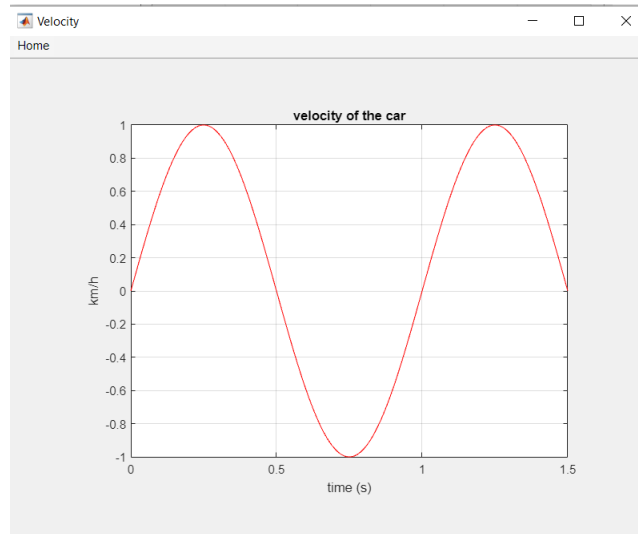


Figura 78.Front-end de Velocity

7.3.4 SUSPENSION FRONT-END

Esta es la App que más relevancia y mayor postprocesado genera en la App Postprocesado Sensores. Tiene la misma estructura que las App de dinámica y suspensión, ya que se dividirá su información en gestión de entradas, cinta de herramientas y visualización de salidas. Se puede observar la división en la Figura 79.

En cuanto a la visualización de salidas, se ha incluido una selección mediante cajas para poder seleccionar de que ruedas se representan las gráficas de posición de amortiguador. Pudiendo ser FL (Front Left), FR (Front right), RL (Rear Left) y RR (Rear Right). Para poder efectuar dicha selección se ha tenido que asignar una variable a cada estado de las cajas y mediante condicionales establecer que plots se deben hacer.

La gestión de entradas consiste en cargar las geometrías de suspensión de un Excel, tanto la delantera como la trasera. De ser iguales, se puede cargar el mismo Excel en ambas casillas. Se dejará a disposición un Excel como plantilla, pero dicho Excel es el exportado de la App de suspensión, de esta manera se puede enlazar el trabajo de ambas Apps de manera fluida. Para poder calcular el Roll del vehículo es necesario especificar el ancho de vía delantero y trasero mediante inputs numéricos.

La cinta de herramientas en este caso alberga la mayor información de esta App. En ella se encuentra el botón “Home” para poder volver a la pantalla principal de la App. También se encuentra el botón “Archivo”, que como en las anteriores aplicaciones se exportan los resultados postprocesados de la App por si el usuario desea tratarlos de manera distinta a los que recoge la App. Estos son los resultados de Roll, posición del suelo y fuerzas en las barras de suspensión. Se pueden observar que los botones de Roll y las ruedas se encuentran desactivados en la Figura 79. Esto se debe a que hasta que no se han cargado los parámetros de la suspensión permanecen desactivados. Si se pulsan los botones de Roll se muestra una figura de Matlab con el Roll con respecto al tiempo en radianes, mientras que si se pulsa el botón de cualquiera de las ruedas se muestra en pantalla un paquete de figuras de Matlab con el movimiento del suelo, la fuerza del amortiguador, la fuerza en la pushrod y la fuerza en el triángulo inferior de dicha rueda.

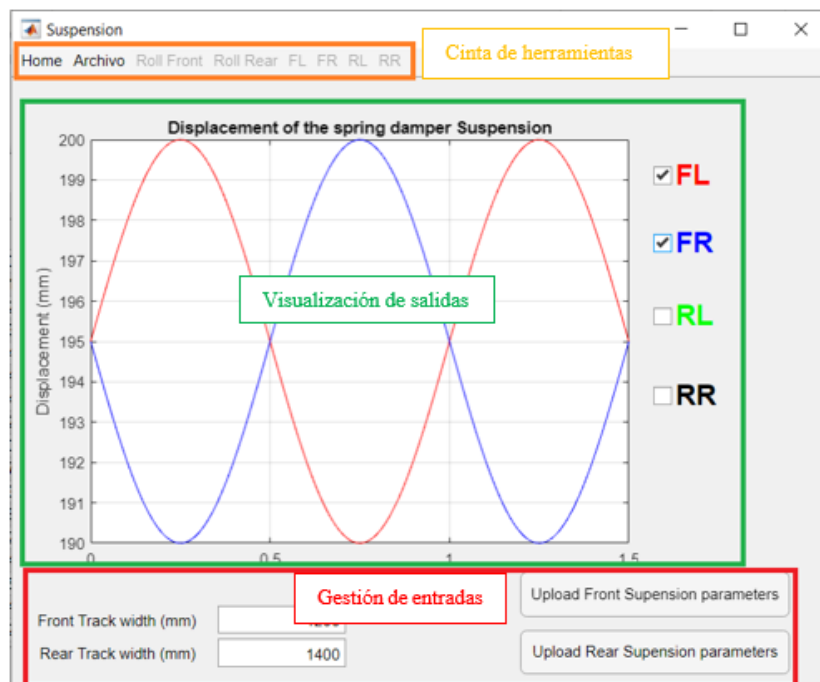


Figura 79. Front-end Suspension Telemetry

7.4 VERIFICACIÓN DE APP ADQUISICIÓN

En este apartado se pretende verificar que las ecuaciones dinámicas elaboradas para la App Postprocesado Sensores son correctas. Para ello se pretende hacer uso de una herramienta distinta, que como en las Apps anteriores viene siendo Ansys.

Para poder comprobar las ecuaciones se necesita tener un modelo de geometría que poder cargar en un módulo de Rigid Dynamics, Figura 80. Se hace uso del assembly del apartado 6.4.1 para este modelo.

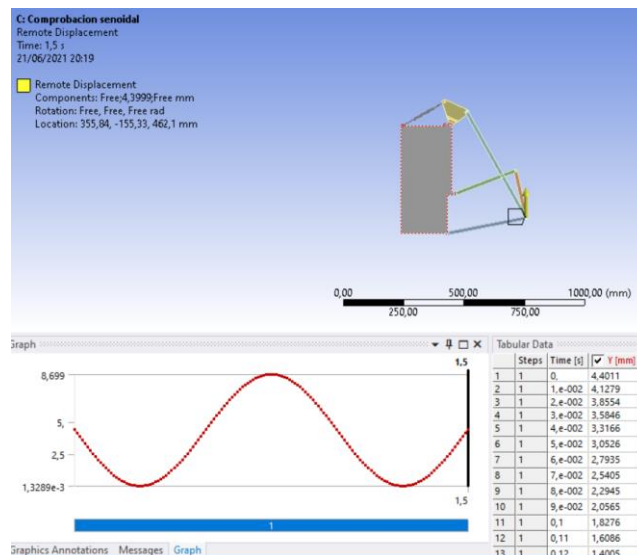


Figura 80. Modelo Rigid Dynamic Postprocesado Sensores

La verificación consiste en introducir una senoidal como entrada de movimiento del amortiguador y simular mediante la App los resultados de dicha senoidal. Posteriormente extraer el movimiento del suelo para esta simulación e introducirlo como entrada tabular en el modelo de Rigid Dynamics generado en 6.4.2. De esta manera se puede ejecutar el modelo de Ansys y se extraen todos los resultados de fuerza y se contrastan con los resultados de fuerza de la App. La senoidal de entrada en el suelo es la siguiente:

$$Long_{amor}(mm) = 195 + 5 * \sin (2 * \pi + time) \quad [52]$$

Los resultados de fuerza de ambos programas se pueden observar de la Figura 81 a la Figura 84. Con estas figuras se valida el funcionamiento de la App Postprocesado Sensores.

