

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"MODELO DINÁMICO DEL TREN  
DELANTERO DE UNA MOTOCICLETA"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre – 2022

AUTORA: Paula Espinosa Mora

DIRECTOR/ES: Ramón Peral Orts

Miguel Fabra Rodríguez

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE IMÁGENES</b> .....	4
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	6
1.1. INTERACCIÓN SONORA RUEDA-ASFALTO .....	8
1.2. SISTEMA DE SUSPENSIÓN.....	9
1.2.1. MATERIALES.....	10
1.2.2. SUSPENSIÓN DELANTERA.....	10
1.2.2.1. AJUSTE.....	10
1.2.2.2. TIPOS DE HORQUILLA .....	11
1.2.3. CÓMO ESCOGER EL TIPO DE SUSPENSIÓN ADECUADO .....	14
1.3. EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LA CONDUCCIÓN.....	15
1.3.1. VIBRACIONES EN UNA MOTOCICLETA .....	16
1.3.2. CONFORT.....	17
1.3.3. UN CASO CONCRETO: VIBRACIONES EN MOTOCICLETAS DE COMPETICIÓN .....	18
1.4. ANTECEDENTES.....	19
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	24
<b>3. DISEÑO DEL MODELO PROPUESTO</b> .....	25
3.1. MARCO TEÓRICO .....	25
3.2. MODELOS SIMPLIFICADOS DE SUSPENSIÓN .....	27
3.2.1. MODELO DE 1 GRADO DE LIBERTAD .....	27
3.2.2. MODELO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.....	28
3.3. GEOMETRÍA DEL MODELO PROPUESTO.....	28
3.3.1. MODELADO DEL NEUMÁTICO .....	29
3.3.1.1. PARTES DE UN NEUMÁTICO [38] .....	30
3.3.2. MODELADO DE LA SUSPENSIÓN.....	31
3.3.3. LLANTA.....	32
3.3.4. ACOPLAMIENTO SUSPENSIÓN Y RUEDA 3D.....	33
3.3.5. MODELADO DEL ASFALTO .....	34
3.3.6. INTERACCIÓN ASFALTO-RUEDA .....	35
3.3.7. MALLADO ELEMENTOS 3D .....	35
3.3.8. MOVIMIENTO DE LA RUEDA.....	36
3.4. ESTUDIO .....	37

3.4.1. ESTUDIO ESTACIONARIO.....	37
3.4.2. ESTUDIO TRANSITORIO .....	37
<b>4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
4.1. MODELO CON RESALTE .....	39
4.2. MODELO CON HUECO .....	41
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>44</b>
5.1. TRABAJOS FUTUROS.....	44
5.2. LIMITACIONES DEL MODELO .....	45
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>



# ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1: Horquilla Girder [8] .....	11
Ilustración 2: Horquilla Saxon-Motodd [10] [11].....	11
Ilustración 3: Horquilla Hossack [13] .....	12
Ilustración 4: Horquilla telescópica [15].....	13
Ilustración 5: Motocicleta Scott Flying Squirrel 1926 [16] e Ilustración 6: Motocicleta BMW r12 1935 [17].....	13
Ilustración 7: Horquilla telescópica invertida [19].....	14
Ilustración 8: Comparación de horquillas telescópicas [20].....	14
Ilustración 9: Aleix Espargaró en el circuito de Sachsenring [30].....	19
Ilustración 10: Modelos simplificados .....	20
Ilustración 11: Modelo realista.....	20
Ilustración 12: Simplificación suspensión delantera .....	21
Ilustración 13: Función senoidal que representa la carretera .....	22
Ilustración 14: Modelo de 8 grados de libertad.....	23
Ilustración 15: Sistema amortiguado .....	26
Ilustración 16: Fuerza Aplicada .....	27
Ilustración 17: Modelo de 2 GDL [36] .....	28
Ilustración 18: Geometría Modelo Propuesto .....	29
Ilustración 19: Diferentes Ruedas Parametrizadas .....	29
Ilustración 20: Perfil del neumático.....	30
Ilustración 21: Partes de un Neumático [39].....	30
Ilustración 22: Partes del Neumático Modelado .....	<u>31</u>
Ilustración 23: Constructor del Modelo: Dinámica Multicuerpo.....	<u>32</u>
Ilustración 24: Obtención centro rotación rueda.....	<u>34</u>
Ilustración 25: Simplificación suspensión y rueda acoplada.....	<u>34</u>
Ilustración 26: Contacto rueda-asfalto.....	<u>35</u>
Ilustración 27: neumático Mallado.....	<u>36</u>
Ilustración 28: Ejemplo con Resalte.....	<u>39</u>
Ilustración 29: Representación de Desplazamiento frente al Tiempo. Modelo con resalte.....	<u>39</u>
Ilustración 30: Representación de la Fuerza Ejercida por el Muelle frente al tiempo.....	<u>40</u>

Ilustración 31: Fotogramas representativos de la Aceleración del Sistema en Movimiento.....	40
Ilustración 32: Geometría del Modelo con Hueco.....	41
Ilustración 33: Representación de los Desplazamientos de la Masa Suspendida y la Rueda frente al tiempo.....	42
Ilustración 34: Representación de la Fuerza Ejercida por el Muelle frente al tiempo.....	42
Ilustración 35: Fotogramas representativos de la Aceleración del Sistema en Movimiento.....	43



# 1. INTRODUCCIÓN

El ruido es el sonido audible proveniente de un objeto en movimiento, que por lo general es desagradable y molesto al oído humano. Por tanto, estamos hablando de un contaminante auditivo. Mientras que las vibraciones se pueden definir como la propagación de ondas elásticas en un sólido o fluido. Éstas pueden producir daños y lesiones o bien efectos relacionados con el malestar. Es por ello, que ambos deben ser estudiados en muchas áreas: electrodomésticos, vehículos, turbinas, etc. La mayoría de los estudios vibratorios y acústicos se realizan durante el proceso de diseño, ya que al hacerlos en esta etapa se reduce el número de prototipos a realizar y por lo tanto el coste. No solo se estudian por los daños que puedan causar sino también porque se debe cumplir con los requisitos legales y las demandas de los consumidores. Por tanto, debe ser igualmente analizada la sensación que producen en los usuarios. Cada vez es más relevante este estudio por la creciente demanda de empresas y usuarios en la reducción de dichas variables.

En el caso particular de este estudio, cabe destacar que los vehículos diseñados para circular a grandes velocidades, sean de alta gama o diseñados específicamente para competiciones de velocidad, prestan especial atención a estos problemas. Esto es debido a que se generan más vibraciones a altas velocidades. Asimismo, una exposición prolongada a una gran cantidad de vibraciones puede incluso producir problemas de salud además de una sensación de inseguridad e incomodidad en el conductor.

El ruido y las vibraciones se originan principalmente en los motores, bombas, ruedas y en las zonas de interacción entre partes de la máquina y/o entre partes de la máquina y agentes externos, es decir, se pueden originar en el rozamiento con el aire o el asfalto. El ruido y las vibraciones originados en este último caso son más difíciles de controlar que los originados en partes concretas de la máquina.

El ruido y las vibraciones pueden ser analizadas con mediciones exactas, pero los efectos que perciben los consumidores como el confort son subjetivos.

Se entiende por este confort el bienestar o comodidad que proporcionan diversas circunstancias, condiciones y objetos [1]. En el caso concreto de un

vehículo es la comodidad que sienten los pasajeros al estar dentro del mismo. Es por ello por lo que para medirlo se requiere de la ayuda de probadores o de herramientas analíticas que reflejan reacciones humanas. Esta variable es la más importante de analizar debido a que los análisis objetivos no siempre concuerdan con lo que percibe el ser humano.

Además, la comodidad es una característica que los consumidores tienen en cuenta a la hora de adquirir un vehículo y de un gran valor añadido para el consumidor. Es decir, por más que un vehículo en concreto posea diversas partes de mayor calidad que sus competidores, si este no tiene la misma comodidad que los demás será percibido como peor ante la competencia. Por lo tanto, las compañías deben tratar de satisfacer las necesidades ergonómicas de su producto para adecuarlo a las necesidades del mercado. Consecuentemente, pueden innovar en este sentido fabricando productos con mayor comodidad percibida que la competencia.

Además de a la comodidad, las vibraciones y el ruido originan otros efectos negativos en el vehículo y sus usuarios.

En concreto, tanto la vibración del vehículo o de alguna de sus partes, junto con el ruido acústico que se pueda generar por un mal funcionamiento de la suspensión o un estado deplorable de los neumáticos, es percibido como molesto y desagradable por los clientes. Lo que conduce a empeorar la experiencia de conducción.

Por un lado, la exposición de un vehículo a vibraciones y ruido continuado afectan al funcionamiento y durabilidad de los diversos componentes internos. Es decir, disminuyen el rendimiento del vehículo y aumentan las averías de este. Este motivo provoca que los consumidores se planteen durante la adquisición de un vehículo la elección de una marca u otra en función de las posibilidades de reparaciones futuras y fiabilidad del vehículo.

Por otro lado, el desgaste del vehículo provocado por el ruido y las vibraciones hace que el mismo pierda parte de su seguridad y aumente el riesgo de accidente en carretera. También puede tener efectos adversos en el cuerpo humano, tales como lesiones y enfermedades. En conclusión, afecta a la seguridad y la salud de los usuarios.

Económicamente hablando, por ejemplo, el gasto provocado por los accidentes de tráfico en el año 2015 ascendió a cerca más de 2.000 millones de euros según un informe de la AEC (Asociación Española de la Carretera) en conjunto con SEOPAN (Asociación de Empresas Constructoras y Concesiones de Infraestructuras) [2]. Aunque es verdad que dichos costes no se deben, por lo general, de forma directa a los efectos del ruido y las vibraciones; pero estos sí que forman parte indirectamente, ya que son una causa de accidentes.

Desde el punto de vista de las empresas fabricantes de vehículos, el estudio del ruido y de las vibraciones está enfocado a minimizarlos lo máximo posible. La disminución de las vibraciones, como se ha mencionado anteriormente, permite aumentar la estabilidad de los vehículos y disminuir el desgaste de sus componentes. En consecuencia, aumenta la calidad percibida por el consumidor sobre la empresa. Por ejemplo, compañías como Toyota o Porsche, que poseen buenos sistemas de suspensión, se encuentran entre las marcas con coches más fiables y que menos averías y problemas sufren a lo largo de su vida útil [3].

En resumen, el estudio de las vibraciones y del ruido tiene una gran importancia económica para las empresas, ya que el esfuerzo en reducir estos factores se traduce en un aumento de la calidad de los productos y mayores ingresos además de poder reducir costes en la fabricación de prototipos al estudiarlos durante el proceso de diseño. También su estudio ayuda a prevenir y disminuir los gastos provocados por accidentes y aumenta la seguridad de las personas en la vía pública.

### 1.1. INTERACCIÓN SONORA RUEDA-ASFALTO

El nivel de vibración que es transmitido del vehículo a la carretera depende principalmente de: la degradación de la carretera, siendo éste el factor más relevante; la velocidad a la que circula el automóvil; y el tipo de vehículo que circula, concretamente, los vehículos más grandes como los camiones son los que transmiten más vibraciones. Aun así, se debe prestar atención a la velocidad que lleva el vehículo, ya que a ciertas velocidades puede generarse resonancia. [4]

En cuanto a la generación de ruido y vibraciones, el tipo de pavimento es una variable muy influyente. Los pavimentos porosos y de hormigón producen menos ruido, pero la diferencia no es tan significativa [5].

Los métodos más utilizados para ver la influencia del tipo de pavimento en el ruido generado son experimentales, como por ejemplo el CPX o Close Proximity Method, donde se colocan micrófonos a unas distancias determinadas cerca de la rueda para medir el ruido generado por la rueda al circular por la vía.

No solo la interacción rueda-asfalto es relevante en la generación de ruido, sino también en el grip y la adherencia del neumático. Estas son especialmente importantes en competición debido a las altas velocidades y temperaturas que se consiguen. Esta adherencia depende de los materiales de los que están formados los dos elementos en contacto, la presión insuflada, la temperatura de ambos entre otras variables.

En las últimas décadas, la reducción de la intensidad sonora, una magnitud física que expresa la mayor o menor amplitud de las ondas sonoras [1], es uno de los puntos centrales por parte de los gobiernos y las empresas. Esto se puede ver por ejemplo en la publicación en 2018 por la OMS de las “Directrices sobre el ruido ambiental para la región europea”, [6] donde se enumeran medidas para reducir esta intensidad sonora, habiendo un apartado para los vehículos. Estas directrices están validadas gracias a estudios de la influencia del ruido en las personas y en distintas enfermedades, así como en la efectividad de la implantación de las medidas propuestas, sea en la circulación de vehículos terrestres, aéreos o aerogeneradores. No solo hay medidas de reducción de velocidad en entornos urbanos o la disminución del tráfico sino también en la modificación de pavimentos.

