



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

**Estudio de viabilidad de la recuperación energética en
suspensiones de automóvil**

Autor: Iñaki López Gutiérrez

Director: Juan de Norverto Moriñigo

Madrid

Julio 2016

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

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

El autor D. Iñaki López Gutiérrez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Estudio de viabilidad de la recuperación energética en suspensiones de automóvil, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

Madrid, a 7 de Julio de 2016

ACEPTA



Fdo.....

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Estudio de viabilidad de la recuperación energética en suspensiones de
automóvil**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2016/2017 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.: Iñaki López Gutiérrez Fecha: 07 / 07 / 2016

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan de Norverto Moriñigo Fecha: 07 / 07 / 2016

Vº Bº del Coordinador de Proyectos



Fdo.: Fernando de Cuadra García Fecha: 07 / 07 / 2016

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA EN SUSPENSIONES DE AUTOMÓVIL

Autor: López Gutiérrez, Iñaki

Director: De Norverto Moriñigo, Juan

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción y objetivos

En la búsqueda de una mayor eficiencia energética de los automóviles, la tecnología conocida como suspensiones regenerativas ha llamado la atención de investigadores y profesionales de la industria del automóvil. Un sistema de suspensiones regenerativas es aquel el cual aprovecha la energía cinética generada en el movimiento vertical de las suspensiones para convertirla en otro tipo de energía. En los últimos años, los avances en este campo han ido en la dirección de las suspensiones regenerativas eléctricas, las cuales convierten energía cinética en energía eléctrica. Dichas suspensiones han sido propuestas como una posible solución al principal problema que tienen los coches híbridos y eléctricos: la autonomía de la batería. Los amortiguadores convencionales disipan la energía cinética de la suspensión en forma de calor, mientras que los sistemas de suspensiones regenerativas eléctricas sustituyen dichos amortiguadores por amortiguadores electromagnéticos, que hacen a la vez de amortiguador y generador de electricidad.

Este proyecto consiste en una simulación del sistema de suspensiones regenerativas eléctricas, centrándose fundamentalmente en dos objetivos:

- Cuantificación de la energía disipada en los amortiguadores hidráulicos convencionales, para el caso de un coche con un sistema de suspensiones pasivas.
- Diseño de un generador eléctrico lineal y estudio de su comportamiento simultáneo como amortiguador y como generador.

Metodología

El modelo utilizado e implementado en Matlab-Simulink para estudiar el comportamiento de las suspensiones de coche ha sido el modelo de cuarto de vehículo. Este modelo, de dos grados de libertad, es ampliamente utilizado para llevar a cabo simulaciones con el fin de conocer la dinámica vertical de la suspensión. Se analiza únicamente una cuarta parte del vehículo, por lo que a la hora de cuantificar la energía total disipada, se ha asumido que los cuatro amortiguadores disipan simultáneamente la misma cantidad de energía.

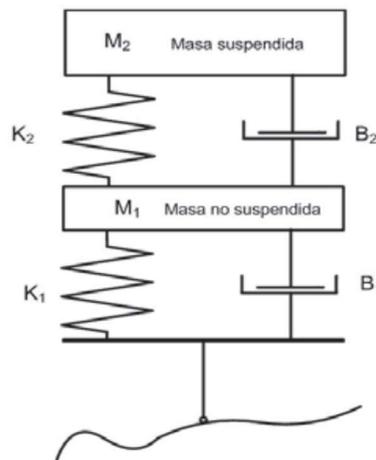


FIG. 1: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO

Las entradas de este modelo son dos: velocidad del coche y perfil de rugosidad del terreno sobre el que circula el coche. En todas las simulaciones realizadas se ha tomado la condición de velocidad constante. Respecto al perfil de rugosidad del terreno, se ha utilizado la norma ISO 8608 para generar perfiles artificiales. Dicha norma clasifica los terrenos en distintas clases de calidad en función de las mayores o menores irregularidades verticales que presenten.

Además de cuantificar la energía disipada por los amortiguadores, también se han tenido en cuenta las dos principales funciones de un sistema de suspensión: el confort y la seguridad de los pasajeros. Para ello, se han definido dos índices que han sido evaluados en todas las simulaciones simultáneamente con la energía disipada:

- Índice de incomodidad: definido como la aceleración vertical que percibe el cuerpo humano dentro del coche. Para calcular dicha percepción, se ha utilizado la norma ISO 2631.
- Índice de inseguridad: definido como un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas dinámicas con las estáticas que sufre el neumático.

En primer lugar, se ha simulado un caso base con los valores de un turismo estándar. Después, se ha realizado un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros de modelo de cuarto de vehículo.

En cuanto al amortiguador electromagnético, se ha diseñado un generador lineal de imanes permanentes cuyo principio de operación se basa fundamenta en la Ley de Faraday-Lenz. Se ha realizado un estudio de los materiales más adecuados con el fin de maximizar el flujo magnético dentro del mismo y por tanto la energía generada. También se han determinado las ecuaciones necesarias para evaluar su comportamiento como generador (expresiones de la tensión y potencia inducida) y como amortiguador (expresiones de la fuerza de amortiguación y del coeficiente de amortiguación equivalente).

El generador diseñado ha sido implementado en Simulink mediante la herramienta Simscape, y ha sido simulado acoplado al modelo de cuarto de vehículo como amortiguador pasivo.

Resultados

En cuanto a la energía disipada por los amortiguadores hidráulicos utilizados mayoritariamente en la industria del automóvil actualmente, se ha hallado que la potencia instantánea disipada es directamente proporcional a la velocidad del coche y a las irregularidades del terreno:

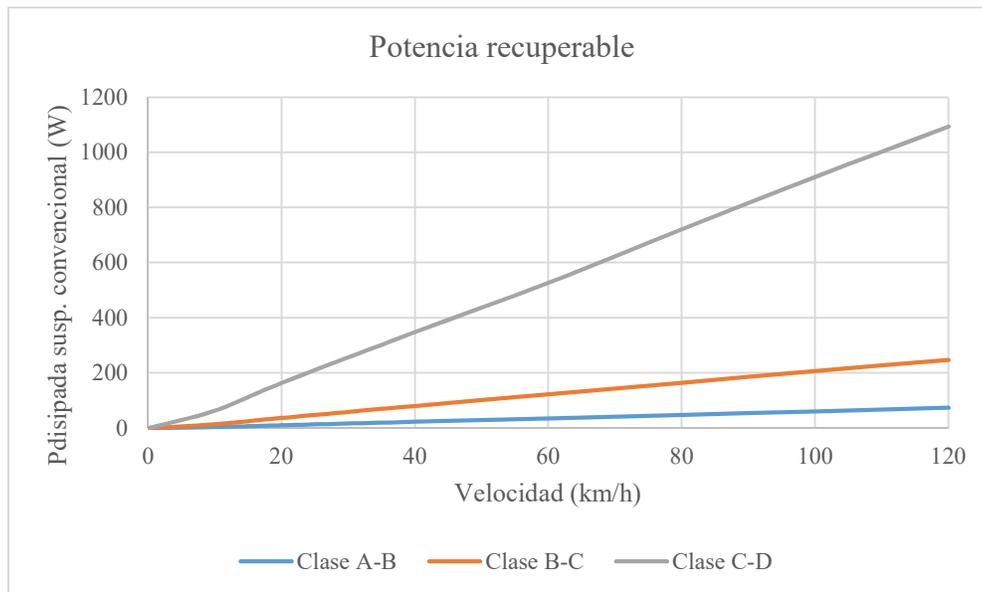


FIG. 2: POTENCIA DISIPADA EN LOS 4 AMORTIGUADORES ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

A partir de los resultados mostrados en la figura 2, se ha estimado el aumento de autonomía que supondría, para el caso de un coche eléctrico de consumo medio 15 kWh/100 km, generar el 100% de dicha potencia en forma de potencia eléctrica:

Clase de terreno	E (kWh / 100km)	Aumento de la autonomía (%)
A-B	0.056	0.372
B-C	0.193	1.287
C-D	0.846	5.640

TABLA 1: POTENCIAL AUMENTO DE LA AUTONOMÍA DE UN COCHE ELÉCTRICO ESTÁNDAR CON SUSPENSIONES REGENERATIVAS

Los resultados del análisis de sensibilidad realizado muestran que la potencia disipada en los amortiguadores es especialmente sensible a tan solo un parámetro: la constante de rigidez del neumático (K_1). Aumentar la rigidez de los neumáticos, lo cual se consigue aumentando la presión de inflado de los mismos, supone un incremento de la energía recuperable en las suspensiones. Por ejemplo, aumentar un 10 % la rigidez de los neumáticos, aumenta en un 9.8 % la potencia disipada en los amortiguadores. Sin embargo, hacer esto implica una conducción más incómoda y más insegura, tal y como puede observarse en la siguiente figura:

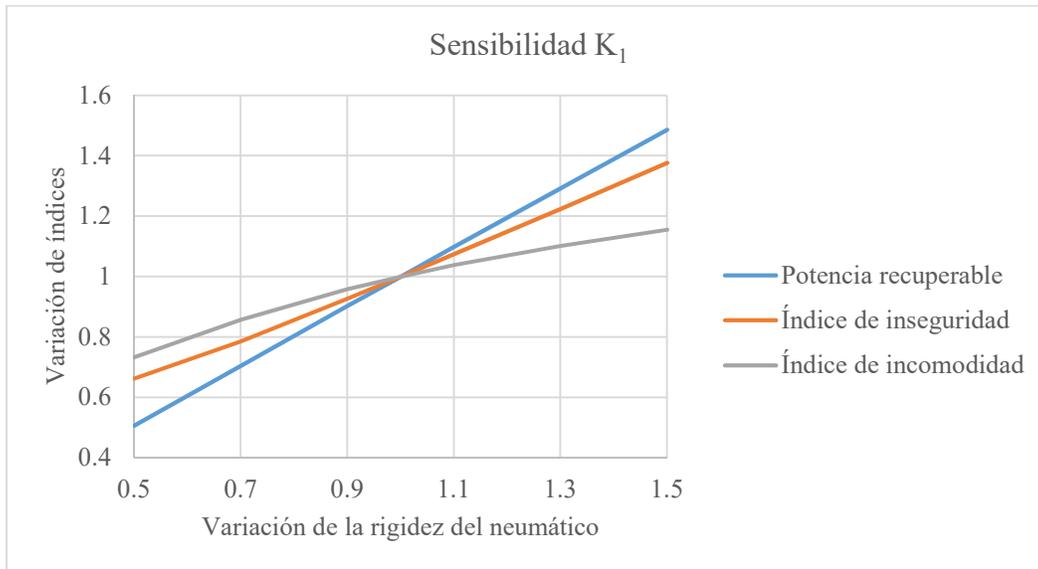


FIG. 3: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL NEUMÁTICO K_1

En cuanto al análisis de los materiales necesarios para construir el generador lineal, se ha determinado que los imanes permanentes que presentan mayor capacidad energética son los NdFeB. Además, de acuerdo con otros estudios realizados al respecto, el material más adecuado de la varilla (a la cual son solidarios los imanes permanentes) para maximizar el flujo magnético es el aluminio. Dichos estudios anteriores revelan también que una envolvente cilíndrica exterior hecha de acero maximiza el flujo.

En cuanto a la simulación del generador diseñado como amortiguador pasivo, se han simulado dos modalidades: una monofásica y otra trifásica. En ambos casos, el generador diseñado ha demostrado ser capaz de ofrecer las mismas prestaciones amortiguadoras que los amortiguadores convencionales en distintas condiciones de conducción. Sin embargo, presentan una gran diferencia en cuanto a la eficiencia, siendo mucho más eficiente el generador trifásico. El trifásico presenta una eficiencia del 92 % en todos los casos simulados, mientras que el monofásico no supera una del 65 % en el mejor de los casos. Esto se debe al menor consumo de corriente de fase que se produce en el generador trifásico. En la siguiente tabla se muestra una comparativa de dicha corriente:

Condiciones	Ifase (A, rms)		Diferencia (%)
	Monofásico	Trifásico	
A-B, 100 km/h	1.99	0.71	-64.17
B-C, 80 km/h	3.29	1.18	-64.24
C-D, 60 km/h	5.88	2.11	-64.17

TABLA 2: DIFERENCIA DE LA CORRIENTE DE FASE ENTRE GENERADOR MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO EN DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE

Por otro lado, se ha llevado a cabo la simulación de la rectificación AC/DC de la tensión inducida por el generador acoplado como amortiguador. Los resultados de esta simulación reflejan que no es una señal fácilmente convertible en continua. Se necesitan unos filtros del orden los 2 ó 3 faradios a la salida del puente rectificador para obtener una señal DC, aunque aun así tiene un rizado considerable. Este filtro implica unos tiempos de carga del condensador altos (alrededor de los 10 s para las situaciones simuladas), por lo que no se puede obtener la energía recuperada en forma continua inmediatamente.

Conclusiones

Este proyecto demuestra la viabilidad del uso de los generadores lineales de imanes permanentes como amortiguadores pasivos acoplados en las suspensiones de coches. También demuestra que se puede inducir en forma de potencia eléctrica la potencia que de otro modo, con amortiguadores hidráulicos convencionales, sería disipada en forma de calor.

Sin embargo, no se ha analizado en detalle el proceso de transporte de la energía generada en las suspensiones regenerativas al sistema de baterías del coche. Se ha simulado el circuito rectificador AC/DC (el cual es necesario para poder cargar una batería con la energía eléctrica de la suspensión regenerativa) sobre una carga, sin tener en cuenta el circuito completo de conexión a la batería.

Futuros trabajos en el campo de las suspensiones regenerativas eléctricas deberían ir enfocados al estudio y diseño de la electrónica de potencia necesaria para almacenar la energía eléctrica generada con los amortiguadores electromagnéticos en un sistema de baterías. Una vez diseñado esto, se podría conocer en detalle la cantidad de energía finalmente disponible para su almacenamiento en las baterías del coche, ya que el aumento de autonomía calculado en este proyecto (tabla 1) parte de un cálculo ideal sin pérdidas.

FEASIBILITY STUDY ON ENERGY RECOVERY FROM CAR SUSPENSIONS

ABSTRACT

Introduction and objectives

In the search of more energy efficient cars, the technology called as regenerative suspensions has attracted much attention from researchers and workers in the car industry. A regenerative suspensions system makes use of the kinetic energy generated in the vertical movement of the suspensions, converting it into another form of energy. During the last years, advances in this field have been directed towards electric regenerative suspensions, which convert kinetic energy into electricity. This kind of suspension has been proposed as a possible solution to the main disadvantage of hybrid and electric cars: range anxiety. Conventional shock absorbers dissipate the suspension's kinetic energy into heat, while an electric regenerative suspensions system substitutes those shock absorbers with electromagnetic shock absorbers, which work simultaneously as shock absorber and electricity generator.

This project consists on a simulation of an electric regenerative suspensions system, focusing in two main objectives:

- Quantification of the dissipated energy in conventional hydraulic shock absorbers, for the particular case of a passive suspensions car.
- Linear electric generator design and evaluation of its performance as shock absorber and generator.

Methodology

The model implemented in Matlab-Simulink to study the behavior of car suspensions has been the quarter car model. This two degree of freedom model is widely used in the industry to carry out simulations which objective is to study the vertical dynamic of the suspension. Only a quarter of the car is analyzed, so when it comes to quantify the total amount of dissipated energy, it has been assumed that the four shock absorbers dissipate the same amount of energy simultaneously.

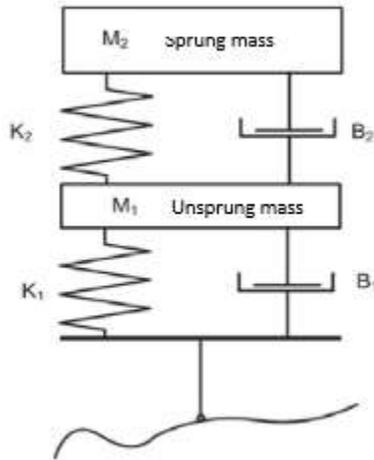


FIG. 1: QUARTER CAR MODEL

The inputs of this system are two: car's speed and road roughness. All the simulations have been carried out assuming constant speed. With regard to the roughness profile, artificial road profiles have been generated making use of ISO 8608. This ISO standard provides a classification of road qualities according to their unevenness.

In addition to quantifying the dissipated energy by shock absorbers, it has been also taken into account the two major functions of a suspension system: comfort and security of the passengers in the car. For that, two indices have been defined and evaluated in every simulation that has been carried out, as well as the dissipated energy calculation:

- Discomfort index: defined as the vertical acceleration that a human body inside the perceives. To calculate human perception, ISO 2631 has been used.
- Insecurity index: defined as a dimensionless parameter that relates the dynamic and static loads that the tire suffers.

In the first place, a base case with standard car values has been simulated. Then, a sensitivity analysis on the different quarter car parameters has been done.

Regarding the electromagnetic shock absorber, a permanent magnet linear generator based on Faraday-Lenz's Law has been designed. A study has been done in order to determine the most appropriate materials to maximize magnetic flux inside the generator and thus the generated energy. Also, a series of expressions have been identified in order to evaluate its behavior as a

generator (expressions of induced voltage and power) and as a shock absorber (expressions of damping force and equivalent damping constant).

The designed generator has been implemented in Simulink using Simscape tool, and it has been simulated coupled to the quarter car model as a passive shock absorber.

Results

With regard to the dissipated energy by hydraulic shock absorbers, the most used ones in the car industry nowadays, it has been found that instant dissipated power is directly proportional to the car speed and road unevenness:

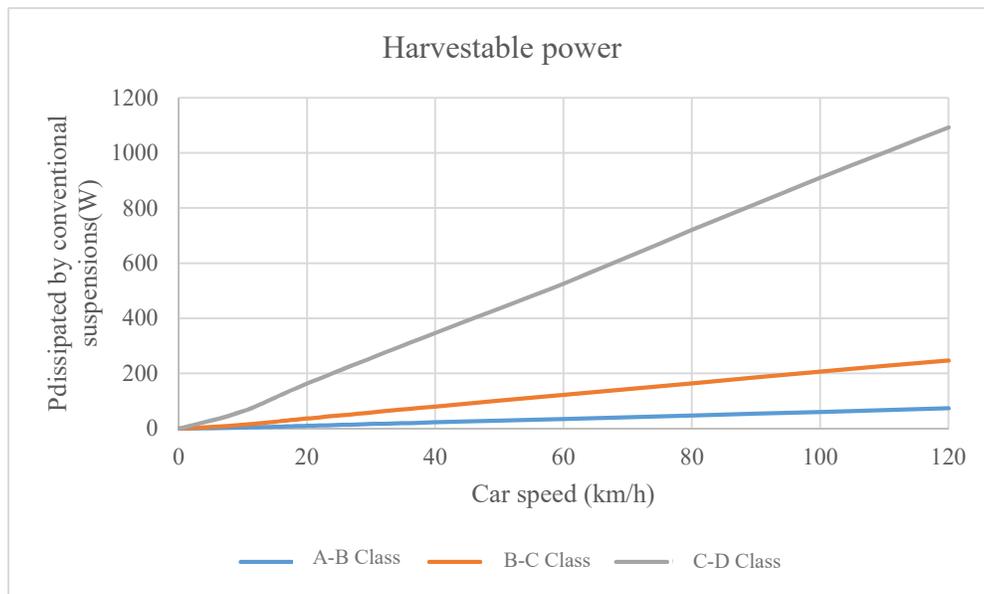


FIG. 2: DISSIPATED POWER BY 4 SHOCK ABSORBERS AT DIFFERENT SPEEDS AND ROAD PROFILES

From the results showed in figure 2, the potential range increase for an electric car with an average consumption of 15 kWh/100 km has been calculated, if 100 % of the power was harvested:

Road class	E (kWh / 100km)	Range increase (%)
A-B	0.056	0.372
B-C	0.193	1.287
C-D	0.846	5.640

TABLE 1: POTENTIAL RANGE INCREASE OF AN STANDARD EV CAR WITH REGENERATIVE SUSPENSIONS

The sensitivity analysis results show that the power dissipated in the shock absorbers is especially sensitive to only one parameter: the tire stiffness (K_1). Increasing tires stiffness, which can easily be achieved by increasing the tires inflation pressure, means an increase in the harvestable energy from car suspensions. For example, increasing K_1 by a 10 %, the power dissipated increases in a 9.8 %. However, doing so implies an uncomfortable and unsafe driving, as it can be seen in the following figure:

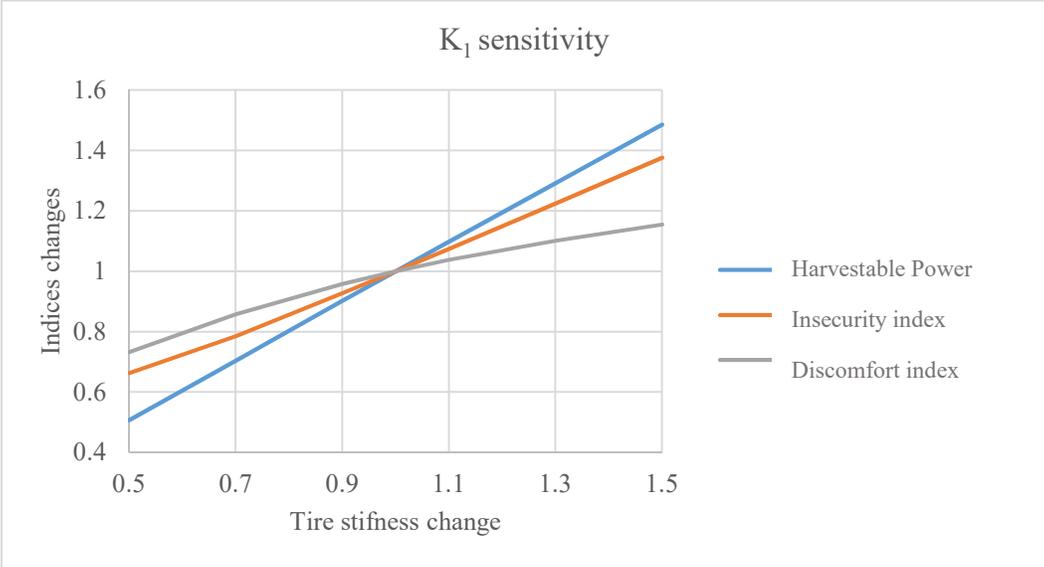


FIG. 3: EFFECTS OF TIRE STIFNESS (K_1) CHANGES

With regard to study done in order to find out the best materials for the linear generator, it has been found that NdFeB permanent magnets are the best choice as they have the biggest energy capacity. Furthermore, according to other research in this area, the most appropriate material for the rod (permanent magnets are attached to it) to maximize the magnetic flux is aluminum. Those mentioned studies also reveal that an outside cylinder made of iron is the one that maximizes the flux inside the generator.

With regard to the simulation of the generator as a passive damper, two modalities have been simulated: a one-phase and a three-phase generator. For both cases, the designed generator has shown great performance as a passive shock absorber, showing the same performance as a hydraulic damper in different driving conditions. However, the two modalities show a big difference in efficiency. The three-phase generator has a 92 % efficiency in all the simulations,

while the one-phase achieves only 65 % efficiency in the best case. This is due to reduction in phase current achieved using three phases instead of only one. In the following table a comparative chart on phase current is shown:

Conditions	I _{phase} (A, rms)		Difference (%)
	One-phase	Three-phase	
A-B, 100 km/h	1.99	0.71	-64.17
B-C, 80 km/h	3.29	1.18	-64.24
C-D, 60 km/h	5.88	2.11	-64.17

TABLE 2: COMPARATIVE CHART ON PHASE CURRENT BETWEEN ONE-PHASE AND THREE-PHASE GENERATORS AT DIFFERENT SPEEDS AND ROAD PROFILES

A simulation of the AC/DC rectification of the AC induced voltage in the generator working as a damper has also been carried out. The results of this simulation show that it is not an easily convertible signal. 2 or 3 farads filters are needed in order to obtain a more or less DC signal, although it still has considerable ripple. This filter implies long charging time for the capacitor filter (around 10 seconds for the conditions simulated), which prevents the system to recover the energy in DC form immediately.

Conclusions

This project demonstrates the feasibility of permanent magnet linear generators as passive dampers coupled to the suspension car system. It also demonstrates that the energy dissipated into heat by conventional dampers, can be induced as electric energy by the mentioned generators.

However, the transport process of the energy generated at the regenerative suspensions to the car battery has not been evaluated in detail. The AC/DC rectifier (which is necessary to be able to charge a battery with the energy harvested with electromagnetic dampers at the suspensions) has been simulated connected to a load, without taking into account the entire circuit which would connect it to a battery.

Future works on the electric regenerative suspension systems should focus on the study and design of the necessary power electronics to store the harvested energy in the batteries. Once this is designed, the exact amount of energy finally available to be stored could be calculated, as the range increase shown here (table 1) draws from an ideal calculation without taking into account any losses.