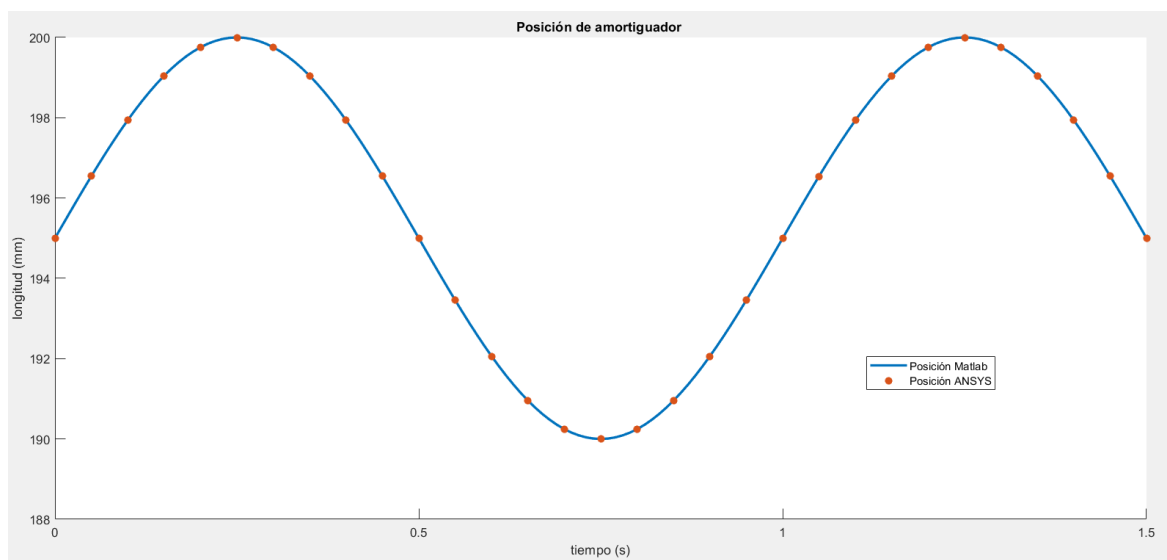


Figura 81. Resultados de posición amortiguador

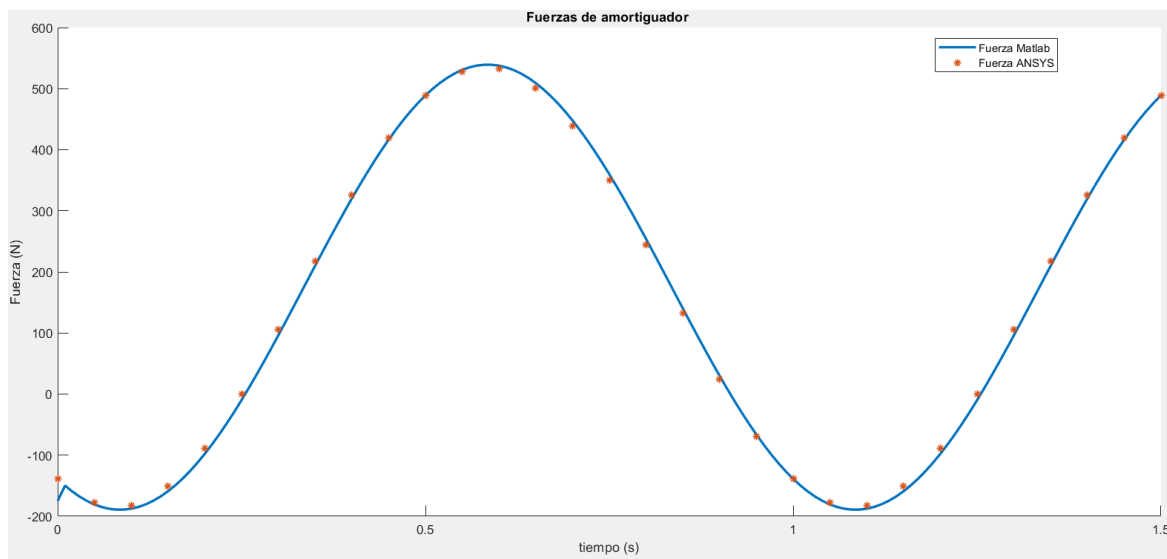


Figura 82. Resultados de fuerzas amortiguador

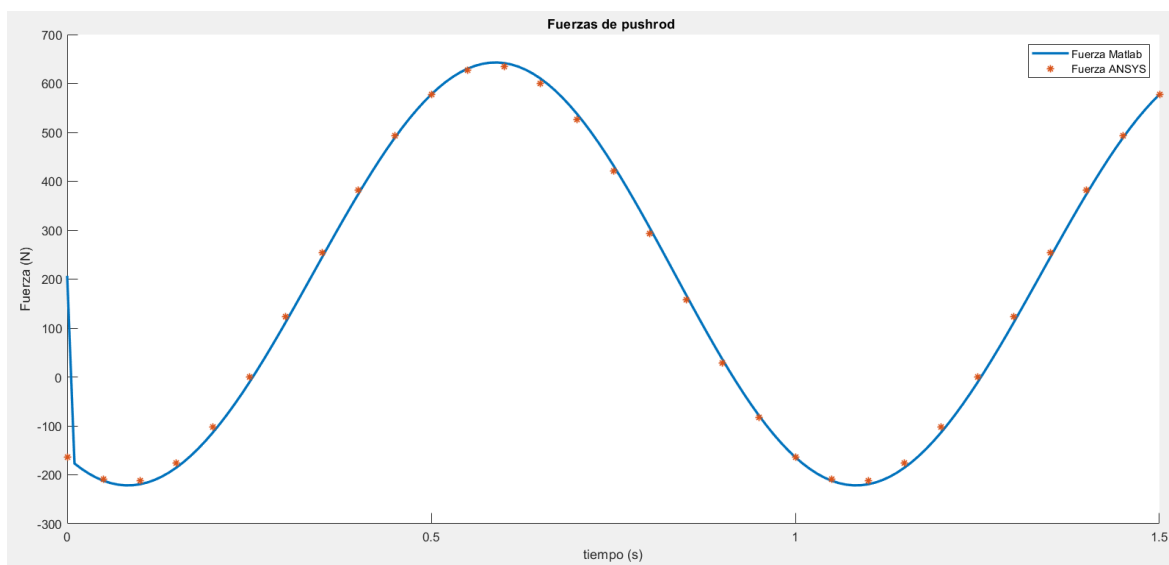


Figura 83. Resultados de fuerzas de pushrod

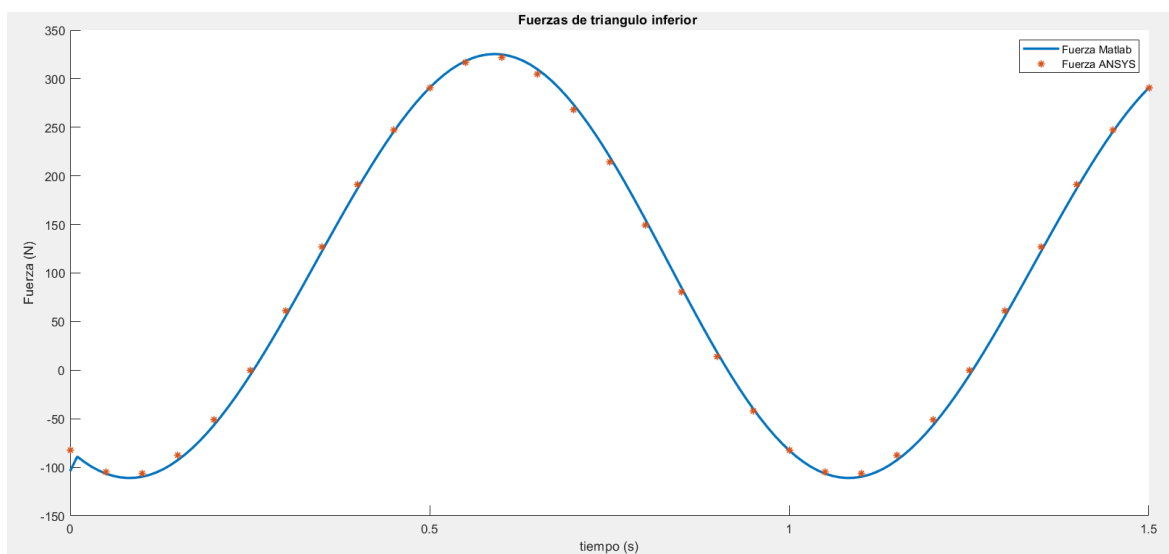


Figura 84. Resultados de fuerzas triangulo inferior.

Capítulo 8. CASO DE ESTUDIO

En este Capítulo se va a exponer un estudio del vehículo IFS-03 del equipo ISC. La finalidad de dicho estudio es poder hacer uso de las Apps para asesorar el diseño y demostrar la utilidad que tienen. Debido a que el objetivo principal del proyecto es la creación de las Apps, este capítulo no entrará en excesivo detalle sobre el estudio del vehículo y sus posibles mejoras.

8.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN POR PARTE DEL ISC

En este apartado se documentan los parámetros proporcionados por el equipo del ISC del diseño actual del vehículo para poder usar las tres Apps creadas. En el caso de la App dinámica y la App de suspensión se ha podido acceder a prácticamente todos los parámetros necesarios para hacer el estudio. Para la App Postprocesado Sensores no se dispone de datos ya que no se ha conseguido elaborar una adquisición de datos de ningún vehículo del ISC por lo que no se podrá elaborar un estudio y se tendrá que esperar a recabar datos en el final de esta temporada posterior a la redacción de la memoria.

8.1.1 QUARTER CAR

Los parámetros requeridos para el modelo del Quarter-Car fueron proporcionados por el ISC ya que tienen identificada la masa total del vehículo y se estima un piloto de 68 kg. Con esto se puede sacar la masa suspendida en carrera y mediante los planos del vehículo se puede conseguir la masa no suspendida. Los parámetros del vehículo son los representados en la Tabla 11.

Sprung Mass (kg)	183+68=251
Unsprung Mass (kg)	32
Spring Stiffness (N/mm)	140
Damping (%cc)	54
Damping (Ns/mm)	6,402
Tire Stiffness (N/m)	1,60E+06
Resting unsprung pos (cm)	14,8
Resting sprung pos (cm)	29,7

Tabla 11. Parámetros Quarter-Car ISC

La rigidez se obtiene mediante 4 amortiguadores con 35 kN/mm. Antes de introducir los resultados en el modelo para establecer simulaciones se va a hacer un estudio previo de la caída estática y de la frecuencia natural del sistema. Los vehículos de competición suelen tener frecuencias naturales altas, ya que se tiende a suspensiones duras que en casos de aceleración y frenada tienen mejor comportamiento pese a que se comporte mal a grandes perturbaciones del terreno ya que no las hay. En los F1 se suele buscar una frecuencia natural en torno a 4-4.5 Hz. En este caso obtenemos la frecuencia natural de la fórmula 53. Esta frecuencia natural es algo baja y se estima que puede darse por una estimación incorrecta de la masa total del vehículo o que no se incluyó al piloto para dicho diseño ya que al contar con el piloto quedaría la frecuencia natural de la fórmula 54.

$$f_{n_{SM}} = \frac{\sqrt{\frac{K_{rueda} * K_{amor}}{K_{rueda} + K_{amor}}}}{\frac{M_{SM}}{2 * \pi}} = 3.604 \text{ Hz} \quad [53]$$

$$f_{n_{SM-sin\text{piloto}}} = \frac{\sqrt{\frac{K_{rueda} * K_{amor}}{K_{rueda} + K_{amor}}}}{\frac{M_{SM-sin\text{piloto}}}{2 * \pi}} = 4.22 \text{ Hz} \quad [54]$$

Quizás para futuras ediciones, si no se estima una reducción de peso, se deberían poner muelles con mayor rigidez.

Observando la masa no suspendida, ésta representa un 13% del peso del vehículo sin piloto y se estudiará el efecto de conseguir reducir dicha masa.

Se elaborará una simulación en el que observaremos la caída estática del vehículo para tener una primera aproximación para el ground clearance. Posteriormente se excitarán ante escalones y se observará la respuesta del sistema para la rigidez actual y observar la diferencia ante una suspensión más blanda. Finalmente se observará la mejora dinámica de la reducción de 2 kg en la masa suspendida y la reducción de 2 kg en la masa suspendida.

8.1.1.1 Ground clearance

Se puede observar en la Figura 85 que la caída estática de la masa suspendida es de 19.7 mm, por lo que se puede estimar con respecto a la posición extendida cuanto bajará el chasis en estático. Falta añadir la corrección por la no linealidad que aporta la progresión de la geometría de suspensión.