## 1.2. SISTEMA DE SUSPENSIÓN

La suspensión de una motocicleta sirve principalmente para mantener la rueda sobre el asfalto, aumentando así la estabilidad y el control y proporcionando al conductor seguridad y comodidad al conducir. Además, tiene la función de absorber las irregularidades del terreno por el que circula.

En cuanto a las piezas que la componen encontramos los elementos elásticos y los elementos de amortiguación. Los elementos elásticos son los resortes o muelles. Mientras que los elementos de amortiguación son válvulas que gestionan el paso de fluido hidráulico para tener un movimiento controlado y que los impactos no sean bruscos.

#### 1.2.1. MATERIALES

Para la fabricación de las suspensiones se utilizan materiales con bajos coeficientes de amortiguación. Se requiere que cumplan esta característica porque deben aislar las vibraciones transmitidas desde el asfalto hasta el chasis de la motocicleta. En concreto los tubos de las horquillas están fabricados principalmente de fibra de carbono.

Asimismo, los tubos deben estar recubiertos de materiales con muy bajos coeficientes de fricción, para que el aceite en su interior desgaste en la menor medida posible las paredes del tubo y por consiguiente realizar correctamente su tarea de amortiguación.

#### 1.2.2. SUSPENSIÓN DELANTERA

La horquilla es el nombre por el que se conoce comúnmente a la suspensión delantera.

##### 1.2.2.1. AJUSTE

Para conseguir el correcto ajuste de la suspensión delantera se pueden modificar variables como la rigidez de los muelles, el rebote o la precarga.

La precarga se puede definir como una compresión realizada sobre el elemento elástico con la motocicleta en reposo. Ésta se utiliza para que el muelle nunca llegue a alcanzar su máxima extensión. [7]

Para cambiar la altura del vehículo la precarga se puede ajustar entre ciertos límites. Si el ajuste necesario sobrepasa estos límites es recomendable cambiar el elemento elástico de la suspensión por uno con mayor o menor constante de rigidez, según el comportamiento que se desee. En algunos casos, posible si la configuración de diseño de la suspensión lo permite, también puede ser ajustado a nivel de amortiguación o rebote.

### 1.2.2.2. TIPOS DE HORQUILLA

Una de las primeras horquillas utilizadas fue la llamada *Girder*. Ésta consiste en un par de barras unidas directamente a la rueda unidas por 2 brazos a dos uniones triples con un resorte, formando un paralelogramo.



Ilustración 1: Horquilla Girder [8]

Otro de los tipos de horquillas que podemos encontrar es la *Saxon-Motodd*, comercializada por BMW como Telelever. Formada por dos columnas con tubos deslizantes y fijos. Ésta mantiene las dos funciones de la suspensión separadas, al encargarse los tubos de alinear la rueda y la columna de suspensión central de los trabajos de amortiguación y suspensión. Esta horquilla sólo amortigua pequeños momentos de flexión en frenada y en circulación por suelo irregular, lo que hace que tenga gran agarre y una buena respuesta en frenadas bruscas. [9]

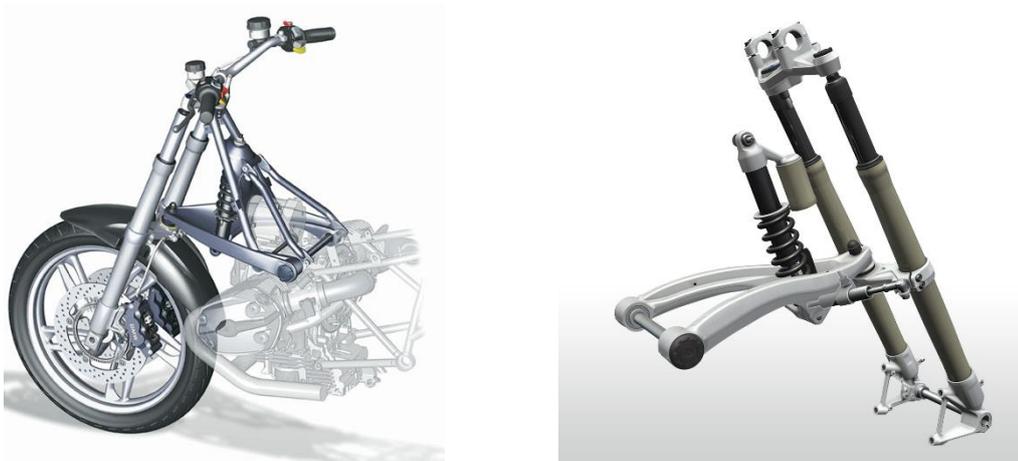


Ilustración 2: Horquilla Saxon-Motodd [10] [11]

Norman Hossack diseñó otro de los tipos de horquillas comercializado principalmente por la compañía alemana BMW Motorrad, la *Hossack/Fior* o *Duolever*. Ésta cambia las barras o tubos de las anteriores por dos trapecios oscilantes sujetos a un cuadrilátero articulado. A los trapecios oscilantes se unen los tubos deslizantes propios de la horquilla. Como la Telelever, también separa las dos tareas de la suspensión delantera debido a la columna de suspensión central. La ventaja de esta suspensión frente a las anteriores es una mayor resistencia a la torsión gracias a que los trapecios oscilantes absorben las fuerzas que aparecen. Además, también tiene como características la eficacia de frenado estable independientemente de la velocidad o la estabilidad y sensación de precisión en la dirección. [12]



*Ilustración 3: Horquilla Hossack [13]*

La *horquilla telescópica* es el tipo de suspensión más comúnmente utilizado. Está formada por dos tubos cogidos en la parte superior a una tija mientras son introducidos estos en un par de tubos de mayor tamaño. [14] Contienen un sistema de muelle y amortiguador. Las primeras motocicletas de producción en serie con este tipo de horquilla datan del año 1935, aunque sin sistema de amortiguación las podemos encontrar desde 1908.



Ilustración 4: Horquilla telescópica [15]



Ilustración 5: Motocicleta Scott Flying Squirrel 1926 [16]



Ilustración 6: Motocicleta BMW r12 1935 [17]

Existe otro tipo de suspensión telescópica muy utilizada: la *suspensión telescópica invertida*. [18] Respecto a la telescópica habitual, tiene la ventaja de poder albergar más fluido hidráulico, provocando que la rigidez de la suspensión sea mayor. En este caso, los tubos están sujetos al eje de la rueda delantera, en vez de a la parte superior. Esto hace que la distribución de la masa sea distinta, es decir, se minimizan las fuerzas de torsión al transmitir la masa del eje delantero al chasis de la moto. Asimismo, el depósito de aceite se encuentra en la parte superior del tubo. Otra diferencia es que en la horquilla telescópica las fuerzas se transmiten del asfalto a la moto, mientras que en la invertida se producen desde la moto al asfalto. El inconveniente de esta frente a la horquilla telescópica es la posibilidad de pérdida del fluido hidráulico por rotura o daño del sello que retiene el fluido en su interior.



*Ilustración 7: Horquilla telescópica invertida [19]*



*Ilustración 8: Comparación de horquillas telescópicas [20]*

### 1.2.3. CÓMO ESCOGER EL TIPO DE SUSPENSIÓN ADECUADO

La elección del tipo de suspensión dependerá del asfalto por el que vaya a circular la motocicleta, es decir, de las irregularidades que tenga la calzada. En concreto, cuantas más irregularidades tenga el terreno menor rigidez de la suspensión se necesita y primará más la efectividad de la suspensión que la comodidad del piloto.

Además, en el caso de las motocicletas off-road, motocicletas diseñadas para circular fuera del asfalto, el recorrido debe ser mayor que el de las on-road para poder mitigar mejor las irregularidades del terreno.

Como ejemplo, la suspensión telescópica invertida se utiliza principalmente en las motocicletas de motociclismo de velocidad porque, debido a su mayor rigidez, el piloto puede controlar mejor la frenada. Mientras que las

telescópicas se suelen utilizar en motocicletas que necesitan menor rigidez como las de trial. En el caso del motociclismo de velocidad se utiliza este tipo de suspensión puesto que este tipo de horquilla está diseñada para que los resortes o muelles estén constantemente en compresión. Y esto es de gran ayuda porque es necesario implementar más fuerza al sistema para que se comprima al tener una precarga que provoca que la distancia entre el asfalto y el chasis se mantenga constante aun cuando el piloto está subido a la motocicleta

### 1.3. EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LA CONDUCCIÓN

La transmisión de vibraciones del vehículo hacia el conductor o pasajeros provoca efectos negativos. No sólo en el rendimiento del vehículo, sino también en las sensaciones que experimenta la persona a bordo de él, pudiendo llegar a ser estos efectos perjudiciales para la salud.

La comodidad o el confort se pueden definir como el bienestar físico, psicológico ambiental y material que experimentan las personas en diferentes situaciones. La consecución de esta en la conducción atribuye una sensación de seguridad y confianza a los conductores y ocupantes de los vehículos.

El confort de un automóvil viene determinado por diversas características que posee el vehículo. Entre los factores que más influyen en un mayor confort podemos encontrar: la amplitud del vehículo en su interior, por lo que el diseño del interior adquiere una gran importancia al tratar de distribuir de manera óptima todos los accesorios y características en el habitáculo; el aislamiento del vehículo ante ruidos y vibraciones, ya que pueden resultar molestos y en algunos casos provocar lesiones; y los neumáticos y el sistema de suspensión, que se encargan de amortiguar las diversas irregularidades en el pavimento, proporcionando mayor seguridad y comodidad en los pasajeros [21]. Ésta última se trata de una de las partes más importantes y con mayor peso en la estabilidad de los vehículos y la sensación de seguridad en el conductor. Con el paso del tiempo se ha ido perfeccionando su funcionamiento para que proporcione la máxima estabilidad sin perder comodidad.

En su conjunto el confort del vehículo está compuesto por la seguridad de éste. Aquí podemos distinguir entre seguridad activa y seguridad pasiva [22]. La seguridad activa es la que trata de evitar los accidentes de tráfico. Se encuentra,

por ejemplo, en el control de tracción, el control de estabilidad, el sistema ABS, el asistente de marcha atrás, etc. Por otro lado, la seguridad pasiva está compuesta por los diversos elementos que tienen como función reducir o evitar las lesiones provocadas por los accidentes. Básicamente entra en funcionamiento cuando la seguridad activa ha fallado. Los ejemplos más evidentes son el cinturón de seguridad, los reposacabezas o el airbag.

El estudio y desarrollo del confort en los vehículos está ligado al objetivo de las empresas de mejorar la experiencia de conducción y viaje de los consumidores, al mismo tiempo que aumenta la seguridad de sus productos y cumplen con las diversas normativas y estándares de calidad exigidos.

En los últimos años se puede observar que los fabricantes de automóviles han ido incorporando más sistemas de seguridad y confort en sus productos. Un estudio de mercado [23] sobre la incorporación de sistemas de confort, asistencia y seguridad en los vehículos demuestra que con el paso de los años los turismos cuentan con mayores sistemas tecnológicos incorporados. También concluye que la incorporación de nuevos sistemas de confort ha sido rápida y que gracias a los avances tecnológicos de la industria han permitido que toda clase de vehículos, sin importar su gama, pueda tener incorporados mejores y mayor número de sistemas de seguridad y confort.

La inversión de las empresas en el desarrollo del confort en los vehículos ha permitido, en líneas generales, que gran parte de los consumidores puedan disponer de estas innovaciones en sus turismos y disfrutar de una mayor seguridad y comodidad durante la conducción. A su vez, las empresas han podido reducir costes de fabricación e implementar dichas mejoras en el confort en la mayoría de sus vehículos.

### 1.3.1. VIBRACIONES EN UNA MOTOCICLETA

Como se ha mencionado y razonado, el confort es una característica que se debe perseguir a la hora de diseñar una motocicleta. En este caso, el confort que se experimenta está influenciado principalmente por: la puesta a punto del vehículo, la posición y estilo de pilotaje del conductor o los controles de dirección, entre otros.

Entendemos por ergonomía al estudio de las condiciones de adaptación de un lugar de trabajo, una máquina, un vehículo, etc., a las características físicas y psicológicas del trabajador o el usuario [24]. Por tanto, se buscará un diseño ergonómico de la motocicleta, es decir adaptado a las condiciones fisiológicas del usuario [1] para que resulte más cómoda su conducción.