Índice de contenidos

Índice de figuras.....	21
Índice de tablas	25
1. Introducción	27
1.1. Motivación	27
1.2. Objetivos	29
2. Estado del arte de las suspensiones.....	31
2.1. Funciones del sistema de suspensión	31
2.2. Componentes del sistema de suspensión.....	32
2.2.1. Neumáticos	32
2.2.2. Resortes	33
2.2.3. Amortiguadores	35
2.2.3.1. Amortiguador pasivo	36
2.2.3.2. Amortiguador semi-activo	39
2.2.3.3. Amortiguador activo	41
2.3. Tipos de sistema de suspensión.....	42
2.3.1. Suspensión pasiva.....	42
2.3.2. Suspensión semi-activa.....	43
2.3.3. Suspensión activa	43
2.4. Suspensión regenerativa.....	44
2.4.1. Suspensión regenerativa mecánica	44
2.4.2. Suspensión regenerativa electromagnética	44
3. Modelo desarrollado para evaluar la energía disipada en las suspensiones.....	49
3.1. Modelo de cuarto de vehículo	49
3.1.1. Modelización del terreno	51
3.1.2. Índice de incomodidad.....	54
3.1.3. Índice de inseguridad.....	55
3.2. Energía recuperable en las suspensiones.....	56
4. Simulación del modelo: análisis de resultados	57
4.1. Caso base.....	58
4.1.1. Desplazamiento y velocidad de la suspensión.....	58
4.1.2. Índice de incomodidad.....	59

4.1.3. Índice de inseguridad.....	60
4.1.4. Potencia disipada en los amortiguadores.....	61
4.2. Análisis de sensibilidad.....	64
4.2.1. Variación de la masa suspendida M_2	64
4.2.2. Variación de la masa no suspendida M_1	65
4.2.3. Variación de la constante de amortiguación B_2	65
4.2.4. Variación de la constante de rigidez del muelle K_2	66
4.2.5. Variación de la constante de rigidez del neumático K_1	67
4.2.6. Conclusiones.....	68
5. Suspensión regenerativa.....	69
5.1. Generador lineal de imanes permanentes.....	69
5.1.1. Principio de funcionamiento.....	69
5.1.2. Descripción general y diseño.....	70
5.1.2.1. Parte móvil.....	71
5.1.2.2. Parte fija.....	75
5.1.3. Circuito equivalente y ecuaciones.....	77
5.1.3.1. Rectificación AC/DC.....	80
5.2. Simulación del modelo con suspensión regenerativa.....	83
5.2.1. Simulación sobre carga, sin rectificación AC/DC.....	84
5.2.1.1. Generador monofásico.....	85
5.2.1.2. Generador trifásico.....	89
5.2.2. Simulación de la rectificación AC/DC.....	93
5.2.3. Conclusiones acerca de la suspensión regenerativa.....	99
6. Conclusión y futuros trabajos.....	101
6.1. Conclusión.....	101
6.2. Futuros trabajos.....	102
Referencias.....	103

Índice de figuras

FIG. 1.1: COMPARATIVA DE LA AUTONOMÍA DE DISTINTOS TIPOS DE VEHÍCULOS [1]	28
FIG. 2.1: SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN COCHE.....	32
FIG. 2.2: MODELO EQUIVALENTE DEL NEUMÁTICO PARA EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA VERTICAL DEL COCHE.....	33
FIG. 2.3: MUELLES HELICOIDALES EMPLEADOS EN EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE COCHES COMO RESORTES.....	33
FIG. 2.4: MUELLE Y DEFINICIÓN DE LAS COTAS DE SUS EXTREMOS PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY DE HOOKE.....	34
FIG. 2.5: DETALLE DE LA SECCIÓN DE UN MUELLE HELICOIDAL.....	35
FIG. 2.6: AMORTIGUADOR PASIVO EN CONFIGURACIÓN MONOTUBO.....	36
FIG. 2.7: AMORTIGUADOR PASIVO EN CONFIGURACIÓN BITUBO.....	37
FIG. 2.8: AMORTIGUADOR Y DEFINICIÓN DE LAS COTAS DE SUS EXTREMOS PARA LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO LINEAL.....	38
FIG. 2.9: VÁLVULA SOLENOIDE Y SUS DOS MODOS DE OPERACIÓN.....	39
FIG. 2.10: ESTRUCTURA DEL FLUIDO MAGNETORREOLÓGICO EN DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	40
FIG. 2.11: SUSPENSIÓN ACIVA REGENERATIVA PROPUESTA POR SUDA ET AL.....	45
FIG. 2.12: CIRCUITO RECTIFICADOR DEL SISTEMA MOSTRADO EN LA FIGURA 2.11.....	45
FIG. 2.13: GENERADOR LINEAL DISEÑADO POR ZUO ET AL. PARA SER EMPLEADO COMO AMORTIGUADOR ELECTROMAGNÉTICO.....	46
FIG. 2.14: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA LINEAL PROPUESTA POR INTERTRONIC GRESSER GMBH.....	47
FIG. 2.15: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA ROTACIONAL BASADA EN EL MECANISMO DE PIÑÓN Y CREMALLERA PROPUESTA POR SUDA ET AL.....	47
FIG. 2.16: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA ROTACIONAL BASADA EN EL MECANISMO DE HUSILLO DE BOLAS PROPUESTA POR SUDA ET AL.....	47
FIG. 3.1: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO.....	49
FIG. 3.2: DIAGRAMA DEL CUERPO LIBRE EN EL MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO PARA SUSPENSIÓN PASIVA.....	50
FIG. 3.3: PERFILES DE TERRRENO ARTIFICIALES GENERADOS SIGUIENDO LA NORMA ISO 8609.....	54
FIG. 4.1: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO PARA UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA IMPLEMENTADO EN SIMULINK.....	57
FIG. 4.2: DESPLAZAMIENTO DE LA SUSPENSIÓN ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO.....	58
FIG. 4.3: VELOCIDAD DE LA SUSPENSIÓN ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO.....	59
FIG. 4.4: ACELERACIÓN VERTICAL PONDERADA DE LA CARROCERÍA ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO.....	60
FIG. 4.5: PARÁMETRO ADIMENSIONAL I ANTE DISTINTAS CONDICIONES DE VELOCIDAD DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO.....	61

FIG. 4.6: POTENCIA DISIPADA EN LOS AMORTIGUADORES ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO	62
FIG. 4.7: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA SUSPENDIDA M2	64
FIG. 4.8: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA SUSPENDIDA M1	65
FIG. 4.9: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE AMORTIGUACIÓN B2.....	66
FIG. 4.10: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL MUELLE K2.....	67
FIG. 4.11: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL NEUMÁTICO K1	68
FIG. 5.1: IMÁN MOVIÉNDOSE DENTRO DE UN ARROLLAMIENTO CONDUCTOR, EN EL QUE SE INDUCE UNA TENSIÓN ENTRE SUS EXTREMOS_.....	70
FIG. 5.2: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES DE FORMA CILÍNDRICA [11]	71
FIG. 5.3: CURVA B-H EN LA QUE SE INDICAN LOS PUNTOS MÁS SIGNIFICATIVOS DE LOS IMANES PERMANENTES_.....	72
FIG. 5.4: CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE IMANES PERMANENTES [12]....	73
FIG. 5.5: LÍNEAS E INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO PARA: (a) VARILLA DE ACERO SIN TUBO, (b) VARILLA DE ALUMINIO SIN TUBO, (c) VARILLA DE ALUMINIO CON TUBO EXTERIOR DE ACERO [4]	76
FIG. 5.6: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN REGENERATIVA	77
FIG. 5.7: CIRCUITO EQUIVALENTE DEL CONJUNTO FORMADOR POR EL GENERADOR TRIFÁSICO, RECTIFICADOR Y BATERÍA.....	77
FIG. 5.8: PUENTE RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA FORMADO POR DIODOS.....	80
FIG. 5.9: PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA FORMADO POR DIODOS	81
FIG. 5.10: SEÑAL SENOIDAL RECTIFICADA POR UN PUENTE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA 81	
FIG. 5.11: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO CON SUSPENSIÓN REGENERATIVA	83
FIG. 5.12: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO CON AMORTIGUADOR ELÉCTRICO MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE	85
FIG. 5.13: DETALLE DE LA FIGURA 5.12: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES MONOFÁSICO.....	86
FIG. 5.14: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO CON AMORTIGUADOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE	89
FIG. 5.15: DETALLE DE LA FIGURA 5.14: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES TRIFÁSICO	90
FIG. 5.16: PERFIL DE LA VELOCIDAD RELATIVA ENTRE LA PARTE MÓVIL Y LA PARTE FIJA DEL GENERADOR LINEAL, PARA UN TERRENO DE CALIDAD C-D Y UNA VELOCIDAD DEL COCHE DE 60 KM/H.....	93
FIG. 5.17: PERFIL DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN UNA FASE DEL GENERADOR LINEAL TRIFÁSICO, PARA UN TERRENO DE CALIDAD C-D Y UNA VELOCIDAD DEL COCHE DE 60 KM/H.....	94
FIG. 5.18: CIRCUITO RECTIFICADOR PARA GENERADOR MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE	95
FIG. 5.19: VOLTAJE INDUCIDO EN EL GENERADOR MONOFÁSICO (IZQ.) Y VOLTAJE A LA SALIDA DEL PUENTE RECTIFICADOR SIN FILTRO (DCHA.).....	95
FIG. 5.20: VOLTAJE RECTIFICADO Y FILTRADO DEL GENERADOR MONOFÁSICO CON DISTINTOS CONDENSADORES	96

FIG. 5.21: CIRCUITO RECTIFICADOR PARA GENERADOR TRIFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE.....	97
FIG. 5.22: VOLTAJE INDUCIDO EN EL GENERADOR MONOFÁSICO (IZQ.) Y VOLTAJE A LA SALIDA DEL PUENTE RECTIFICADOR SIN FILTRO (DCHA.).....	98
FIG. 5.23: VOLTAJE RECTIFICADO Y FILTRADO DEL GENERADOR TRIFÁSICO CON DISTINTOS CONDENSADORES	99

Índice de tablas

TABLA 3.1: LISTADO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO.....	50
TABLA 3.2: CALIDAD DEL TERRENO EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL PARÁMETRO K (ISO 8608).....	52
TABLA 3.3: CÓDIGO DE MATLAB PARA LA GENERACIÓN DE PERFILES DE RUGOSIDAD DE TERRENO SIGUIENDO LA ISO 8608.....	53
TABLA 4.1: VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA EL CASO BASE	58
TABLA 4.2: POTENCIAL AUMENTO DE LA AUTONOMÍA DE UN COCHE ELÉCTRICO ESTANDAR CON SUSPENSIONES REGENERATIVAS	63
TABLA 5.1: TABLA COMPARATIVA DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DISTINTOS TIPOS DE IMANES PERMANENTES.....	74
TABLA 5.2: PARÁMETROS DEL GENERADOR LINEAL SIMULADO COMO AMORTIGUADOR [14]	83
TABLA 5.3: COMPARATIVA ENTRE SUSPENSIÓN CONVENCIONAL Y REGENERATIVA, JUNTO CON DATOS DEL GENERADOR MONOFÁSICO, PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE.....	87
TABLA 5.4: COMPARATIVA ENTRE SUSPENSIÓN CONVENCIONAL Y REGENERATIVA, JUNTO CON DATOS DEL GENERADOR TRIFÁSICO, PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE.....	91
TABLA 5.5: DIFERENCIA DE LA CORRIENTE DE FASE ENTRE GENERADOR MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO EN DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE.....	92

1. Introducción

1.1. Motivación

Uno de los retos actuales en el sector del transporte es conseguir reducir la dependencia del petróleo, ya sea mejorando la eficiencia de los vehículos de combustión o, sobre todo, logrando una mayor implantación de los vehículos híbridos y eléctricos. Hay dos razones principales por las que hay cada vez una mayor conciencia acerca de la necesidad de cambiar la forma en la que nos transportamos:

En primer lugar, debemos movernos hacia modelos de transporte más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Sustituir los automóviles de combustión por eléctricos supondría un gran avance en la reducción de emisiones contaminantes, siempre y cuando la generación de la electricidad que consuman estos últimos provenga de fuentes de energía renovables.

En segundo lugar, las fluctuaciones en el precio del petróleo debido a razones geopolíticas afectan enormemente a la economía por la dependencia que tenemos de sus derivados (gasolina y gasóleo) en el sector del transporte. Reducir esta dependencia permitiría una mayor estabilidad de precios en el sector del transporte que se trasladaría al resto de la economía.

A pesar de las visibles ventajas que nos aportaría una mayor presencia de automóviles eléctricos en detrimento de los de combustión, hay una gran desventaja que tienen los primeros respecto a los segundos que actualmente impiden su avance: la autonomía. En la siguiente figura se muestra una comparativa de la autonomía media de distintos tipos de vehículos según su motor: de combustión interna, híbridos recargables, eléctricos de autonomía prolongada y eléctricos:

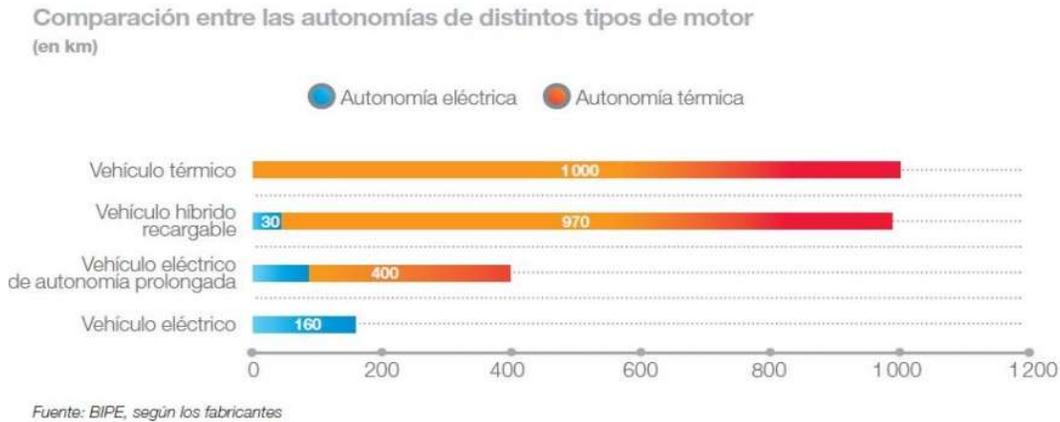


FIG. 1.1: COMPARATIVA DE LA AUTONOMÍA DE DISTINTOS TIPOS DE VEHÍCULOS [1]

Para solucionar el problema de la autonomía de los vehículos eléctricos, las soluciones que se han planteado han ido en tres direcciones:

- Tratar de mejorar los sistemas de almacenamiento de electricidad con baterías hechas de nuevos materiales que aumenten su densidad energética.
- Conseguir una mayor eficiencia energética en las diferentes piezas del automóvil.
- Buscar cómo se puede recuperar energía que desperdicie el automóvil para recuperarla y trasladarla a su sistema de baterías.

Este proyecto trata de estudiar una posible solución del tercer tipo. Hasta el momento se ha avanzado mucho en la recuperación de la energía desperdiciada en las frenadas, pero durante los últimos años se ha especulado en el sector del automóvil con la idea de que también podría recuperarse energía que se desperdicia en las suspensiones con el vehículo en movimiento. Los amortiguadores convencionales disipan energía en forma de calor, y es esta energía la que se pretende recuperar en forma de energía eléctrica. Dicha energía eléctrica se podría generar acoplando un generador eléctrico en las suspensiones que funcionase como amortiguador en sustitución del convencional amortiguador viscoso. Este tipo de nuevas suspensiones recibe el nombre de “suspensiones regenerativas”.

1.2. Objetivos

El fin de este proyecto es estudiar la viabilidad de la recuperación de energía en las suspensiones de coches. Para ello, los objetivos concretos del proyecto son los siguientes:

- Conocer los distintos tipos sistemas de suspensión y amortiguadores.
- Cuantificar la energía que se pierde con los amortiguadores dominantes en el sector del automóvil.
- Diseñar un amortiguador eléctrico y estudiar su comportamiento simultáneo como amortiguador y como recuperador de energía.
- Establecer conclusiones acerca de la viabilidad de las suspensiones regenerativas.

2. Estado del arte de las suspensiones

En este segundo capítulo se presentan las funciones de un sistema de suspensión de un automóvil, los diferentes componentes que constituyen dicho sistema y los distintos tipos de sistemas que hay. Se hace especial hincapié en los amortiguadores, ya que es el elemento sobre el que se estudia más adelante la energía que disipan. Del mismo modo, al final del capítulo se presenta un repaso de las distintas tecnologías de suspensiones regenerativas que se han propuesto hasta la fecha.

2.1. Funciones del sistema de suspensión

El sistema de suspensión de un vehículo aísla a la carrocería del vehículo de las vibraciones que inducen las irregularidades del terreno sobre el que circula dicho vehículo, manteniendo el contacto de las ruedas con el pavimento. De este modo, se pueden distinguir dos funciones principales:

- Confort para los pasajeros del vehículo, ya que mitiga las aceleraciones verticales que se inducen en la carrocería provocadas por la rugosidad del pavimento.
- Seguridad en la conducción, ya que asegura el contacto entre las ruedas y el pavimento. Que haya una adecuada adherencia es fundamental porque de ella se obtienen las reacciones que permiten avanzar y girar.

Por lo tanto, el sistema de suspensión no es un sistema aislado, sino que interactúa con otros sistemas como la dirección o la frenada. El comportamiento del vehículo tiene una gran dependencia del sistema de suspensión que tenga.

2.2. Componentes del sistema de suspensión

El sistema de suspensión se compone de los siguientes elementos:

- Neumáticos.
- Resortes.
- Amortiguadores.



FIG. 2.1: SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN COCHE

Por “suspensión”, se suele entender el conjunto formado por el resorte y el amortiguador. Sin embargo, los neumáticos también influyen en las tareas de suspensión, por lo que se tienen en cuenta a la hora de analizar el sistema en su conjunto. A continuación, se describen las funciones de los componentes y consideraciones acerca de su diseño.

2.2.1. Neumáticos

Como se ha explicado anteriormente, la fuerza de contacto entre el neumático y el pavimento es fundamental para garantizar el control del vehículo por parte del conductor.

A la hora de estudiar la dinámica vertical del vehículo, el neumático se suele modelar como un muelle de rigidez constante K . A veces se incluye también una constante de amortiguación equivalente B , aunque normalmente se desprecia.

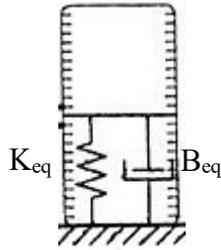


FIG. 2.2: MODELO EQUIVALENTE DEL NEUMÁTICO PARA EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA VERTICAL DEL COCHE

2.2.2. Resortes

El resorte es el elemento elástico de la suspensión. La misión de este elemento es soportar el peso de la masa suspendida del vehículo y asegurar el confort de los pasajeros. Dicha masa suspendida incluye toda la masa del vehículo a excepción de la masa de las ruedas, ejes y montajes de freno.

Ante las irregularidades del terreno, el resorte puede trabajar de dos modos distintos:

- En compresión, cuando el vehículo pasa sobre una elevación del terreno.
- En extensión, cuando el neumático desciende.

Gracias a estos dos modos de trabajo, el resorte asegura que el vehículo y sus ocupantes perciban lo menos posible las irregularidades del terreno. Además de asegurar el confort, también es un elemento importante para asegurar la seguridad de la conducción, ya que permite que los neumáticos mantengan en todo momento el contacto con el pavimento.

El resorte más utilizado en los sistemas de suspensión de coches es el muelle helicoidal.



FIG. 2.3: MUELLES HELICOIDALES EMPLEADOS EN EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE COCHES COMO RESORTES

A la hora de estudiar la dinámica vertical del coche, el resorte se modela como un muelle lineal que cumple con la Ley de Hooke. Dicha Ley expresa que la fuerza que proporciona el muelle es directamente proporcional a su elongación.

$$\overrightarrow{F_{muelle}} = -K * (\overrightarrow{Z_2} - \overrightarrow{Z_1}) \quad (2.1)$$

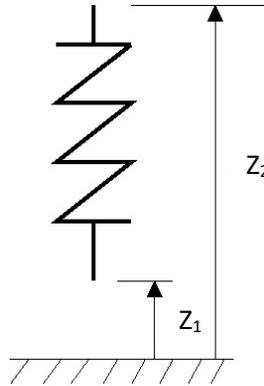


FIG. 2.4: MUELLE Y DEFINICIÓN DE LAS COTAS DE SUS EXTREMOS PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY DE HOOKE

Donde:

F_{muelle} : fuerza ejercida por el muelle [N].

K : constante de rigidez del muelle [N/m].

$Z_{1,2}$: desplazamiento del extremo (1 ó 2) del muelle [m].

Para el caso de un muelle helicoidal, su constante de rigidez se puede calcular del siguiente modo:

$$K = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * N} \quad (2.2)$$

Donde:

d : diámetro de las espiras [m].

G : módulo de elasticidad del material del que está hecho el muelle [N/m²].

D : diámetro medio del muelle [m].

N : número de espiras.

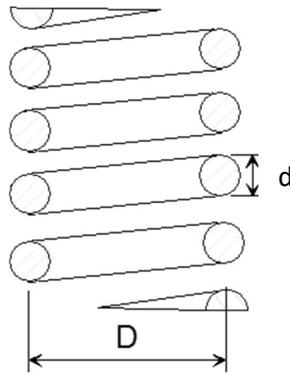


FIG. 2.5: DETALLE DE LA SECCIÓN DE UN MUELLE HELICOIDAL

2.2.3. Amortiguadores

Cuando el resorte se desvía de su posición de equilibrio, el resorte tiende a oscilar hasta recuperar dicha posición. Este proceso induce unas oscilaciones incontroladas que harían que la conducción resultara incómoda por las aceleraciones inducidas en la carrocería y además insegura por no permitir al neumático mantener el contacto con el terreno. Es por ello que resulta necesario el amortiguador. El amortiguador disipa la energía generada en el movimiento vertical de la suspensión, limitando las oscilaciones del resorte. Gracias a esto, los amortiguadores consiguen cumplir los dos objetivos principales de todo sistema de suspensión:

- Confort, ya que al reducir las oscilaciones del resorte evita que se transmitan aceleraciones verticales no deseadas a la carrocería del coche.
- Seguridad, ya que al reducir las oscilaciones del resorte evita que la rueda oscile verticalmente, permitiendo de este modo que mantenga el contacto con el terreno.

Según el tipo de sistema de suspensión que se quiera tener (pasiva, semi-activa o activa), se necesita un tipo de amortiguador u otro. A continuación, se presentan los distintos tipos de amortiguadores que se pueden utilizar en una suspensión:

2.2.3.1. Amortiguador pasivo

Este tipo de amortiguador es un amortiguador hidráulico cuyo principio de operación es el movimiento de un fluido a través de un estrangulamiento. El mecanismo consta de un cilindro y un pistón. El pistón, solidario a la carrocería mediante un vástago, desliza en el interior de un cilindro, el cual es solidario a la rueda y está lleno de aceite. El cilindro queda dividido en dos cámaras por el pistón, el cual tiene unos pequeños orificios por los que pasa forzosamente el aceite de una cámara a otra.

El estrangulamiento del aceite por dichos orificios provoca una fuerza que se opone tanto al movimiento de extensión como al movimiento de compresión del resorte, con lo que se consigue reducir las oscilaciones del mismo. Esta fuerza de oposición es una fuerza no conservativa, por lo que la energía mecánica inducida por el movimiento del resorte es disipada en forma de calor por disipación viscosa. La magnitud de la fuerza amortiguadora queda determinada por la cantidad y el tamaño de los agujeros del pistón.

En automoción se utilizan dos configuraciones distintas, aunque ambas se fundamentan en el principio de operación explicado anteriormente:

- Estructura monotubo:

El amortiguador monotubo consta de dos cámaras principales: una de aceite y otra de gas. A su vez, consta de dos pistones: uno flotante y otro de trabajo solidario a una varilla.

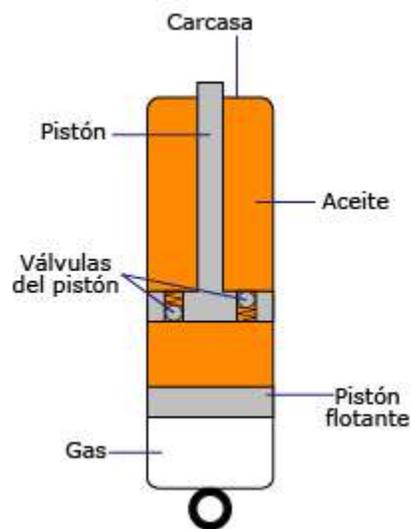


FIG. 2.6: AMORTIGUADOR PASIVO EN CONFIGURACIÓN MONOTUBO

El pistón flotante separa la cámara de aceite de la de gas, mientras que el solidario a la varilla es que el lleva los orificios a través de los cuales se estrangula el aceite. A medida que la varilla se mueve dentro del tubo, el pistón flotante sigue su movimiento.

- Estructura bitubo:

El amortiguador bitubo consta de dos cámaras: una interior y otra de reserva.

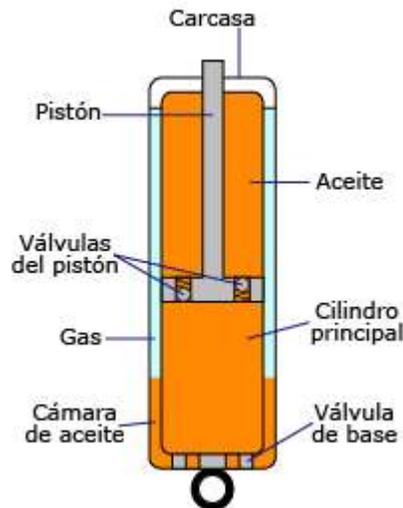


FIG. 2.7: AMORTIGUADOR PASIVO EN CONFIGURACIÓN BITUBO

En este caso el aceite es estrangulado en dos puntos: en los orificios del pistón y en los que hay en la base del cilindro. Cuando el amortiguador trabaja a compresión, la fuerza de amortiguación queda determinada por los orificios tanto del pistón como de la base. En cambio, cuando el amortiguador trabaja a extensión, la fuerza depende mayormente de los orificios del pistón.

En cuanto a una comparativa entre ambas configuraciones, ambas presentan ventajas y desventajas:

Por un lado, la configuración monotubo se calienta menos al disipar el calor directamente por el único tubo que tiene expuesto al aire. Sin embargo, el tener un único tubo tiene el peligro de que es más susceptible a ser dañado por impacto de algún objeto que se desprenda del terreno.

Por otro lado, la configuración bitubo ofrece la importante ventaja de ajustarse más rápidamente a los cambios en las condiciones de rugosidad del terreno y velocidad del coche.

En cuanto a la modelización de los amortiguadores para estudiar la dinámica vertical del coche, los amortiguadores hidráulicos modernos presentan un comportamiento lineal, independientemente de su configuración. Un comportamiento lineal significa que la fuerza de amortiguación es proporcional a la velocidad de extensión del amortiguador.

$$\overrightarrow{F}_{amortiguador} = -B * (\overrightarrow{\dot{Z}}_2 - \overrightarrow{\dot{Z}}_1) \quad (2.3)$$

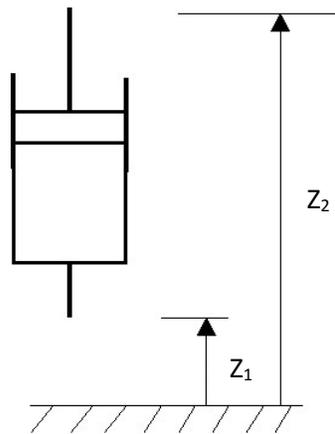


FIG. 2.8: AMORTIGUADOR Y DEFINICIÓN DE LAS COTAS DE SUS EXTREMOS PARA LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO LINEAL

Donde:

$F_{amortiguador}$: fuerza ejercida por el amortiguador [N].

B: constante de amortiguación [N*s/m].

$\dot{Z}_{1,2}$: velocidad de desplazamiento del extremo (1 ó 2) del amortiguador [m].