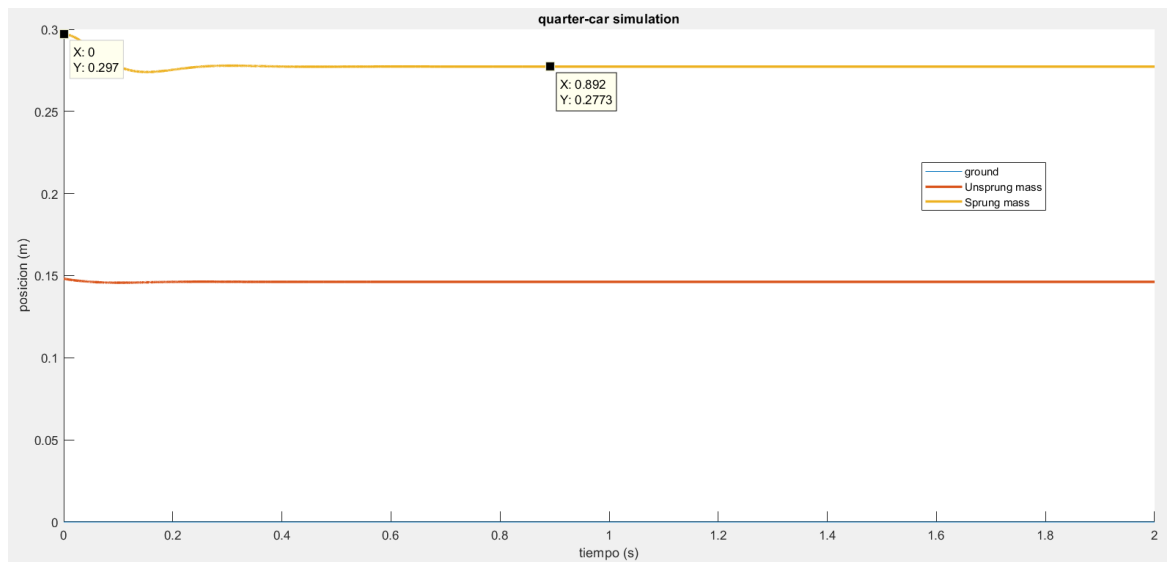


Figura 85.Caída estática IFS-03

8.1.1.2 Comportamiento ante perturbación

Se ha decidido una perturbación de 25mm de amplitud de perturbación cuadrada. Se va a mantener durante 0.3s en dicha amplitud para observar la atenuación del sistema de

suspensión. Se calcula una propuesta de suspensión con 2,5Hz de frecuencia natural más típica de vehículos turismo y se ajusta al mismo porcentaje de amortiguamiento crítico, quedando una rigidez de 64,425.5 N/mm y un amortiguamiento de 4,34 Ns/mm.

Se puede observar en la Figura 86 que la suspensión del ISC es más incómoda para el piloto, ya que tiene mayor pendiente el desplazamiento de la masa suspendida, pero la masa no suspendida tarda menos tiempo en atenuar el movimiento, lo que mejora la adherencia del neumático.

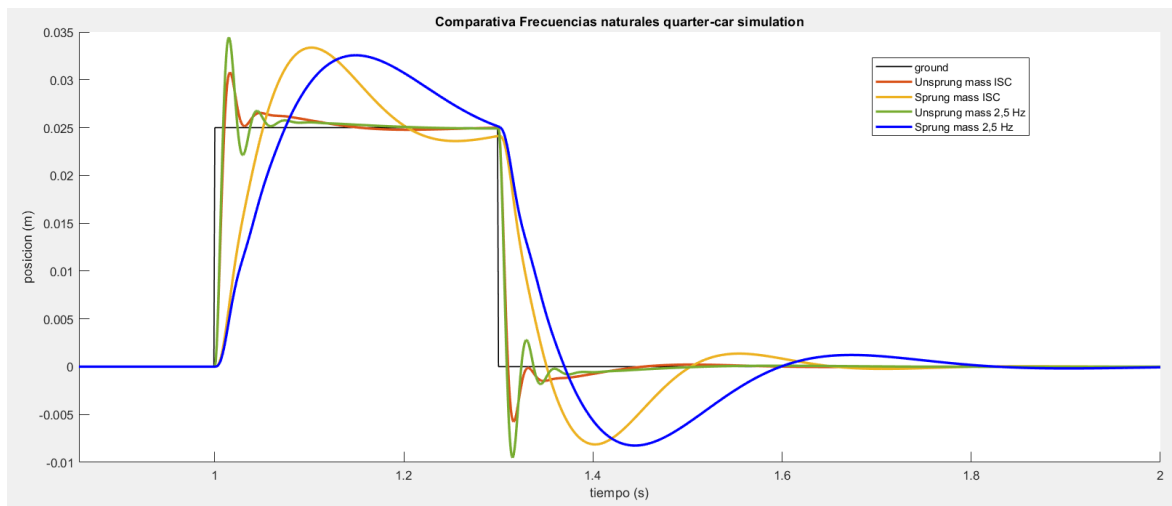


Figura 86. Comparativa Frecuencias naturales ISC

8.1.1.3 Reducción de masa no suspendida

Tomando como referencia la perturbación del apartado anterior y la suspensión original del ISC se observará el impacto en la simulación una reducción de 10 kg de peso en la masa suspendida o en la masa no suspendida.

Los resultados son los expresados en las Figura 87 y Figura 88. Se observa que en el caso de la reducción de 10 kg de peso de la masa suspendida no tiene ninguna mejora apreciable a nivel de agarre en una perturbación del terreno, mientras que conseguir 10 kg en la masa no suspendida sí que tiene un efecto grande, principalmente en su movimiento de la masa no suspendida. Esto demuestra que es más importante concentrarse en la reducción de peso de estos elementos.

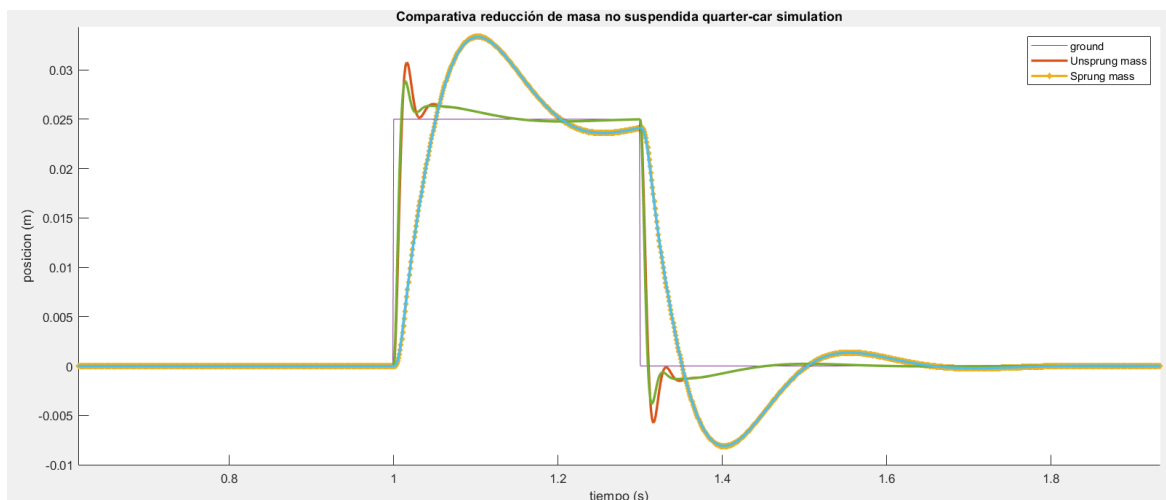


Figura 87. Comparativa reducción de masa no suspendida

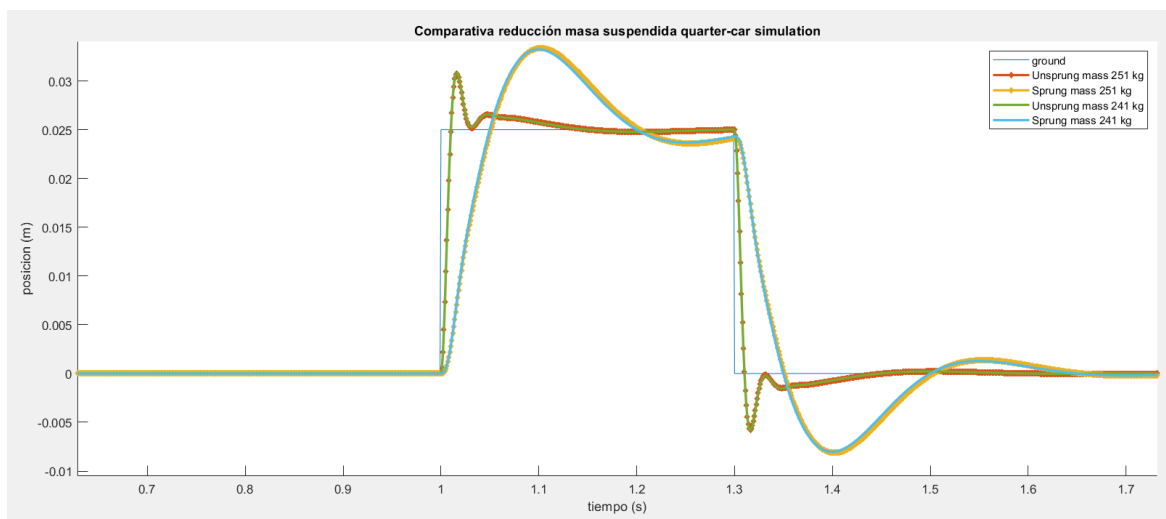


Figura 88. Comparativa reducción de masa suspendida

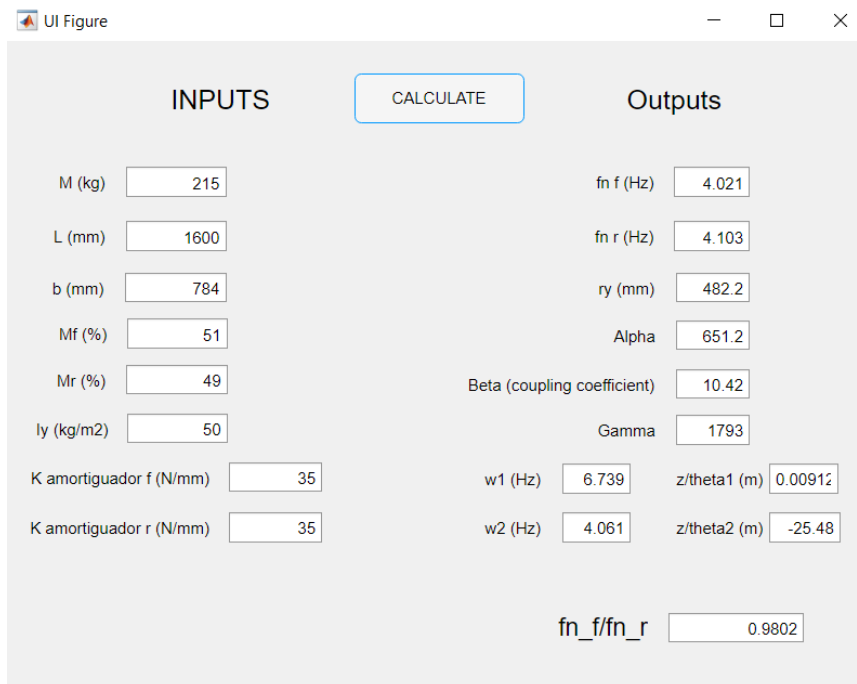
8.1.2 HALF-CAR

En este apartado se desarrolla un pequeño estudio sobre el Half-Car. La intención del diseño es comprobar que el reparto de rigidez de la suspensión es el correcto entre el eje delantero y trasero, también se va a inducir un movimiento de pitch y otro de bounce seleccionando el perfil de suelo adecuado. Para ello es necesario completar los parámetros del vehículo necesarios para simular un Half-Car. Estos parámetros se pueden observar en la Tabla 12. Cabe destacar que todos estos datos fueron proporcionados por el ISC, salvo el momento de inercia del vehículo del cual no tienen realizado el cálculo. Se ha hecho una aproximación a que estaría en torno a 50 kg/m² para poder realizar el estudio del Half-Car. Se puede observar que la decisión del equipo es mantener la misma rigidez tanto en el eje trasero como en el delantero. Dado que la masa total del vehículo parece estar centrada se puede considerar que es una decisión acertada, aunque no la óptima. Como se ha visto en el apartado 5.2.4, conviene tener una mayor frecuencia natural delantera que trasera tanto para la absorción de perturbaciones como para que el vehículo sea intuitivo para el piloto por sus modos de vibración de Pitch y Roll. Por ello, en este apartado se va a analizar la respuesta del modelo del ISC y una propuesta ajustando de manera distinta la rigidez del vehículo.