### 1.3.2. CONFORT

Para definir y analizar el confort en una motocicleta se pueden utilizar pruebas objetivas, midiendo la fatiga generada en las personas; o subjetivas, midiendo la influencia de las vibraciones en ellas. Siendo estas últimas pruebas las más utilizadas.

Las vibraciones producidas en la motocicleta son transmitidas al piloto, disminuyendo su seguridad y su comodidad, a través del manillar, del asiento y los pedales. Por tanto, es importante utilizar para estas partes de la motocicleta materiales antivibratorios, es decir, que amortigüen las vibraciones que pueden llegar a percibirse por el piloto. Otra de las formas para intentar minimizar los efectos de estas vibraciones es el correcto ajuste y elección de la suspensión, al ser este un elemento fundamental en la absorción de vibraciones provenientes de las irregularidades del asfalto y la estabilidad de la motocicleta.

La caracterización de las vibraciones se puede realizar mediante el desplazamiento, la velocidad o la aceleración. Aunque la más utilizada en la regulación de los límites vibratorios, para que las vibraciones transmitidas no sean peligrosas para su salud, es la aceleración [25].

Podemos diferenciar dos tipos de vibraciones mecánicas en función de qué parte del cuerpo es la que está en contacto con la transmisión de la vibración: las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo, que empiezan a ser peligrosas a partir de unos 50Hz de frecuencia; y las transmitidas al cuerpo entero, cuyos efectos provocados no son uniformes, dependen de la postura y de la persona que las experimenta.

### 1.3.3. UN CASO CONCRETO: VIBRACIONES EN MOTOCICLETAS DE COMPETICIÓN

La aparición de vibraciones ocasionalmente provoca en los pilotos de motocicletas una disminución de confort y seguridad que conlleva a un menor rendimiento encima de la moto, además de poder acarrear problemas de salud.

En cuanto a las vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo, pueden tener un efecto perjudicial en la salud. Concretamente, los pilotos pueden sufrir el *síndrome compartimental* [26], afección grave que implica un aumento de la presión en un compartimento muscular. Es una lesión que ocasiona la debilitación y falta de fuerza en los brazos, al haber problemas con el flujo sanguíneo y dañarse el tejido muscular y nervioso. Generalmente, los pilotos que la padecen se suelen operar para recuperar el funcionamiento habitual de la extremidad.

Respecto a las vibraciones transmitidas al cuerpo entero, sus efectos son en el rendimiento del piloto durante la competición ya que dificultan el manejo de la moto y provocan pérdidas de tiempo por vuelta. En concreto, los pilotos deben hacer frente al *chatter* [27]: vibración vertical de las masas suspendidas entre 17 y 22 Hz de frecuencia, que empeora el rendimiento y hace que la motocicleta sea difícil de conducir. Suele aparecer en curva y justo antes de acelerar. Las causas de este fenómeno son variadas, pero suele ocurrir cuando la frecuencia de rotación de la rueda se asimila a la frecuencia de chatter, es decir, que entra en resonancia. El cambio de rueda o del muelle de la suspensión pueden ser soluciones a este problema, pero suelen ser remedios adquiridos con la experiencia y no como algo universal.

El chattering es un fenómeno al que se debe dar especial importancia durante una competición, ya que puede marcar las diferencias. Por ejemplo, pilotos de clase mundial como Aleix Espargaró o Jonathan Rea han apuntado a esta dificultad para competir en igualdad de condiciones. En el Gran Premio de Alemania de la temporada 2022 de MotoGP en el circuito de Sachsenring, Aleix mencionaba que en carrera sufrió mucho chattering en el tren delantero, lo que no le permitió tener el ritmo de carrera que sí tenía en los entrenamientos. Aleix aseguró que el problema era debido a la nueva rueda delantera que montó para

la carrera, aunque el técnico encargado de los neumáticos discrepó con el piloto y lo achacó a las altas temperaturas y a la poca adherencia del asfalto [28]. Al contrario que Aleix, Jonathan Rea, seis veces campeón del mundo de Superbikes, tuvo problemas de chattering solo en las últimas vueltas en el Gran Premio de la República Checa de Superbikes en el circuito de Most, donde la moto se movía más de la cuenta al trazar las curvas y debido al esfuerzo físico que le suponía pilotar en esas condiciones no pudo alcanzar a los dos líderes de la carrera [29].



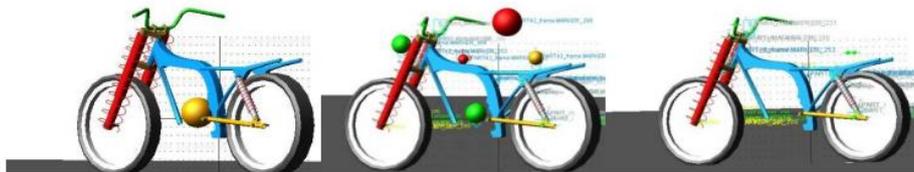
*Ilustración 9: Aleix Espargaró en el circuito de Sachsenring [30]*

#### 1.4. ANTECEDENTES

El análisis vibratorio de las motocicletas se ha ido estudiando durante décadas y recientemente ha aumentado su importancia y el número de estudios que se han realizado respecto a este tema. Los modelos que se han desarrollado han ido desde lo más simple a lo más cercano a la realidad pasando por modelos innovadores.

En 2013 [31] se propusieron 4 modelos tridimensionales donde cada uno consideraba más variables que el anterior. El primer modelo solo consideraba el chasis, las ruedas en contacto con el asfalto y las suspensiones delantera y trasera, omitiendo el motor, el piloto y otros subsistemas, que serán añadidos como masas volumétricas suspendidas en los siguientes dos modelos hasta llegar al cuarto y último donde se añade todo con su forma, geometría y propiedades reales.

Los modelos se analizaron en las mismas condiciones de partida con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos con cada una de las simplificaciones. Esta comparativa muestra que el modelo tridimensional más realista podría ser una solución efectiva para sustituir por pruebas simuladas los experimentos bajo condiciones de difícil obtención.



*Ilustración 10: Modelos simplificados*



*Ilustración 11: Modelo realista*

No solo se han desarrollado modelos 3D, sino que también se ha considerado la posibilidad de crear un sistema de interconexión entre las suspensiones delantera y trasera.

Como se puede ver en este estudio [32], el diseño de este sistema consiste en simplificar la horquilla telescópica como una fuerza aplicada en el chasis hacia la rueda delantera mientras que la suspensión trasera es un momento entre el chasis y el basculante. Estas dos magnitudes están divididas en dos: las fuerzas de interconexión y la fuerza relativa a la suspensión.

Los resultados de las simulaciones realizadas con este modelo interconectado muestran los posibles beneficios de implementar este sistema y que no produce significantes inestabilidades añadidas. Se puede añadir el hecho de que se pueden obtener diferentes resultados si se cambian los valores de los coeficientes de amortiguación dependiendo de la velocidad a la que circula la motocicleta.

Para mejorar el manejo y el confort se han diseñado suspensiones semi-activas, donde, para incrementar el rendimiento, se añade una pequeña cantidad de energía proveniente de una fuente externa. En el siguiente análisis [33] se modeliza este tipo de suspensión para una horquilla telescópica como suspensión delantera y una de brazo oscilante como trasera (ambas simplificadas) utilizando diferentes estrategias para definir el coeficiente de amortiguación en función del tiempo que va a servir como variable de control. Para analizar el movimiento de la motocicleta por un terreno irregular se ha definido una función senoidal.

Este diseño de suspensión propuesto se evalúa dentro de un modelo 3D de una motocicleta completa, consistente en 7 cuerpos rígidos que representan las dos ruedas con sus llantas, las suspensiones delantera y trasera, el chasis y el basculante. Se simulan las fuerzas del amortiguador, del muelle y de la rueda para probar la validez del sistema.

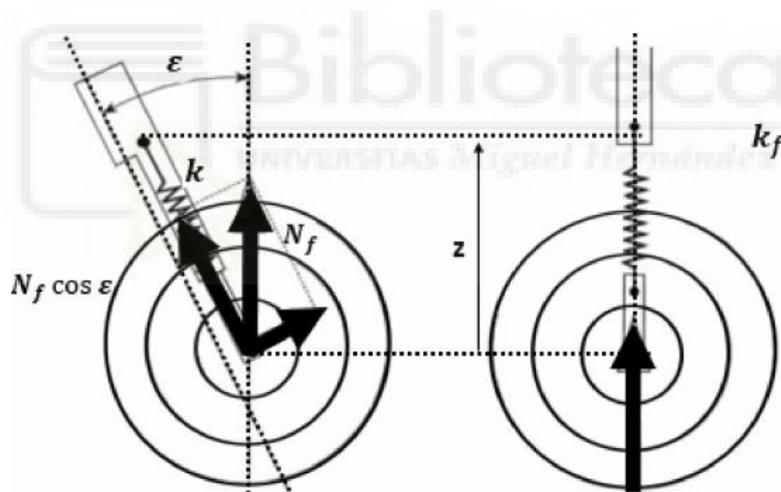
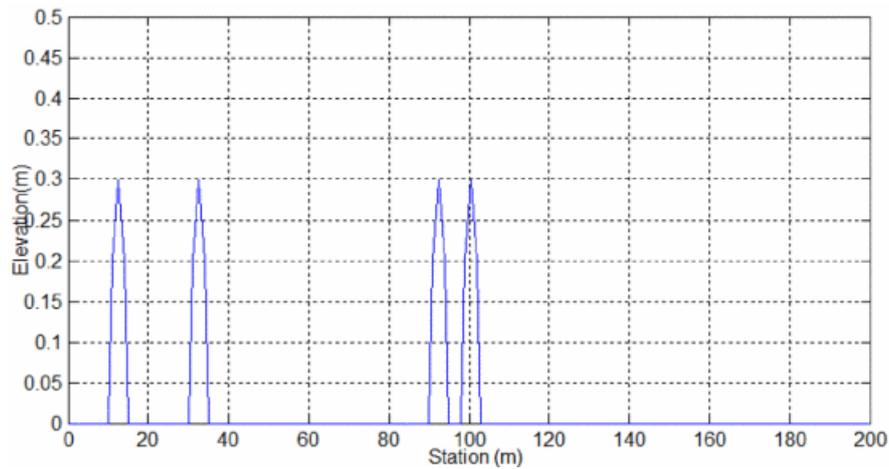


Ilustración 12: Simplificación suspensión delantera



*Ilustración 13: Función senoidal que representa la carretera*

La motocicleta, de misma forma que un vehículo automóvil, se puede representar como un sistema de masas volumétricas, muelles y amortiguadores conectados entre sí. Ese modelo es el que utiliza Sudhir Kaul [34] para analizar el impacto de implantar un sistema antivibratorio en una motocicleta.

El modelo de 8 grados de libertad propuesto consiste en cuatro cuerpos rígidos representados por masas volumétricas interconectadas gracias a las suspensiones delantera y trasera y los sistemas antivibratorios, representados ambos por un sistema de muelle-amortiguador.

Se han analizado las frecuencias naturales y el comportamiento de la motocicleta frente a irregularidades en el terreno concluyendo que los sistemas antivibratorios incluidos mejoran el confort del piloto al mismo tiempo que dificultan el manejo. Además, el modelo propuesto por Sudhir Kaul puede acoplar diferentes diseños.