2.2.3.2. Amortiguador semi-activo

Los amortiguadores semi-activos tienen la misma estructura que los pasivos y son diseñados de tal forma que su comportamiento sea también lineal. Por lo tanto, la ecuación (2.3) es aplicable también a los amortiguadores semi-activos. La diferencia entre los semi-activos y los pasivos es que en los primeros puede variarse la constante de amortiguación B . Dicho valor puede ajustarse de dos formas:

- Válvula solenoide:

Este tipo de válvula es empleada para el control del paso de gas, en sistemas neumáticos, o del paso de fluidos, en sistemas hidráulicos. El control del paso se consigue abriendo o cerrando la válvula. Este proceso de apertura o cerramiento se consigue a partir de los impulsos electromagnéticos que recibe un solenoide, el cual a su vez trabaja junto a un muelle que devuelve a la válvula a su posición neutral cuando el solenoide no recibe impulsos. En la siguiente figura se pueden observar un caso particular en el que el diseño se ha hecho de modo que cuando el solenoide se active, la válvula se abra:

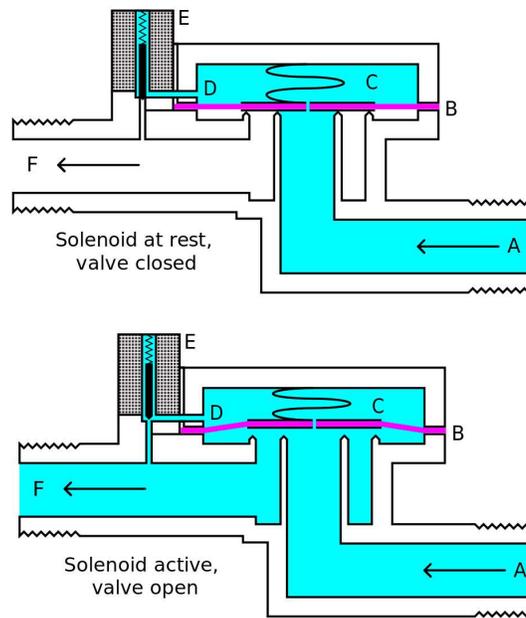


FIG. 2.9: VÁLVULA SOLENOIDE Y SUS DOS MODOS DE OPERACIÓN

Controlando el paso del aceite se consigue ajustar el valor de la constante de amortiguación.

- Fluido magnetorreológico:

Este tipo de fluido se comporta de modo que su viscosidad varía en presencia de campos magnéticos. En los amortiguadores magnetorreológicos se sustituye el aceite de los amortiguadores hidráulicos convencionales por dicho fluido. El fluido tiene partículas metálicas flotando en él, y al magnetizarse modifica su viscosidad. En la siguiente figura se puede observar como varía la estructura del fluido en presencia de campo magnético, incrementando de este modo su viscosidad:

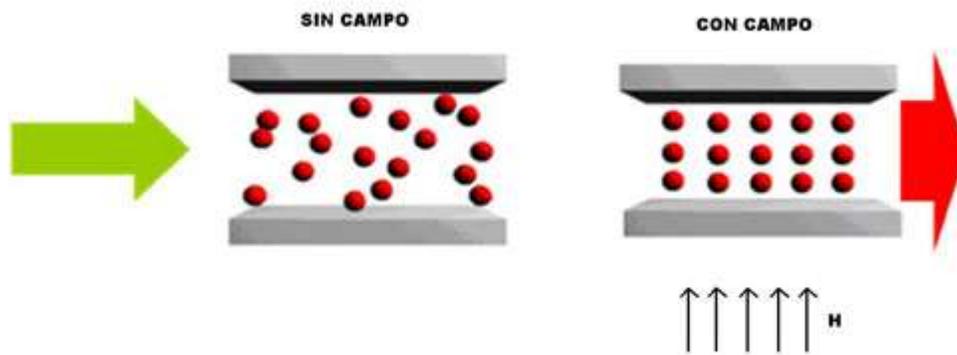


FIG. 2.10: ESTRUCTURA DEL FLUIDO MAGNETORREOLÓGICO EN DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

Al magnetizar el fluido, aumenta la viscosidad y por tanto la constante amortiguación que presenta el amortiguador que contiene este tipo de fluido.

En conclusión, hay dos posibilidades en cuanto a los amortiguadores semi-activos: utilizar válvulas solenoide o fluidos magnetorreológicos. La desventaja de las válvulas solenoide es que implican un proceso mecánico de apertura y cierre que puede provocar retrasos no deseados en el ajuste de la constante de amortiguación. En cambio, los fluidos magnetorreológicos permiten un ajuste de la constante de amortiguación más suave.

2.2.3.3. Amortiguador activo

El amortiguador activo consta de un actuador electromagnético que, a partir de una fuente de energía externa, ofrece una fuerza de amortiguación para reducir las vibraciones inducidas por las irregularidades del terreno. Hay tres tipos comunes de actuadores electromagnéticos empleados como amortiguadores activos:

- Lineal:

Constan de un arrollamiento en forma de solenoide y una varilla con imanes permanentes. Su principio de operación se basa en la Ley de Faraday-Lenz, según la cual al circular una corriente por los arrollamientos, se genera un campo magnético opuesto al de los imanes permanentes. Esto crea una contrafuerza que sirve como fuerza de amortiguación. Este tipo de amortiguador es el que ofrece una menor fuerza de amortiguación, de acuerdo con anteriores estudios realizados.

- Husillo de bolas:

Con este mecanismo se transmite el movimiento de un motor rotacional a un elemento con movimiento lineal. La fuerza que se puede obtener con este mecanismo es superior al caso del actuador lineal, pero es poco eficiente debido a las pérdidas que se producen en la conversión de movimiento rotacional a movimiento lineal.

- Piñón y cremallera:

Este es otro mecanismo posible para la conversión de movimiento rotacional a lineal, con la desventaja que tiene en cuanto a las pérdidas que se producen en dicha conversión.

2.3. Tipos de sistema de suspensión

Se distinguen tres tipos distintos, en función del amortiguador utilizado. Los diferentes sistemas han surgido ante la necesidad de variar la constante de amortiguación B del amortiguador. En función de las condiciones del terreno, puede ser más conveniente un amortiguador con un valor alto de B o con un valor inferior. En función del valor de B , se habla de “suspensiones duras” o “suspensiones blandas”:

- Suspensiones duras (valores elevados de B):

Las suspensiones duras ofrecen al conductor una mayor tracción, lo cual es conveniente cuando el trazado del terreno en el cual se está conduciendo presenta curvas pronunciadas. Por otro lado, presentan la desventaja de que se amortiguan menos las irregularidades del terreno. Esto hace que no se mitigue lo suficiente la aceleración vertical de la carrocería, haciendo menos confortable el viaje a los pasajeros del vehículo.

- Suspensiones blandas (valores reducidos de B):

Las suspensiones blandas tienen la ventaja de que amortiguan mejor las irregularidades del terreno, aumentando así el confort de los pasajeros. Sin embargo, el problema que tienen este tipo de suspensiones es que ofrecen menor tracción.

2.3.1. Suspensión pasiva

Este sistema es el más utilizado actualmente en la industria del automóvil, ya que su sencillez lo hace más económico. Actualmente los amortiguadores más utilizados en la industria son los hidráulicos, los cuales disipan en forma de calor la energía mecánica generada en el movimiento de la suspensión. La desventaja de este tipo de suspensión es que la constante de amortiguación B es constante, lo cual no permite adaptar la suspensión a las condiciones de conducción y terreno. Por ello normalmente se ajusta el valor constante de B en un valor medio, buscando un compromiso entre las ventajas de una suspensión dura (mayor tracción) y las de una blanda (mayor confort).

2.3.2. Suspensión semi-activa

Este sistema de suspensión permite variar la constante de amortiguación en función de las condiciones del terreno. Es un sistema más complejo que el de la suspensión pasiva, ya que además de contar con un amortiguador regulable (válvula solenoide o de fluido magnetorreológico, presentados en el apartado 2.2.3.2.), incorpora un sensor y un micro-controlador. Funciona de tal modo que el sensor detecta los cambios en las condiciones del terreno y envía dicha información al micro-controlador. El micro-controlador, a su vez, gobierna la regulación del amortiguador. Por lo tanto, la suspensión se endurece o se reblandece en función de las condiciones del terreno. Por ejemplo, si el sensor detecta que el coche va a pasar por un bache, el micro-controlador da la orden al regulador del amortiguador para que la constante de amortiguación se reduzca, haciendo así más confortable el paso por dicho bache para los pasajeros del vehículo.

La desventaja de este sistema es que es más caro que el sistema de suspensión pasiva. Además, para el caso particular de los amortiguadores que emplean un fluido magnetorreológico, hay que tener en cuenta que este tipo de fluidos se degrada con el tiempo y la temperatura, perdiendo las propiedades magnéticas que le hacen útil para esta aplicación.

2.3.3. Suspensión activa

Este es el sistema más complejo y a la vez el que mejores prestaciones ofrece. La fuerza de amortiguación es proporcionada por un actuador que recibe energía de una fuente externa. Dicha fuerza se ajusta constantemente en función de las condiciones del terreno, las cuales son registradas por un sistema de sensores.

A pesar de ser el sistema que mejor amortiguación ofrece en todo momento, tiene numerosas desventajas que han hecho que su implantación en la industria del automóvil no se haya extendido. Entre dichas desventajas, destaca su peso, su gran tamaño, su consumo de energía y por descontado su alto precio.

2.4. Suspensión regenerativa

Debido a las necesidades de una mayor eficiencia energética de los automóviles, y en particular la necesidad de aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos, investigadores y profesionales de la industria del automóvil han comenzado a investigar la posibilidad de recuperar la energía que se pierde en las suspensiones.

En este apartado se presentan las conclusiones más relevantes de anteriores trabajos que se han llevado a cabo en torno a la idea de la recuperación de energía en las suspensiones. Hasta el momento se han planteado dos tipos de sistemas recuperadores: mecánico y electromagnéticos [2].

2.4.1. Suspensión regenerativa mecánica

Este tipo de suspensión regenerativa cuenta con el amortiguador hidráulico convencional, añadiendo un acumulador hidráulico. La desventaja de añadir un acumulador hidráulico es que hace necesario un sistema de tuberías, el cual es pesado y además requiere de un espacio adicional para su instalación.

Este tipo de sistemas reciben cada vez menos atención de los investigadores, porque durante los últimos años, debido al creciente interés en los automóviles híbridos y eléctricos, los esfuerzos se han centrado en recuperadores de energía eléctrica.

2.4.2. Suspensión regenerativa electromagnética

Las suspensiones regenerativas electromagnéticas utilizan amortiguadores electromagnéticos, los cuales convierten la energía mecánica de las vibraciones inducidas por la rugosidad del terreno en energía eléctrica. Esta conversión puede hacerse mediante motores eléctricos rotacionales o lineales. Además, este tipo de amortiguadores puede utilizarse en sistemas de suspensión tanto pasiva, como semi-activa o activa.

- Lineales:

Suda, Nakadai y Nakano [3] propusieron un sistema de suspensión activa con amortiguador lineal que no necesitaba de una fuente de energía externa. El sistema propuesto consta de un generador y de un actuador. El generador proporciona la energía que consume el actuador. Dicha energía proviene de las vibraciones inducidas por las irregularidades del terreno y se acumula en un condensador antes de entregarse al actuador.

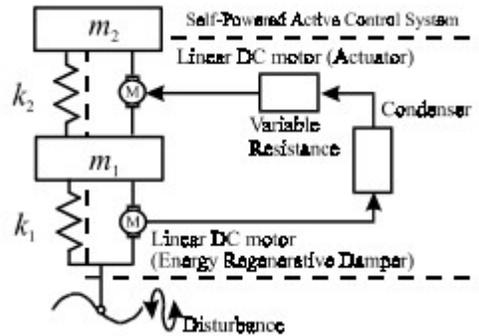


FIG. 2.11: SUSPENSIÓN ACIVA REGENERATIVA PROPUESTA POR SUDA ET AL.

La tensión inducida en el generador es alterna, debido al movimiento irregular inducido por el terreno rugoso. Por tanto, esta tensión se rectifica antes de cargar el condensador con el siguiente cicuito:

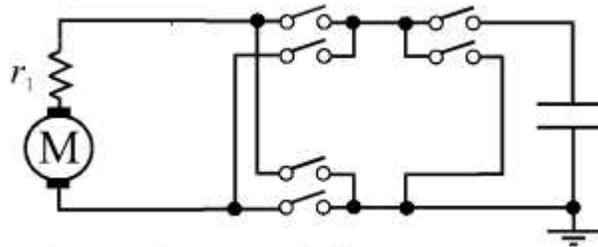


FIG. 2.12: CIRCUITO RECTIFICADOR DEL SISTEMA MOSTRADO EN LA FIGURA 2.11

La conclusión a la que llegaron es que el sistema se puede autoabastecer, aunque en ciertas condiciones el actuador no es capaz de proporcionar la fuerza de amortiguación suficiente.

Zuo et al. [4] diseñaron y experimentaron un modelo de generador lineal con el fin de ser un sustituto de los amortiguadores convencionales hidráulicos. El principio de operación se fundamenta en la Ley de Faraday-Lenz. El generador consta de una parte estática externa y una parte móvil que se desplaza linealmente. La parte estática contiene unos arrollamientos, mientras que la parte móvil es una varilla con imanes permanentes montados sobre ella. Los imanes en movimiento provocan tensiones inducidas en los arrollamientos. En su propuesta discuten, entre otros aspectos, las configuraciones y materiales más apropiados. Los experimentos fueron realizados en un prototipo a escala 1:2. Su conclusión final fue que un prototipo a escala 1:1, siguiendo su diseño, sería capaz de generar entre 16 y 64 W de potencia para velocidades RMS de la suspensión de entre 0.25 y 0.5 m/s.

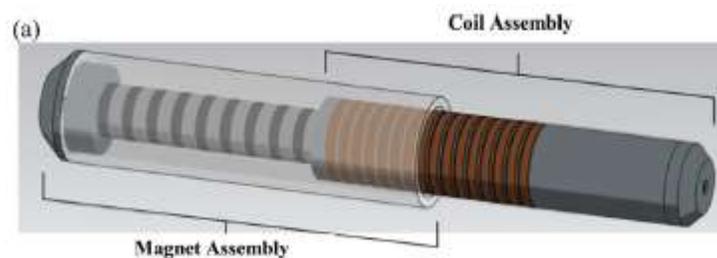


FIG. 2.13: GENERADOR LINEAL DISEÑADO POR ZUO ET AL. PARA SER EMPLEADO COMO AMORTIGUADOR ELECTROMAGNÉTICO

Otra reciente propuesta de suspensión regenerativa electromagnética lineal la realizó la compañía alemana Intertronic Gresser [5]. En 2015 anunciaron haber patentado un nuevo sistema de suspensiones generadoras de electricidad para automóviles híbridos y eléctricos. Este nuevo sistema dejaría de contar con los convencionales muelles y amortiguadores hidráulicos. Consiste en un elemento de resorte con presión hidráulica variable (controlado por un sistema electrónico, haciendo así de suspensión) acoplado a un generador eléctrico que consigue convertir la energía cinética de los movimientos verticales de la suspensión (causados por irregularidades del terreno) en energía eléctrica por inducción. Según su planteamiento, la cantidad de electricidad generada es proporcional al peso del vehículo y podría llegar a unos 15 kWh por cada 100 km recorridos, lo que supondría prácticamente doblar la autonomía de los coches eléctricos actualmente presentes en el mercado.



FIG. 2.14: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA LINEAL PROPUESTA POR INTERTRONIC GRESSER GMBH

- Rotacionales:

Suda y Shiiba [6] propusieron un amortiguador regenerativo basado en el mecanismo de piñón y cremallera. Dicho mecanismo convierte el movimiento rotacional de un motor en el movimiento lineal del actuador. El problema de este mecanismo son las pérdidas producidas en dicha conversión.

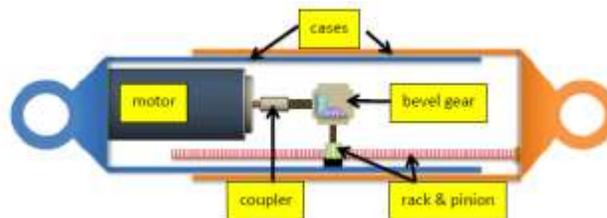


FIG. 2.15: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA ROTACIONAL BASADA EN EL MECANISMO DE PIÑÓN Y CREMALLERA PROPUESTA POR SUDA ET AL.

Más adelante, Suda Y realizó otra propuesta. Suda et al. [7] diseñaron un amortiguador regenerativo esta vez basado en el mecanismo de husillo de bolas.

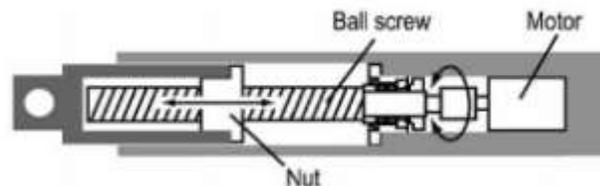


FIG. 2.16: SUSPENSIÓN REGENERATIVA ELECTROMAGNÉTICA ROTACIONAL BASADA EN EL MECANISMO DE HUSILLO DE BOLAS PROPUESTA POR SUDA ET AL.

Las conclusiones respecto a estos dos sistemas de regeneradores fueron las mismas: el actuador no llega a proporcionar la fuerza necesaria en ciertas condiciones y las pérdidas por fricción en la conversión del movimiento rotacional en lineal son considerables.

- Otros:

Una noticia que aumentó mucho las expectativas acerca de la tecnología de la suspensión regenerativa tuvo lugar en 2013, cuando ZF y Levant Power anunciaron un acuerdo de colaboración para desarrollar un proyecto de suspensiones de automóvil activas y regenerativas [8]. El objetivo era contar con las ventajas de la suspensión activa reduciendo su elevado coste y consumo energético. El sistema a desarrollar consistía en una unidad construida en el exterior del amortiguador formada por la unidad de control (CDC, Continuous Damping Control), un motor eléctrico y una bomba electrohidráulica que regula el flujo de aceite en el amortiguador para adaptar su dureza a las condiciones de conducción y carretera. Para recuperar la energía, el sistema de válvulas utiliza el movimiento del pistón del amortiguador guiando el aceite a través de la bomba que a su vez hace funcionar al motor en modo generador. La energía cinética convertida en eléctrica pasaría entonces al sistema de alimentación del coche.

A día de hoy ninguna de las dos compañías involucradas en el proyecto han anunciado ningún avance al respecto.

3. Modelo desarrollado para evaluar la energía disipada en las suspensiones

En esta sección se presenta el modelo desarrollado e implementado posteriormente en Simulink para estudiar la dinámica del vehículo y las suspensiones, además de cuantificar la energía que se disipa en los amortiguadores convencionales en distintas condiciones. Este modelo incluye también indicadores de incomodidad e inseguridad en la conducción, ya que la función fundamental de las suspensiones es asegurar el máximo confort y seguridad posibles.

El modelo se ha desarrollado para el caso de un coche y el sistema de suspensión más habitual en estos:

- Muelle helicoidal de rigidez constante.
- Amortiguador hidráulico de amortiguación constante.
- Sistema de suspensión pasiva.

3.1. Modelo de cuarto de vehículo

El modelo de cuarto de vehículo se utiliza para analizar tan solo una cuarta parte del total del vehículo. Es de gran utilidad cuando se quiere estudiar en detalle la dinámica vertical del vehículo. Está definido por los elementos que se muestran en las siguientes figura y tabla:

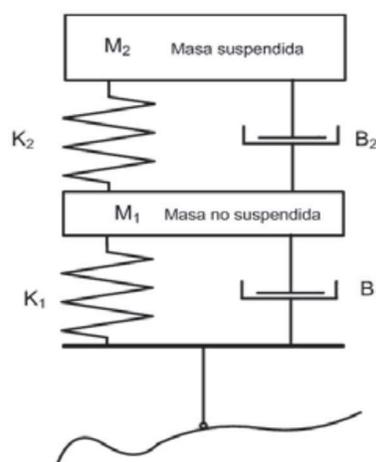


FIG. 3.1: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO

M_2	Masa suspendida (un cuarto de la masa total del vehículo a excepción de las ruedas y elementos de suspensión).
M_1	Masa no suspendida (masa de la rueda más su soporte y otros elementos solidarios).
K_2	Constante de rigidez del muelle de la suspensión.
K_1	Constante de rigidez del neumático.
B_2	Constante de amortiguamiento del amortiguador.
B_1	Constante de amortiguamiento del neumático (habitualmente se desprecia).

TABLA 3.1: LISTADO DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO

Este modelo considera tan solo dos grados de libertad, restringiéndolo por tanto al estudio de la dinámica vertical. Dichos grados de libertad son los movimientos verticales de la masa suspendida (M_2) y de la masa no suspendida (M_1).

En la siguiente figura se muestran las fuerzas que actúan en un sistema de suspensión pasiva, que es el que se va a simular:

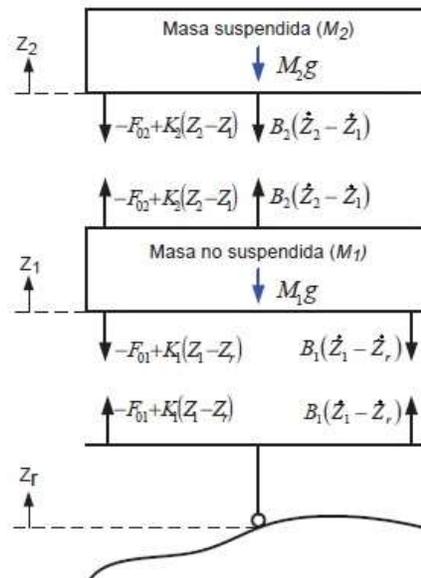


FIG. 3.2: DIAGRAMA DEL CUERPO LIBRE EN EL MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO PARA SUSPENSIÓN PASIVA

Las variables Z_2 , Z_1 y Z_r representan el movimiento vertical de la masa suspendida, el de la no suspendida y las irregularidades del terreno respectivamente.

Las ecuaciones que se derivan del diagrama anterior son las siguientes:

Cuando el sistema se encuentra en situación de equilibrio, las fuerzas F_{02} y F_{01} son las siguientes:

$$F_{02} = M_2 * g ; \quad F_{01} = (M_1 + M_2) * g, \quad (3.1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

Aplicando la segunda Ley de Newton a ambas masas:

$$M_2 * \ddot{Z}_2 = -B_2 * (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + F_{02} - K_2 * (Z_2 - Z_1) - M_2 * g \quad (3.2)$$

$$M_1 * \ddot{Z}_1 = B_2 * (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - F_{02} + K_2 * (Z_2 - Z_1) - M_1 * g - B_1 * (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) + F_{01} - K_1 * (Z_1 - Z_r) \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.1) en (3.2) y (3.3), quedan las siguientes ecuaciones simplificadas:

$$M_2 * \ddot{Z}_2 = -B_2 * (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2 * (Z_2 - Z_1) \quad (3.4)$$

$$M_1 * \ddot{Z}_1 = B_2 * (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2 * (Z_2 - Z_1) - B_1 * (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1 * (Z_1 - Z_r) \quad (3.5)$$

3.1.1. Modelización del terreno

En posteriores capítulos se mostrará la influencia de diferentes niveles de rugosidad del terreno en la dinámica de la suspensión y en la energía disipada en el amortiguador. Para efectuar ese análisis, se generan en primer lugar distintos perfiles de rugosidad de carretera. Se ha partido de la clasificación que ofrece la normativa ISO 8608.

La norma ISO 8608 asume que una carretera tiene las mismas propiedades estadísticas en cualquier sección de ella que analicemos. Clasifica la rugosidad del terreno en ocho clases. Dichas clases están etiquetadas de la A a la H, siendo la clase A la de mayor calidad y la H la de peor calidad. La clasificación se hace en función de la densidad espectral de potencia (PSD) que se obtiene aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) al perfil de rugosidad medido de una carretera.

De acuerdo con [9], es posible generar perfiles artificiales de rugosidad de un terreno de longitud L a partir de la siguiente expresión:

$$Z_r(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} * 2^k * 10^{-3} * \left(\frac{n_0}{i * \Delta n}\right) * \cos(2\pi * i * \Delta n * x + \varphi_i) \quad (3.6)$$

Donde:

X: variable del eje de abscisas sobre el que vehículo avanza ($0 < X < L$)

$\Delta n = 1 / L$, siendo n la frecuencia espacial cuyas unidades son ciclos / metro

$n_{\max} = 1 / B$, siendo B el intervalo de muestreo

$N = n_{\max} / L$

$n_0 = 0.1$ ciclos / metro

φ_i : ángulo de fase aleatorio ($0 < \varphi < 2\pi$)

k: valor constante que depende de la clasificación de la ISO 8608. Este valor es el indicador de la calidad del terreno ($3 < k < 9$)

k	Calidad del terreno	
	Límite inferior	Límite superior
3	A	B
4	B	C
5	C	D
6	D	E
7	E	F
8	F	G
9	G	H

TABLA 3.2: CALIDAD DEL TERRENO EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL PARÁMETRO K (ISO 8608)

Para generar los perfiles artificiales aleatorios se ha implementado la ecuación (3.6) con el código de Matlab que se muestra a continuación:

```

k = 3; % Valor ISO rugosidad del terreno, de 3 a 9
N = 2500; % Número de puntos
L = 250; % Longitud del perfil de terreno a generar (m)
B = L/N ; % Intervalo de muestreo (m)
dn = 1/L; % Banda de frecuencia
n0 = 0.1; % Frecuencia espacial (ciclos/m)
n = dn : dn : N*dn; % Banda de frecuencia espacial
phi = 2*pi*rand(size(n)); % Ángulo de fase aleatorio
Amp1 = sqrt(dn)*(2^k)*(1e-3)*(n0./n); % Amplitud
x = 0:B:L-B; % Variable de abscisas de 0 a L
hx = zeros(size(x));
for i=1:length(x)
    hx(i) = sum(Amp1.*cos(2*pi*n*x(i)+ phi));
end

```

TABLA 3.3: CÓDIGO DE MATLAB PARA LA GENERACIÓN DE PERFILES DE RUGOSIDAD DE TERRENO SIGUIENDO LA ISO 8608

Para las simulaciones cuyos resultados se muestran en capítulos posteriores, se han utilizado perfiles de terreno artificiales de las clases de la A a la D. Terrenos de una calidad peor que estas son impracticables y obligan al conductor a conducir a muy bajas velocidades. Por este motivo no se han tenido en cuenta calidades de terreno más allá de la calidad D.