Sprung mass (kg)	251
Moment of inertia (kg/m ²)	50
Unsprung Front Mass (kg)	16
Unsprung Rear Mass (kg)	16
Front Spring Stiffness (N/mm)	70
Front Damping (Ns/mm)	3,2
Rear Spring Stiffness (N/mm)	70
Rear Damping (Ns/mm)	3,2
Tire Stiffness (N/m)	400000
Resting unsprung pos (cm)	14,8
Resting usprung pos (cm)	29,7
Velocity of the car (km/h)	50
Ground input	TestSequence
Wheelbase (mm)	1600
distance front to cdg (mm)	784
distance rear to cdg (mm)	816
Gravity	OFF
Mf (%)	60
Mr(%)	40
Time simulation (s)	8
Test sine Amplitude (mm)	20
Test Heaviside (mm)	50

Tabla 12. Parámetros Half-Car ISC

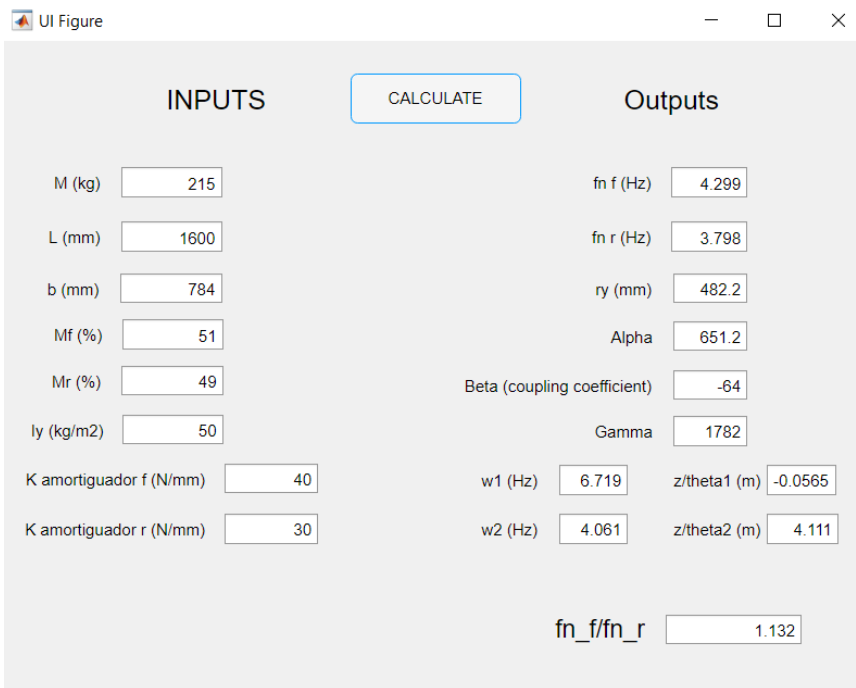
El ajuste de rigidez se elaborará con la pestaña IC Calculator. Se empieza por calcular el estado actual del vehículo del ISC, siendo los resultados la Figura 89. En estos resultados podemos observar que la ratio de frecuencias naturales está ligeramente por debajo de 1 lo cual no es conveniente para el comportamiento dinámico de bounce y pitch.



INPUTS		CALCULATE	Outputs			
M (kg)	215		fn f (Hz)	4.021		
L (mm)	1600		fn r (Hz)	4.103		
b (mm)	784		ry (mm)	482.2		
Mf (%)	51		Alpha	651.2		
Mr (%)	49		Beta (coupling coefficient)	10.42		
Iy (kg/m ²)	50		Gamma	1793		
K amortiguador f (N/mm)	35		w1 (Hz)	6.739	z/theta1 (m)	0.00912
K amortiguador r (N/mm)	35		w2 (Hz)	4.061	z/theta2 (m)	-25.48
			fn_f/fn_r	0.9802		

Figura 89. Resultados de IC ISC

La intención es conseguir una ratio de 1,1 para obtener el efecto dinámico deseado y observar en qué se puede apreciar la diferencia entre la simulación del vehículo y la nueva propuesta. Los resultados de la rigidez propuesta se representan en la Figura 90. Se propone tener 80 N/mm en el eje delantero y 60 N/mm en el eje trasero para conseguir dicha ratio. De esta manera, el centro de rotación del pitch se encuentra ligeramente retrasado con el cdg y el modo bounce a 4 m delante del cdg.



INPUTS		CALCULATE	Outputs	
M (kg)	215		fn f (Hz)	4.299
L (mm)	1600		fn r (Hz)	3.798
b (mm)	784		ry (mm)	482.2
Mf (%)	51		Alpha	651.2
Mr (%)	49		Beta (coupling coefficient)	-64
Iy (kg/m ²)	50		Gamma	1782
K amortiguador f (N/mm)	40		w1 (Hz)	6.719
K amortiguador r (N/mm)	30		z/theta1 (m)	-0.0565
			w2 (Hz)	4.061
			z/theta2 (m)	4.111
			fn_f/fn_r	1.132

Figura 90. Resultados de la propuesta de IC para el ISC

A continuación, se han elaborado las simulaciones y obtenido los resultados de las excitaciones para pitch y las excitaciones para bounce. En el caso de tener una perturbación de periodicidad de la longitud de la batalla ocurriría bounce. En el caso de tener una perturbación del doble de la longitud de la batalla se tendría un movimiento de pitch predominante.

Debido a que los inputs de perturbaciones son temporales se deben transformar las perturbaciones espaciales en temporales. Si el vehículo tiene una velocidad de 50 km/h que son 13.89 m/s un bache de 1600 mm es una señal cuadrada de periodo 0.115 s, mientras que un bache de 2400 mm es una señal cuadrada de periodo 0.23 s.

Los resultados del movimiento de bounce están en la Figura 91 y en la Figura 92.

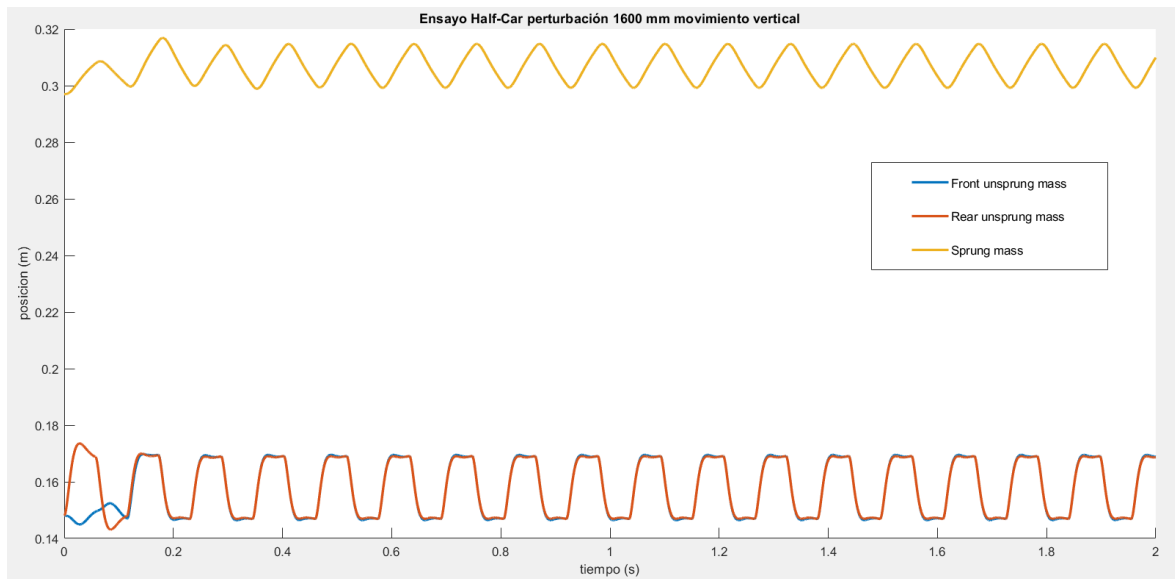


Figura 91. Ensayo Half-Car 1600 mm movimiento vertical

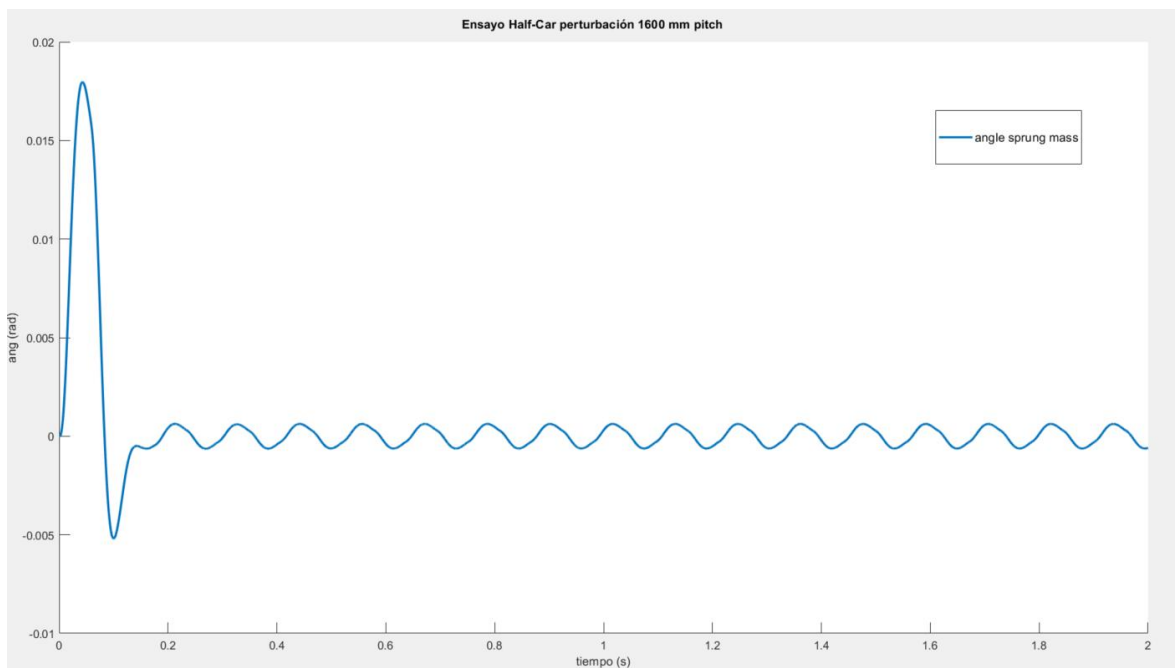


Figura 92. Ensayo Half-Car 1600 mm pitch

Los resultados del movimiento de pitch se encuentran en la Figura 93 y en la Figura 94.