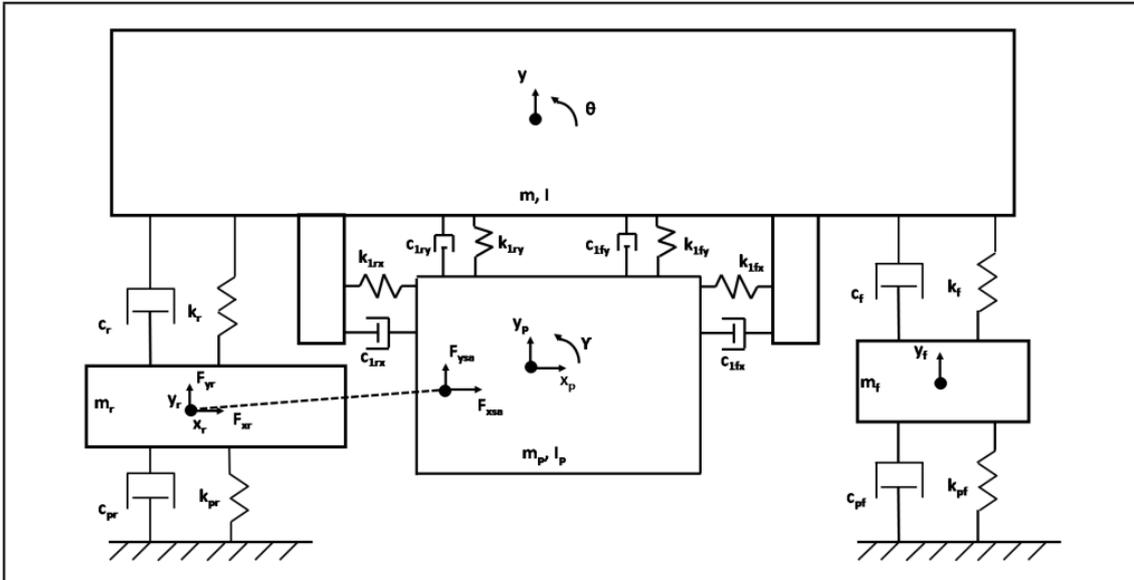


Ilustración 14: Modelo de 8 grados de libertad

Los modelos vibratorios que se suelen usar en los sistemas mecánicos intentan ser lineales para simplificarlos. En el trabajo de Andrzej Debowski [35] se presenta un modelo no-lineal de 5 grados de libertad con los elementos imprescindibles en el sistema de dirección de una motocicleta. Estos 5 grados de libertad tienen en cuenta movimientos angulares y verticales, así como el cambio de longitud de la suspensión. Menciona también la posibilidad de utilizar otro modelo sin cambios en la metodología posterior. Con utilidad sobretodo en las primeras etapas de diseño de la motocicleta debido a la posibilidad de cambiar los parámetros del sistema real para estudiar las vibraciones que se crearán. Para ello, utiliza las ecuaciones de Lagrange de segundo orden.

El modelo presentado puede ser reducido sin perder ningún parámetro relevante por el camino. Además, considera que el conductor tiene peso en las frecuencias naturales de la motocicleta al cambiar su estilo de pilotaje, pero que estos cambios no son lo suficientemente significativos a pesar de que puedan cambiar el comportamiento vibratorio del sistema.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo válido para el análisis del comportamiento vibratorio del tren delantero de una motocicleta frente a diversas irregularidades en el asfalto.

Para poder evaluar el comportamiento de una motocicleta se han utilizado diversos modelos y softwares de simulación a lo largo del tiempo. Dependiendo del objeto de estudio se han utilizado modelos de 1, 2 o más grados de libertad, siendo el modelo escogido en este caso un modelo híbrido donde se agrupa un sistema vibratorio de un grado de libertad con un sólido 3D. Solo será de un grado de libertad debido a que el interés recae en el estudio de las vibraciones provocadas solo en el tren delantero, omitiendo la parte trasera y central de la motocicleta.

Para poder conseguir el objetivo se tendrán que conseguir otros previamente:

- Estudiar modelos existentes que se hayan analizado anteriormente.
- Modelizar la geometría 3D del neumático.
- Diseñar el modelo de suspensión que se utilizará.
- Acoplar la suspensión a la geometría 3D del neumático.
- Modelizar el asfalto.
- Diseñar las condiciones de contorno.
- Ejecutar diversas simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento del modelo.

El software que se utilizará en este caso será Comsol, software que puede analizar tanto dinámicamente como acústicamente los modelos propuestos, además de permitir la parametrización de las variables y los diferentes estudios.

### 3. DISEÑO DEL MODELO PROPUESTO

El objetivo de este estudio es diseñar un modelo de una suspensión delantera de una motocicleta con su correspondiente neumático en un software de simulación, en este caso COMSOL, para analizar el comportamiento del tren delantero de la motocicleta.

Concretamente, se realizará un estudio de dinámica multicuerpo en el software COMSOL, correspondiente al neumático con la llanta y al asfalto representado, y un sistema mecánico global, que representará la suspensión agrupada.

#### 3.1. MARCO TEÓRICO

Se define modo de vibración como cada frecuencia natural de un sistema, identificada por su posición, amplitud y fase. Por tanto, todos los sistemas masa-muelle tienen frecuencias naturales.

Llamamos resonancia al fenómeno que ocurre al excitar un sistema con la misma frecuencia que su frecuencia natural produciendo vibraciones que aumentan de amplitud progresivamente, pudiendo llegar a tener efectos perjudiciales para el sistema. Por ello no es deseable que se llegue a producir resonancia, siendo este uno de los motivos por los que se deben estudiar las vibraciones.

Para poder analizar un sistema vibratorio es necesario realizar un modelo matemático de éste. El modelo matemático se crea a partir de la simplificación del sistema con ayuda de los parámetros de los sistemas mecánicos: rigidez ( $k$ ), masa ( $m$ ) y amortiguamiento ( $c$ ). Estos parámetros se relacionan con las fuerzas de inercia, elásticas y de disipación de energía, es decir, con las fuerzas características de los estudios de vibraciones.

El sistema más sencillo con todos los elementos presentes sería un sistema amortiguado. Consiste en un sistema representado por una masa puntual de valor  $m$ , un muelle con rigidez  $k$  y un amortiguador con coeficiente de amortiguación viscoso  $c$ .

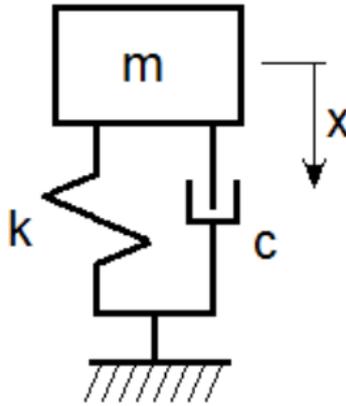


Ilustración 15: Sistema amortiguado

Este sistema consta de un solo grado de libertad, siendo éste el desplazamiento vertical de la masa puntual.

A continuación, se deben plantear las ecuaciones relacionadas con los tres tipos de energías características de los estudios de vibraciones: cinética, relacionada con el trabajo producido por el movimiento; potencial elástica, relacionada con las fuerzas que causan la deformación del elemento elástico; y de disipación, energía disipada por el amortiguador del sistema.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2 \quad (1)$$

Expresión energía cinética

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (2)$$

Expresión energía potencial elástica

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \dot{x}^2 \quad (3)$$

Expresión energía de disipación

Posteriormente, estas expresiones se introducen en la ecuación de Lagrange que se deriva para tener una ecuación diferencial de segundo grado:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_c}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial E_c}{\partial x} + \frac{\partial E_d}{\partial x} = - \frac{\partial E_p}{\partial x} \quad (4)$$

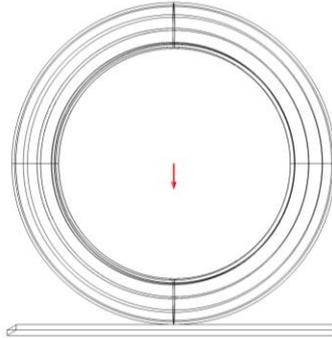
Ecuación de Lagrange para el movimiento lineal

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (5)$$

Ecuación diferencial de 2º grado que describe el sistema

Esta ecuación es la que rige el desplazamiento vertical de la masa suspendida.

Por otro lado, también es necesario encontrar la ecuación de la fuerza que realiza el sistema sobre la rueda. Esta fuerza es ejercida por el amortiguador y por el muelle, puesto que son los dos elementos unidos directamente a la rueda.



*Ilustración 16: Fuerza Aplicada*

$$F_{el} = k \cdot x \quad (6)$$

*Fuerza ejercida por el muelle*

$$F_d = c \cdot \dot{x} \quad (7)$$

*Fuerza ejercida por el amortiguador*

La combinación de estas dos fuerzas es la fuerza que realiza el sistema sobre la rueda:

$$F_t = F_{el} + F_d = k \cdot x + c\dot{x} \quad (8)$$

*Fuerza total que realiza el sistema sobre la rueda*

### 3.2. MODELOS SIMPLIFICADOS DE SUSPENSIÓN

Para poder analizar la suspensión, ésta se debe modelizar. En función de la finalidad del estudio, si interesa analizar también el comportamiento de la rueda o no, se han ido utilizando distintos modelos.

#### 3.2.1. MODELO DE 1 GRADO DE LIBERTAD

El primer modelo de simplificación de la suspensión consiste en un sistema vibratorio de un grado de libertad, siendo el grado de libertad el desplazamiento vertical de la masa suspendida. En este caso sólo se tendrá en cuenta la suspensión.

Éste está compuesto por una masa suspendida de valor  $m$ , un muelle con constante elástica  $k$  y un amortiguador con coeficiente de amortiguación  $c$ . Para

poder tener en cuenta la vibración de la rueda, el nodo al que están conectados el muelle y el amortiguador debe estar libre. De esta manera la vibración puede ser transmitida mediante el desplazamiento.

### 3.2.2. MODELO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD

Para tener en cuenta tanto la suspensión como la rueda, la rueda puede ser simplificada de la misma forma que la suspensión. Es decir, con una masa suspendida, un muelle y un amortiguador con las variables correspondientes de valores relativos a la rueda.

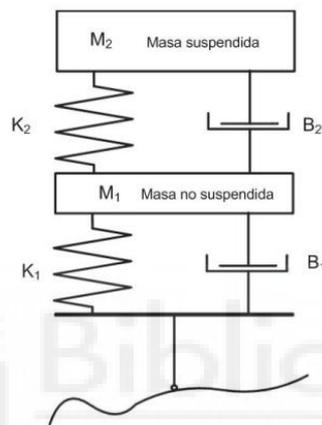
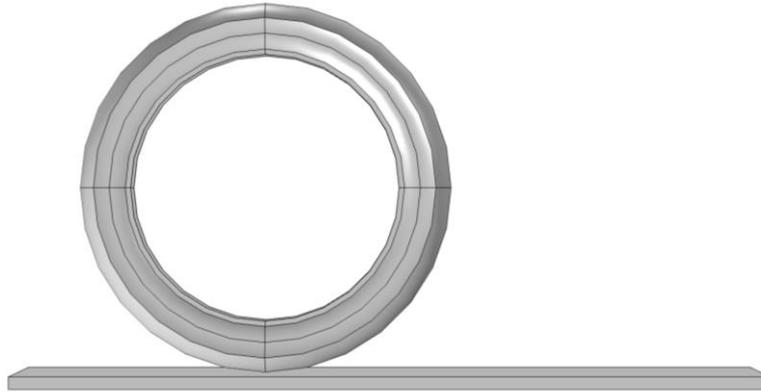


Ilustración 17: Modelo de 2 GDL [36]

Este modelo constaría de dos grados de libertad, los desplazamientos verticales de las masas suspendidas de la simplificación tanto de la suspensión como de la rueda. En este caso, según lo que se quiera analizar, los nodos pueden estar libres, fijos o con un desplazamiento predeterminado.

### 3.3. GEOMETRÍA DEL MODELO PROPUESTO

En este caso, se ha desarrollado un modelo de suspensión nuevo, una mezcla de los modelos vistos hasta ahora. Exactamente, se trataría de un modelo híbrido, donde se utiliza la simplificación de un grado de libertad, pero sin simplificar la rueda, es decir, con una representación 3D de ella. Además, también se ha representado el asfalto.



*Ilustración 18: Geometría Modelo Propuesto*

### 3.3.1. MODELADO DEL NEUMÁTICO

La modelización de la rueda consiste en la representación 3D del perfil del neumático de la motocicleta parametrizado según la designación y medidas de éste. Por ello se puede afirmar que el neumático se encuentra como variable del modelo, es decir, es muy sencillo modificar los parámetros que lo definen para adaptarlo al tipo y tamaño del neumático que se quiere analizar.

Los neumáticos de motocicleta se designan de esta forma: 125/75 R 17, siendo 125 el ancho de la rueda en milímetros, 75 el ratio de aspecto de la rueda, la R hace referencia a que es un neumático de estructura radial y el 17 al diámetro de la llanta en pulgadas.