En la siguiente figura se observan tres perfiles de rugosidad distintos obtenidos a partir de la implantación del código de la tabla 3.3:

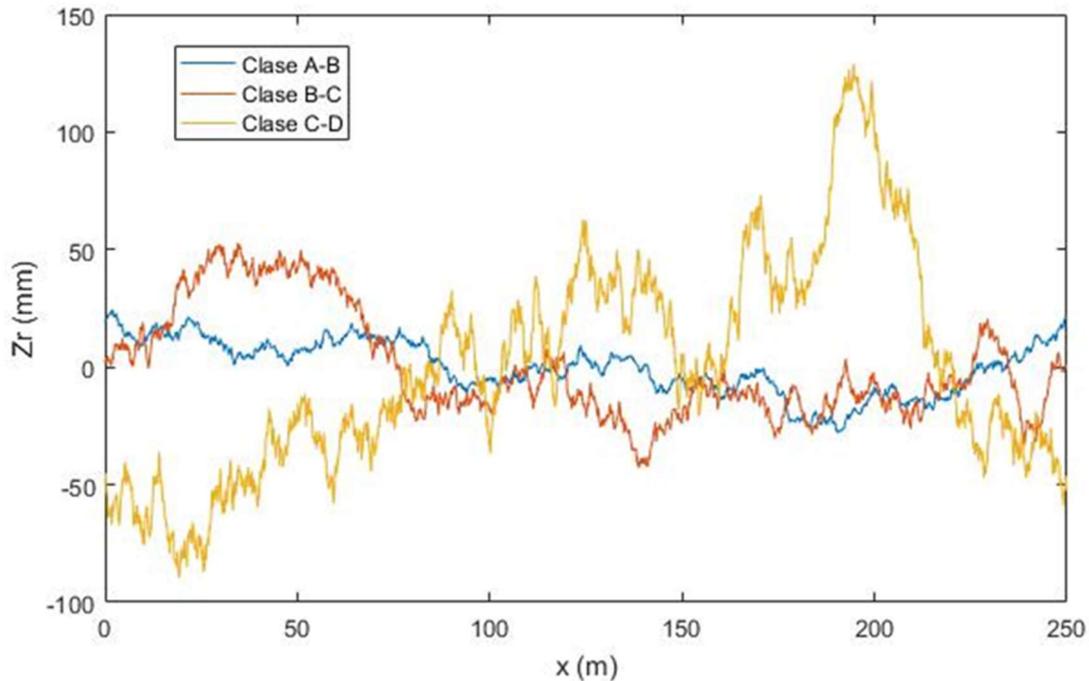


FIG. 3.3: PERFILES DE TERRRENO ARTIFICIALES GENERADOS SIGUIENDO LA NORMA ISO 8609

En la figura 3.3 observamos como aumenta la rugosidad del perfil (Z_r) al cambiar de clase de calidad. El perfil azul es el de mejor calidad (entre nivel A y nivel B), por lo que es el que menores valores de Z_r presenta. En cambio, el perfil dorado (entre nivel C y nivel D) es el de peor calidad y es el que presenta mayores valores de Z_r .

El perfil obtenido muestra la rugosidad del terreno (Z_r) respecto del eje transversal al recorrido del coche (x). La entrada del modelo de cuarto de vehículo debe de ser la rugosidad respecto del tiempo. La conversión del eje de distancias (x) a un eje de tiempos se hace conociendo la velocidad constante a la que circula el coche, calculando el eje de tiempos como el cociente entre el eje x y la velocidad transversal.

3.1.2. Índice de incomodidad

En la evaluación del rendimiento de las suspensiones de un vehículo, es fundamental tener en cuenta que una de sus principales funciones es asegurar que las vibraciones inducidas por las

irregularidades del terreno no se trasladen a los pasajeros. En otras palabras, las suspensiones deben asegurar el confort de los pasajeros del vehículo.

El confort no puede evaluarse analizando únicamente las aceleraciones de la carrocería. Dicho confort depende de la percepción subjetiva del cuerpo humano. Evidentemente, cuanto mayor sea la aceleración vertical de la carrocería, menos confortable será el viaje para el pasajero, pero el cuerpo humano no percibe exactamente esa aceleración. Para determinar la percepción humana de dicha aceleración se ha tenido en cuenta la norma ISO 2631. Esta norma determina que para evaluar adecuadamente la percepción humana ante vibraciones, la aceleración debe ponderarse con unas curvas estandarizadas de sensibilidad humana. Para efectuar dicha ponderación, se ha empleado el siguiente filtro propuesto por L.Zuo, S.A. Nayfeh [10]:

$$W_k^{(3)}(s) = \frac{80.03s^2 + 989.0s + 0.02108}{s^3 + 78.92s^2 + 2412s + 5614}$$

Por tanto, el índice de incomodidad queda definido como el valor eficaz de la aceleración de la masa suspendida (\ddot{Z}_2) ponderada por el filtro de tercer orden mostrado anteriormente.

3.1.3. Índice de inseguridad

Además de asegurar el confort de los pasajeros, las suspensiones deben asegurar una conducción segura. Una conducción segura se consigue cuando la rueda tiene una fuerza de contacto suficiente con el terreno. En caso contrario, la rueda puede perder el contacto y el conductor acaba perdiendo el control sobre el coche.

En el modelo de cuarto de vehículo, se distinguen dos tipos de fuerzas verticales: fuerzas estáticas y fuerzas dinámicas. Las fuerzas estáticas se corresponden con los pesos de las masas M_2 y M_1 , mientras que las fuerzas dinámicas surgen con las oscilaciones verticales inducidas por las irregularidades del terreno. El valor de estas últimas depende de la rugosidad del terreno, de la velocidad del coche y de los parámetros del modelo de cuarto de vehículo.

Una manera de analizar lo segura o no que es la conducción en unas circunstancias determinadas, es calcular la relación entre las fuerzas dinámicas y las fuerzas estáticas que sufre el neumático.

Cuanto mayores son las fuerzas dinámicas, más peligrosa resulta la conducción. Siguiendo este planteamiento, se ha definido el parámetro adimensional I como índice de inseguridad:

$$I = \frac{\text{Fuerzas dinámicas}}{\text{Fuerzas estáticas}} = \frac{|K_1 * (Z_1 - Z_r)|}{(M_2 + M_1) * g} \quad (3.7)$$

Si I alcanza el valor unidad, la rueda pierde el contacto con el asfalto. En los resultados que se presentan en capítulos posteriores, se presenta el valor medio de I.

3.2. Energía recuperable en las suspensiones

Uno de los principales objetivos de este trabajo es, antes de proponer cualquier diseño de suspensión regenerativa, calcular cuánta energía se puede recuperar analizando la energía que disipan las suspensiones convencionales.

Como ya se ha explicado, en una suspensión se distinguen dos elementos fundamentales: un muelle y un amortiguador. Los sistemas de suspensiones de los coches actuales usan amortiguadores viscosos que disipan la energía cinética del movimiento vertical de la rueda y la carrocería en forma de energía térmica. Es esta energía térmica disipada la que se pierde con la tecnología actual de suspensiones y la que se podría recuperar en forma de energía eléctrica, lo cual es el objetivo fundamental de este estudio.

La potencia disipada en un amortiguador viscoso que presenta un comportamiento lineal (ecuación 2.3) es proporcional a la constante de amortiguación (B_2 en nuestro caso) y a la velocidad de la suspensión al cuadrado. Como la velocidad de la suspensión varía con el tiempo, la potencia disipada también lo hace. Por esta razón se ha calculado el valor medio de dicha potencia:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T [B_2 * (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1)^2] dt \quad (3.8)$$

Una vez conocido el valor medio de la potencia, la energía se calcula del siguiente modo:

$$E = \bar{P} * t \quad (3.9)$$

4. Simulación del modelo: análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de las distintas simulaciones hechas en Matlab-Simulink con el modelo desarrollado en el capítulo 3.

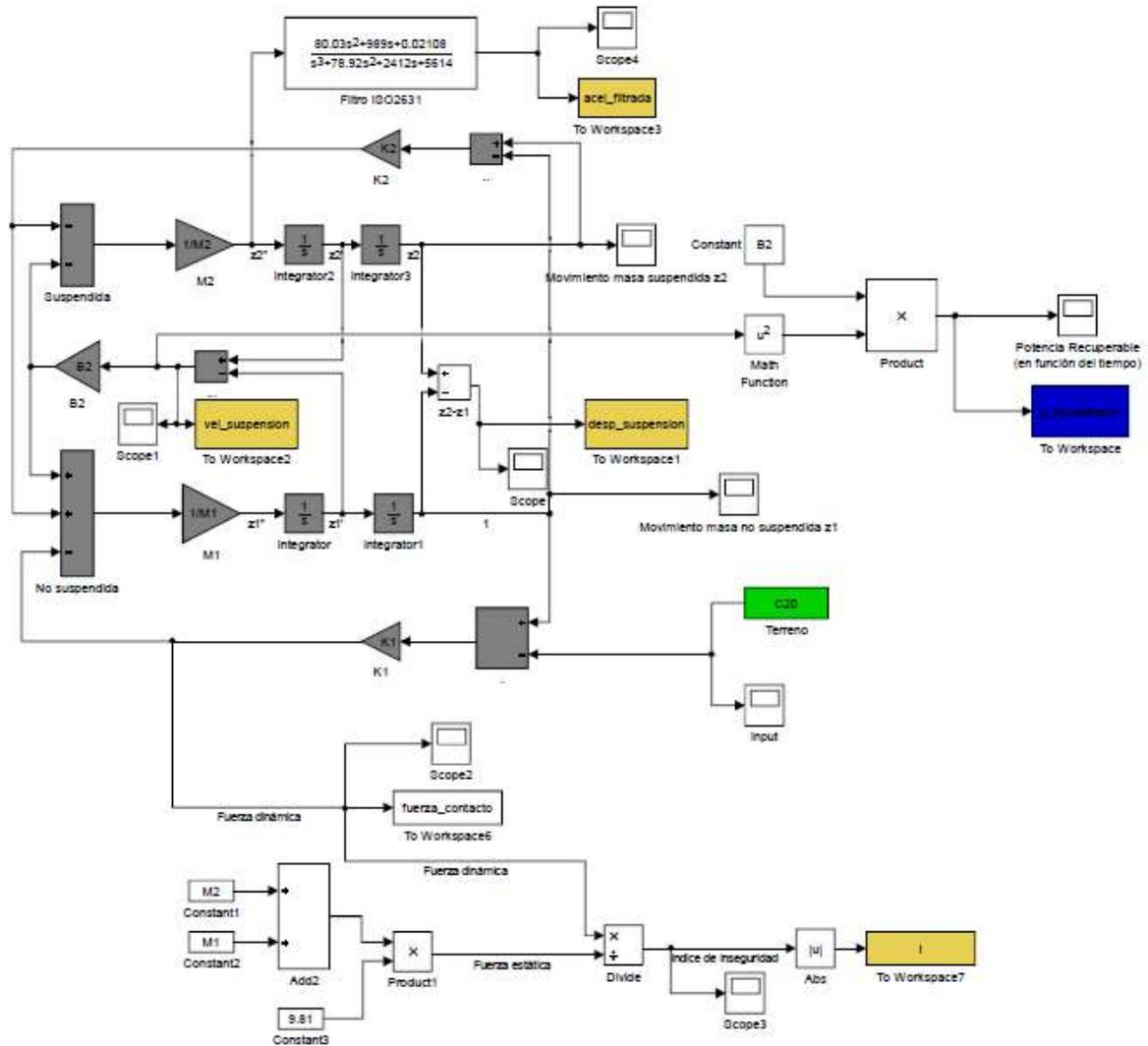


FIG. 4.1: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO PARA UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA IMPLEMENTADO EN SIMULINK

En primer lugar se presenta un caso base y después un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo de cuarto de vehículo. El objetivo fundamental de este cuarto capítulo es analizar la cinética de la suspensión, la energía disipada, el índice de incomodidad y el índice de inseguridad ante distintas condiciones de velocidad del vehículo y calidad del terreno.

4.1. Caso base

Para el caso base se han tomado los valores indicados en la tabla 4.1, que son valores estándar para el caso de un coche [9].

Masa suspendida (M_2)	400 kg
Masa no suspendida (M_1)	40 kg
Rigidez del muelle (K_2)	21000 N/m
Constante del amortiguador (B_2)	1500 N*s/m
Rigidez del neumático (K_1)	150000 N/m

TABLA 4.1: VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA EL CASO BASE

4.1.1. Desplazamiento y velocidad de la suspensión

Como puede observarse en las figuras 4.2 y 4.3, una mayor velocidad del coche y un terreno más bacheado implican mayores movimientos de la suspensión.

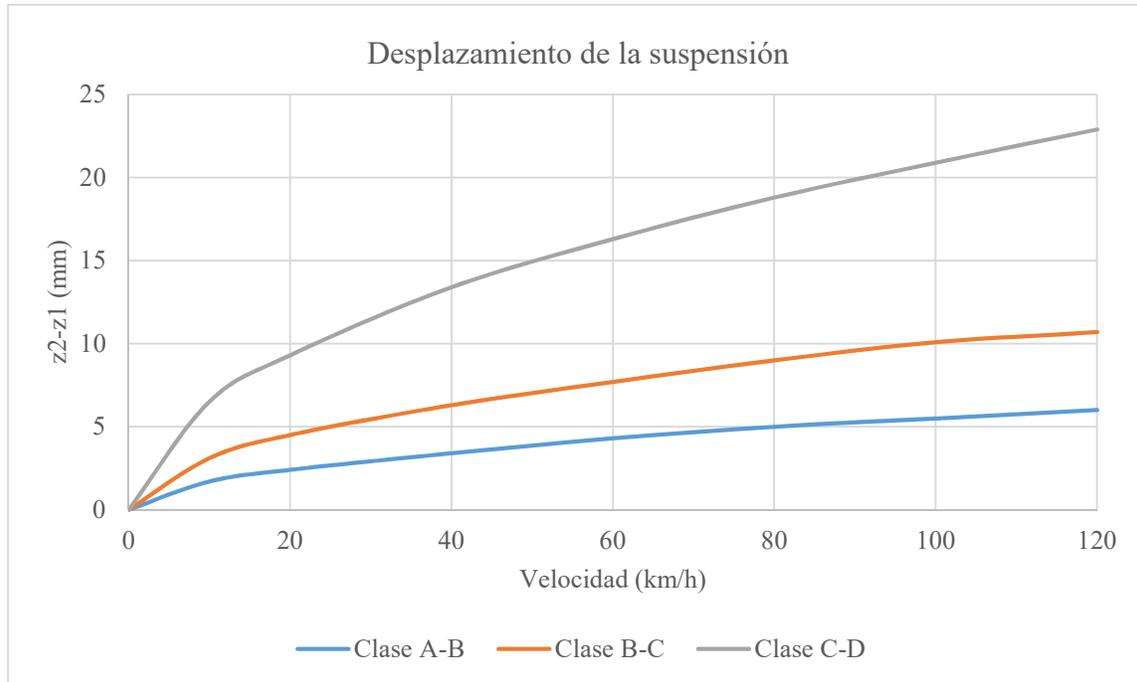


FIG. 4.2: DESPLAZAMIENTO DE LA SUSPENSIÓN ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

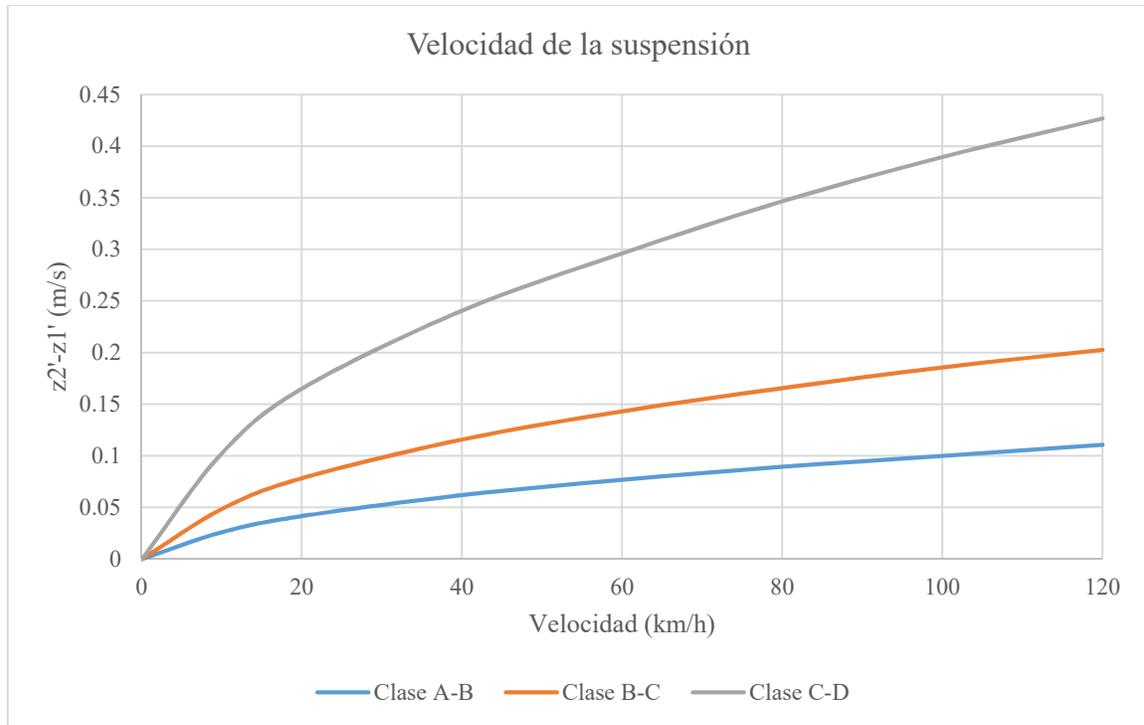


FIG. 4.3: VELOCIDAD DE LA SUSPENSIÓN ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

Tanto para el desplazamiento ($Z_2 - Z_1$) como para la velocidad ($\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1$) se han tomado los valores eficaces de las señales obtenidas en las respectivas simulaciones. En cuanto al perfil de las gráficas mostradas en las figuras 4.2 y 4.3, se observa que tienen formas muy similares, lo que significa que ambas magnitudes responden de forma muy similar ante variaciones de la velocidad del coche y de la calidad del terreno sobre el que circula este. En cuanto a los valores obtenidos, puede observarse un incremento considerable de ambas cuando se trata de un terreno de clase C-D, la peor calidad de las que se han simulado.

4.1.2. Índice de incomodidad

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.1.2, como índice de incomodidad se ha tomado el valor eficaz de la aceleración vertical de la masa suspendida (\ddot{Z}_2) filtrada de acuerdo con la ISO 2631.

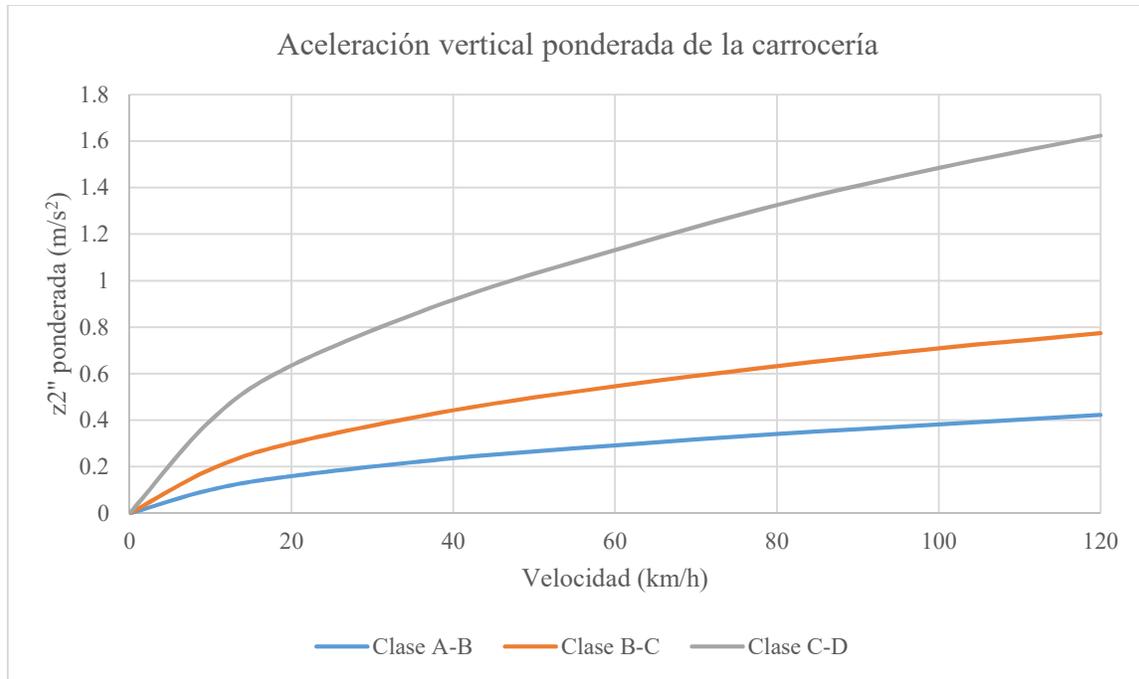


FIG. 4.4: ACELERACIÓN VERTICAL PONDERADA DE LA CARROCERÍA ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

En la figura 4.4 puede observarse que la velocidad del coche y los baches influyen negativamente en el confort de los pasajeros. Para el caso de un terreno de mala calidad, C-D, se observa que los pasajeros pueden llegar a percibir aceleraciones verticales superiores a 1 m/s^2 si el coche circula a velocidades superiores a los 50 km/h .

4.1.3. Índice de inseguridad

En la figura 4.5 se muestra la evolución del parámetro adimensional I, definido en el apartado 3.1.3, respecto a la velocidad del coche y la calidad del terreno. Cuanto mayor es I, significa que más peligrosa es la conducción y más probable es que las ruedas no ejerzan el suficiente contacto con el suelo y por tanto el conductor pierda el control sobre el coche.

Los valores mostrados en la siguiente figura se corresponden con el valor medio de la señal de I registrada durante las sucesivas simulaciones. Se observa que a mayores niveles de velocidad del coche y rugosidad del terreno sobre el que se circula, más probable es que el conductor pierda el control del vehículo.

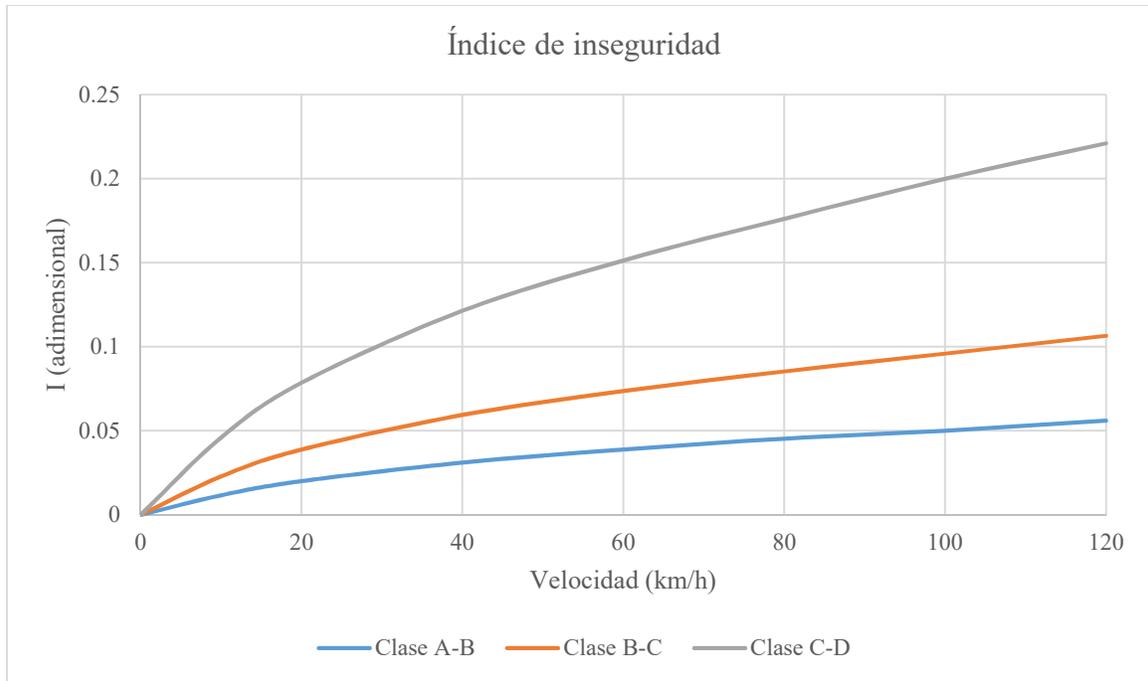


FIG. 4.5: PARÁMETRO ADIMENSIONAL I ANTE DISTINTAS CONDICIONES DE VELOCIDAD DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

4.1.4. Potencia disipada en los amortiguadores

Tal y como refleja la ecuación (3.8), la potencia que disipa un amortiguador viscoso con comportamiento lineal es directamente proporcional a la diferencia de la velocidad de sus extremos. A la vista de los resultados obtenidos en la figura 4.3, la cual muestra que la velocidad de la suspensión crece a medida que lo hace la velocidad del coche y la rugosidad del terreno, se espera que la cantidad de potencia disipada evolucione del mismo modo. La figura 4.6 confirma esto. Los valores de potencia mostrados en dicha figura se corresponden con el valor medio de la señal registrada en las simulaciones. También cabe aclarar que el valor que se muestra es el valor correspondiente al conjunto de los cuatro amortiguadores que tiene un coche, asumiendo el mismo comportamiento para las cuatro suspensiones.

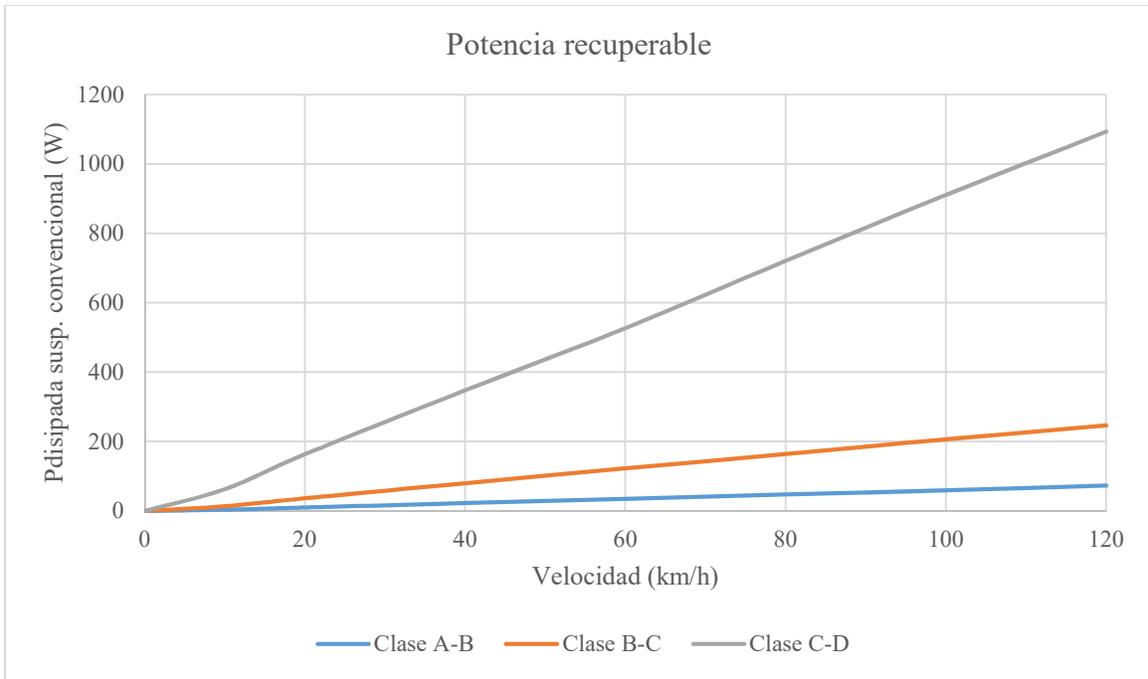


FIG. 4.6: POTENCIA DISIPADA EN LOS AMORTIGUADORES ANTE DISTINTAS VELOCIDADES DEL COCHE Y CALIDADES DEL TERRENO

Tal y como era de esperar con los resultados obtenidos en el apartado 4.1.1., la potencia disipada en los amortiguadores aumenta si también lo hace la velocidad del coche o si empeora la calidad del terreno. En el caso de un coche circulando sobre un terreno de mala calidad, clase C-D, se pueden llegar a disipar potencias del orden de 1 kW si se circula a altas velocidades superiores a los 100 km/h.

Esta potencia mostrada en la figura 4.6 es la que se pierde en forma de calor con un sistema de suspensiones convencional y la que a priori podría recuperarse con un sistema de suspensiones regenerativas, el cual lograrse generar esta potencia en forma de potencia eléctrica. A continuación, se muestra una tabla que recoge el aumento de autonomía de un coche eléctrico que podría conseguirse si se almacenase dicha potencia en la batería del coche. Los valores indicados se corresponden con un caso ideal en el que no se tienen en cuenta ningún tipo de pérdidas, por lo que el valor real será menor.

Clase de terreno	E (kWh / 100km)	Aumento de la autonomía (%)
A-B	0.056	0.372
B-C	0.193	1.287
C-D	0.846	5.640

TABLA 4.2: POTENCIAL AUMENTO DE LA AUTONOMÍA DE UN COCHE ELÉCTRICO ESTANDAR CON SUSPENSIONES REGENERATIVAS

La segunda columna de la tabla superior indica la energía que disipa el conjunto de los cuatro amortiguadores a distintas velocidades en un recorrido de 100 km. El valor mostrado es la media de distintas velocidades dentro de cada clase de terreno. Para realizar el cálculo se ha aplicado la ecuación (3.9):

$$E = \bar{P} * t$$

Donde:

\bar{P} : Valor medio de la potencia disipada por los cuatro amortiguadores a una determinada velocidad y para una calidad de terreno determinada.

t : Tiempo (en horas) que tarda el coche en recorrer 100 km a una determinada velocidad constante.

La tercera columna de la tabla hace referencia al aumento porcentual de la autonomía que supondría almacenar en forma de energía eléctrica la energía calculada en la segunda columna. Se ha calculado de la siguiente manera:

$$\Delta_{autonomía} (\%) = \frac{E \left(\frac{kWh}{100km} \right)}{\text{Consumo medio del coche eléctrico} \left(\frac{kWh}{100 km} \right)} * 100 \quad (4.1)$$

Como consumo medio del coche se han tomado 15 kWh/100 km recorridos, que se corresponde con un coche de las dimensiones del caso base (Tabla 4.1). Cabe resaltar que este cálculo solo pretende servir de estimación para comprender la magnitud de la energía que pierden los vehículos con los actuales sistemas de amortiguadores viscosos. El nivel de detalle del cálculo realizado no es elevado, ya que se está tomando un valor de consumo medio sin discriminar las diferencias de consumo según la velocidad o rugosidad del terreno

4.2. Análisis de sensibilidad

El objetivo del análisis de sensibilidad es conocer la influencia que tienen los distintos parámetros del modelo de cuarto de vehículo sobre los outputs. Se ha analizado la variación de la potencia disipada, la seguridad y el confort frente a la variación de las masas suspendida y no suspendida, rigideces del muelle y del neumático, y constante del amortiguador.

Se han tomado como referencia los resultados presentados en el apartado 4.1. Por tanto, el valor unidad de los índices y parámetros mostrados en este apartado se corresponde con los resultados del caso base.

4.2.1. Variación de la masa suspendida M_2

Tal y como se observa en la figura 4.7, la cantidad de potencia que se disipa en los amortiguadores es insensible a disminuciones o aumentos de la masa suspendida. En cambio, sí que se aprecian notables cambios en los índices de inseguridad e incomodidad. En ambos casos se observa una relación de proporcionalidad inversa con M_2 . Cuanto mayor es el valor de la masa suspendida, menor es el valor de dichos índices, y por tanto más segura y más confortable resulta la conducción.

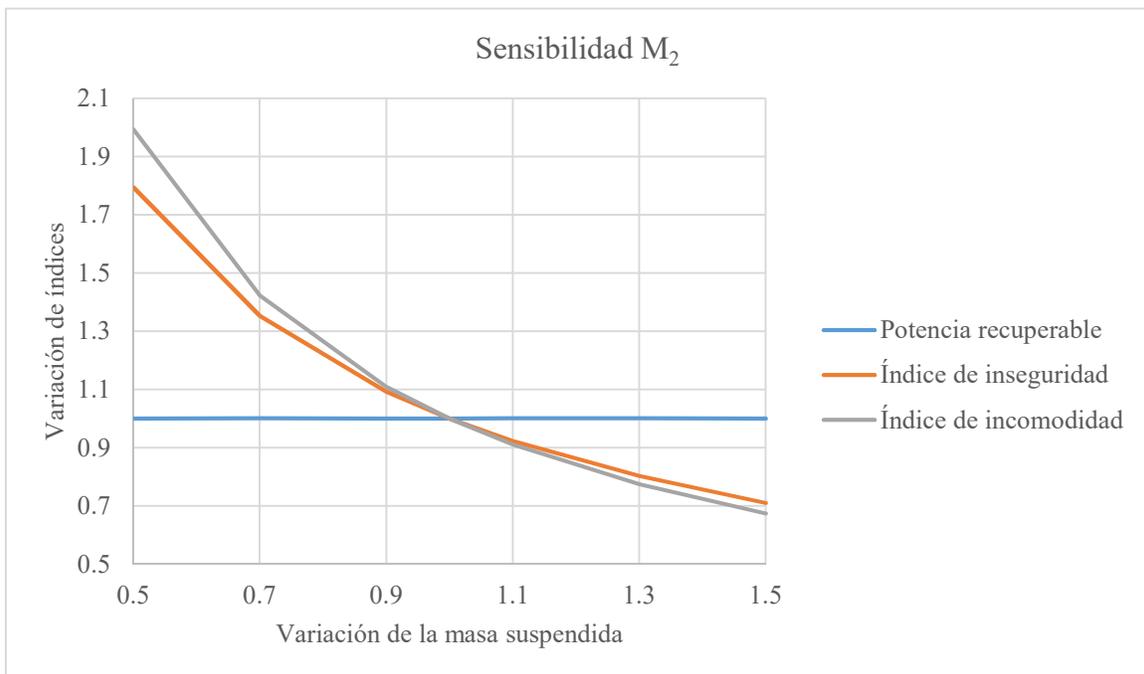


FIG. 4.7: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA SUSPENDIDA M_2

4.2.2. Variación de la masa no suspendida M_1

En este caso tampoco se aprecian apenas cambios en la potencia disipada. En cuanto a los índices de inseguridad e incomodidad, la relación con M_1 es contraria a la relación con M_2 , siendo directamente proporcional con M_1 . La variación es más acentuada en el caso de la seguridad. Aumentar la masa no suspendida implica un conducción menos segura y menos confortable.

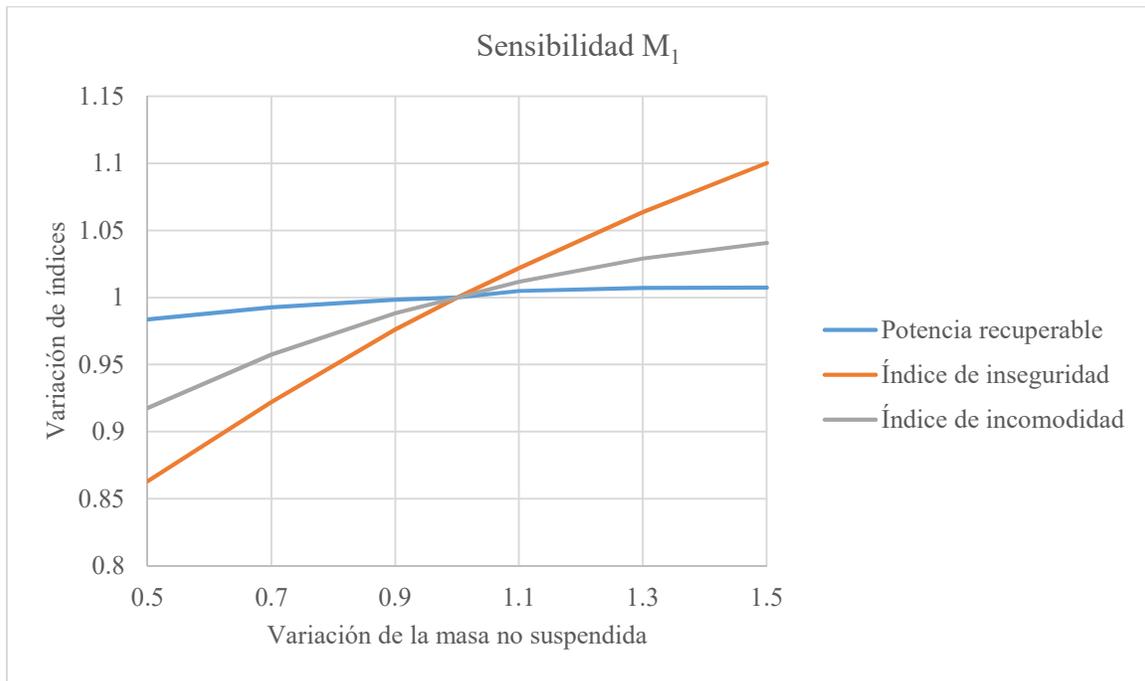


FIG. 4.8: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA MASA SUSPENDIDA M_1

4.2.3. Variación de la constante de amortiguación B_2

De nuevo, la potencia recuperable es insensible a las variaciones de B_2 . Los índices de inseguridad e incomodidad sí son sensibles a los cambios de la constante del amortiguador, pero de maneras opuestas. Por un lado, el índice de inseguridad y B_2 presentan una relación de proporcionalidad inversa. Incrementar la constante de amortiguación se traduce en una conducción más segura. Por otro lado, el índice de incomodidad y B_2 presentan una relación de proporcionalidad directa. Incrementos de B_2 se traducen en incrementos de la aceleración vertical de la masa suspendida ponderada según la perceptibilidad humana, lo cual hace menos confortable el viaje a los pasajeros.

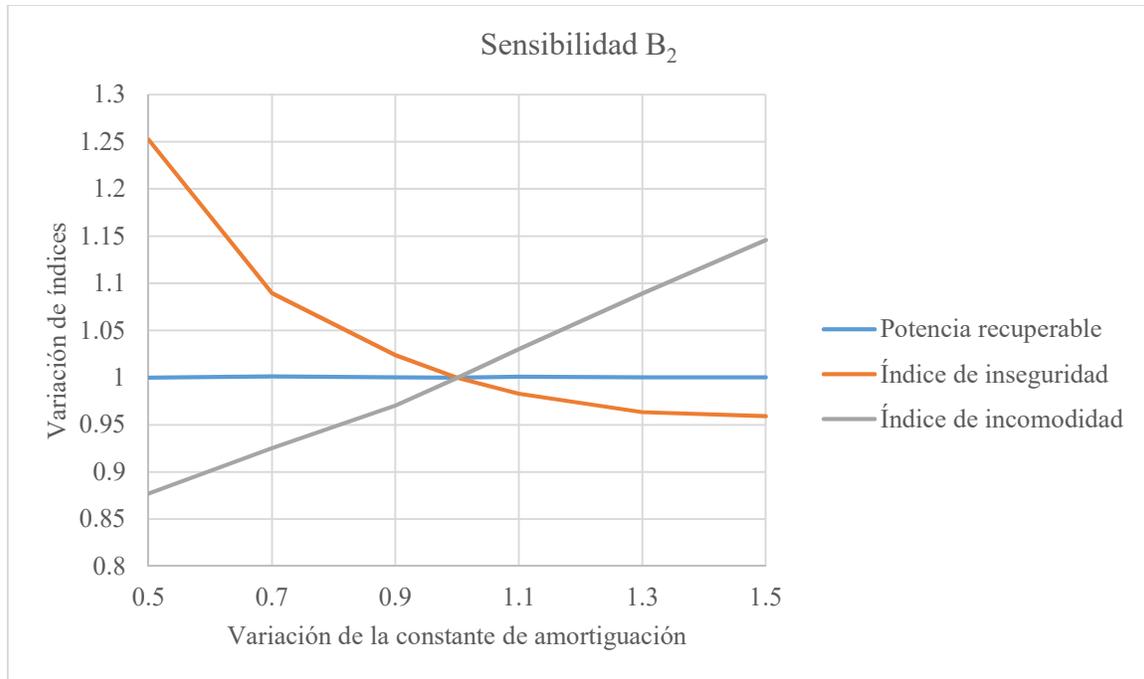


FIG. 4.9: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE AMORTIGUACIÓN B_2

Suspensiones con valores altos de B_2 reciben el nombre informal de “suspensiones duras”, mientras que para el caso contrario se habla de “suspensiones blandas”. Las suspensiones blandas ofrecen una conducción más confortable (menor aceleración vertical de la carrocería) pero exigen más destreza por parte del conductor (aumentan las fuerzas dinámicas en los neumáticos, por lo que es más fácil que el conductor pierda el control). Por otro lado, las suspensiones duras ofrecen lo contrario: más seguridad a cambio de menos confort. Con las suspensiones duras se consigue una mayor adherencia de los neumáticos con el pavimento.

4.2.4. Variación de la constante de rigidez del muelle K_2

A la vista de lo mostrado en la figura 4.10, una suspensión con un resorte de mayor o menor rigidez no cambia nada en cuanto a la potencia recuperable. Pero K_2 sí que es un parámetro relevante en cuanto a la inseguridad y la incomodidad. Ambos índices tienen una relación de proporcionalidad directa con dicho parámetro.

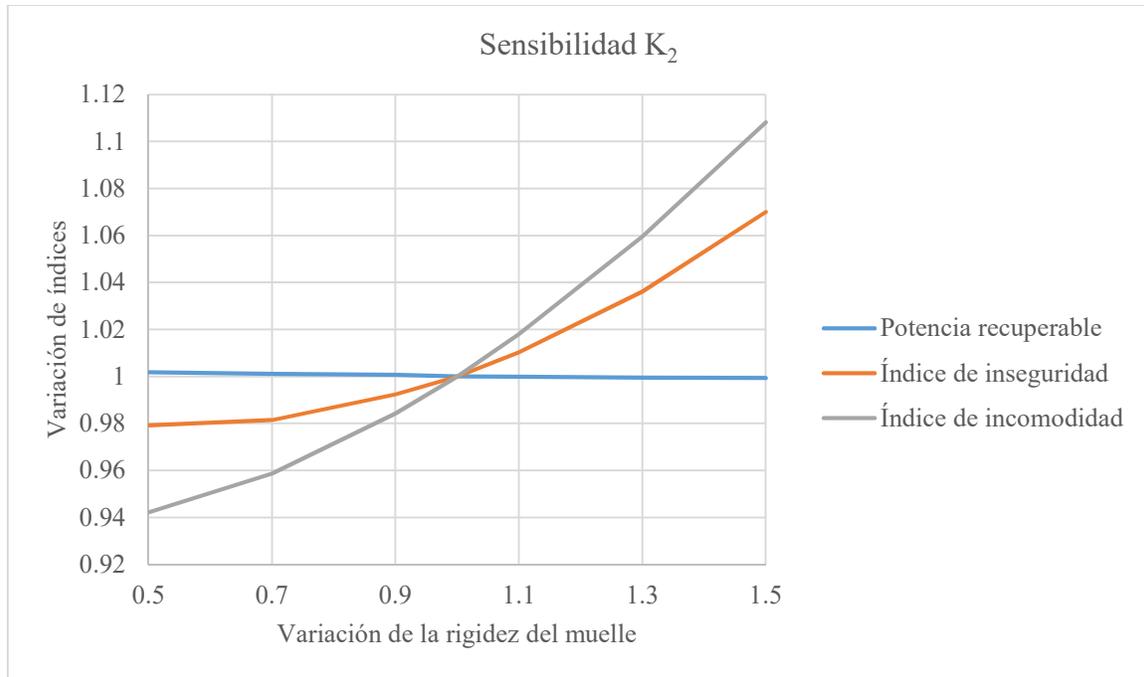


FIG. 4.10: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL MUELLE K_2

En cuanto al índice de incomodidad, cuanto más rígido es el resorte, más vibraciones se transmiten a la carrocería y por tanto menos confort tienen los pasajeros.

En cuanto al índice de inseguridad, los resultados muestran que aumentar K_2 se traduce en mayores valores del parámetro adimensional I. Esto quiere decir que aumentan las fuerzas dinámicas, lo cual hace menos manejable el coche.

4.2.5. Variación de la constante de rigidez del neumático K_1

Este es el único parámetro al que es notablemente sensible la cantidad de potencia evacuada en los amortiguadores. Los tres outputs analizados (potencia, seguridad y confort) presentan una relación de proporcionalidad directa con la rigidez del neumático. El más sensible a variaciones en K_1 es la potencia. A priori, esto sería ventajoso en cuanto a la potencia recuperable en las suspensiones, ya que se podría recuperar más energía con tan solo aumentar la presión de inflado del neumático. Pero esto tiene una contrapartida, y es que como se puede observar en la figura 4.11, la inseguridad y la incomodidad también aumentan.

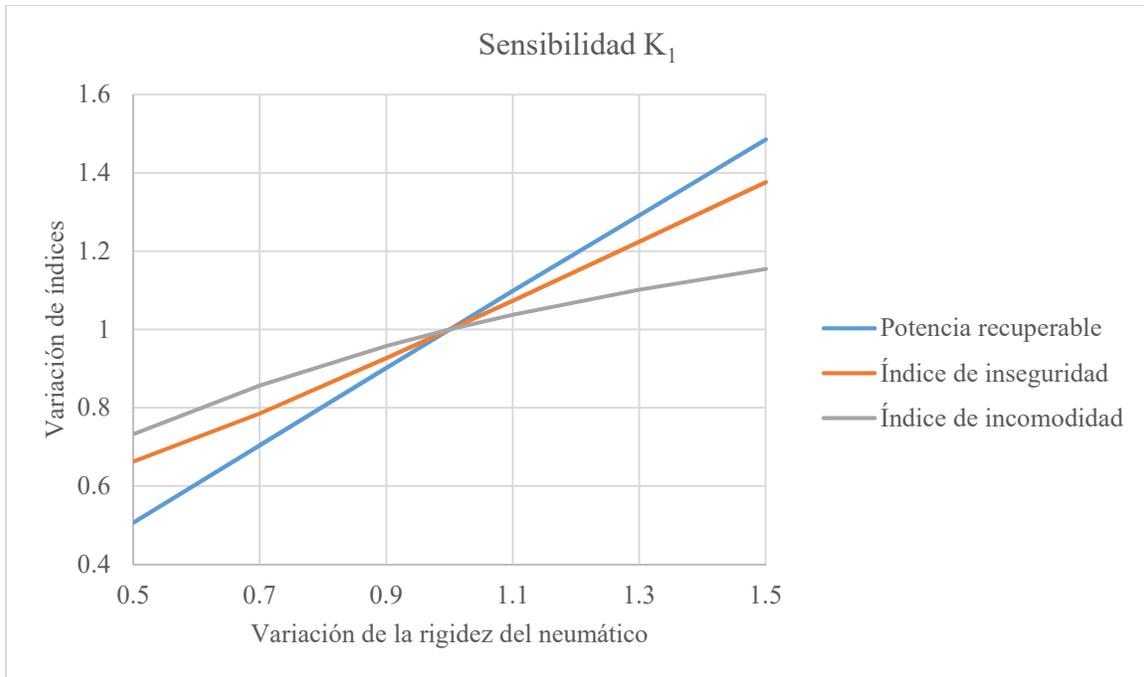


FIG. 4.11: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL NEUMÁTICO K_1

4.2.6. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, el parámetro más relevante teniendo en cuenta el objetivo principal de este estudio (la recuperación de energía en las suspensiones) resulta ser K_1 , la rigidez del neumático. Para el resto de parámetros del modelo, la cantidad de potencia que se disipa en los amortiguadores es prácticamente insensible.

La conclusión fundamental es que aunque aumentar la rigidez del neumático aumentaría la cantidad de potencia recuperable en las suspensiones notablemente (aumentar un 10% dicha rigidez aumentaría un 9,8% la potencia recuperable, de acuerdo con la figura 4.11), no sería razonable porque no se cumpliría el compromiso que debe haber de seguridad y comodidad. En la búsqueda de una mayor potencia a recuperar, se acabaría provocando una conducción más insegura para el conductor y más incómoda para los pasajeros del coche.

5. Suspensión regenerativa

En este capítulo se presenta un modelo de suspensión regenerativa, es decir, una suspensión en la que el amortiguador viscoso es sustituido por un generador electromagnético lineal. Este amortiguador eléctrico convierte la energía cinética del movimiento lineal de la suspensión en electricidad, de ahí el nombre de suspensión regenerativa.

En primer lugar, se presenta el diseño y modelo matemático del generador. En la segunda parte de este capítulo se analiza el comportamiento de dicho generador implementado en el modelo de simulación desarrollado en el capítulo 3.

5.1. Generador lineal de imanes permanentes

5.1.1. Principio de funcionamiento

Los generadores lineales se basan en la Ley de Faraday aplicada al caso de una bobina, la cual indica que cuando una bobina que forma un circuito cerrado se mueve a través de un campo magnético, una diferencia de voltaje se induce en los extremos de dicha bobina. Ese voltaje inducido, que también recibe el nombre de fuerza electromotriz inducida, es igual a la variación negativa de flujo magnético respecto al tiempo que ve el circuito cerrado del conductor. Para un arrollamiento formado por N vueltas, la Ley de Faraday se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.1)$$

Donde:

ε : Fuerza electromotriz inducida entre los extremos del arrollamiento [V].

N: Número de espiras del arrollamiento conductor.

Φ : Flujo magnético [Wb] o [T*m²].

El signo negativo se debe a la Ley de Lenz, la cual dice que el sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético que produce se opone a la variación del flujo del campo aplicado.

En un generador lineal de imanes permanentes se induce una tensión cuando se produce un movimiento relativo entre dichos imanes y un arrollamiento conductor. Dicho movimiento

produce la variación de flujo magnético necesaria para inducir la tensión, tal y como refleja la ecuación (5.1). En la figura 5.1 queda reflejado de manera gráfica dicho principio de funcionamiento:

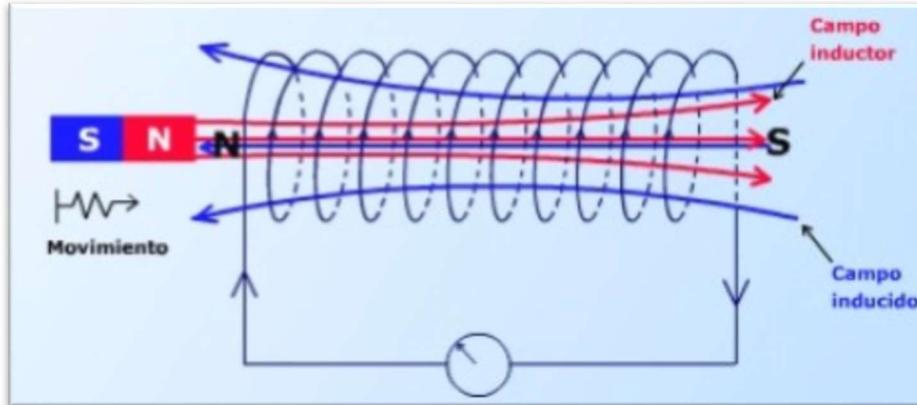


FIG. 5.1: IMÁN MOVIÉNDOSE DENTRO DE UN ARROLLAMIENTO CONDUCTOR, EN EL QUE SE INDUCE UNA TENSIÓN ENTRE SUS EXTREMOS

En esta figura se representa la Ley de Faraday y la Ley de Lenz. Al moverse el imán de izquierda a derecha, se induce una corriente en las espiras del arrollamiento de tal modo que producen un campo magnético inducido (en azul) que se opone al aumento del flujo del campo inductor (en rojo). A su vez, esta corriente induce una fuerza electromotriz en el conductor, siendo el voltaje mayor en el extremo izquierdo que en el derecho.

5.1.2. Descripción general y diseño

El generador propuesto en este proyecto para ser usado como amortiguador eléctrico es un generador lineal de imanes permanentes de forma cilíndrica, que es la forma de los amortiguadores viscosos utilizados en las suspensiones convencionales. Optar por esta forma hace muy fácil la sustitución de los amortiguadores viscosos por estos eléctricos, permitiendo mantener el muelle helicoidal rodeándolo.

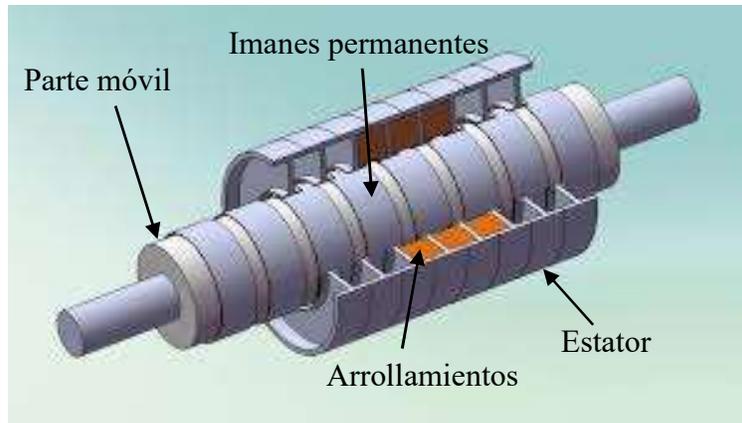


FIG. 5.2: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES DE FORMA CILÍNDRICA [11]

En un generador cuyo principio de funcionamiento se fundamenta en las leyes del electromagnetismo, es fundamental hacer la elección más adecuada de los materiales que constituyen las distintas partes del generador para incrementar la densidad de flujo magnético que ven los arrollamientos del estator. De este modo, se optimiza la cantidad de energía eléctrica generada por la Ley de Faraday. A continuación, se analizan cuáles resultan ser los materiales más adecuados para las distintas partes del generador.

5.1.2.1. Parte móvil

La parte móvil está formada por una varilla y por imanes permanentes montados sobre su superficie.

Varilla:

En cuanto al material más adecuado para la varilla, Zuo et al [4] estudiaron en un prototipo la diferencia entre utilizar una varilla de aluminio y una varilla de acero. Concluyeron que, como la permeabilidad magnética relativa del acero es 100 veces superior a la del aluminio, en el caso de una varilla de acero las líneas de campo magnético producidas por los imanes permanentes se ven forzadas a ir dentro de la varilla. En cambio, con una varilla de aluminio, el flujo no se concentra en la varilla sino que se dispersa por el entrehierro y por tanto mayor es la densidad de flujo que ven variar los arrollamientos. Por tanto, con una varilla de aluminio se induce más tensión que con una de acero.

Imanes permanentes:

Los imanes permanentes son aquellos materiales que pueden ser imantados y pueden generar un campo magnético persistente, a diferencia de los imanes temporales que solo pueden generar campo en presencia de una fuente de energía externa. En un generador lineal de imanes permanentes, la excitación la producen estos. Para maximizar la cantidad de energía generada, la elección del tipo de imanes permanentes es crítica, ya que cada tipo de imanes permanentes tiene unas características particulares.

Los imanes permanentes se pueden caracterizar por su curva B-H. B hace referencia a la densidad de flujo magnético, cuya unidad es Tesla, y H a la intensidad de campo magnético, cuya unidad es A/m. En concreto, la parte de la curva que es más importante a la hora de clasificar los distintos tipos de imanes permanentes es la curva de desmagnetización, situada en el segundo cuadrante. Hay dos puntos fundamentales que definen dicha curva:

- B_r (campo magnético remanente): es la densidad de flujo magnético correspondiente a una intensidad de campo magnético nula.
- H_c (fuerza coercitiva): es el valor de la intensidad de campo magnético necesaria para alcanzar una densidad de flujo magnético nula en un material que ha sido previamente magnetizado.

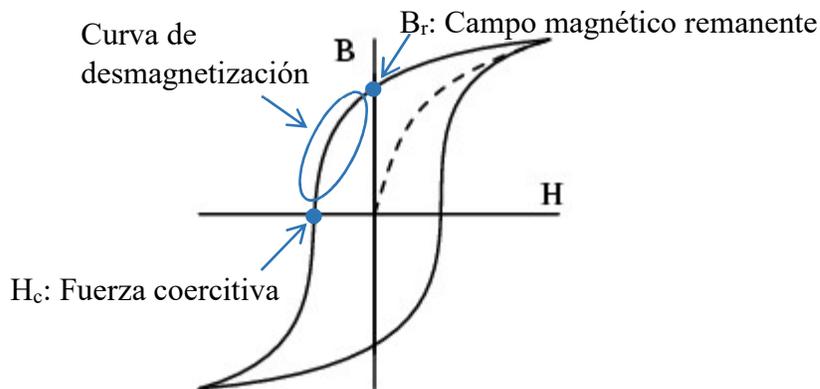


FIG. 5.3: CURVA B-H EN LA QUE SE INDICAN LOS PUNTOS MÁS SIGNIFICATIVOS DE LOS IMANES PERMANENTES

Haciendo uso de la curva de desmagnetización de un imán permanente, se puede calcular la energía producida por unidad de volumen por dicho imán:

$$W = \frac{B \cdot H}{2} \quad \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (5.2)$$

Los imanes permanentes más utilizados en máquinas eléctricas son los siguientes:

- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe)
- Cerámicos: ferritas como ferrita de bario ($BaO \times 6Fe_2O_3$) y ferrita de estroncio ($SrO \times 6Fe_2O_3$)
- Tierras raras, como samario-cobalto (SmCo) y neodimio-hierro-boro (NdFeB)

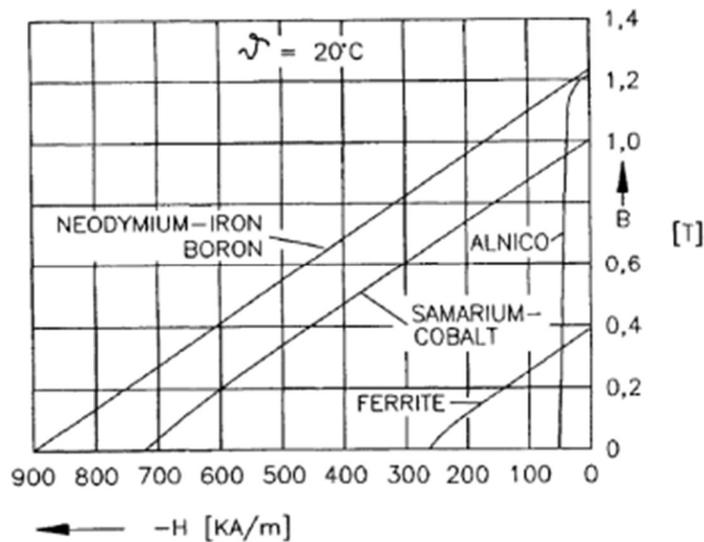


FIG. 5.4: CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE IMANES PERMANENTES [12]

En la figura 5.4, se puede observar la curva de desmagnetización de dichos tipos de imanes permanentes. Estas curvas son sensibles a la temperatura. Las mostradas se corresponden con una temperatura de 20 °C. Este es un factor importante, ya que si la temperatura aumenta los imanes permanentes se degradan, pudiendo llegar a perder su magnetismo si alcanzan la Temperatura de Curie.

Los alnicos, que fueron los primeros en usarse en máquinas eléctricas de imanes permanentes, tienen un campo magnético remanente (B_r) alto, una fuerza coercitiva (H_c) baja y por tanto una curva de desmagnetización no lineal.

Más adelante comenzaron a usarse las ferritas. Las ferritas, o cerámicos, son imanes permanentes con un mayor valor de H_c pero tienen un B_r mucho más pequeño que los alnicos. Su coste es muy bajo.

Ya en las últimas décadas es cuando se han desarrollado imanes permanentes de tierras raras, los cuales tienen la mayor capacidad energética W , de acuerdo con la ecuación (5.2). Los primeros en desarrollarse fueron los de samario-cobalto, pero tienen un coste elevado debido a la escasez de Sm y de Co. Debido a esta desventaja en cuanto al coste, se desarrollaron los imanes permanentes de neodimio-hierro-boro. Estos elementos (Nd, Fe y B) no son tan escasos como el Sm y el Co, lo cual reduce el coste, pero tienen la desventaja de ser más sensibles a la temperatura.

En la siguiente tabla se reflejan las principales ventajas y desventajas de cada tipo de imán permanente:

Tipo de imán permanente	Ventajas	Desventajas
Alnico	<ul style="list-style-type: none"> - Alto B_r - Baja sensibilidad a la temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja H_c - Curva no lineal
Ferritas	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo coste - Pocas pérdidas por corrientes parasitarias 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo B_r - Alta sensibilidad a la temperatura
Samario-cobalto (SmCo)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta capacidad energética - Baja sensibilidad a la temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado coste
Neodimio-hierro-boro (NdFeB)	<ul style="list-style-type: none"> - Menor coste que SmCo - Alta capacidad energética 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sensibilidad a la temperatura

TABLA 5.1: TABLA COMPARATIVA DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DISTINTOS TIPOS DE IMANES PERMANENTES

Por tanto, los imanes permanentes más apropiados para la aplicación de este proyecto son los de Neodimio-Hierro-Boro, ya que son los que ofrecen una mayor capacidad energética en el menor volumen y al mejor coste. Es cierto que tienen la desventaja de ser altamente sensibles a la temperatura, pero esto se puede prevenir si reciben un pretratamiento de protección ante la corrosión. Dicho pretratamiento consiste habitualmente en una triple capa protectora Níquel-Cobre-Níquel [13].

5.1.2.2. Parte fija

La parte fija está formada por un cilindro exterior que en su interior tiene unas hendiduras en las que se sitúan los arrollamientos en los que se induce la fuerza electromotriz.

Envolverte cilíndrica exterior:

El material de esta parte del generador es un factor decisivo en la distribución del flujo magnético producido por los imanes permanentes. Zuo et al [4] estudiaron dos configuraciones distintas con el fin de determinar la mejor opción para maximizar el flujo magnético que ven variar respecto al tiempo los arrollamientos del estator: generador sin tubo exterior y generador con tubo exterior de acero. Los resultados obtenidos reflejaron la necesidad de usar un tubo exterior, porque de lo contrario el flujo magnético se dispersa por el aire en vez de concentrarse en los arrollamientos. Con el tubo exterior se obliga a las líneas de campo magnético a viajar por los arrollamientos del estator en vez de cerrarse en el aire como harían sin tubo.

En la siguiente figura se muestran las diferencias entre distintas configuraciones del generador:

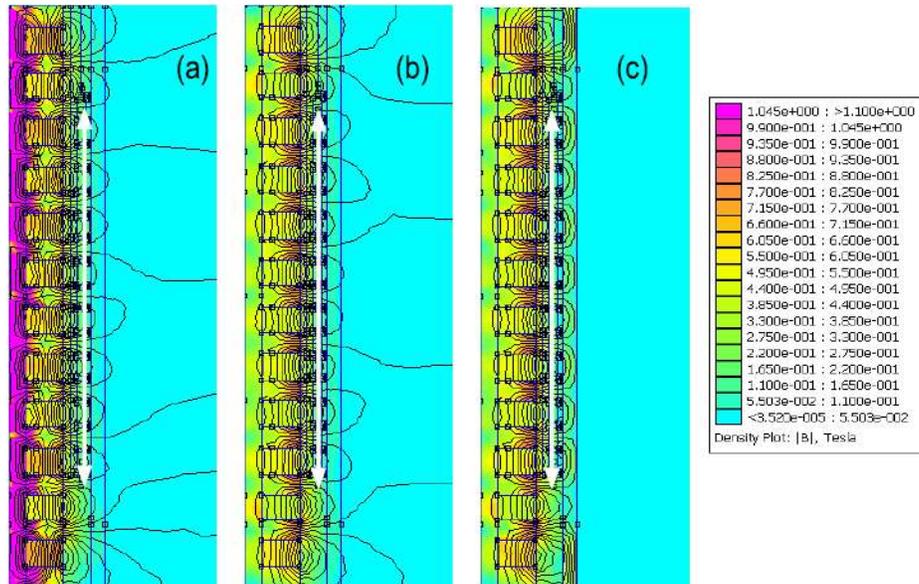


FIG. 5.5: LÍNEAS E INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO PARA: (a) VARILLA DE ACERO SIN TUBO, (b) VARILLA DE ALUMINIO SIN TUBO, (c) VARILLA DE ALUMINIO CON TUBO EXTERIOR DE ACERO [4]

La sección del generador mostrada en la figura es la siguiente (de izquierda a derecha): varilla con imanes permanentes, hendiduras del estator donde se sitúan los arrollamientos (marcadas por la flecha blanca) y tubo o aire en su defecto.

En el caso (a), se observa como la intensidad de campo magnético es muy alta en la varilla, siendo menor que en los arrollamientos. Esto se debe a la alta permeabilidad magnética del acero del que está hecha la varilla. Además, se observa cómo hay una dispersión de líneas de campo magnético en el aire al no tener el generador un tubo exterior que las obligue a viajar dentro del mismo.

En el caso (b), la sustitución de la varilla de acero por otra de aluminio mejora la distribución de las líneas de campo magnético teniendo en cuenta el objetivo de este generador. Con esta configuración, el campo magnético se concentra más en los arrollamientos del estator en vez de concentrarse en la varilla como ocurría en el caso anterior. A pesar de esta mejora, persiste el problema de la dispersión de campo magnético en el exterior.

En el caso (c), se observa el diseño que optimiza la distribución del campo magnético que sufren los arrollamientos del estator. Por un lado, la varilla de aluminio hace que, gracias a su baja permeabilidad magnética, no se concentre el campo en ella sino en los arrollamientos. Por otro lado, la introducción del tubo exterior de acero hace que, gracias a su alta permeabilidad, las líneas de campo no se dispersen en el aire y queden concentradas por tanto en el estator.

5.1.3. Circuito equivalente y ecuaciones

En este apartado se presenta el circuito eléctrico equivalente de un sistema de suspensión regenerativa acoplada en un coche. Del mismo modo se presentan las ecuaciones que sirven para modelizar el sistema y estudiar su comportamiento como amortiguador y generador al mismo tiempo. Las simulaciones de este sistema y los resultados de las mismas se presentan en posteriores apartados.

Debido a que las oscilaciones de la parte móvil del generador siguen un patrón irregular que viene dado por la rugosidad del terreno sobre el que está circulando el coche, la tensión inducida en el generador lineal es alterna. Por ello debe introducirse un rectificador de corriente alterna a corriente continua entre la salida del generador y la entrada de la batería. Cabe recordar que para cargar las baterías se les debe aplicar una corriente continua.



FIG. 5.6: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN REGENERATIVA

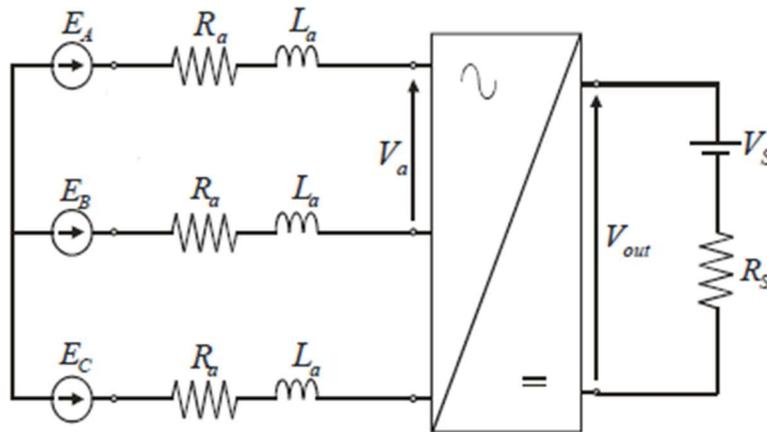


FIG. 5.7: CIRCUITO EQUIVALENTE DEL CONJUNTO FORMADOR POR EL GENERADOR TRIFÁSICO, RECTIFICADOR Y BATERÍA

Los parámetros del circuito son los siguientes:

- E_A, E_B, E_C : tensiones de fase inducidas.
- R_a : resistencia eléctrica equivalente del arrollamiento de una fase.
- L_a : inductancia equivalente del arrollamiento de una fase.
- V_a : voltaje compuesto en la entrada del acumulador (acumulador: conjunto formado por el rectificador y la batería).
- V_{out} : voltaje a la salida del rectificador que alimenta a la batería.
- V_s : voltaje de la batería.
- R_s : resistencia equivalente de la batería.

La tensión en cada fase se induce por la Ley de Faraday. De acuerdo con Arif Indro et al [14], dicha tensión inducida en cada fase es proporcional a la velocidad relativa entre la parte móvil y la parte fija:

$$E_{\Phi} = K_E * v \quad (5.3)$$

Donde:

$$K_E = 2 * N_c * B_w * l_t * p \quad (5.4)$$

Donde a su vez:

N_c : número de espiras del arrollamiento de dicha fase.

B_w : densidad de flujo magnético en el arrollamiento.

l_t : longitud de cada espira.

p : número de pares de polos.

Por lo tanto, las unidades de la constante K_E son: $\left[\frac{V*s}{m}\right]$

Para la aplicación que se estudia aquí, resulta muy importante conocer las expresiones de la potencia inducida y la contrafuerza que ofrece el generador oponiéndose al movimiento de los imanes permanentes.

Por un lado, la contrafuerza electromotriz que induce el generador en cada fase, que para el caso de un generador lineal funcionando como amortiguador eléctrico será la fuerza de amortiguación, se calcula del siguiente modo:

El producto de la constante del generador y la corriente que circula por los arrollamientos tiene las siguientes unidades:

$$\frac{V * s}{m} * A = \frac{W * s}{m} = \frac{J}{m} = \frac{N * m}{m} = N$$

Por tanto:

$$F_{am} = K_E * I \quad (5.5)$$

Por otro lado, la potencia inducida en cada fase del generador se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$P_{in} = E_{\Phi} * I = F_{am} * v \quad (5.6)$$

Del mismo modo es de interés hallar la constante de amortiguación equivalente del generador, con el objetivo de poder compararlo con la constante de un amortiguador viscoso habitual. Partiendo de las ecuaciones (3.8) y (5.6):

$$P_{amortiguador} = B * v^2$$

viscoso

$$P_{amortiguador} = F_{am} * v = K_E * I * v = \frac{K_E * I}{v} * v^2$$

eléctrico

Por tanto, a partir de este desarrollo se demuestra que la constante de amortiguación equivalente de un generador lineal de imanes permanentes es:

$$B_{eq} = \frac{K_E * I}{v} \quad (5.7)$$

5.1.3.1. Rectificación AC/DC

Una vez diseñado el generador que se emplee como amortiguador eléctrico, resulta igualmente importante la elección de la electrónica de potencia que rectifique la señal de salida del generador para poder cargar la batería del coche en corriente continua (DC).

El circuito rectificador que cuyo comportamiento se presenta en posteriores capítulos, está formado por:

- Puente rectificador de onda completa formado por diodos.
- Filtro a la salida de dicho puente.

Puente rectificador de diodos:

A continuación, se presentan los puentes rectificadores monofásicos y trifásicos:

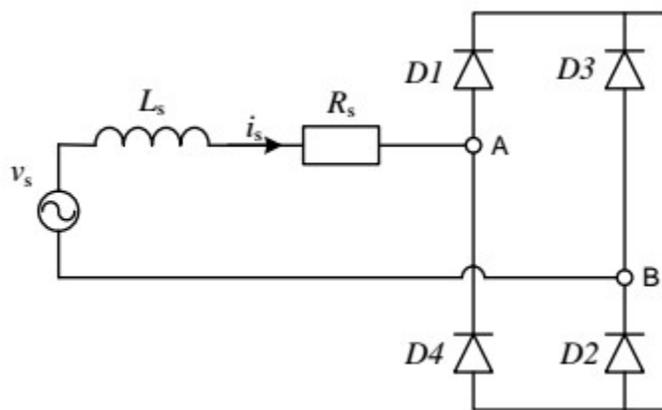


FIG. 5.8: PUENTE RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA FORMADO POR DIODOS

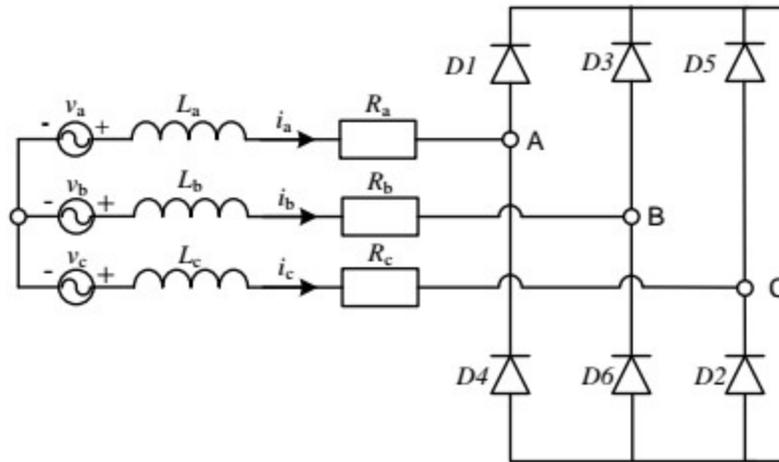


FIG. 5.9: PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA FORMADO POR DIODOS

Si la señal de entrada es una señal senoidal, las señales a la salida de estos dos circuitos tienen las formas mostradas en la siguiente figura:

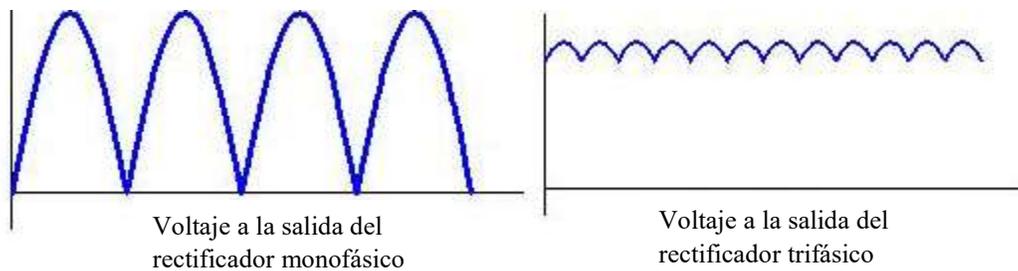


FIG. 5.10: SEÑAL SENOIDAL RECTIFICADA POR UN PUENTE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Como puede observarse en la figura 5.10, solo con el puente rectificador de onda completa no se obtiene una señal continua, sino que tiene una componente alterna llamada rizado. Dicha señal tiene un nivel de rizado alto, especialmente en el caso de una señal monofásica. En ciertas aplicaciones los niveles de rizado deben estar dentro de unos límites concretos, como es el caso de la carga de una batería. Niveles de rizado altos pueden provocar problemas en la salud de la batería, reduciendo la vida útil de las mismas. Por ejemplo, para el caso de una batería VRLA, el rizado

máximo no puede superar el 0.5% del valor DC del voltaje aplicado [15]. Para obtener una señal lo más continua posible, es decir, con el menor rizado posible, resulta fundamental introducir un filtro a la salida del puente rectificador

Filtro en circuito rectificador AC/DC:

El objetivo del filtro es eliminar o reducir el rizado de la señal rectificadora obtenida a la salida del puente de diodos. Se distinguen tres tipos de filtros [16]:

- Condensador: utilizado en aplicaciones de baja potencia.
- Inductancia: utilizado en aplicaciones de mayor potencia.
- Condensador e inductancia: combina las ventajas del condensador y la inductancia. Con el condensador se consiguen armonizar las variaciones del voltaje y con la inductancia las variaciones de corriente. Es ampliamente utilizado en aplicaciones de alta potencia.

5.2. Simulación del modelo con suspensión regenerativa

En este apartado se presentan los resultados y conclusiones obtenidas tras sustituir el amortiguador viscoso con el que se había simulado en el capítulo 4 por un amortiguador eléctrico. El generador lineal funciona en el modelo como amortiguador pasivo.

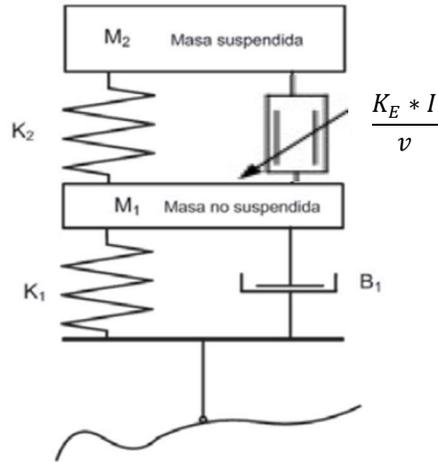


FIG. 5.11: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO CON SUSPENSIÓN REGENERATIVA

La velocidad relativa (v) entre los imanes y el arrollamiento del estator se ha calculado como:

$$v = \dot{Z}_2 - \dot{Z}_1 \quad (5.8)$$

La expresión (5.8) se corresponde con hacer solidario el estator a la masa suspendida (M_2) y por otra parte hacer solidario el movimiento de la varilla con imanes permanentes a la masa no suspendida M_1 .

Para implantar el generador en el modelo, se han utilizado los siguientes valores para sus diferentes parámetros:

N_c	70
B_w	0.8 T
l_t	0.160 m
p	4
R_a	1.3 Ω
L_a	6.1 mH

TABLA 5.2: PARÁMETROS DEL GENERADOR LINEAL SIMULADO COMO AMORTIGUADOR [14]

Con estos valores, la constante K_E , de acuerdo con la ecuación (5.4), es igual a $71.68 \frac{V*s}{m}$.

5.2.1. Simulación sobre carga, sin rectificación AC/DC

Se ha simulado el modelo con el generador conectado a una carga, sin rectificar la señal generada. El objetivo es verificar si se induce la potencia esperada y si el generador ofrece un buen comportamiento amortiguador antes de ser conectado a un circuito rectificador. Se han simulado un generador monofásico y un generador trifásico.

Las simulaciones se han llevado a cabo para diferentes condiciones de terreno y velocidad. A su vez, se han analizado y comparado las siguientes magnitudes con respecto al amortiguador viscoso para cada respectiva condición de conducción:

- Desplazamiento de la suspensión
- Velocidad de la suspensión
- Índice de incomodidad
- Índice de inseguridad
- Potencia en una suspensión (disipada en el caso del amortiguador viscoso e inducida en el arrollamiento del estator en el caso del amortiguador eléctrico).
- Fuerza de amortiguación
- Constante de amortiguación

Además de los valores indicados en la tabla 5.2, es igualmente importante el valor de la carga que se conecta al generador. La potencia inducida, la fuerza de amortiguación y la constante de amortiguación equivalente dependen del valor de la intensidad I . Esta intensidad depende de R_{carga} , ya que el generador forma un circuito cerrado con ella. Con el fin de que el amortiguador eléctrico ofreciera prestaciones de amortiguación similares a las del amortiguador viscoso simulado en el capítulo 4, se han realizado diversas simulaciones hasta fijar los siguientes valores:

- Generador monofásico: $R_{carga} = 2.5 \Omega$
- Generador trifásico: $R_{carga} = 8.5 \Omega$

En la siguiente figura se puede observar con mayor detalle el modelo del generador monofásico implementado en Simulink haciendo uso de la herramienta Simscape:

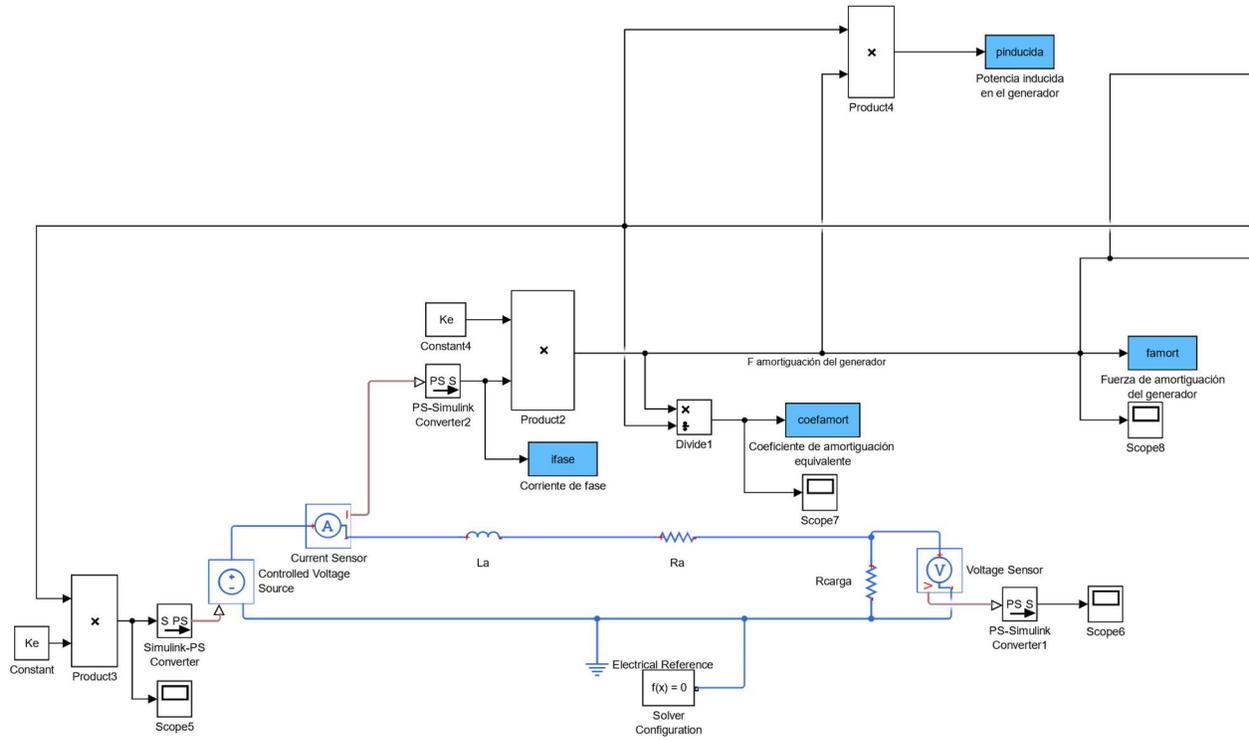


FIG. 5.13: DETALLE DE LA FIGURA 5.12: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES MONOFÁSICO

Como puede observarse en la figura 5.12, se han implementado en Simulink las ecuaciones expuestas en el apartado 5.1.3.

A continuación, se muestran en una tabla los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo mostrado en la figura 5.12 en tres condiciones distintas de calidad del terreno y velocidad del coche.

	Clase A-B, 100 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	14.99	Ifase (A, rms)	1.99
Desp. Suspensión (m)	0.0055	0.0057	3.64	Pout (W)	4.93	Vin (V, rms)	7.58
Vel. Suspensión (m/s)	0.1001	0.1048	4.70				
Índice de incomodidad (m/s ²)	0.382	0.3772	-1.26				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.0501	0.0501	0.00	Eficiencia (%)	32.91		
Potencia en 1 suspensión (W)	15.0188	14.9854	-0.22				
F. Amortiguación (N)	150.0937	143.6231	-4.31				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1368.7	-8.75				

	Clase B-C, 80 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	41.16	Ifase (A, rms)	3.29
Desp. Suspensión (m)	0.009	0.0094	4.44	Pout (W)	13.54	Vin (V, rms)	12.56
Vel. Suspensión (m/s)	0.1657	0.1737	4.83				
Índice de incomodidad (m/s ²)	0.6323	0.6244	-1.25				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.0854	0.0858	0.47	Eficiencia (%)	32.90		
Potencia en 1 suspensión (W)	41.1895	41.1574	-0.08				
F. Amortiguación (N)	248.5644	237.9956	-4.25				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1403.4	-6.44				

	Clase C-D, 60 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	131.46	Ifase(A, rms)	5.88
Desp. Suspensión (m)	0.0163	0.017	4.29	Pout (W)	86.52	Vin (V, rms)	22.45
Vel. Suspensión (m/s)	0.2963	0.3105	4.79				
Índice de incomodidad (m/s ²)	1.1317	1.1169	-1.31				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.1513	0.1519	0.40	Eficiencia (%)	65.81		
Potencia en 1 suspensión (W)	131.7123	131.4629	-0.19				
F. Amortiguación (N)	444.4868	425.3624	-4.30				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1459.8	-2.68				

TABLA 5.3: COMPARATIVA ENTRE SUSPENSIÓN CONVENCIONAL Y REGENERATIVA, JUNTO CON DATOS DEL GENERADOR MONOFÁSICO, PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE

Como puede observarse en la tabla 5.3, el generador lineal diseñado es capaz de ofrecer como amortiguador eléctrico prestaciones muy similares a las de un amortiguador convencional. En particular, tanto el índice de incomodidad como el índice de inseguridad apenas varían. El de incomodidad varía poco más del 1% y el de inseguridad entre el 0 y el 0.5% respecto a los obtenidos con un amortiguador viscoso de constante $B=1500 \text{ N*s/m}$. Otro detalle que se observa en cuanto al comportamiento del amortiguador eléctrico es que la constante de amortiguación equivalente que presenta no es constante, tal y como puede deducirse de la expresión (5.7).

En cuanto a la recuperación de energía que ofrece el generador, se observa que se induce la potencia esperada (la potencia disipada por el amortiguador convencional viscoso) en todos los casos simulados. Hay pequeñas diferencias entre la potencia disipada por el amortiguador convencional y la potencia inducida en el amortiguador eléctrico (-0.22%, -0.08% y -0.19%). Estas diferencias se deben a que, al no ser amortiguadores idénticos, hay cambios en la fuerza de amortiguación y velocidad de la suspensión, y la potencia depende de ambas ($P=F*v$).

A pesar de que se induce la potencia esperada en el arrollamiento del estator del generador, las pérdidas por conducción son elevadas. La eficiencia del generador está en torno al 30% en los dos primeros casos simulados y en torno al 65% en el último. El generador monofásico es capaz de ofrecer unas prestaciones adecuadas como amortiguador eléctrico, pero a costa de una elevada corriente que induce muchas pérdidas por conducción en su arrollamiento.

Otro valor que se presenta en la tabla 5.3 es el voltaje que se induce en el generador. El valor del voltaje inducido es importante ya que hay que tener en cuenta que para cargar una batería, el voltaje con el que se le alimenta debe ser superior al propio de la batería. De lo contrario, no se produce el correcto flujo de corriente desde la fuente que carga la batería hasta la batería. El voltaje inducido en el estator del generador no es el que alimentará la batería, sino que será menor por la caída de tensión que se produzca hasta llegar a la conexión de la batería. Sin embargo, como en este caso no se está simulando el circuito completo con el rectificador y la batería, sirve como estimación del orden de magnitud del voltaje con el que se podría cargar la batería a la que se conectara.

5.2.1.2. Generador trifásico

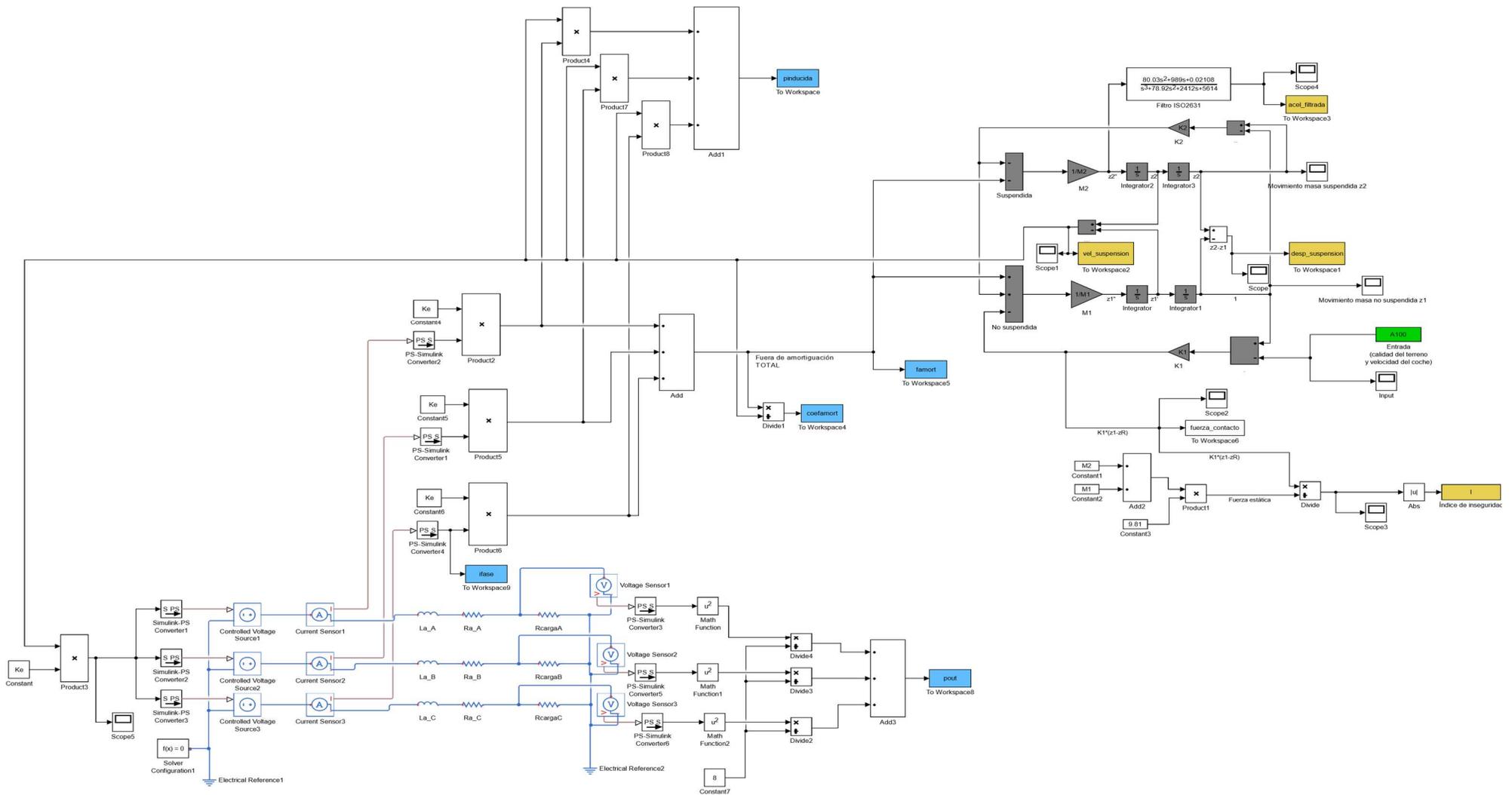


FIG. 5.14: MODELO DE CUARTO DE VEHÍCULO CON AMORTIGUADOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE

En la siguiente figura se puede observar con mayor detalle el modelo del generador trifásico implementado en Simulink haciendo uso de la herramienta Simscape:

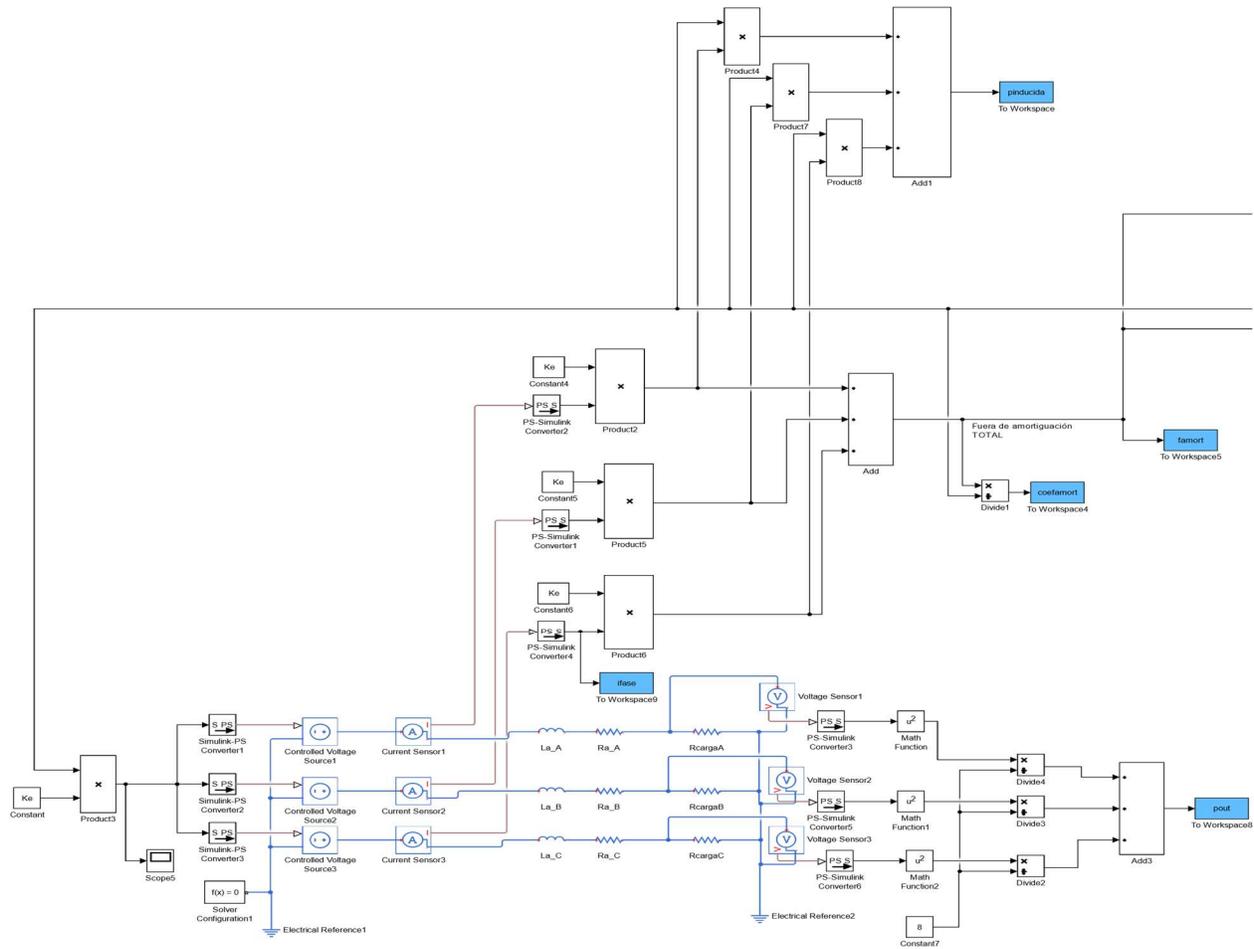


FIG. 5.15: DETALLE DE LA FIGURA 5.14: GENERADOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES TRIFÁSICO

A continuación, se muestran en una tabla los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo mostrado en la figura 5.14 en tres condiciones distintas de calidad del terreno y velocidad del coche.

	Clase A-B, 100 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	14.89	Ifase (A, rms)	0.71
Desp. Suspensión (m)	0.0055	0.0053	-3.64	Pout (W)	13.72	Vin fase (V, rms)	6.98
Vel. Suspensión (m/s)	0.1001	0.0965	-3.60	Eficiencia (%) 92.14			
Índice de incomodidad (m/s ²)	0.382	0.3886	1.73				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.0501	0.0496	-1.00				
Potencia en 1 suspensión (W)	15.0188	14.8893	-0.86				
F. Amortiguación (N)	150.0937	154.3586	2.84				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1460.3	-2.65				

	Clase B-C, 80 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	40.70	Ifase (A, rms)	1.18
Desp. Suspensión (m)	0.009	0.0087	-3.33	Pout (W)	37.50	Vin fase (V, rms)	11.54
Vel. Suspensión (m/s)	0.1657	0.1596	-3.68	Eficiencia (%) 92.15			
Índice de incomodidad (m/s ²)	0.6323	0.6427	1.64				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.0854	0.0838	-1.87				
Potencia en 1 suspensión (W)	41.1895	40.6997	-1.19				
F. Amortiguación (N)	248.5644	255.2215	2.68				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1616.7	7.78				

	Clase C-D, 60 km/h			Generador			
	Convencional	Regenerativa	Diferencia (%)	Pin (W)	130.68	Ifase (A, rms)	2.11
Desp. Suspensión (m)	0.0163	0.0157	-3.68	Pout (W)	120.42	Vin fase (V, rms)	20.68
Vel. Suspensión (m/s)	0.2963	0.286	-3.48	Eficiencia (%) 92.15			
Índice de incomodidad (m/s ²)	1.1317	1.1519	1.78				
Índice de inseguridad (adimensional)	0.1513	0.1493	-1.32				
Potencia en 1 suspensión (W)	131.7123	130.6837	-0.78				
F. Amortiguación (N)	444.4868	457.3032	2.88				
Coefficiente de amortiguación (N*s/m)	1500	1542.5	2.83				

TABLA 5.4: COMPARATIVA ENTRE SUSPENSIÓN CONVENCIONAL Y REGENERATIVA, JUNTO CON DATOS DEL GENERADOR TRIFÁSICO, PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE

A partir de los resultados mostrados en la tabla 5.14, se puede deducir que el diseño realizado del generador trifásico ofrece, como amortiguador eléctrico, prestaciones muy similares a las de un amortiguador viscoso. Respecto al generador monofásico, con el generador trifásico hay una leve mayor diferencia en los índices de incomodidad e inseguridad. Con el generador monofásico, las diferencias máximas obtenidas para el índice de incomodidad y el de inseguridad son de -1.31% y 0.47%. En cambio, con el generador trifásico dichas diferencias son de 1.78% y -1.87% respectivamente.

Por lo que respecta a la potencia generada por el generador lineal trifásico, se observa que se induce la potencia disipada en el caso del amortiguador viscoso, tal y como ocurría con el generador monofásico. Por tanto, el generador trifásico también cumple su función de generar la energía que con un amortiguador viscoso se disiparía en forma de calor.

Por el contrario, el generador trifásico presenta una eficiencia muy superior a la del generador monofásico. En los tres casos simulados, la eficiencia es del 92%, cuando con el generador monofásico no se obtiene más del 65% en el mejor de los tres casos simulados. Esto se debe a que la fuerza de amortiguación, que es igual al producto $K_E \cdot I$, la proporcionan tres fases. Gracias a esto, la corriente (I) que circula por cada fase es mucho menor que la corriente que circula por el único arrollamiento del generador monofásico (un 64%, tal y como puede observarse en la tabla 5.15). Es tal la reducción de la corriente que circula por cada fase, que la suma de las pérdidas de las tres fases del generador trifásico es inferior a las pérdidas que tienen lugar en la única fase del generador monofásico.

Condiciones	Ifase (A, rms)		Diferencia (%)
	Monofásico	Trifásico	
A-B, 100 km/h	1.99	0.71	-64.17
B-C, 80 km/h	3.29	1.18	-64.24
C-D, 60 km/h	5.88	2.11	-64.17

TABLA 5.5: DIFERENCIA DE LA CORRIENTE DE FASE ENTRE GENERADOR MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO EN DISTINTAS CONDICIONES DE CALIDAD DEL TERRENO Y VELOCIDAD DEL COCHE

En cuanto a los voltajes inducidos en cada fase, son levemente inferiores a los obtenidos con el generador monofásico, pero del mismo orden de magnitud que es lo relevante a la hora de tener en cuenta el proceso de carga de la batería a la que alimenta.

5.2.2. Simulación de la rectificación AC/DC

La rectificación AC/DC de este sistema de suspensión regenerativa entraña la complicación de que la señal de la tensión inducida no es periódica. Dicha tensión es función de la velocidad relativa entre la varilla de imanes permanentes y el estator (v), la cual depende en todo momento de las irregularidades aleatorias del terreno sobre el que circula el coche y de la velocidad del mismo. De acuerdo con la expresión (5.8), v coincide con la velocidad de la suspensión. En la siguiente figura se muestra la señal registrada de dicha velocidad en una de las simulaciones realizadas:

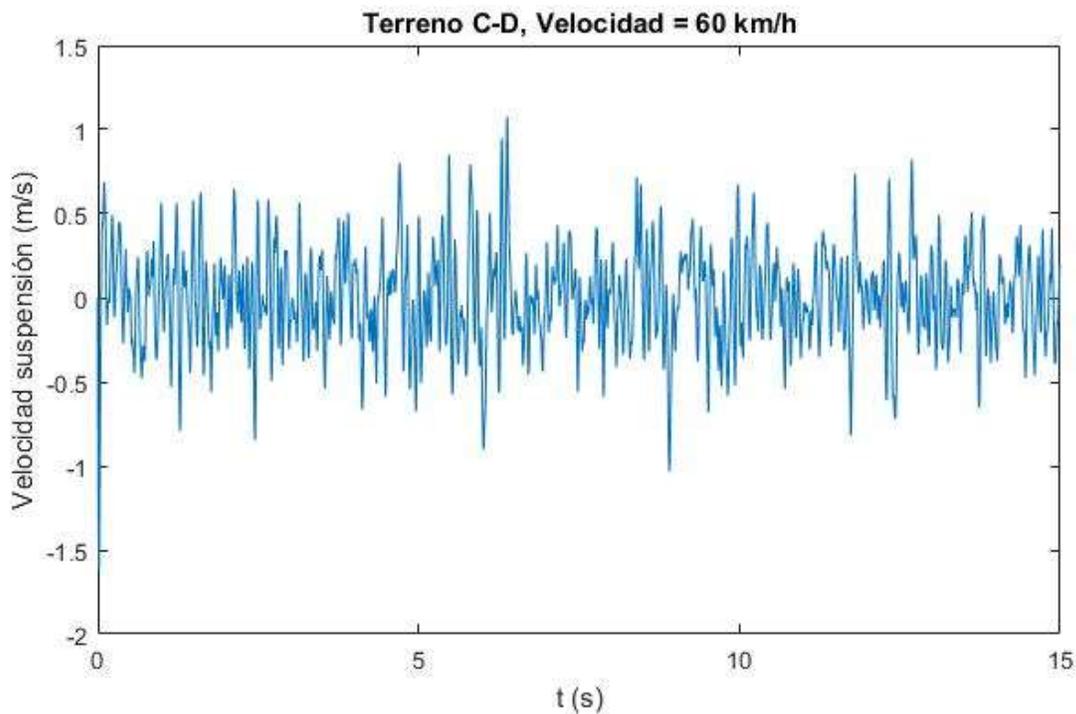


FIG. 5.16: PERFIL DE LA VELOCIDAD RELATIVA ENTRE LA PARTE MÓVIL Y LA PARTE FIJA DEL GENERADOR LINEAL, PARA UN TERRENO DE CALIDAD C-D Y UNA VELOCIDAD DEL COCHE DE 60 KM/H

La tensión inducida en cada fase del generador es proporcional a la velocidad mostrada en la figura 5.16, tal y como refleja la expresión (5.3):

$$E_{\Phi} = K_E * v$$

Por lo tanto, dicha tensión E_{Φ} tiene el mismo perfil que la velocidad v tal y como se puede observar en la siguiente figura:

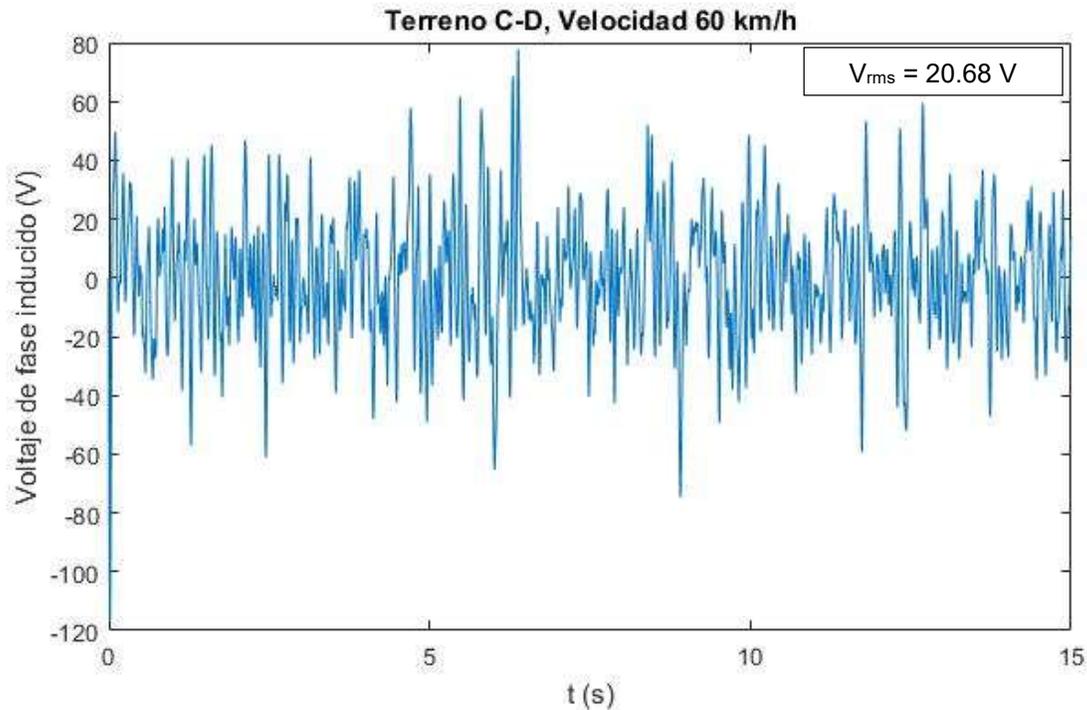


FIG. 5.17: PERFIL DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN UNA FASE DEL GENERADOR LINEAL TRIFÁSICO, PARA UN TERRENO DE CALIDAD C-D Y UNA VELOCIDAD DEL COCHE DE 60 KM/H

Con la figura 5.17 se confirma lo explicado anteriormente: la tensión inducida no es una señal periódica ni tiene una forma conocida, como pudiera ser una señal senoidal, triangular o cuadrada. Como se trata de una aplicación de baja potencia, el filtro más conveniente a la salida del puente rectificador es un condensador, tal y como se ha expuesto en el apartado 5.1.2.2.

A continuación, se analiza el efecto que tiene introducir en primer lugar el puente rectificador y, posteriormente, el filtro. Se ha simulado el circuito rectificador desacoplado del modelo de cuarto de vehículo, utilizando como entrada las señales de las tensiones inducidas registradas en las

simulaciones del apartado 5.2.1. El objetivo es conocer si se puede obtener una tensión continua a partir de la tensión inducida.

Rectificación con generador monofásico

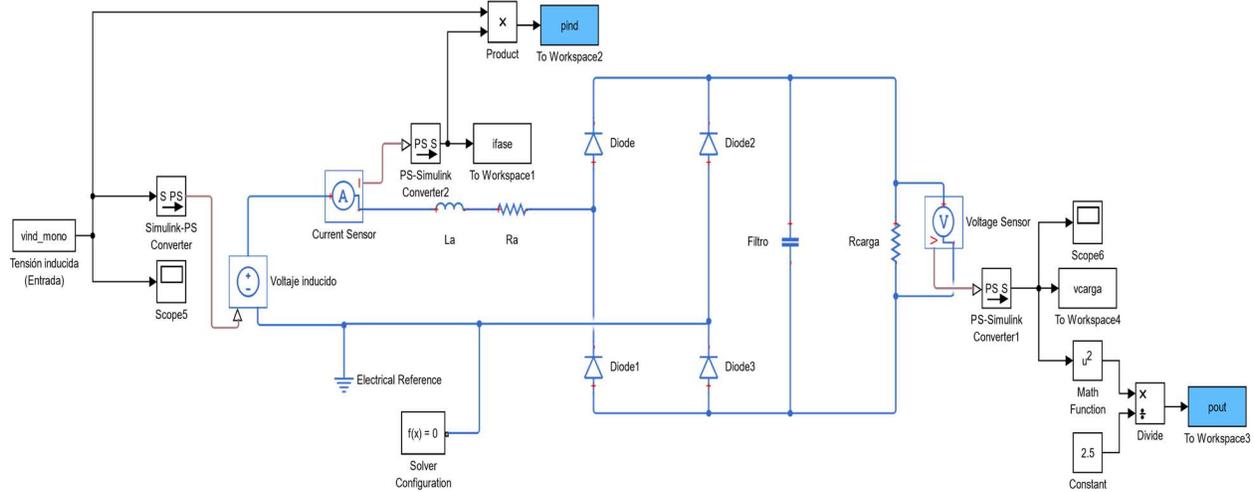


FIG. 5.18: CIRCUITO RECTIFICADOR PARA GENERADOR MONOFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTE SIMSCAPE

La señal de entrada que se quiere rectificar es la tensión inducida en un terreno de calidad C-D y con una velocidad de 60 km/h. Además, el valor de la carga es de 2.5Ω , el valor determinado en el apartado 5.2.1. para que el generador monofásico funcione adecuadamente como amortiguador. A continuación, se muestra el voltaje inducido y el obtenido a la salida del puente rectificador sin filtro:

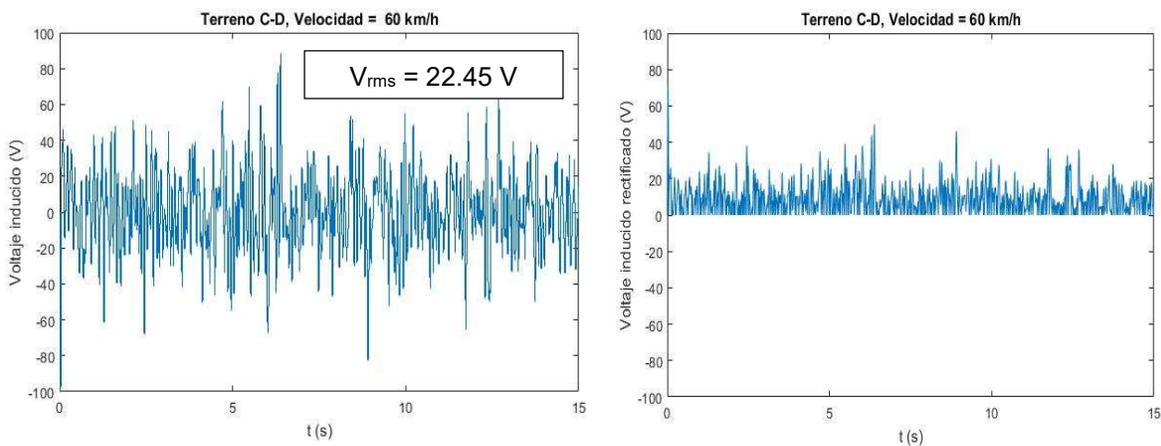


FIG. 5.19: VOLTAJE INDUCIDO EN EL GENERADOR MONOFÁSICO (IZQ.) Y VOLTAJE A LA SALIDA DEL PUENTE RECTIFICADOR SIN FILTRO (DCHA.)

Como puede observarse en la figura 5.19, el puente rectificador de onda completa formado por cuatro diodos consigue anular la parte negativa de la señal. Obtener una señal exclusivamente positiva es el primer paso necesario para poder obtener una señal continua. El siguiente paso para obtener una señal continua es la introducción de un filtro a la salida del puente, la cual se analiza a continuación.

En cuanto al filtro, formado por un condensador, se ha comprobado que se necesita un condensador de una capacidad del orden de unidades de faradio, aunque sigue sin ser una señal puramente continua. En la siguiente figura se muestra la tensión rectificada y filtrada con distintos condensadores:

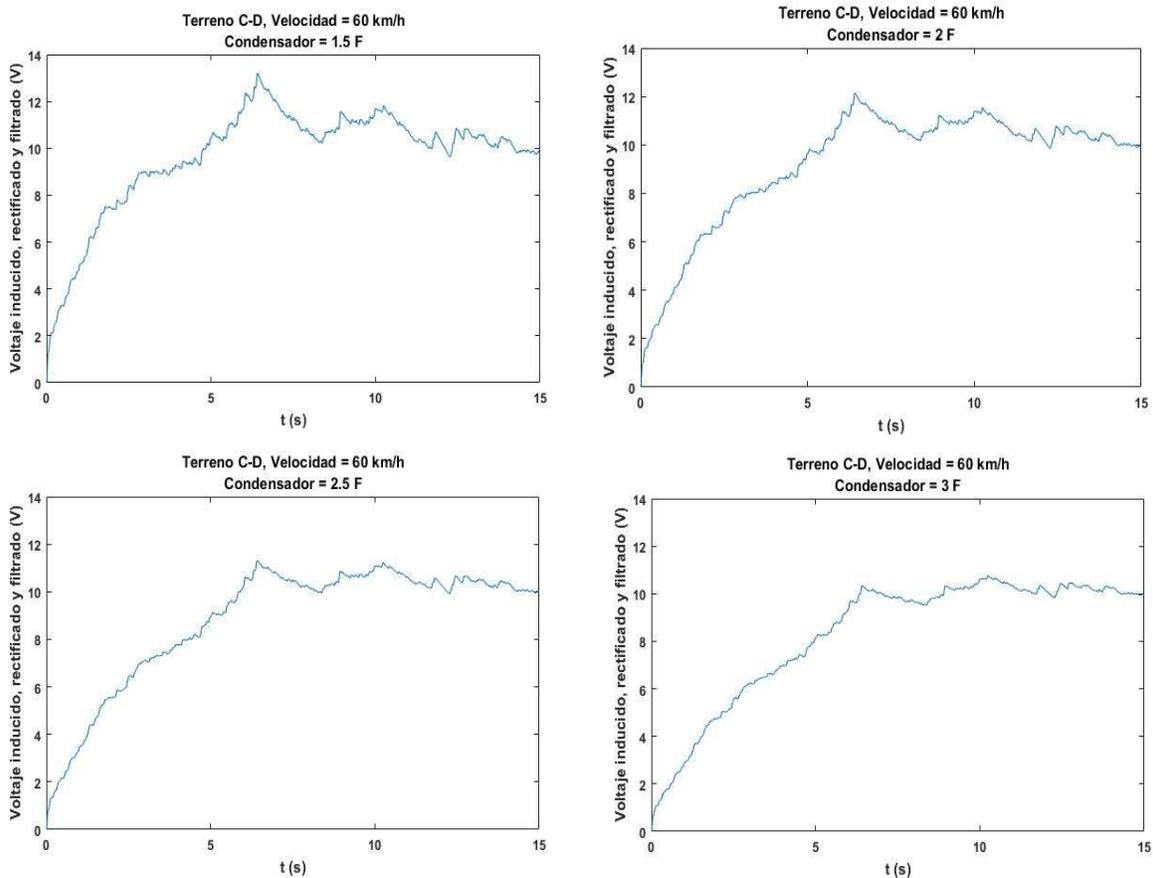


FIG. 5.20: VOLTAJE RECTIFICADO Y FILTRADO DEL GENERADOR MONOFÁSICO CON DISTINTOS CONDENSADORES

Como puede observarse en la figura 5.20, a medida que aumenta el valor del condensador que filtra la señal a la salida del puente rectificador ocurre lo siguiente:

- La señal tarda más tiempo en estabilizarse en un valor DC de 10 V.
- El rizado de la señal disminuye.

Rectificación con generador trifásico

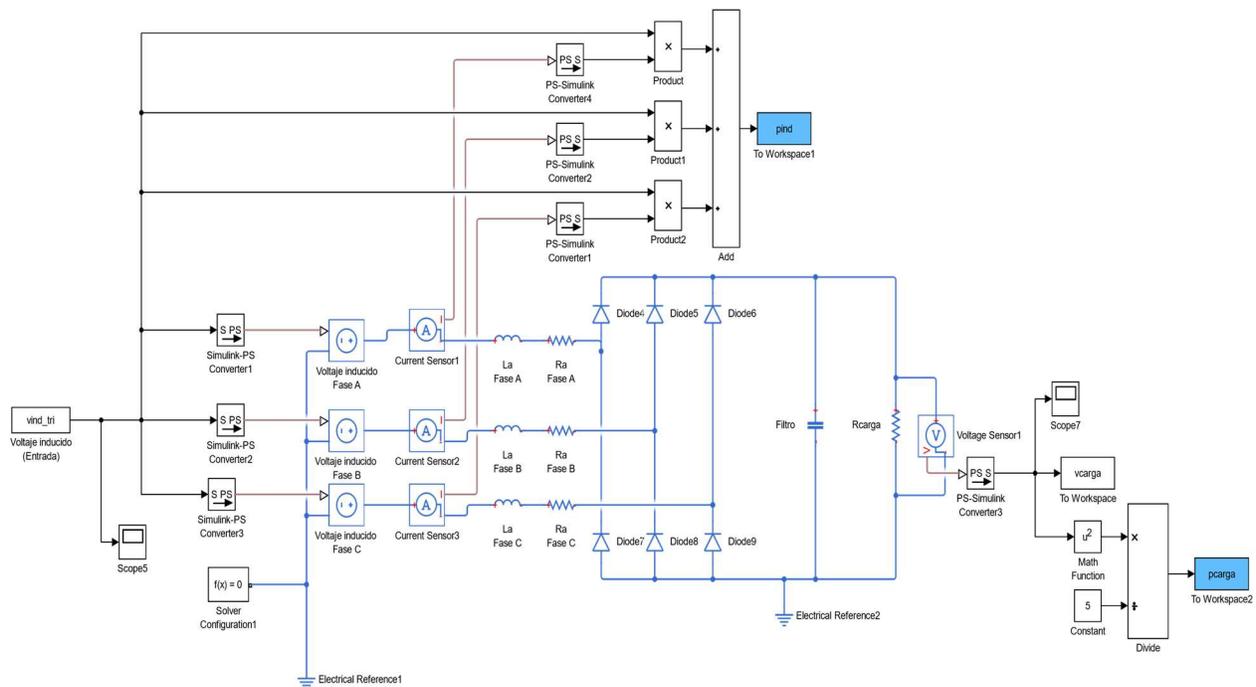


FIG. 5.21: CIRCUITO RECTIFICADOR PARA GENERADOR TRIFÁSICO IMPLEMENTADO EN SIMULINK MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMSCAPE

La señal de entrada que se quiere rectificar es la tensión inducida en un terreno de calidad C-D y con una velocidad de 60 km/h. Además, el valor de la carga es de 8.5Ω , el valor determinado en el apartado 5.2.1. para que el generador trifásico funcione adecuadamente como amortiguador. A continuación, se muestra el voltaje inducido y el obtenido a la salida del puente rectificador sin filtro:

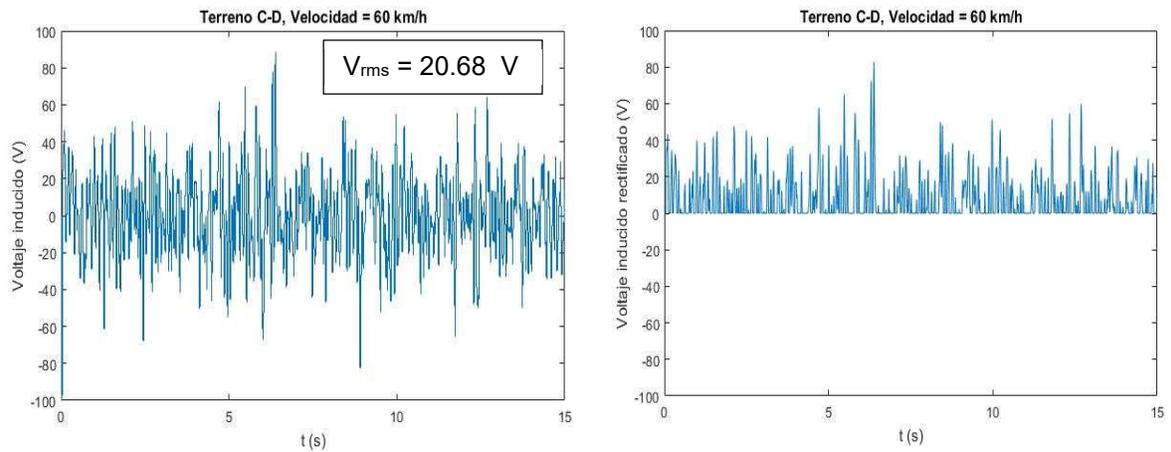
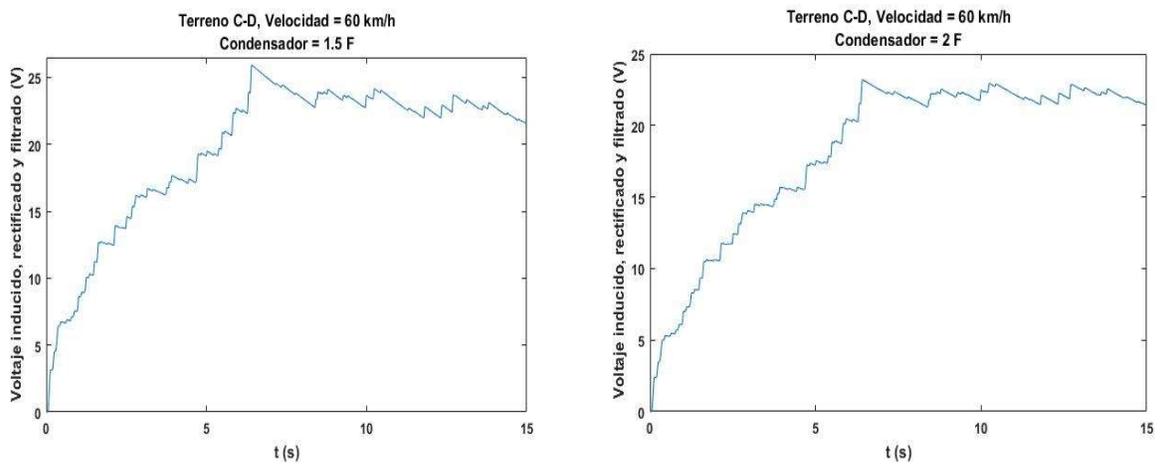


FIG. 5.22: VOLTAJE INDUCIDO EN EL GENERADOR MONOFÁSICO (IZQ.) Y VOLTAJE A LA SALIDA DEL PUENTE RECTIFICADOR SIN FILTRO (DCHA.)

Como puede observarse en la figura 5.22, tal y como ocurría con el generador monofásico y el puente de cuatro diodos, el puente de seis diodos anula la parte negativa de las tres señales a rectificar del generador trifásico.

En cuanto al filtro, formado por un condensador, se ha comprobado que se necesita un condensador de una capacidad del orden de unidades de faradio, aunque sigue sin ser una señal puramente continua. En la siguiente figura se muestra la tensión rectificada y filtrada con distintos condensadores:



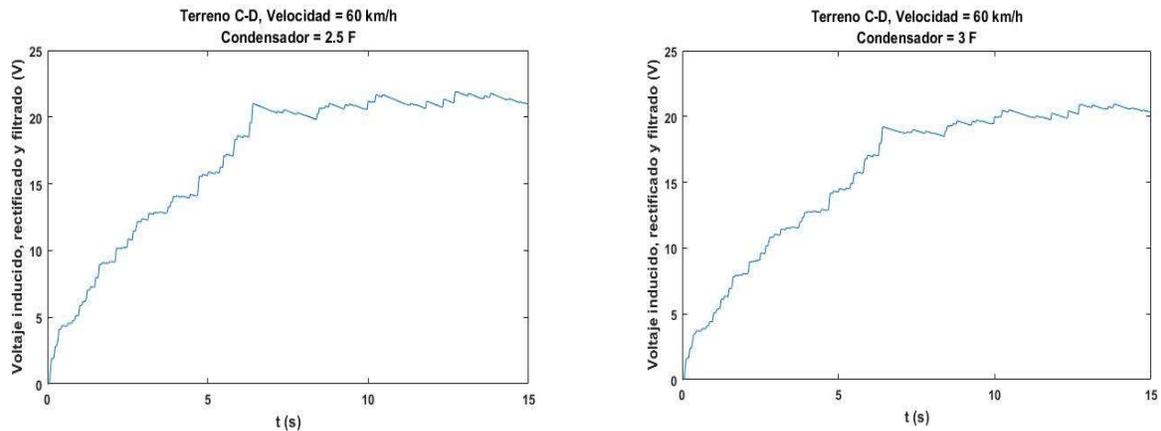


FIG. 5.23: VOLTAJE RECTIFICADO Y FILTRADO DEL GENERADOR TRIFÁSICO CON DISTINTOS CONDENSADORES

Como puede observarse en la figura 5.23, a medida que aumenta el valor del condensador que filtra la señal a la salida del puente rectificador ocurre lo siguiente:

- La señal tarda más tiempo en estabilizarse en un valor DC de 21 V.
- El rizado de la señal disminuye.

5.2.3. Conclusiones acerca de la suspensión regenerativa

A partir del modelo de generador lineal de imanes permanentes propuesto en el apartado 5.1., se han simulado dos modalidades del mismo: un generador monofásico y otro trifásico. Para ambos casos, se ha analizado su comportamiento como amortiguador eléctrico sustituyendo al amortiguador viscoso convencional. Después, se ha analizado la posibilidad de rectificar la señal alterna inducida en el generador para obtener una señal continua que pudiese utilizarse para cargar una batería.

En cuanto al comportamiento de ambos generadores como amortiguadores, se ha comprobado que en ambos casos las variaciones de los distintos índices respecto al amortiguador viscoso son mínimas. Por lo tanto, tanto el generador monofásico como el trifásico ofrecen prestaciones muy similares a las del amortiguador viscoso. En cambio, hay una gran diferencia entre ambos en cuanto al rendimiento eléctrico. Las pérdidas por conducción que presenta el generador

monofásico son superiores a las del generador trifásico. Para las distintas condiciones sobre las que se ha simulado el modelo de cuarto de vehículo con amortiguador eléctrico, la eficiencia en el caso del generador monofásico no supera el 65%, mientras que el trifásico presenta una eficiencia del 92%. Esta diferencia se debe a que la corriente que circula por el arrollamiento de cada fase es directamente proporcional a la fuerza de amortiguación que ofrece el generador. Dicha fuerza se reparte entre las distintas fases en el caso del generador trifásico, mientras que en el caso del monofásico la fuerza es proporcionada únicamente por un arrollamiento. Por lo tanto, la corriente que circula por el único arrollamiento del generador trifásico es muy superior a la de los tres arrollamientos del generador trifásico, lo cual hace que las pérdidas por efecto Joule sean más grandes.

En cuanto a la rectificación de la tensión alterna que proporciona el generador lineal a la tensión continua necesaria para cargar una batería, se han simulado los respectivos circuitos rectificadores para el caso del generador monofásico y trifásico. Se ha comprobado que el puente rectificador de diodos anula adecuadamente la parte negativa de la tensión alterna del generador. Las dificultades en la rectificación vienen a la hora de filtrar la señal positiva obtenida a la salida del puente de diodos, debido a que la señal a rectificar presenta una forma totalmente irregular con muchos picos de tensión. Esto hace que, para poder obtener una señal lo más continua posible, se necesiten condensadores de en torno a los 2 ó 3 faradios. Condensadores de esta magnitud implican tiempos de carga altos, lo cual no es conveniente en este sistema debido a la elevada variabilidad que pueden presentar las distintas condiciones de conducción (irregularidades del terreno y velocidad del coche). Además, tal y como puede observarse en las figuras 5.20 y 5.23, la señal filtrada tiene bastante rizado, por lo que no es una señal continua pura o al menos con un rizado muy pequeño, menor al 0.5 %, que es lo requerido para cargar, por ejemplo, una batería VRLA.

6. Conclusión y futuros trabajos

6.1. Conclusión

La primera tarea llevada a cabo en este proyecto ha sido cuantificar la energía que se disipa en forma de calor en los coches a través de los amortiguadores hidráulicos convencionales dominantes en la industria. Se ha comprobado que dicha disipación tiene una relación directamente proporcional con la velocidad del coche y las irregularidades del terreno sobre el que se circula. Por ejemplo, para el caso de un coche circulando a una velocidad superior a los 110 km/h sobre un terreno de mala calidad (nivel C-D, de acuerdo con la ISO 8608), el conjunto de los cuatro amortiguadores puede llegar a disipar un total superior a 1 kW.

Del mismo modo, se ha estimado el aumento de autonomía de un coche eléctrico (de consumo medio 15 kWh/100 km) que supondría recuperar el 100 % de la energía disipada en los amortiguadores actuales. Según el nivel de calidad del terreno, de mejor a peor el aumento de autonomía medio sería de 0.4 %, 1.3 % y 5.6 % respectivamente. Evidentemente, este valor será en cualquier caso menor ya que dicho cálculo no tiene en cuenta ningún tipo de pérdidas.

La segunda tarea del proyecto ha sido diseñar un amortiguador electromagnético para posteriormente simularlo acoplado al sistema de suspensión del coche. Dicho amortiguador consiste en un generador lineal de imanes permanentes cuyo principio de funcionamiento se basa en la Ley de Faraday-Lenz. El generador diseñado tiene dimensiones similares a las de los amortiguadores viscosos utilizados actualmente en los coches.

En cuanto a las simulaciones realizadas, el generador ha sido simulado primeramente como amortiguador pasivo, formando un circuito cerrado con una carga cuyo valor ha sido ajustado para obtener el mejor rendimiento del generador como amortiguador. Se han simulado dos posibles configuraciones: monofásica y trifásica. Se ha comprobado que para ambas configuraciones el generador presenta un comportamiento adecuado como amortiguador, pero presentan diferencias en cuanto a la eficiencia. La configuración trifásica es la más adecuada en aras de la eficiencia, ya que en todos los casos simulados presenta una eficiencia del 92 %, mientras que el monofásico no supera el 65 %.

Posteriormente se ha simulado la rectificación AC/DC necesaria para realizar la eventual carga de una batería. El circuito simulado no ha tenido en cuenta el circuito completo de carga incluyendo

una batería, sino que tan solo se ha simulado el conjunto formado por un puente rectificador y un filtro. La conclusión de dichas simulaciones es que son necesarios condensadores de capacidades del orden de los 2 ó 3 F, lo cual implica tiempos de carga considerables. Y además, las señales rectificadas que se han obtenido tienen bastante rizado, algo que no es conveniente para el proceso de carga de una batería.

Otro detalle importante acerca de los resultados obtenidos en las simulaciones del generador, es el orden de magnitud del voltaje inducido. Dicho voltaje varía entre los 7 V y los 20 V según las distintas condiciones simuladas. Este valor debe tenerse en cuenta a la hora de transportar la energía eléctrica generada en las suspensiones regenerativas a una batería. La batería de servicios auxiliares de un coche suele ser de 12 V, mientras que la batería principal de un coche eléctrico está en torno a los 380 V. Para poder cargar una batería, el voltaje de alimentación de la misma debe ser superior al de la propia batería. Por lo tanto, la electrónica de potencia debe jugar un papel fundamental en el proceso de conexión de las suspensiones regenerativas con la batería.

6.2. Futuros trabajos

Futuros trabajos en el campo de las suspensiones regenerativas deberían ir enfocados al estudio y diseño de la electrónica de potencia necesaria para almacenar la energía eléctrica generada con los amortiguadores electromagnéticos en un sistema de baterías. En este proyecto la rectificación AC/DC ha sido estudiada sin detalle, ya que no se ha tenido en cuenta el circuito completo con una batería. Además de la electrónica de potencia referente a la rectificación de la tensión alterna que proporciona el generador acoplado como amortiguador, es igualmente importante la electrónica de potencia necesaria para alcanzar el voltaje necesario para cargar la batería la que se alimente. Una vez obtenida una señal DC con niveles de rizado admisibles tras la rectificación AC/DC, puede ser necesario el uso de convertidores DC/DC tipo Boost que aumenten el voltaje para poder cargar adecuadamente las baterías.

Referencias

[1] “El coche eléctrico y los europeos”, Informe del Observatorio Cetelem. 2012.

<http://www.elobservatoriocetelem.es/observatorio/cetelem-observador-auto-europeo-2012.pdf>

[2] Zhang Jin-qiu, Peng Zhi-zhao, Zhang Lei, Zhang Yu, “A review on energy-regenerative suspension systems for vehicles”, World Congress of Engineering. 2013.

http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013_pp1889-1892.pdf

[3] Yoshihiro Suda, Shigeyuki Nakadai, Kimihiko Nakano, “Study on the self-powered active vibration control”

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.31.3545&rep=rep1&type=pdf>

[4] Lei Zuo, Scully, Shestani, and Zhou, “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, Smart Material and Structure, 19. 2010.

[5] “Our Innovations - Electricity from the suspension”, Intertronic Gresser. 2015.

http://www.interpatent.de/unsere_innovationen_strom_aus_der_federung_en.html

[6] Suda, Yoshihiro and Shiiba, Taichi, “A New Hybrid Suspension System with Active Control and Energy Regeneration”, Vehicle System Dynamics, 25:1, 641 – 654. 1996.

[7] Suda Y, Suematsu K, Nakano K, et al., “Study on Electromagnetic Suspension for Automobiles-simulation and Experiments of Performance”, Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, USA: 699-704. 2000.

[8] “ZF announces new GenShock energy-recovery suspension”

<http://www.autoblog.com/2013/08/30/zf-genshock-energy-recovery-suspension/>

[9] M. Agostinacchio, D. Ciampa, S. Olita, “The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach”, European Transport Research Review, Volume 6, Issue 3, pp 267–275. 2014.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s12544-013-0127-8>

- [10] L. Zuo, S.A. Nayfeh, “Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings”,
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.324.1711&rep=rep1&type=pdf>
- [11] Andrea Pirisi, G. Gruosso, Riccardo E. Zich, “Novel Modeling Design of Three Phase Tubular Permanent Magnet Linear Generator for Marine Applications”, Politecnico di Milano
<https://www.cst.com/Content/Articles/article462/Novel%20Modeling%20Design%20of%203%20Phase%20Tubular%20PM%20Linear%20Generators.pdf>
- [12] Gieras J, Wang R, Kamper M, “Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines”, Springer. 2008.
- [13] “Introduction to Neodymium Magnets”, <http://www.ndfeb-info.com/>
- [14] Arif Indro Sultoni, I Nyoman Sutantra, and Agus Sigit Pramono, “Modeling, Prototyping and Testing of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber”, Applied Mechanics and Materials. 2014.
- [15] “Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life”,
<http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/en-us/brands/liebert/documents/white%20papers/effects%20of%20ac%20ripple%20current%20on%20vrla%20battery%20life.pdf>
- [16] Sudeep P, Mohammad M, “Filter Design for AC to DC Converter”, International Refereed Journal of Engineering and Science. 2013.
<http://www.irjes.com/Papers/vol2-issue6/Version-1/E02064249.pdf>