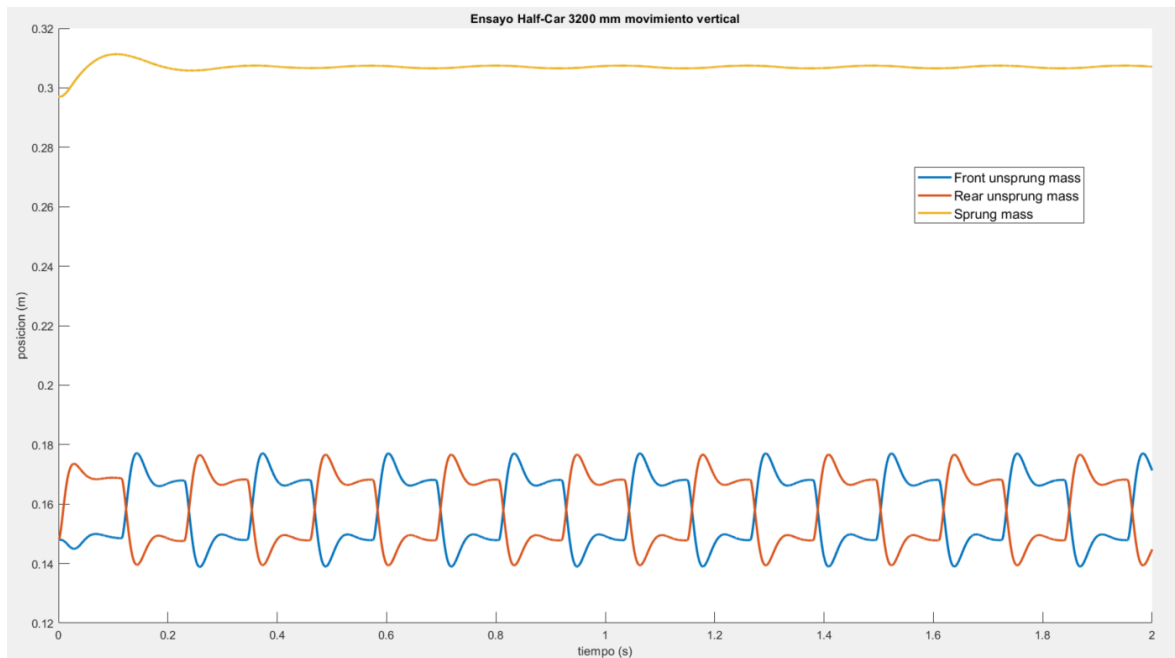


Figura 93. Ensayo Half-Car 3200 mm movimiento vertical

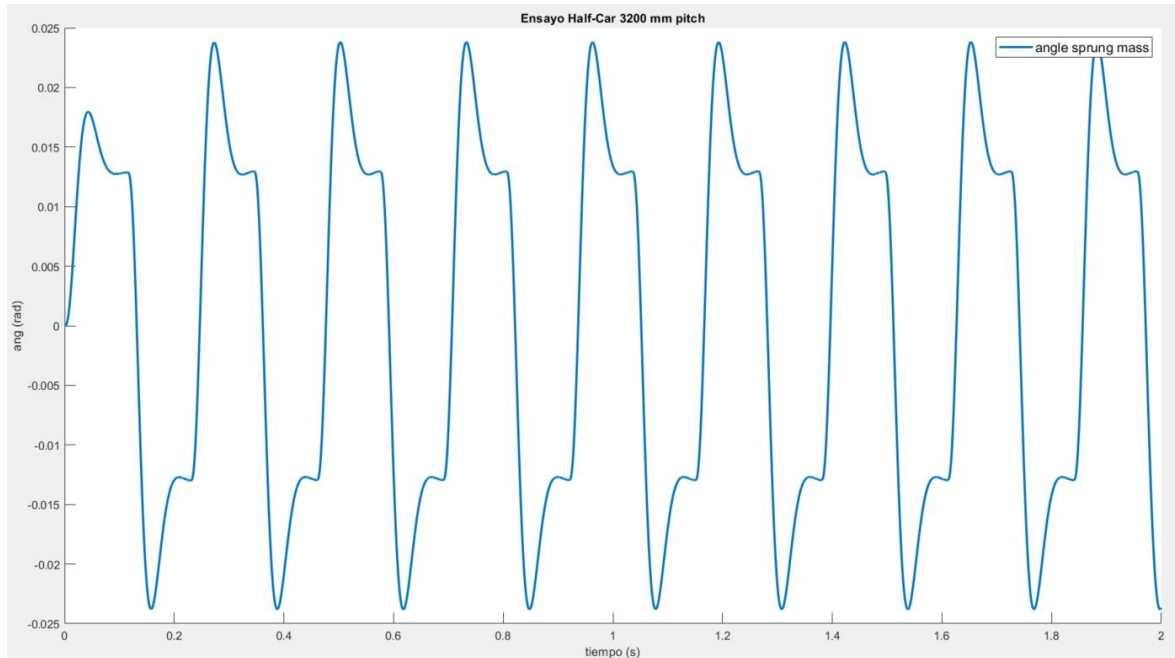


Figura 94. Ensayo Half-Car 3200 mm pitch

En la realidad las perturbaciones del suelo son aleatorias y producen pitch y bounce a la vez por lo que para hacer un estudio más elaborado se necesitarían recopilar perturbaciones

típicas de un Formula Student que se pretenden conseguir gracias a la App Postprocesado Sensores y varios ensayos con el coche midiendo los sensores.

8.1.3 APP SUSPENSIÓN

En este apartado se da uso a la App de suspensión para analizar el actual diseño de la suspensión con respecto a los parámetros que es capaz de medir la App y verificar el diseño. También se plantearán posibles mejoras mediante el uso de la App.

El ISC proporcionó las coordenadas de sus puntos de la suspensión, y dichos puntos tenían unas referencias distintas a las que usa la App. Se ha seleccionado analizar la suspensión delantera del vehículo siendo los puntos de dicha suspensión los expresados en la Tabla 13.

ax (mm)	0
ay (mm)	0
bx (mm)	-15
by (mm)	452,1
cx (mm)	-201,73
cy (mm)	443,7
gx (mm)	33,158
gy (mm)	163,6
L1 (mm)	326
L2 (mm)	555,653
L3 (mm)	43,932
L4 (mm)	55,829
L5 (mm)	200
L6 (mm)	265,751
L7 (mm)	163,173
alpha (deg)	73
K (N/mm)	35
C (Ns/mm)	1,6
Masa susp (kg)	72
Track width (mm)	1200
Largo_rueda (mm)	400

Tabla 13. Inputs suspensión ISC

Estos parámetros fueron introducidos en la App suspensión y se obtuvieron los resultados expresados de la Figura 95 a la Figura 101. Se puede observar, por el tope de compresión que el vehículo tiene altura suficiente de ground clearance, por lo que se puede acomodar correctamente un alerón delantero por debajo de la altura de la base del chasis. A nivel de motion ratio se puede observar una suspensión con tendencia progresiva conservadora, ya que la máxima relación es 1.094. Esta progresividad se podría intentar aumentar, pero siempre teniendo en cuenta el recorrido útil del amortiguador, ya que no es posible tener un recorrido de amortiguador mayor de 57 mm. Debido a esto, no se puede dar excesiva progresividad si no se empieza con una progresividad inferior a 1. En cuanto al Roll Center, éste tiene un desplazamiento en torno a 30 mm, pero se podría intentar reducir la distancia inicial para generar más rigidez lateral. También se puede observar un camber dinámico conservador teniendo poca variación de ángulo. Teniendo una rigidez de 35 N/mm se tiene que comprimir la suspensión 19 mm para igualar el peso de dicha rueda, por lo que se tiene recorrido de compresión para absorber perturbaciones de 31 mm. Este diseño casa con el objetivo que se estableció en el diseño del IFS-03, en el que se quería un diseño robusto y sencillo para fijar un modelo base.