*Ilustración 19: Diferentes Ruedas Parametrizadas*

El neumático se ha dibujado con una figura de revolución con la forma del perfil del neumático. [37]

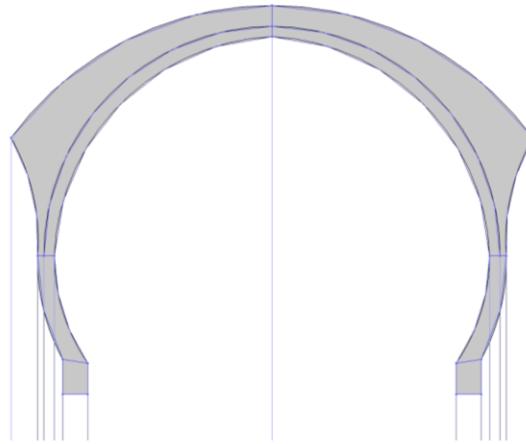


Ilustración 20: Perfil del neumático

Para realizarlo se han tenido en cuenta las características de cada parte del neumático asignando a cada uno el material correspondiente con sus características. Cabe puntualizar que el tamaño y la forma del neumático cambia sensiblemente con la velocidad que lleva la motocicleta, pero esta pequeña variación se despreciará.

Los neumáticos están insuflados con aire a presión, por lo que se ha añadido, señalando las superficies del interior del neumático, una carga de contorno cuya fuerza es la presión insuflada, valor parametrizado como ya lo estaban las dimensiones del neumático.

### 3.3.1.1. PARTES DE UN NEUMÁTICO [38]

**Talón:** Hecho de acero trenzado de alta resistencia recubierto de caucho, crea un sello hermético entre la llanta y el neumático.

**Capa o carcasa:** Hilos de fibra entreteljidos y recubiertos de caucho que forman la estructura del neumático y permiten su flexibilidad.

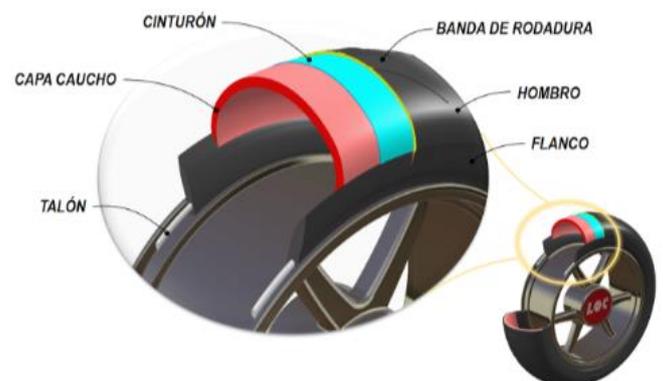


Ilustración 21: Partes de un Neumático [39]

**Cinturón:** Proporciona rigidez al neumático, refuerza la resistencia y reduce el crecimiento dinámico gracias a su capa de acero colocada alrededor del neumático. Los refuerzos están recubiertos de caucho y, en algunos casos, se pueden utilizar para obtener una fortaleza extra, resistencia a los pinchazos y mayor durabilidad.

**Banda de rodadura:** Proporciona amortiguación y agarre al neumático. Puede contener diferentes compuestos diferenciando la parte del hombro (situada entre el área central de la banda de rodadura y el flanco) y el área central.

**Flanco:** Área de caucho más denso que el de la banda de rodadura que va desde ésta hasta el talón y que proporciona estabilidad lateral. Allí podemos encontrar la información acerca del neumático.

Tabla 1: Propiedades de los materiales utilizados en cada parte del neumático [40]

Parte	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$	E (MPa)
Flanco	1140	0,49	3,94
Talón	7800	0,3	210000
Cinturón	1110	0,4	50
Banda Rodadura	1120	0,49	3,501

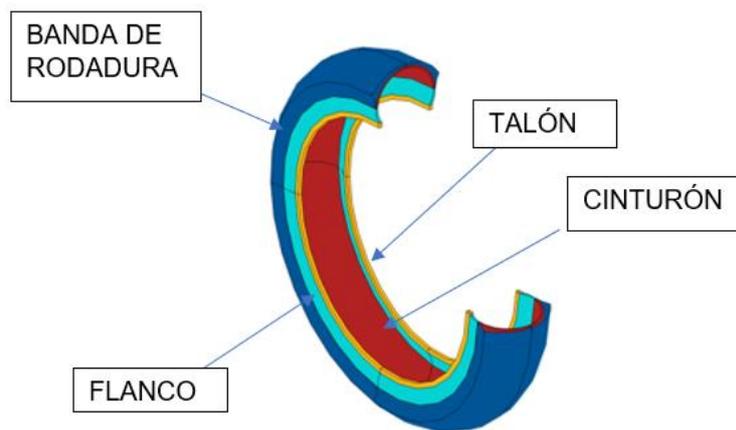


Ilustración 22: Partes del Neumático Modelado

### 3.3.2. MODELADO DE LA SUSPENSIÓN

La suspensión se simplifica conforme se ha explicado en el modelo de suspensión de 1 grado de libertad. Es decir, constará de una masa suspendida, un muelle y un amortiguador.

Como la suspensión delantera será objeto de análisis, el valor de la masa puntual suspendida se corresponderá con la carga que cae sobre el eje delantero de la motocicleta. En cuanto al muelle y el amortiguador, el valor de la constante de rigidez y del coeficiente de amortiguación viscoso serán los correspondientes al tipo de suspensión que se analizará.

Aunque cabe puntualizar que, la suspensión se encuentra como una variable del modelo. Dicho de otro modo, los valores están parametrizados para que sea sencillo de modificarlos y adaptarlos al tipo de suspensión.

### 3.3.3. LLANTA

La llanta es un cuerpo rígido en el que se monta el neumático, por lo que tiene su masa (valor que se puede modificar fácilmente puesto que es una variable del modelo), y por consiguiente su peso, separado del que tiene el neumático. Estas dos magnitudes se añaden al conector rígido con el que se ha definido la llanta. Para definir este se escogen como superficies todas aquellas pertenecientes al talón, puesto que es la parte del neumático que está en contacto con la llanta y transmite las fuerzas entre ambos.

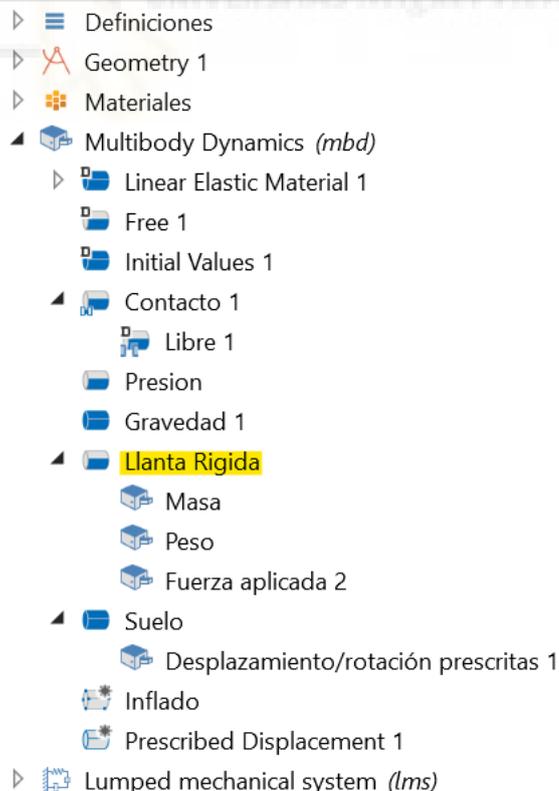


Ilustración 23: Constructor del Modelo: Dinámica Multicuerpo

### 3.3.4. ACOPLAMIENTO SUSPENSIÓN Y RUEDA 3D

La suspensión está unida al neumático en su centro de rotación. Asimismo, como es necesario la posibilidad de que el centro de rotación y la masa puntual correspondiente a la carga que cae sobre el eje delantero puedan desplazarse, los nodos del sistema vibratorio estarán libres.

Igualmente, como el neumático se incluye en formato 3D, para tenerlo en cuenta en el sistema vibratorio se debe añadir una fuente externa. Concretamente, se aplica una fuerza en el centro de rotación hacia abajo en el eje z correspondiente a la fuerza que ejerce el sistema vibratorio. Esta fuerza se añade en el conector rígido que representa la llanta, puesto que así nos aseguramos de que el centro de rotación no va a cambiar ya que la llanta no se va a deformar.

Además, para que el desplazamiento del neumático frente a las rugosidades del asfalto se transmita a la suspensión se necesita definir una *integración* en el punto donde esté conectado el sistema correspondiente a la suspensión, que en este caso se corresponde con el centro de rotación de la rueda. Concretamente, la variable que se integra es el desplazamiento vertical de la rueda. Por lo que esta *integración* regirá el desplazamiento de la fuente exterior, es decir, el elemento que representa el neumático en el sistema vibratorio. Sin embargo, nos encontramos con un impedimento: el centro de rotación de la rueda no es un punto visible y, por tanto, no se puede seleccionar. Como solución se ha optado por seleccionar dos puntos cuyo punto medio del segmento que los une corresponda al centro de rotación del neumático. Para obtener el desplazamiento de este punto, es decir, el que se evaluará en la fuente exterior, se debe hallar la mitad del desplazamiento de cada uno de los puntos seleccionados.

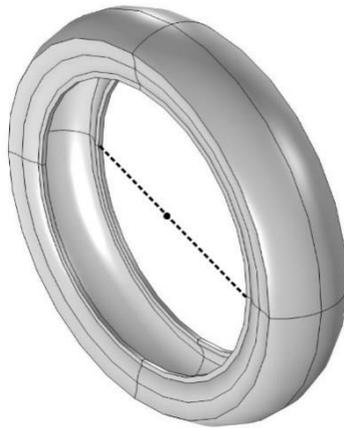


Ilustración 24: Obtención centro rotación rueda

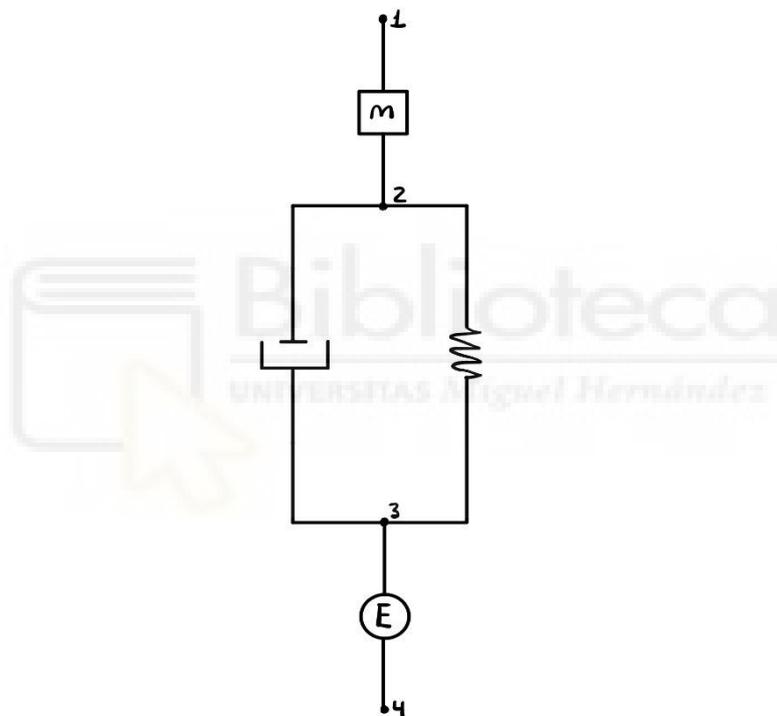


Ilustración 25: Simplificación suspensión y rueda acoplada

### 3.3.5. MODELADO DEL ASFALTO

Además, se ha incluido en el modelo un prisma, modelizado como cuerpo rígido, que representa el asfalto para poder visualizar la huella de la rueda en contacto con el suelo.

Este prisma se puede modificar para mostrar las irregularidades que tenga el terreno por el que pase la motocicleta que se quiera analizar.

### 3.3.6. INTERACCIÓN ASFALTO-RUEDA

Para que el neumático y el asfalto puedan estar en contacto se define un par en contacto. El contorno correspondiente al origen será el superior del prisma que representa el asfalto. Mientras que el correspondiente al destino será la zona de la banda de rodadura del neumático que está en contacto con el asfalto.

Aun así, la definición del par en contacto no es suficiente para que COMSOL nos asegure que los dos elementos van a estar en contacto pues es necesario añadir en el estudio un contacto libre que corresponda a ese par definido.



*Ilustración 26: Contacto rueda-asfalto*

### 3.3.7. MALLADO ELEMENTOS 3D

Para poder analizar el modelo y que el software lleve a cabo la simulación es necesario convertir los elementos dibujados en 3D, es decir la rueda y el asfalto, en 2D. Para ello se realiza un mallado. Esto es convertir la superficie de dichos elementos en una red de cuadriláteros, por tanto, se pasa al estudio de un plano. Dicha red de cuadriláteros se llama malla. Cabe puntualizar que cuanto menores sean los cuadriláteros, mayor será la precisión, porque la malla se ajustará más a la forma de la superficie. A cambio el tiempo que tarda el software en llevar a cabo la simulación aumenta, ya que el número de puntos a estudiar es mayor. Por tanto, se debe llegar a un equilibrio entre el tiempo y la posición, en función de lo que se requiera para el estudio.

En el caso de la rueda, es necesario que la malla sea lo más uniforme posible en todas las partes del neumático. Por lo que se ha optado por que cada

parte del neumático tenga una malla independiente, debido a las diferentes características de cada una. Además, los cuadriláteros de dichas mallas serán lo más pequeños posible para poder obtener así resultados relativamente precisos.

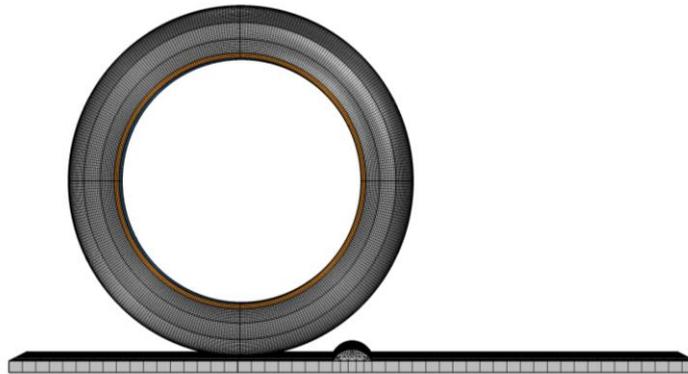


Ilustración 27: neumático Mallado

En cuanto al prisma que representa el asfalto, su mallado no requiere de cuadriláteros tan pequeños, ya que no es nuestro objeto de estudio.

### 3.3.8. MOVIMIENTO DE LA RUEDA

El movimiento de la rueda sobre el pavimento se ha descompuesto en dos movimientos diferenciados: el de rotación de la rueda y el de desplazamiento horizontal del suelo.

En cuanto al *movimiento de rotación* de la rueda se consigue definiendo una rotación predefinida en la llanta, es decir, se escoge el eje con respecto al que se quiere que gire. En nuestro caso el eje X. A continuación, se escribe la expresión que rige el ángulo de rotación que tendrá la rueda en cada momento:

$$\phi = \frac{v \cdot t^2}{d_e} \quad (9)$$

Donde  $v$  es la velocidad lineal a la que se desplaza, y  $d_e$  el diámetro exterior del neumático, siendo  $t$  el tiempo.

Respecto al *desplazamiento horizontal*, para que la rueda avance es necesario definir un desplazamiento horizontal en el bloque que representa el asfalto. En el suelo se mantienen fijos todos los grados de libertad: giros y desplazamientos en las tres direcciones del espacio, exceptuando el relativo al desplazamiento horizontal correspondiente al desplazamiento en el eje Y. Al

igual que en movimiento de rotación se debe definir la expresión que rige su movimiento:

$$u_y = -vt \quad (10)$$

Donde  $v$  la misma velocidad lineal que la escrita en la rueda.

Con la composición de ambos movimientos podemos afirmar que obtenemos la representación más realista posible del movimiento de la rueda sobre el asfalto.

### 3.4. ESTUDIO

El objetivo del estudio es analizar la suspensión en el paso de la rueda por una irregularidad en el terreno.

El estudio está compuesto por tres partes: las dos primeras estacionarias y la restante transitoria. Esto es debido a que el neumático primero debe ser insuflado con aire a presión y estar en contacto con el suelo. Además de que el muelle de la suspensión debe estar comprimido en la posición inicial del movimiento.

#### 3.4.1. ESTUDIO ESTACIONARIO

En la primera parte, se posiciona el neumático en un estado de reposo, donde la rueda ya está insuflada con aire a presión y donde la gravedad y el peso de la masa suspendida han comprimido el muelle de la suspensión. Para ello primero se desplaza el neumático de forma guiada hasta que esté claramente en contacto con el suelo. Con la rueda ya posicionada y en contacto con el suelo, el pavimento y la llanta de la rueda están fijas, además del punto de contacto del neumático con el suelo, para que los otros elementos sean los que se coloquen en su posición inicial, antes del movimiento, gracias a la fuerza de la gravedad y a la presión del aire.

#### 3.4.2. ESTUDIO TRANSITORIO

En el estudio transitorio, ni la llanta ni el punto de contacto del neumático con el asfalto están fijas. Esto es debido a que el objetivo es analizar la rueda en movimiento, y, por tanto, se requiere que la rueda esté libre, pero siga en contacto con el suelo.

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo propuesto se han realizado dos simulaciones diferentes, con igualdad de datos de partida y características, pero con dos irregularidades opuestas en el pavimento: uno de los modelos tiene un resalte mientras que el otro tiene un hueco.

En ambos modelos se han utilizado los mismos datos de partida:

- La designación de los neumáticos es 125/75 mientras que la llanta escogida es de 17 pulgadas y 2,5 kg de masa.
- Los coeficientes correspondientes a la simplificación de la suspensión, es decir, los valores de  $k$ ,  $c$  y  $m$  son 8500 N/m, 0 Ns/m y 117 kg respectivamente. El valor de  $k$  es uno de los parámetros que sirven para realizar el correcto ajuste de la suspensión por lo que es un valor muy variable. Los datos de la  $k$  y la  $m$  han sido proporcionados por un ingeniero del equipo STOP AND GO RACING TEAM S.L. del campeonato de Moto2. El valor de 8500 N/m del coeficiente  $k$  es el valor medio de alrededor de los 40 muelles de los que disponen mientras que el valor de la  $m$  es el 52% del peso del conjunto moto-piloto considerando un piloto de peso medio y un depósito medio-lleño, es decir, 225 kg, ya que este 52% es el peso que cae en el eje delantero cuando la suspensión está estabilizada en todo su recorrido.
- La presión del neumático es de 2 bar y la velocidad lineal a la que se moverá la rueda será de 3 m/s.
- El prisma que representa el pavimento tiene unas dimensiones de 0,4 x 1,2 x 0,05 m.
- Ambas simulaciones se han realizado con un intervalo de tiempo de 0,2s, dando resultados cada milésima de segundo.

Los resultados que se han analizado en ambas simulaciones son los desplazamientos de la masa suspendida y del centro de gravedad de la rueda, la fuerza ejercida por el muelle y la aceleración del sistema.

#### 4.1. MODELO CON RESALTE

Este modelo incluye en el prisma que representa el pavimento un resalte creado con la inclusión de un cilindro. El cilindro es de 0,04 m de radio.

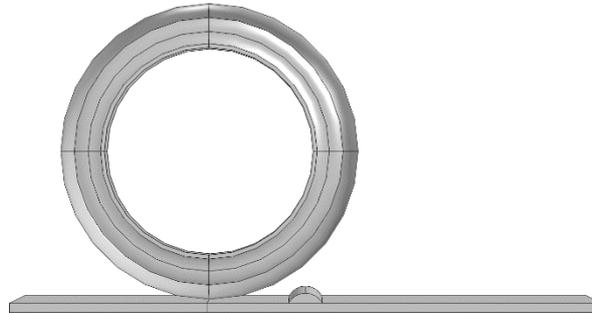


Ilustración 28: Ejemplo con Resalte

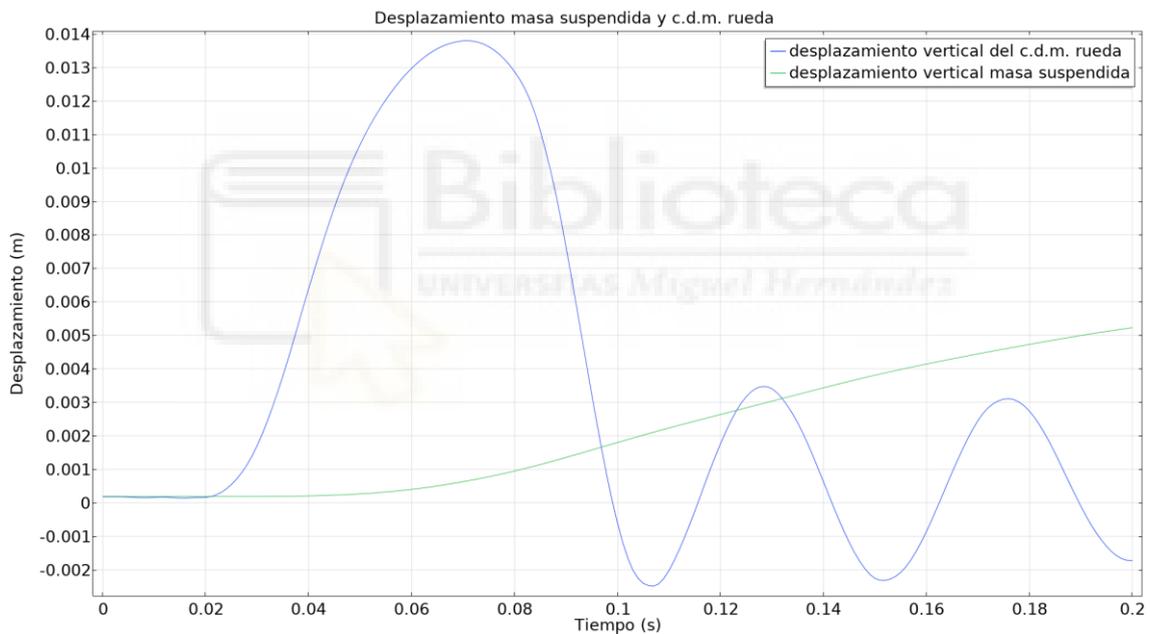


Ilustración 29: Representación de Desplazamiento frente al Tiempo. Modelo con resalte

En la imagen 27 se puede observar el correcto funcionamiento de la suspensión puesto que la amplitud inicial de unos 0,014m del desplazamiento de la masa de la rueda disminuye con el paso del tiempo. En cuanto a la masa suspendida, aumenta su desplazamiento desde el paso de la rueda por el resalte hasta un valor ligeramente superior a 5 mm.

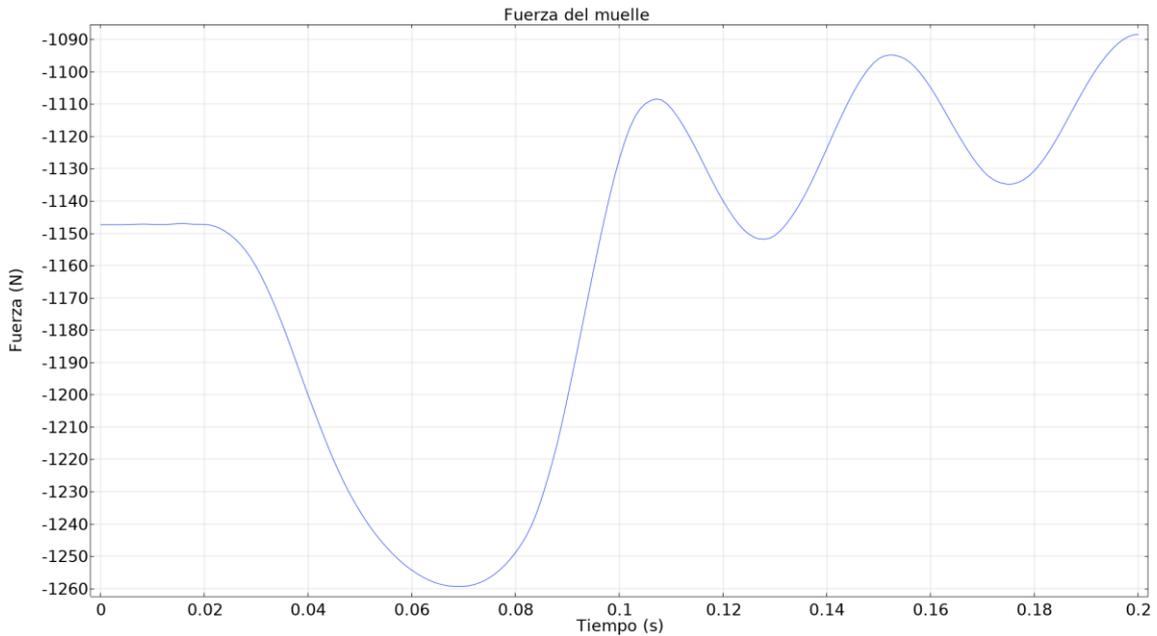


Ilustración 30: Representación de la Fuerza Ejercida por el Muelle frente al tiempo

La posición y la fuerza ejercida por el muelle son inversamente proporcionales, como se puede ver si comparamos las imágenes 27 y 28, el punto de mayor desplazamiento es el punto de menor fuerza ejercida por el muelle (si consideramos el valor absoluto de ambas variables) y, como el desplazamiento, disminuye su amplitud con el paso del tiempo.

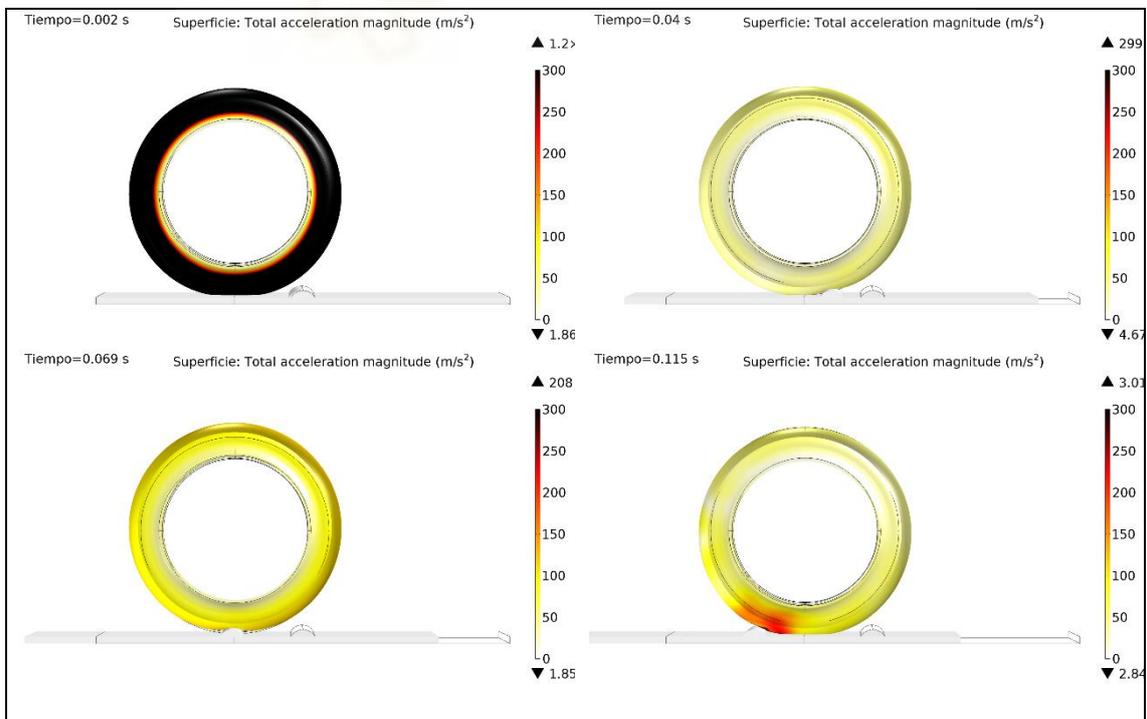


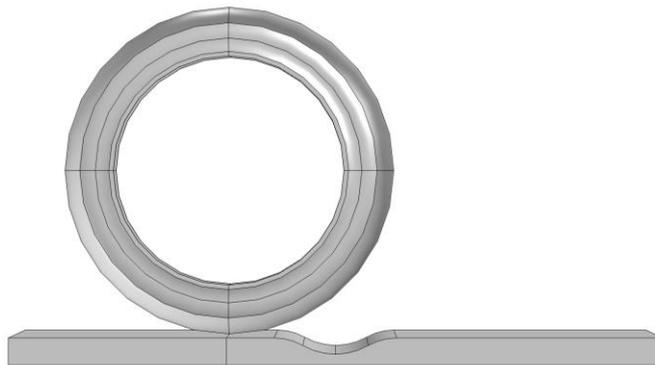
Ilustración 31: Fotogramas representativos de la Aceleración del Sistema en Movimiento

En los fotogramas de la imagen 29 se puede observar la aceleración de la superficie de la rueda en diferentes tramos del movimiento. El primer fotograma representa el momento inicial del movimiento ( $t=0,002s$ ), el segundo corresponde a la rueda antes de pasar por el resalte ( $t=0,04s$ ), el tercero al momento en el que la rueda está encima del resalte ( $t=0,069s$ ), el último fotograma representa el momento en el que la rueda vuelve al pavimento sin irregularidades ( $t=0,115s$ ).

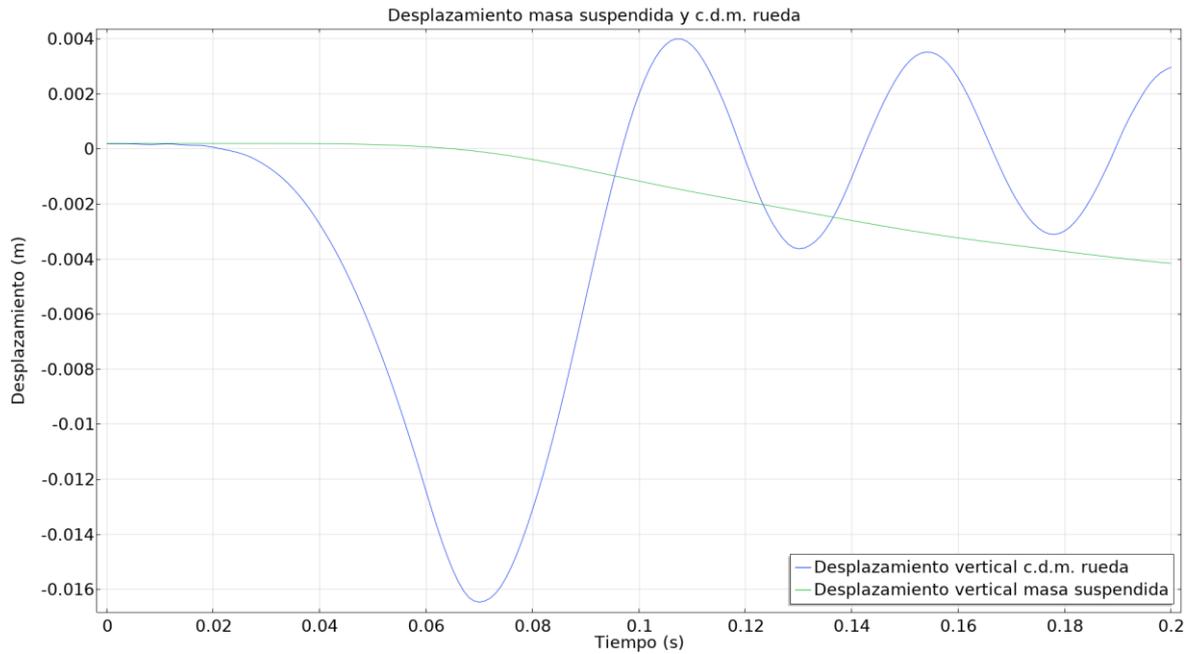
La rueda experimenta un descenso considerable de aceleración al pasar por el resalte, siendo la aceleración máxima de  $299 \text{ m/s}^2$  al empezar a pasar por la irregularidad cuando al inicio tenía una aceleración máxima  $1200 \text{ m/s}^2$ . Cuando el neumático ya ha pasado por encima del resalte, la aceleración aumenta, sobre todo en el punto de contacto entre la rueda y el pavimento, punto de máxima aceleración en todo el movimiento.

#### 4.2. MODELO CON HUECO

De la misma forma que se ha incluido el resalte en el modelo anterior se ha creado un hueco en este. El cilindro tiene un radio de  $0,12 \text{ m}$  y está hundido  $0,03 \text{ m}$  en el prisma para poder crear el hueco. Para que no sea tan brusco el cambio de superficie se han redondeado las aristas con un radio de  $0,105 \text{ m}$ .

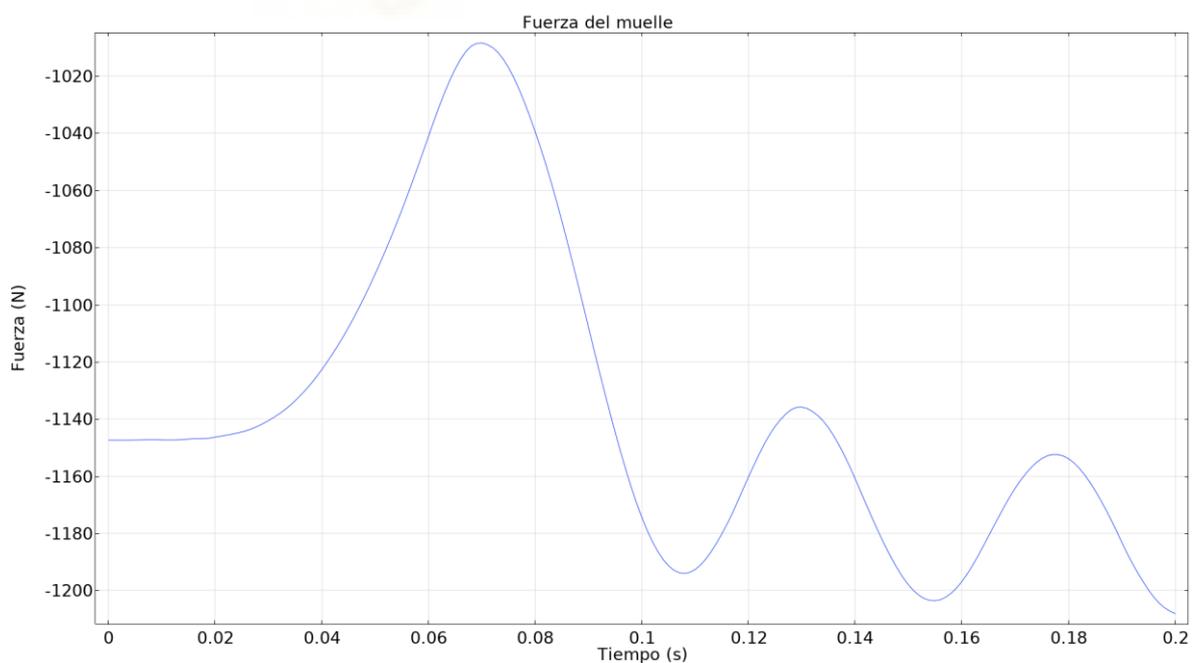


*Ilustración 32: Geometría del Modelo con Hueco*



*Ilustración 33: Representación de los Desplazamientos de la Masa Suspendida y la Rueda frente al tiempo*

En la figura 31 se puede observar el correcto funcionamiento de la suspensión puesto que la amplitud inicial por debajo de -0,016 m del desplazamiento de la masa de la rueda disminuye con el paso del tiempo. En cuanto a la masa suspendida, aumenta su desplazamiento desde el paso de la rueda por el resalte hasta un valor absoluto ligeramente superior a 4 mm.



*Ilustración 34: Representación de la Fuerza Ejercida por el Muelle frente al tiempo*

La posición y la fuerza ejercida por el muelle son inversamente proporcionales, como se puede ver si comparamos las imágenes 31 y 32, el punto de mayor desplazamiento es el punto de menor fuerza ejercida por el muelle (si consideramos el valor absoluto de ambas variables) y, como el desplazamiento, disminuye su amplitud con el paso del tiempo.

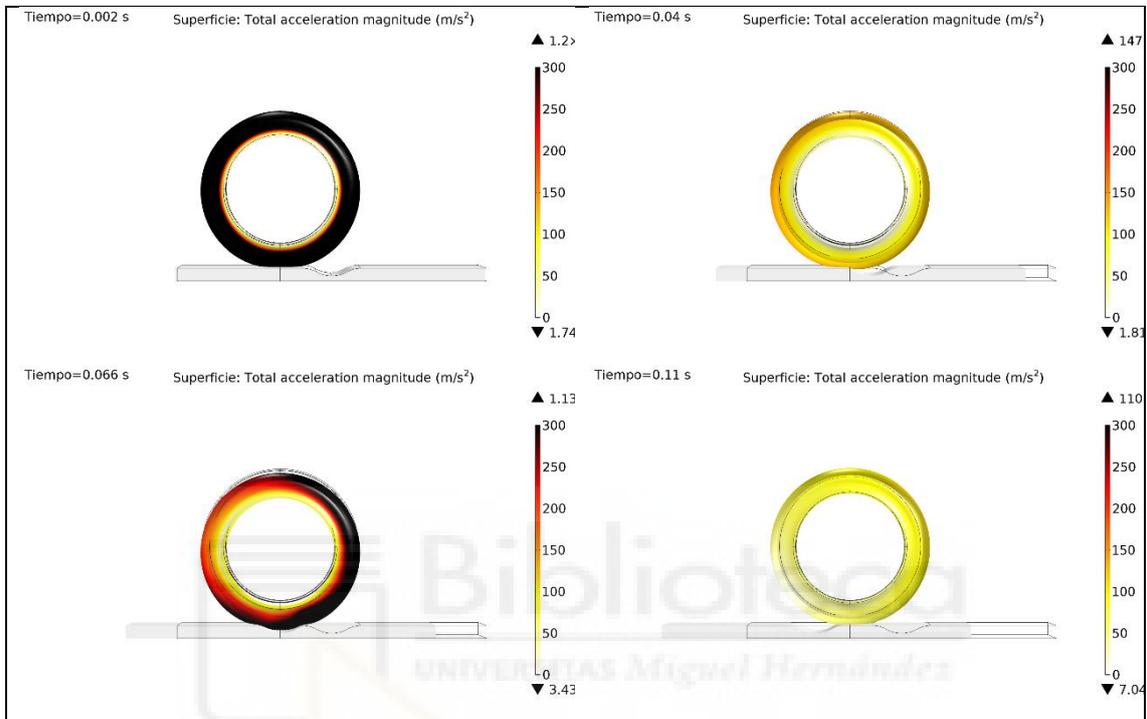


Ilustración 35: Fotogramas representativos de la Aceleración del Sistema en Movimiento

En los fotogramas de la imagen 33 se puede observar la aceleración de la superficie de la rueda en diferentes tramos del movimiento. El primer fotograma representa el momento inicial del movimiento ( $t=0,002s$ ), el segundo corresponde a la rueda antes de pasar por el hueco ( $t=0,04s$ ), el tercero al momento en el que la rueda está en mitad del hueco ( $t=0,066s$ ), el último fotograma representa el momento en el que la rueda vuelve al pavimento sin irregularidades ( $t=0,11s$ ).

La rueda experimenta un descenso considerable para poder pasar por la irregularidad, siendo la aceleración máxima de  $147 \text{ m/s}^2$  al empezar a bajar cuando al inicio tenía una aceleración máxima  $1200 \text{ m/s}^2$ . En el punto más bajo, el neumático vuelve a adquirir aceleración desde el punto de contacto a toda la superficie de la rueda para poder superar el desnivel.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo en el software COMSOL para poder evaluar el comportamiento vibratorio del tren delantero de una motocicleta realizando un sistema híbrido agrupando un sistema vibratorio de un grado de libertad como suspensión con un modelo 3D con la geometría de la rueda.

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo se han realizado dos simulaciones con dos diferentes irregularidades: un resalte y un hueco. En ambas se han analizado los desplazamientos verticales de la masa suspendida de la suspensión y del centro de la rueda junto con la aceleración del sistema y la fuerza ejercida por el muelle. Las simulaciones se han realizado a partir de unas condiciones de contorno diseñadas y unos datos de partida iguales para ambas y con posibilidad de modificación.

Se ha conseguido gracias a estudiar modelos propuestos anteriormente además de desarrollar los acoplamientos y contactos entre suspensión, rueda y pavimento previamente modelados.

### 5.1. TRABAJOS FUTUROS

Las posibilidades de aplicación del modelo son muy amplias, dado que en un mismo modelo se pueden estudiar tanto la interacción del neumático con el asfalto como el comportamiento del tren delantero de la moto.

Al incluir el asfalto en el modelo se puede utilizar este para estudiar la vibración acústica de la rueda en contacto con la carretera, así como para observar el comportamiento al pasar por diferentes tipos de asfaltos, badenes reductores de velocidad o ciertas irregularidades del terreno como baches o socavones. Además, se pueden realizar mapas de ruido con el modelo propuesto.

También se puede emplear como apoyo para conseguir la correcta puesta a punto de la suspensión en determinadas condiciones puesto que se realiza de forma experimental, es decir, con las sensaciones del piloto encima de la motocicleta ayudados por los datos obtenidos de los kilómetros dados.

No solo se puede utilizar para disminuir el tiempo invertido en conseguir una buena puesta a punto si no también en el diseño de la motocicleta, ya que se pueden ajustar los parámetros de la moto a frecuencias que transmitan confort y comodidad al piloto.

En el análisis solo se han tenido en cuenta como resultados los desplazamientos, las aceleraciones y la fuerza ejercida del muelle, pero también se puede obtener información de frecuencias y velocidades.

## 5.2. LIMITACIONES DEL MODELO

A pesar de intentar obtener un modelo lo más realista posible nos encontramos con varias limitaciones debido al empleo de este software.

El modelo considera una simplificación de la suspensión, necesitando un valor o expresión para el coeficiente de amortiguación cuando este no es constante, ya que la amortiguación funciona con un líquido viscoso y cambia con la velocidad que lleva la motocicleta. La horquilla lleva un sistema de válvulas interno que modifica el paso de aceite dependiendo de la velocidad de este, por lo que la horquilla no “amortigua” igual a alta velocidad que a baja ni tampoco funciona de la misma manera en una frenada que pasando por un bache.

Otra limitación es que la suspensión tiene un recorrido limitado que no se ha restringido en el modelo, por lo que es posible que puedan obtenerse del modelo resultados incongruentes con la realidad por este motivo.

Para la validación de los resultados obtenidos en la simulación realizada se necesitaría realizar el mismo estudio con los mismos valores, pero de forma experimental. Si los resultados obtenidos en ambos análisis coinciden o no distan demasiado podremos afirmar la validez del modelo propuesto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] diccionario de la lengua española (RAE).
- [2] A. Moraleja, «Autofácil,» 6 junio 2017.  
<https://www.autofacil.es/seguridad/cuestan-accidentes-trafico/140382.html>.
- [3] OCU, «OCU,» 5 Febrero 2020.  
[https://www.ocu.org/organizacion/prensa/notas-de-prensa/2020/encuestafiabilidadautomoviles\\_040220](https://www.ocu.org/organizacion/prensa/notas-de-prensa/2020/encuestafiabilidadautomoviles_040220).
- [4] M. Agostinacchio, «The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab approach,» 2013.
- [5] D. H. A. M. N. V. Thomas Bennert, «Influence of Pavement Surface Type on Tire/Pavement,» 2005.
- [6] Organización Mundial de la Salud, Environmental noise guidelines for the European Region, 2018.
- [7] Box repsol, «Box Repsol,» 2021.  
<https://www.boxrepsol.com/es/motogp/se-hacen-los-ajustes-suspension-motogp/>.
- [8] «Pinterest,»<https://i.pinimg.com/originals/ac/7b/fc/ac7bfc7e60dcc224c72d0052d261aab7.jpg>.
- [9] BMW Motorrad, «bmw-motorrad,» <https://www.bmw-motorrad.es/es/models/detail/suspension/telelever.html>.
- [10] «Automecatrónica,»[http://automecatronica.files.wordpress.com/2011/10/elelever\\_p0013231.jpeg](http://automecatronica.files.wordpress.com/2011/10/elelever_p0013231.jpeg).
- [11] R. L. S. Martín, «Diario motor,» 10 Junio 2021.  
<https://www.diariomotor.com/noticia/bmw-telelever/>.
- [12] BMW Motorrad, «bmw-motorrad,» <https://www.bmw-motorrad.es/es/models/detail/suspension/duolever.html>.

- [13] D. C. F. V. E. B. Marco Gadola, «The Design of A Motorcycle Featuring Fully Independent Adjustability for Front Suspension and Steering Geometry,» de *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019.
- [14] Honda, «motos.honda,» 20 noviembre 2018.  
<https://motos.honda.com.co/honda-te-cuenta/blog/sistemas-de-suspension-en-motocicletas-todo-lo-que-debes-saber>.
- [15] «all4mini,» <https://www.all4mini.es/horquilla-pitbike-minimoto-quad/645-horquilla-telescopica-completa-pit-bike-horquilla-pit-bike-3701225407076.html>.
- [16] L. BLÁZQUEZ, «espíritu racer moto,» 25 12 2019.  
<https://motos.espirituracer.com/motodeldia/moto-del-dia-scott-flying-squirrel/>.
- [17] «Day Overload,» <https://www.dday-overlord.com/es/equipo/vehiculos/bmw-r12>.
- [18] Honda, «motos honda,» 10 enero 2018.  
<https://motos.honda.com.co/honda-te-cuenta/blog/que-es-suspension-invertida-y-para-que-sirve>.
- [19] «Bud racing,» <https://www.budracing.es/horquilla-completa/25581-horquilla-invertida-tijas-completas-bud-azul-yamaha-yz-65.html>.
- [20] «la maneta,»  
<https://www.lamaneta.org/dictionary/buscado.cgi?num=1052>.
- [21] «vialider,» 1 Abril 2020. <https://www.vialider.es/noticias/confort-en-tu-vehiculo#:~:text=Los%20factores%20que%20m%C3%A1s%20influyen%20en%20el%20confort,cuadros%20de%20instrumentos%20mas%20visibles%20y%20elevalunas%20el%C3%A9ctricos..>
- [22] «RACE,» 29 Septiembre 2019. <https://www.race.es/sistemas-seguridad-pasiva-y-activa>.

- [23] R. d. María, «Estudio de mercado de la incorporación de sistemas de confort, asistencia y seguridad en los vehículos,» 2017.
- [24] «Oxford Languages,»  
[https://www.google.com/search?q=definici%C3%B3n+de+ergonomia&rlz=1C1GCEA\\_enES771ES771&oq=&aqs=chrome.0.69i59i450l8.1056502408j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=definici%C3%B3n+de+ergonomia&rlz=1C1GCEA_enES771ES771&oq=&aqs=chrome.0.69i59i450l8.1056502408j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8).
- [25] «insst,» <https://www.insst.es/-/en-que-unidades-se-miden-las-vibraciones->.
- [26] «medlineplus,»  
<https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001224.htm#:~:text=El%20s%C3%ADndrome%20compartimental%20agudo%20es,problemas%20con%20el%20flujo%20sangu%C3%ADneo..>
- [27] R. L. M. M. V. Cossalter, «The chatter of racing motorcycles,» 2008.
- [28] S. Patterson, «the race,» 20 Junio 2022. <https://the-race.com/motogp/espargaro-unbelievable-german-gp-issue-hindered-many-riders/>.
- [29] R. Jones, «CRASH,» 1 Agosto 2022.  
<https://www.crash.net/wsbk/news/1009283/1/defence-razgatlioglu-compromised-my-line-race-two-start-mess-rea>.
- [30] J. Martín, «marca,» 19 junio 2022.  
<https://www.marca.com/motor/motogp/gp-alemania/2022/06/19/62af2d0b46163ff83b8b463a.html>.
- [31] H. Ni, L. X. Sun y Z. X. Zhang, «The Computational Multi-Body Dynamics for Motorcycle on its Oscillation Properties,» *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2373-375, pp. 76-83, 2013.
- [32] C. M. R. y. M. T. Rodríguez., «Non linear optimization of a sport motorcycle's,» 2014.

- [33] A. S. Mouad Garziad, «Modelling and Control of a Semi-active Suspension System of Motorcycle,» de *International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, Kenitra, Marruecos, 2018.
- [34] S. Kaul, «Influence of a Vibration Isolation System on Planar,» 2019.
- [35] A. D. ĩebowski, «Analysis of the Effect of Mass Parameters on Motorcycle,» *Energies*, vol. 14, nº 16, 2021.
- [36] F. F. J. P. y. B. F. Jorge Hurel. Efraín Terán, «Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo,» 2017.
- [37] Ö. ŞENGÜL, «ANALYSIS OF RADIAL TIRE DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS FOR SUSTAINABLE PRODUCTION,» de *INTERNATIONAL MARMARA SCIENCE AND SOCIAL SCIENCES CONGRESS - IMASCON2019 SPRING*, KOCAELİ / TURQUIA, 2019.
- [38] «Dunlop,» [https://www.dunlop.eu/es\\_es/motorcycle/safety-and-technology/tires-explained.html](https://www.dunlop.eu/es_es/motorcycle/safety-and-technology/tires-explained.html).
- [39] R. 401, «El blog de los profesionales del taller,» <https://blog.reparacion-vehiculos.es/neumaticos-moto-partes-tipos-recomendaciones>.
- [40] Y. Xie y Q. Yang, «Tyre–pavement contact stress distribution considering tyre types.,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, pp. 1899-1911, 2018.