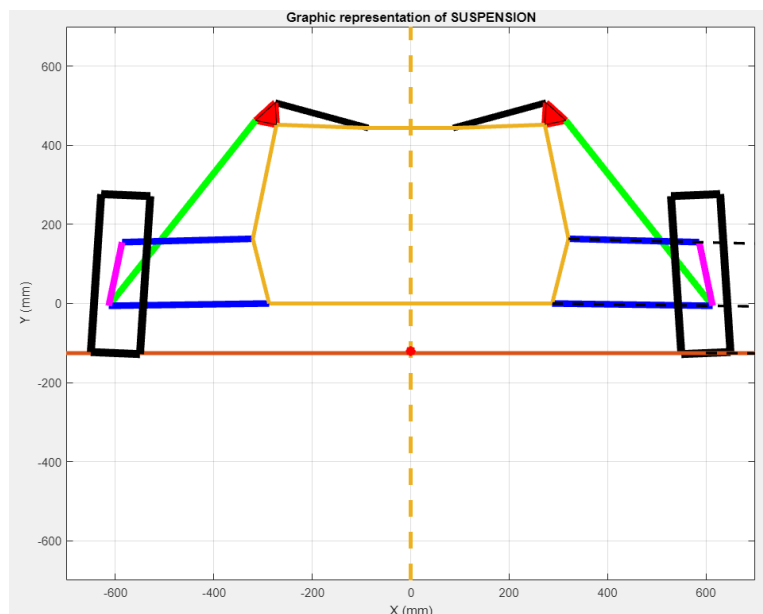


Figura 95. Tope de extensión ISC

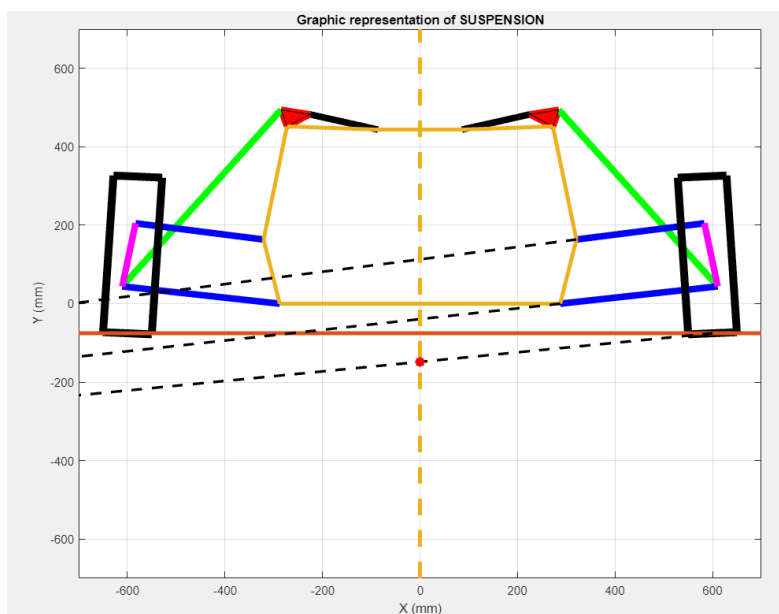


Figura 96. Tope de compresión ISC

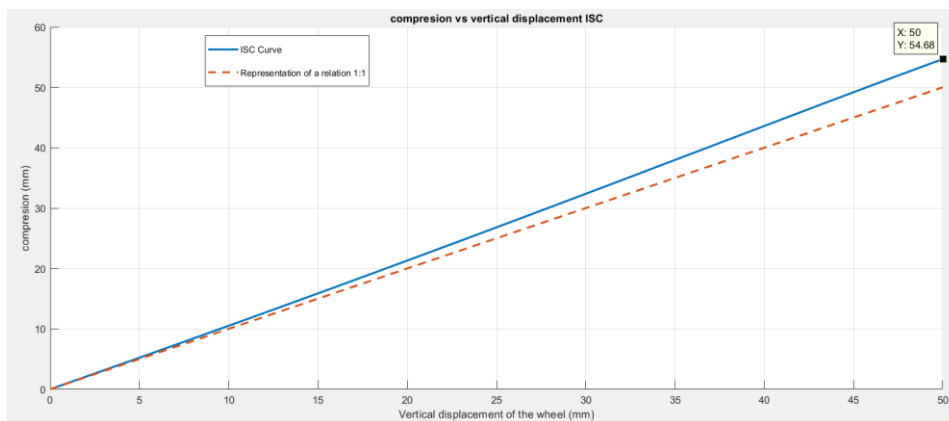


Figura 97. Compresión vs desplazamiento vertical ISC

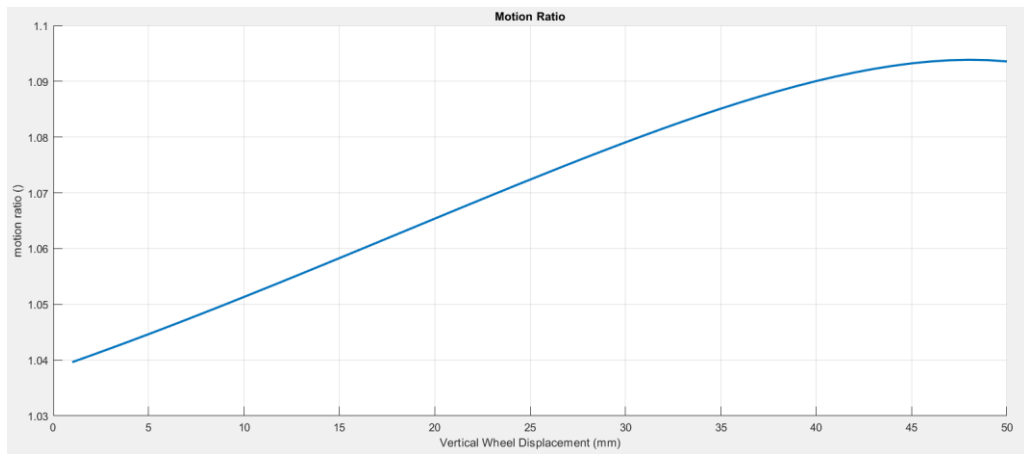


Figura 98. Motion ratio ISC

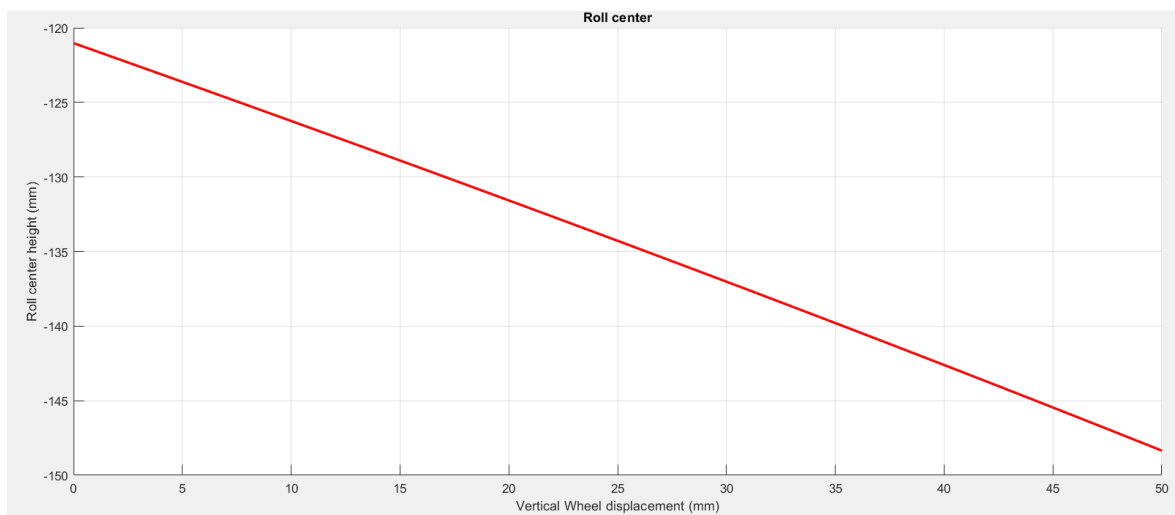


Figura 99. Roll Center dinámico ISC

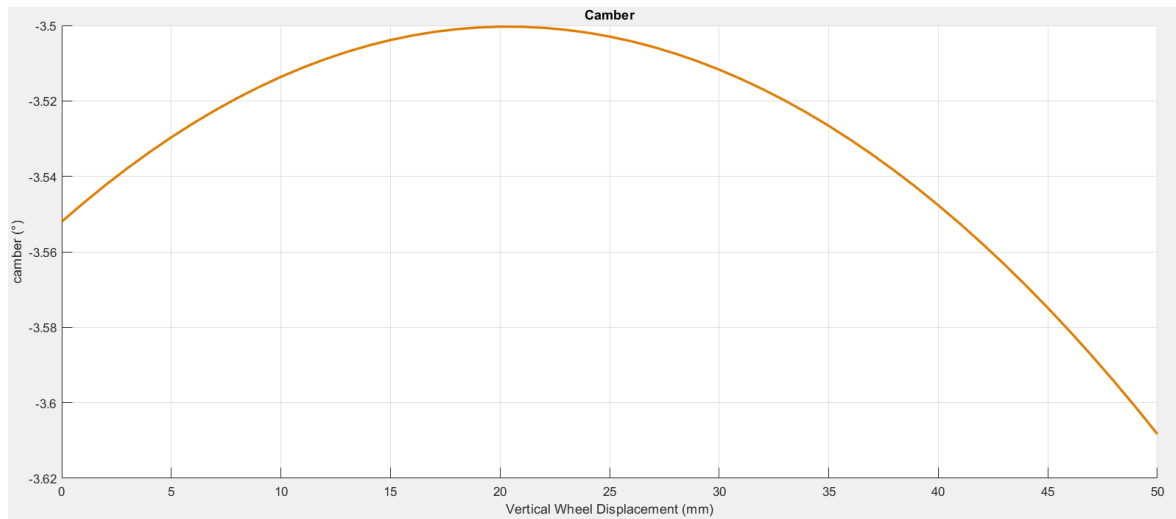


Figura 100. Camber dinámico ISC

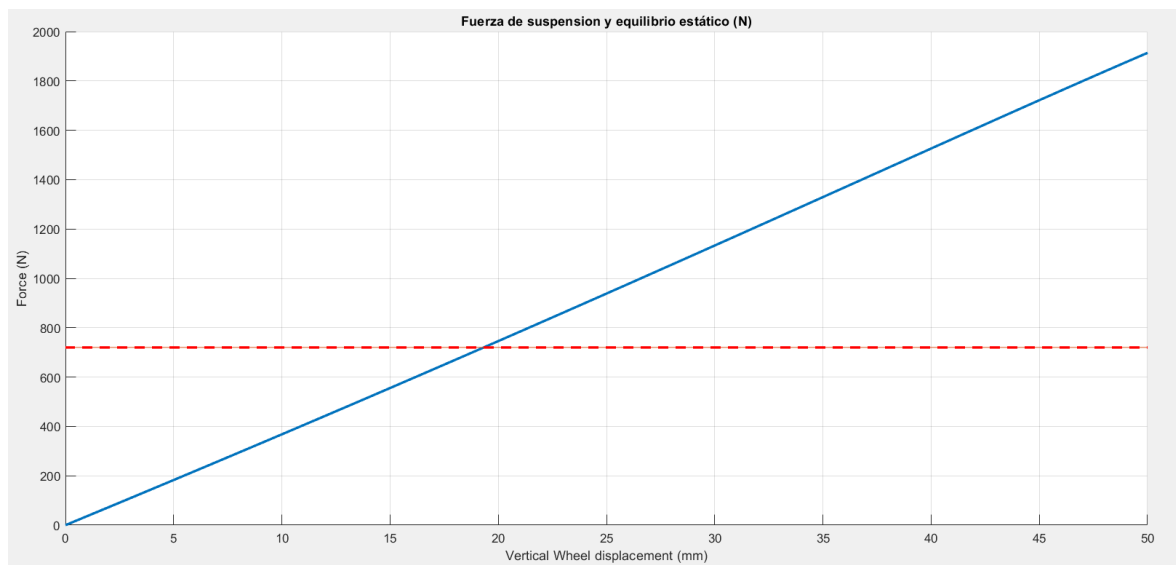


Figura 101. Fuerza de suspensión y equilibrio estático ISC

A continuación, se van a exponer algunas mejoras que podrían realizarse en dicha geometría de suspensión para mejorar las características de estas haciendo uso de la App modificando ciertas cotas y viendo el efecto que tienen en la suspensión. Con esta propuesta no se pretende asumir directamente dicha geometría como correcta, ya que se está obviando la interacción con el resto de los subsistemas del vehículo, y algunas

coordenadas geometrías pueden no ser válidas para otros departamentos, como chasis, por lo que se tendría que seguir iterando la geometría para encontrar el compromiso entre todos los departamentos afectados por la suspensión.

El primer cambio que se quiere proponer abarca la curva de motion ratio, ya que, como se puede observar en la Figura 97, la compresión del amortiguador alcanza los 54,68 mm. Todavía se puede alcanzar una mayor progresividad, ya que se pueden alcanzar los 57mm de compresión. Se establece que el máximo a alcanzar sean 56,5 mm dejando 0,5mm de seguridad, por si existen deformaciones en la suspensión. Para efectuar cambios en la relación de compresión intervienen principalmente los anclajes “b”, “g” y la geometría del rocker siendo los parámetros con mayor impacto “L3” y “L4”, que representan el brazo de palanca entre movimiento vertical y compresión del amortiguador.

Se ha establece que se desplazan 40 mm hacia la derecha los anclajes “b” y “g”, ya que de esta manera la pushrod se encuentra más vertical y el sistema de suspensión invade menos espacio del chasis delante del piloto. Posteriormente se ajustan las longitudes “L3” y “L4” del rocker, ya que la ratio de compresión aumenta cuando se aumenta la longitud “L4” y se disminuye la “L3”. Haciendo uso de dicha premisa se analiza que compresión se alcanza con la nueva posición de los anclajes y tras varias iteraciones de longitudes “L3” y “L4” se logra el objetivo de tener mayor motion ratio y no superar los 56,5mm de compresión máxima. Se pueden observar los cambios en la Figura 102, que se consigue superar la relación de 1:1,1 y en la Figura 103 que no se superan los 56,5 mm.

El segundo cambio conlleva adaptar el camber de manera más efectiva. Es cierto que el ISC ha transmitido que un camber de $-3,5^\circ$ optimiza la fuerza lateral que soporta el neumático, pero este ángulo implica un mayor desgaste de neumático y no es necesario tener dicha tracción lateral en recta. Por ello, en vez de conseguirse ese ángulo en la posición estática sería conveniente tener un ángulo inferior en la posición estática y alcanzar los $-3,5^\circ$ en una posición de compresión avanzada que represente la transmisión de pesos en curva. Para esto se ajustan las longitudes “L6” y “L7” ya que afectan al camber dinámico sin afectar al mecanismo de compresión de la suspensión y la posición de camber

inicial para alcanzar dichos objetivos. Mediante la iteración de varias longitudes se obtuvo la Figura 104 en la que se puede observar que se obtiene un camber estático de $-3,3^\circ$ y los $-3,5^\circ$ no se obtienen hasta los 32 mm de compresión optimizando de esta manera el desgaste del neumático sin perder agarre en curva. El camber dinámico puede llegar a tener una amplitud mayor pero debido a que se fijaron objetivos de poco rango dinámico de suspensión en los primeros diseños del ISC no se ha seguido optimizando.

Los puntos finales propuestos en este apartado son los representados en la Tabla 14.

ax (mm)	0
ay (mm)	0
bx (mm)	25
by (mm)	452,1
cx (mm)	-161,73
cy (mm)	443,7
gx (mm)	33,158
gy (mm)	163,6
L1 (mm)	326
L2 (mm)	555,653
L3 (mm)	45,9
L4 (mm)	58,5
L5 (mm)	200
L6 (mm)	280
L7 (mm)	180
alpha (deg)	73
K (N/mm)	35
C (Ns/mm)	1,6
largo_rueda (mm)	400

Tabla 14. Inputs Nueva Propuesta ISC

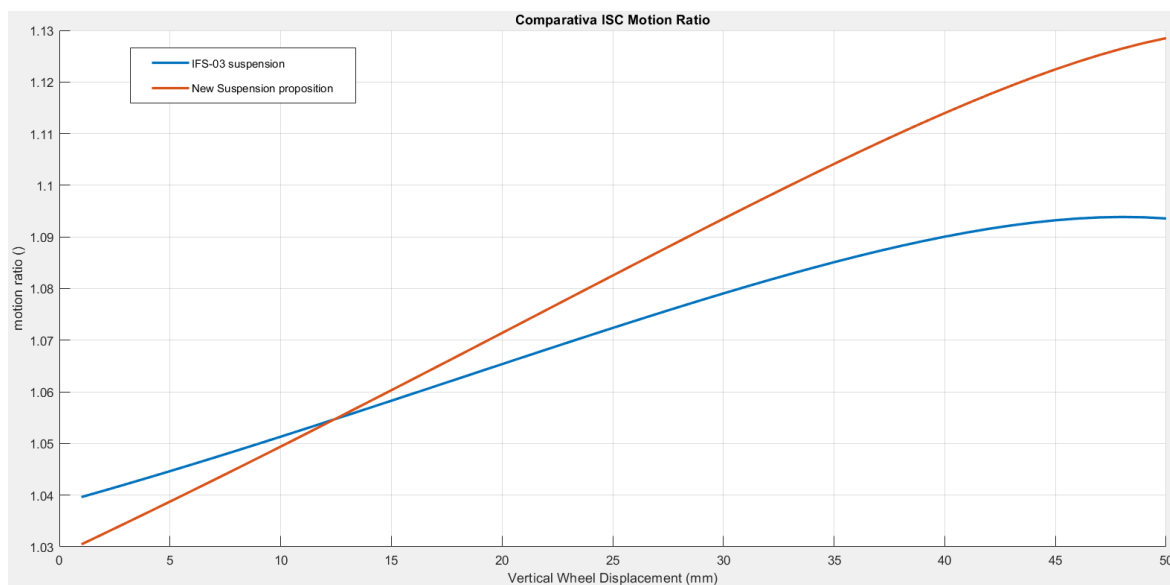


Figura 102. Comparativa ISC Motion Ratio

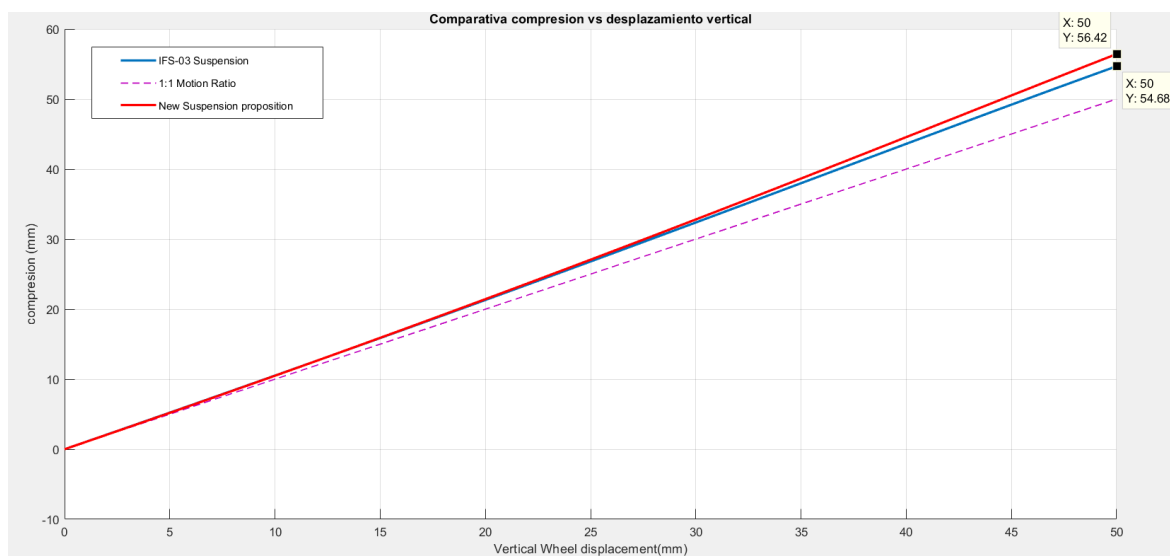


Figura 103. Comparativa ISC compresión vs desplazamiento

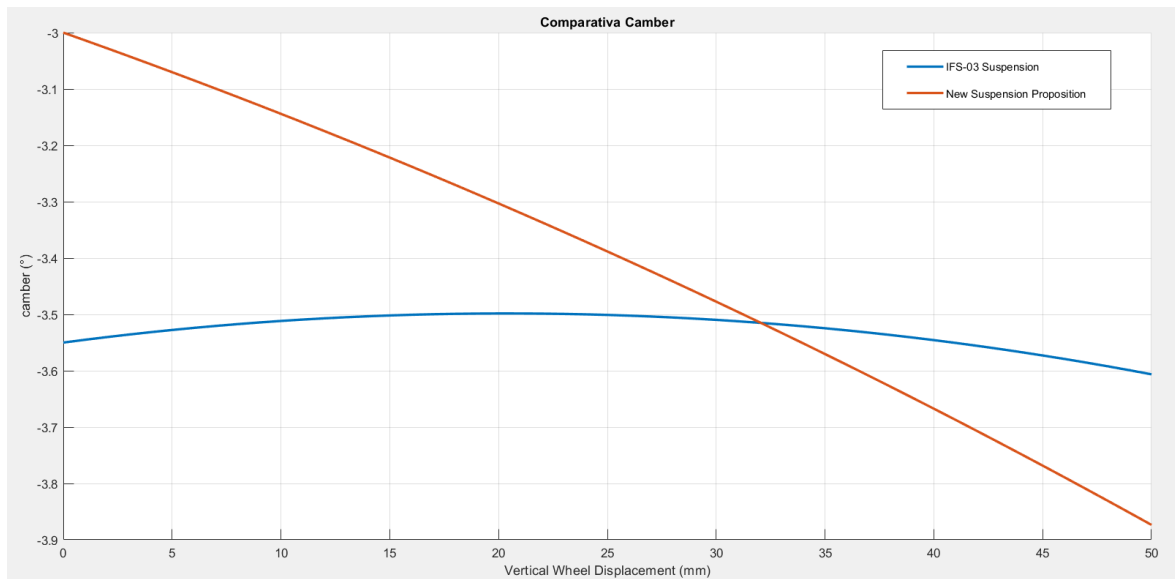


Figura 104.Comparativa ISC Camber

Capítulo 9. DISEÑO DE LA NUEVA SUSPENSIÓN ISC

En este capítulo se propone un proceso de diseño de la suspensión para la futura temporada del ISC haciendo uso de las App de este proyecto. El equipo está evolucionando y adquiriendo nuevo conocimiento. Este procedimiento necesitará actualizaciones, pero puede servir de base para acelerar el proceso de diseño dinámico para la próxima temporada.

9.1 PREPARACIÓN DE MODELOS APP DINÁMICA

El primer paso es definir los parámetros de entrada del nuevo vehículo lo antes posible para empezar los estudios dinámicos. Se deben analizar correctamente las masas, centro de gravedad e inercias del vehículo de la temporada pasada ya que es la mejor aproximación posible y los estudios servirán para guiar las nuevas propuestas de diseño del año siguiente. Posteriormente, se deben pactar las mejoras estimadas para el modelo de la siguiente temporada y qué cambios en los parámetros del modelo implicarían. Una vez recopilado, se deberá ajustar la frecuencia natural a la deseada y elaborar varios estudios de Quarter-Car aprovechando los datos recabados con adquisición de datos. Una vez fijadas la rigidez y amortiguamiento con ayuda del Half-Car se puede estudiar el reparto de rigidez entre el eje delantero y trasero.

9.2 GEOMETRÍA DE SUSPENSIÓN

Haciendo uso de los resultados de la App Postprocesado Sensores cuando se hayan recogido datos en competición, se puede proponer que nuevos parámetros de motion ratio y camber se quieren para la temporada siguiente tanto en el eje delantero como trasero. Con dichos objetivos y los amortiguadores seleccionados por el paso anterior se pueden optimizar las geometrías de suspensión.

9.3 SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS

Es importante hacer un seguimiento de las desviaciones en las premisas de diseño, como pueden ser la masa o el centro de gravedad. Cada vez que se observe una desviación se debe lanzar una simulación para medir el impacto que dicho cambio genera.

El departamento de dinámica tiene que lanzar pronto una propuesta de geometría de suspensión, pero este subsistema linda con muchos otros subsistemas importantes como son chasis, dirección y la geometría de la aerodinámica. El diseño no queda cerrado, ya que existen dificultades para acomodar las necesidades de todos los departamentos, y se debe llegar a compromisos que exigen cambios en la geometría de suspensión. El motion ratio es muy sensible a cambios y por normativa se deben garantizar los 50 mm de recorrido de rueda, por lo que cada milímetro de cambio de coordenada se debe lanzar una simulación y verificar que se sigue cumpliendo normativa.

9.4 MEJORA CONTINUA

En paralelo a todas estas tareas el departamento es nuevo y tiene que adquirir el mayor conocimiento posible, por lo que se deben mejorar los modelos y las Apps del departamento continuamente. También conviene establecer acuerdos con los softwares de modelos complejos como Adams-car y IPG Carmaker para empezar a entrenarse en ellos con el fin de llegar a analizar un vehículo con todos los parámetros y poder basarse en estos modelos para mejorar las Apps.

Capítulo 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como conclusiones se recapitularán los objetivos que se han logrado en este proyecto y que características se han logrado dentro de las Apps.

El primer objetivo consistía en desarrollar una App que permitiera diseñar la geometría de la suspensión del ISC. Este objetivo se ha logrado mediante la creación de una App que es capaz de modificar parámetros de un modelo pushrod de suspensión, representar visualmente el recorrido de movimiento y poder sacar gráficas de los KPI's relevantes de la suspensión que el ISC tiene conocimiento. Para facilitar al usuario, se ha conseguido establecer la funcionalidad de guardar parámetros de entrada y poder volver a cargarlo para futuras sesiones, así como exportar los resultados del modelo. Todo el desarrollo ha sido validado gracias a un modelo de Ansys de Rigid Dynamics, lo que permite al equipo cerciorarse de que los modelos no contienen errores.

El segundo objetivo, la creación de la App Postprocesado Sensores, también ha sido alcanzado. Esta App es capaz de cargar los datos del sistema de adquisición de datos del equipo y los parámetros de la suspensión delantera y trasera para poder postprocesar los datos y obtener resultados que ayuden a mejorar los diseños como es el Roll del vehículo, las fuerzas en las barras de suspensión para optimizar el peso de estas o la generación de un perfil de suelo para poder introducirlo en modelos matemáticos dinámicos. Esta App también tiene la funcionalidad de guardado de resultados para poder disponer de ellos sin necesidad de usarla de nuevo. Se utilizó el mismo modelo de Rigid Dynamics con distintas entradas para poder verificar la correcta implementación de los cálculos de la App dando por concluido el objetivo.

El tercer objetivo, la realización de un estudio dinámico del vehículo actual también ha sido completado. Este objetivo ha sido ampliado a medida que se ha desarrollado el

proyecto, ya que se necesitaba analizar con modelos matemáticos y se optó por preparar otra App dinámica que permitiera hacer este análisis en futuras temporadas con facilidad. Dicha App tiene el Quarter-Car y el Half-Car en el que se puede analizar la respuesta del vehículo para distintas perturbaciones del suelo. La App tiene la funcionalidad de guardar los resultados de las simulaciones. Estas App fueron verificadas mediante modelos en Ansys Rigid Dynamics permitiendo analizar posteriormente la suspensión del ISC.

En dicho análisis se estableció que sería conveniente obtener más rigidez en la suspensión para alcanzar la frecuencia natural objetivo. Se observó la caída estática de la suspensión para reafirmar los cálculos del equipo y cumplir normativa. Gracias al IC Calculator se ha podido establecer que conviene según la distribución de pesos del IFS-03 transferir mayor rigidez a la suspensión delantera con respecto a la trasera. No se ha podido observar que mejora dinámica tiene ya que no se dispone de inputs de suelo reales del vehículo por lo que se tiene que esperar a recabar datos de los sensores lineares. Posteriormente se analizó la geometría de la suspensión delantera del ISC en la que se observó que se podía ganar cierta progresividad y ajustar mejor el camber dinámico por lo que se usó la App no solo para analizar la actual geometría, sino para elaborar una propuesta de mejora sobre la misma.

El cuarto objetivo, una redacción del procedimiento a seguir por parte del ISC en la siguiente temporada ha sido descrito contando con la experiencia de la temporada pasada del ISC y las ventajas que ofrece tener las Apps para la próxima temporada situando en que punto del diseño son útiles cada una de ellas. Se describen de manera general, ya que según número de integrantes y objetivos de cada departamento el procedimiento detallado será distinto.

Este proyecto tiene la intención de ser una propuesta de valor para el ISC acerca de la importancia de desarrollar herramientas propias para enriquecer a los integrantes del equipo y motivar a los usuarios a seguir formándose en dinámica de vehículos. Por ello, se han lanzado tres Apps distintas en vez de focalizarse sólo en una. Como se ha podido expresar en el estado del arte, todos los modelos de dinámica de vehículos pueden

aumentar en complejidad a medida que se entiendan, por lo que estas Apps pueden tener muchas versiones nuevas que aumenten el alcance de sus posibilidades. La intención es que estas Apps evolucionen junto con el conocimiento adquirido con los años de experiencia del equipo, y se conviertan en herramientas muy avanzadas y ajustadas a las necesidades de cada temporada.

En este apartado se expresan algunas propuestas de trabajos futuros que serían interesantes desarrollar sobre las Apps de este proyecto.

- Añadir a los modelos de Simulink de la App dinámica que las características de rigidez y amortiguamiento puedan ser no lineales en vez de constantes. Esto se podría hacer con una look-up table. Esta mejora es relevante si realmente el equipo es capaz de extraer las conclusiones del modelo actual ya que generar dichas look-up table lleva tiempo para cada amortiguador y es más complicado proponer mejoras.
- Si el equipo es capaz de registrar datos mediante los sensores lineales del nuevo vehículo y mediante el uso de la App Postprocesado Sensores adquieren perfiles de suelo de las cuatro ruedas y sean capaces de monitorizar correctamente el cdg y las inercias del vehículo quizás sea interesante generar un modelo de Full-Car dentro de la App dinámica.
- En cuanto a la App de suspensión sería interesante ampliar las ecuaciones para implementar el modelo en 3D, esto permitiría generar postprocesado de más características de la suspensión como el antidive o el antisquat. Se debe proponer como una versión aparte de la suspensión 2D ya que por experiencia la mejor manera de estudiar la relación de compresión es en 2D y es cómodo poder tener la App 2D y posteriormente avanzar la propuesta de diseño con la 3D.
- Los datos recabados por los sensores suelen ser con excesivo ruido que no permiten su lectura. Al entrar en la App desde un Excel pueden ser pretratados, pero se podría añadir funcionalidad e filtrado dentro de la App para facilitar este paso.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Campbell C. “New directions in suspension design, Making the Fast Car Faster”. Cambridge, Massachusetts: Bentley Publishers; 1981
- [2] Milliken William, Milliken Douglas. “Race Car Vehicle Dynamics”. SAE International; Diciembre, 1994.
- [3] Bastow Donald. “Car Suspension and Handling”. 2th. Londres. Pentech Press; Enero, 2014.
- [4] Aparicio Izquierdo, Vera Alvarez, Díaz López. “Teoría de los vehículos automóviles”. 2th. Madrid. Universidad Politécnica De Madrid; Diciembre, 2001.
- [5] Dixon John, “Tyres, Suspension and Handling”. 1th. Cambridge. Cambridge University Press; 1996.
- [6] Mathworks, <https://www.mathworks.com/videos.html>, [citado el 09 de Julio 2021]
- [7] James Allison (2021). Animation of a Quarter-Car Automotive Suspension (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35478-animation-of-a-quarter-car-automotive-suspension>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved July 11, 2021.
- [8] Turakhia Tejas, J. Modi Mahendra. “Mathematical Modelling and Simulation of a Simple Half-Car Vibration Model”. ResearchGate; Mayo 2016.
- [9] Papaioannou G., Dineff A. M., Koulocheris D. “Comparative Study of Different Vehicle Models with respect to Their Dynamic Behaviour”. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering; septiembre 2019.
- [10] Hamilton Leonard Joseph , Martínez Cuenca Álvaro. “Mode Separated suspensión system for a Formula SAE Car”. Universidad Pontificia de Comillas ICAI; 2019.
- [11] Efler Herranz Elías, “Diseño de la suspensión trasera de un vehículo Formula Student”. Universidad Politécnica de Madrid; septiembre 2019.
- [12] Pulido Laparra Carlos, “Diseño del sistema de suspensión para un vehículo de Formula Student”. Universidad Carlos III de Madrid; 2014.
- [13] Arévalo Christian, Medina Ayrton, Valladolid Juan. “Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaça de competencia Eléctrico Formula Student”. Ingenius; 2018.

- [14] https://www.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html

ANEXO I: ODS

En este anexo se va a exponer el alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). La ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, en esta agenda se encuentran los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Que se pueden observar en la Figura 105.



Figura 105. Objetivos de desarrollo sostenible

Tras un estudio sobre la definición de cada ODS se ha considerado que este proyecto impacta en los objetivos 3, 7 y 9.

3) Salud y Bienestar:

La temática de este trabajo es crear Apps que permitan mejorar los diseños de los vehículos mediante su estudio dinámico. Con estas herramientas no solo se pueden optimizar los parámetros del vehículo para competición, sino que también se pueden optimizar los parámetros de diseño para optimizar la seguridad de estos coches. Se puede conseguir un diseño con mayor estabilidad y más intuitivo para el conductor y así poder

mejorar la calidad de la seguridad en el vehículo. Esta descripción está alineada con el punto 3.6 que tiene como objetivo la seguridad vial.

3.6 Para 2020, reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo.

7) Energía asequible y no contaminante

Este proyecto está enmarcado en la competición de Formula Student Electric y está orientado a impulsar al equipo de ICAI en ser más competitivos en dicha competición. Conseguir una competición de alto nivel ayuda a acelerar el desarrollo del vehículo eléctrico y facilitar la permeabilidad de este tipo de coche en el mercado. Este está alineado con el punto 7.a ya que favorece la impulsión de modelos de desplazamiento no contaminantes.

7.a De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias

9) Industria, innovación e infraestructuras:

Este proyecto es de innovación por lo que tiene sinergia con el punto 9.5 ya que mejora las capacidades tecnológicas de los sectores industriales proporcionando herramientas para la formación de ingenieros.

9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo