

DOI: 10.20983/culcyt.2022.1.3.2

Amortiguadores regenerativos para sistemas de suspensión automotriz: Una revisión

Regenerative shock absorbers for automotive suspension systems: A review

Dr. Eduardo Barredo-Hernández¹✉, Dr. José Gabriel Mendoza-Larios¹, M. C. Irving Abdiel Maldonado-Bravo², Dr. Jan Mayén-Chaires³, M. C. Cuauhtémoc Mazón-Valadez²

¹ Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz, C. P. 69000, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

² Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Int. Palmira s/n, col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62490, México.

³ Centro de Investigación y Asistencia Técnica/ CIATEQ A. C. Eje 126 No. 225, Zona Industrial, San Luis Potosí, S.L.P., C. P. 78395, México.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión exhaustiva de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos utilizados para mejorar la reducción del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes (principalmente el CO₂) en vehículos comerciales. En primera instancia, se describe la interacción entre el tren motriz y el sistema de suspensión automotriz, incluyendo los ciclos de velocidad de conducción como el enlace principal. Posteriormente, se presenta un esquema gráfico del proceso de regeneración de energía vibratoria mediante amortiguadores regenerativos, considerando el sistema de almacenamiento de energía. Además, se discuten los avances tecnológicos recientes de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos, sopesando principalmente la filosofía de diseño del mecanismo de rectificación de energía vibratoria. Finalmente, se presentan las conclusiones y tendencias futuras sobre las aplicaciones de estos dispositivos en diferentes disciplinas de la ingeniería.

PALABRAS CLAVE: vehículo; amortiguadores regenerativos; energía vibratoria; sistemas de suspensión automotriz; energías verdes.

ABSTRACT

This paper presents an exhaustive review for different kinds of regenerative shock absorbers used to improve the reduction of fuel consumption and polluting emissions (e.g., CO₂) in commercial vehicles. In the first instance, the interaction between the powertrain and the automotive suspension system is described including the driving velocity cycles as the main link. Then, a graphic scheme of the vibratory energy regeneration process is presented using regenerative shock absorbers and including the energy storage system. In addition, recent technological advances of different kinds of regenerative shock absorbers are discussed considering the design philosophy for the vibratory energy rectification mechanism. Finally, the conclusions and future trends on the potential applications of these devices in different engineering disciplines are presented.

KEYWORDS: vehicle; regenerative shock absorbers; vibration energy; automotive suspension systems; green energy.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Eduardo Barredo-Hernández
INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM)
DIRECCIÓN: Carretera Huajuapán-Acatlilma, km 2.5, Huajuapán de León, Oaxaca, México, C. P. 69000.
CORREO ELECTRÓNICO: eduardin@mixteco.utm.mx

Fecha de recepción: 24 de enero de 2022. **Fecha de aceptación:** 22 de marzo de 2022. **Fecha de publicación:** 4 de abril de 2022.



I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías emergentes de regeneración de energía en el sector automotriz han sido estudiadas y mejoradas a medida que los problemas energéticos se vuelven cada vez más urgentes. Tales tecnologías son las siguientes: sistema de recuperación de energía cinética (KERS, por sus siglas en inglés) [1]–[3], sistema de regeneración energía térmica desperdiciada en el motor [4] y los sistemas de suspensiones regenerativas automotrices [5].

En la mayoría de los vehículos convencionales que utilizan combustible fósil, se ha demostrado que solo el 16 % de la energía química del combustible se utiliza

para propulsar el vehículo [6]. Parte de la energía restante alimenta a otros subsistemas del vehículo y, además, la mayor parte de la energía térmica producida por la máquina de combustión interna se disipa en forma de calor. El porcentaje restante de energía que desplaza al vehículo se distribuye para vencer los efectos aerodinámicos (4 %), resistencia a la rodadura (4 %) y en el sistema de frenado (4 %) (Figura 1).

La resistencia a la rodadura se genera principalmente por el espectro estocástico de potencia del nivel de rugosidad de la carretera, el cual induce energía de vibración al vehículo. La energía vibratoria se transmite al sistema de suspensión y, posteriormente, se disipa en forma de calor en el amortiguador de fluido viscoso [7].

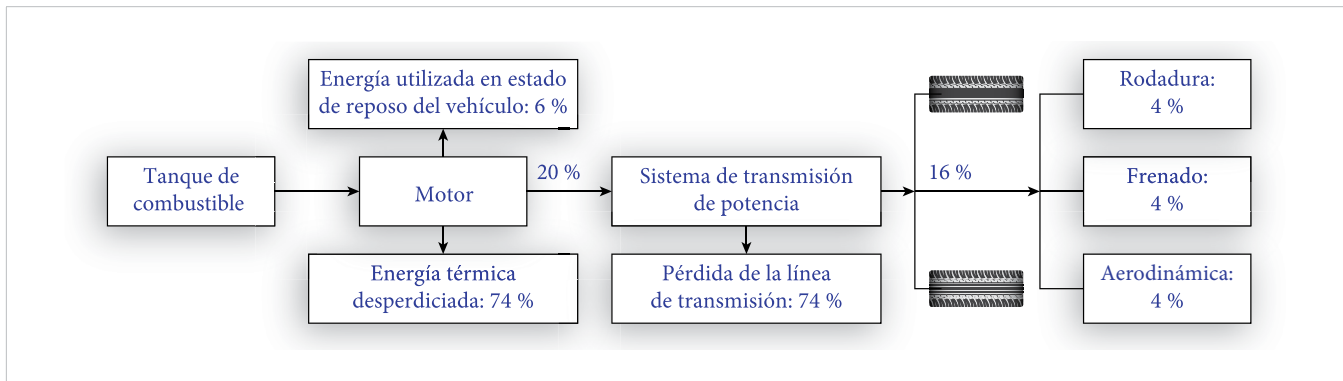


Figura 1. Diagrama del flujo de energía producida por el combustible fósil de un vehículo de pasajeros [6].

Pareciera que no existe una interacción entre el tren motriz del vehículo con el sistema de suspensión y, de hecho, esto es correcto hasta cierto punto. Es claro que el tren motriz cubre las demandas de requerimiento de potencia según sea el modo de conducción del vehículo, mientras que la función principal del sistema de suspensión automotriz es mitigar la vibración generada por el perfil irregular de la carretera y por los movimientos no sincronizados del chasis. Sin embargo, los modos de conducción influyen directamente en la dinámica del vehículo, lo que permite un vínculo entre el tren motriz y el sistema de suspensión (Figura 2).

En la Figura 2 se describe la interacción subyacente entre el tren motriz y la suspensión regenerativa de un Vehículo Eléctrico Híbrido (HEV), en la cual la velocidad de conducción del vehículo influye en ambos sistemas dinámicos. De hecho, la ecuación diferencial estocástica (1) involucra los ciclos de velocidad de conducción $V(t)$, generando las señales vibratorias de la

carretera como fuente de excitación al sistema de suspensión del vehículo:

$$\dot{x}_g(t) = -2\pi f_0 x_g(t) + 2\pi n_0 W(t) \sqrt{G_x(\eta_0) V(t)} \quad (1)$$

donde $f_0 = 0.0628$ Hz representa la frecuencia de corte, $\eta_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ es la frecuencia espacial de referencia, $G_x(\eta_0)$ es el coeficiente de rugosidad de la carretera especificado por la norma ISO 8608 [9], $V(t)$ es la velocidad de conducción del vehículo, $W(t)$ es un proceso estocástico estacionario (ruido blanco gaussiano) con media temporal igual a cero y finalmente, $x_g(t)$ es el perfil irregular de la carretera [10]. A partir de la Ecuación (1), es claro observar que los niveles de intensidad de vibración en el vehículo dependen fuertemente de la rugosidad de la carretera $G_x(\eta_0)$ y de la velocidad de conducción del vehículo $V(t)$. En efecto, el rendimiento del combustible es también afectado por la vibración inducida por el perfil irregular de la carretera, tal como se describe en la Figura 2.

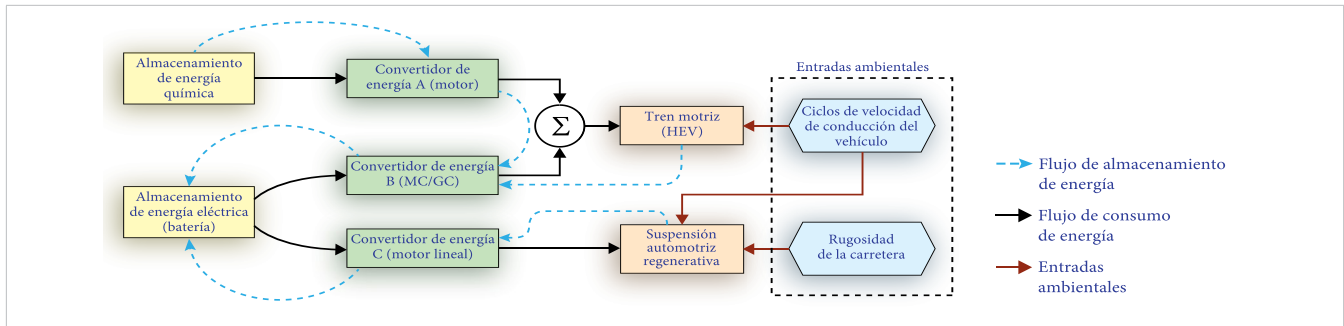


Figura 2. Flujo de energía en el tren motriz híbrido interactuando con una suspensión regenerativa automotriz [8].

II. PROCESO DE REGENERACIÓN DE ENERGÍA VIBRATORIA

Una cantidad considerable de energía cinética se disipa en forma de calor en los amortiguadores de fluido viscoso que conforman a las suspensiones automotrices pasivas. Esta energía cinética causada por la velocidad relativa del sistema de suspensión se podría regenerar por medio de amortiguadores regenerativos inteligentes para reutilizarla posteriormente en otros subsistemas del vehículo.

En la Figura 3 se presenta un esquema general de la recolección de energía en una suspensión regenerativa,

basado en el trabajo de Zhang *et al.* [11]. Nótese que solo la energía cinética producida por la velocidad relativa del sistema de suspensión se considera para la regeneración. Aunque los neumáticos también disipan energía, la esparcida por el sistema de suspensión es aún mayor. Con el objetivo de transformar el movimiento vertical oscilatorio a movimiento rotacional unidireccional, dos embragues unidireccionales acoplan y desacoplan a los vástagos del amortiguador regenerativo. El movimiento rotacional rectificado acciona un generador eléctrico para producir energía que posteriormente se almacena en supercapacitores. Al final, esta energía se puede utilizar para abastecer los requerimientos de potencia eléctrica del tren motriz del vehículo.

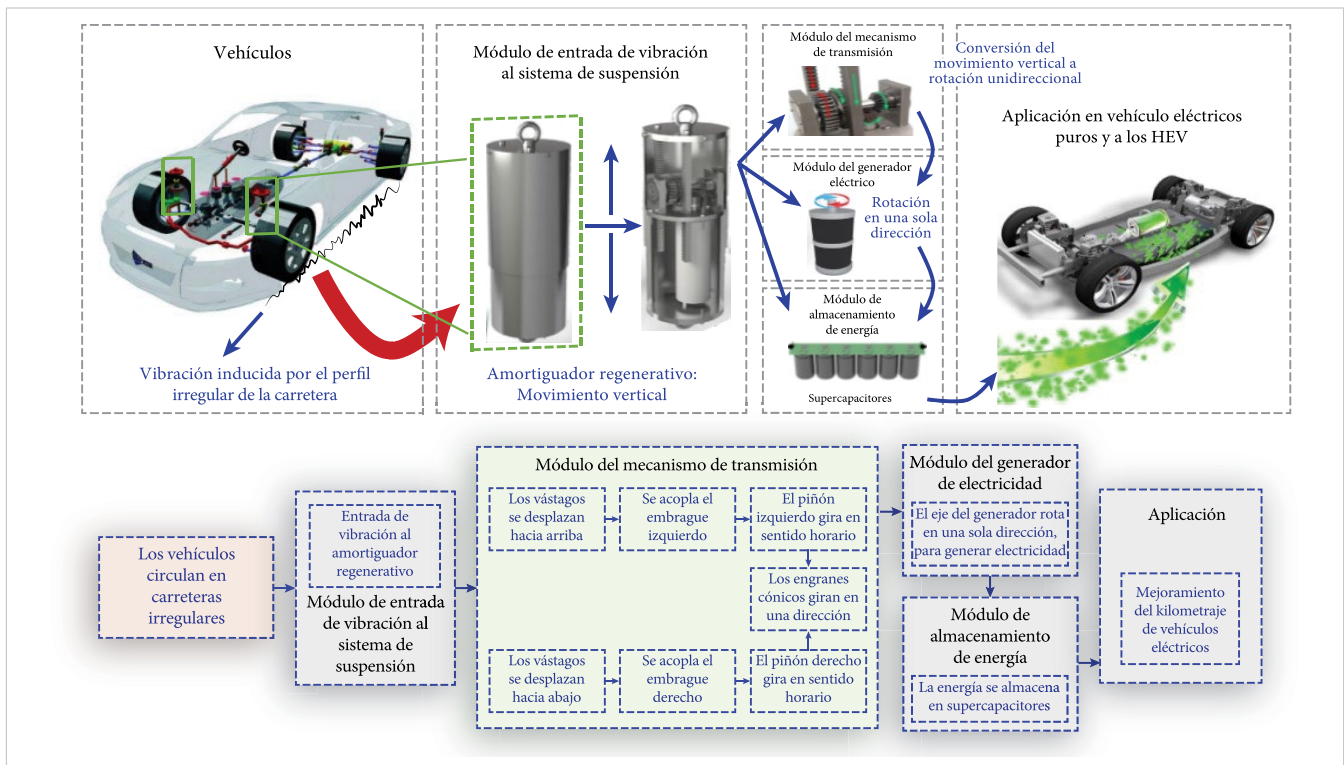


Figura 3. Diagrama de flujo de energía vibratoria en una suspensión con amortiguador regenerativo [11].

Para lograr una densidad alta de conversión de energía, diferentes tipos de amortiguadores regenerativos han sido diseñados, manufacturados y analizados tanto teóricamente como experimentalmente. Estos tipos de cosechadores de energía cinética se clasifican de acuerdo a la forma en como convierten la energía de vibración a electricidad. Se conocen tres tipos de amortiguadores regenerativos, que son los siguientes: el electromagnético lineal, el electromecánico basado en transmisión mecánica y el electrohidráulico basado en transmisión hidráulica. Aunque estos pueden regenerar la energía de vibración, algunos inconvenientes se presentan principalmente en el proceso de rectificación de movimiento vertical bidireccional del sistema de suspensión a movimiento rotacional unidireccional del generador eléctrico.

III. AMORTIGUADORES REGENERATIVOS

A continuación se describe detalladamente tanto la filosofía de diseño como el funcionamiento de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos reportados en la literatura. También se abordan las diferentes aplicaciones en energías verdes de estos dispositivos.

3.1. Amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales

Los amortiguadores electromagnéticos lineales transforman directamente la energía cinética producida por

la diferencia de velocidades del sistema de suspensión, a través del fenómeno de inducción electromagnética (Figura 4). Además, este dispositivo genera una densidad baja de regeneración de energía porque no presenta un mecanismo de amplificación de movimiento. Sin embargo, ofrece una eficiencia alta de conversión de energía. En efecto, la variación del flujo magnético producido por el movimiento relativo entre los imanes y las bobinas del amortiguador origina un voltaje inducido y, consecuentemente, energía eléctrica.

Debido a la efectividad tanto de conversión de energía como de acción de control de este tipo de dispositivo, se han realizado recientemente varios estudios enfocados al incremento del rendimiento de las suspensiones activa y semiactivas autoalimentadas. El primer amortiguador regenerativo basado en motores electromagnéticos lineales fue presentado en el trabajo de Karnopp [12]. Más tarde, Suda y Shiiba [13] desarrollaron una suspensión híbrida compuesta de un sistema de recolección de energía (amortiguador regenerativo electromagnético lineal) para mejorar el rendimiento dinámico de una suspensión activa y así reducir el consumo energía del sistema de control. Además, Zuo *et al.* [14] diseñaron un amortiguador regenerativo compuesto de un generador lineal de cuatro fases para aumentar la eficiencia de regeneración de energía, obteniendo una capacidad de recolección de energía que va desde 26 hasta 64 watts de potencia eléctrica, considerando que la velocidad relativa de la suspensión es de 0.25-0.5 m/s.

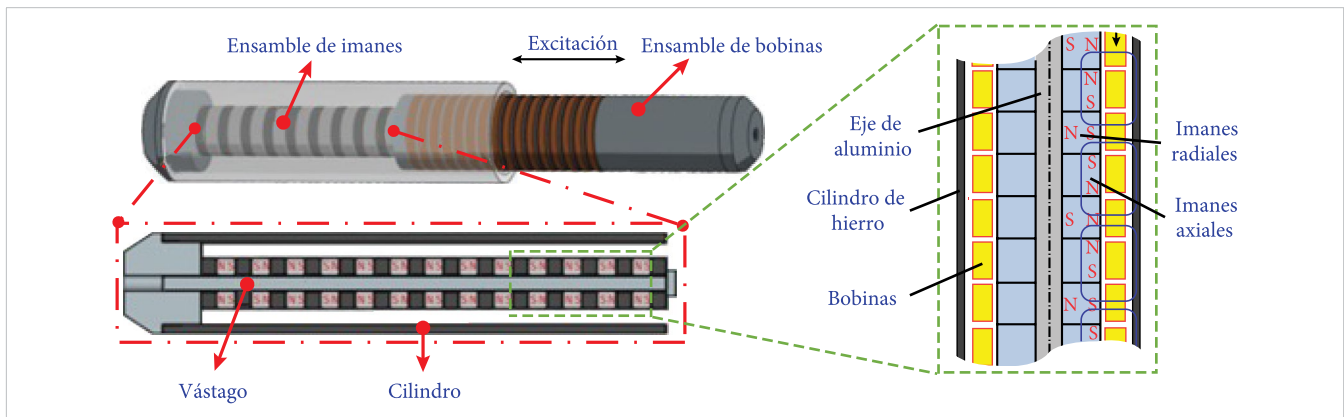


Figura 4. Recolector electromagnético lineal de cuatro fases (imagen adaptada y reproducida con el permiso correspondiente [5]).

Más tarde, Gysen *et al.* [15] analizaron y fabricaron una suspensión activa compuesta principalmente de un amortiguador regenerativo electromagnético lineal y concluyeron que tal suspensión puede mejorar significativamente tanto la comodidad como la seguridad

de conducción del vehículo, manteniendo un consumo mínimo de energía dentro del rango de 150-300 watts. Con esto en mente, Ebrahimi *et al.* [16] diseñaron un amortiguador electromagnético híbrido que consumía menor cantidad de energía que una suspensión activa,

y aprovechaba el efecto de corriente de Foucault para producir amortiguamiento eléctrico pasivo. Además, el dispositivo redujo hasta el 70 % del consumo energético de una suspensión activa convencional, sin embargo, el peso del dispositivo era relativamente mayor que el de los amortiguadores convencionales, lo cual es una desventaja en aplicaciones reales.

Por su parte, Asadi *et al.* [17] diseñaron un amortiguador regenerativo híbrido que consta de dos partes: una pasiva que proporciona fuerzas de amortiguamiento pasivo por medio de un fluido viscoso y otra electromagnética, la cual se utilizó para la regeneración de energía vibratoria por medio de un generador electromagnético lineal y también para proporcionar fuerzas activas al sistema de suspensión. Hu *et al.* [18] diseñaron teóricamente un amortiguador regenerativo semiactivo autoalimentado, el cual consiste de dos partes también: un generador eléctrico lineal que cosecha la energía cinética del sistema de suspensión y el fluido magnetorreológico que controla los niveles de amortiguamiento a través de la corriente eléctrica producida por el generador. Chen *et al.* [19] diseñaron un amortiguador regenerativo semiactivo híbrido con tres niveles de amortiguamiento regulables, constituido principalmente de un generador lineal y un amortiguador hidráulico.

Recientemente, se reportaron en [20]-[22] varios estudios sobre suspensiones semiactivas autoalimentadas con amortiguadores electromagnéticos lineales. Por

otra parte, Gao *et al.* [23] estudiaron los compromisos dinámicos entre el índice de la comodidad de conducción y el de la regeneración de energía en suspensiones electromagnéticas activas por medio de diferentes estrategias de control, y demostraron que no es posible incrementar la capacidad de regeneración de energía sin afectar el índice de la comodidad. Recientemente, Ding *et al.* [24] desarrollaron un sistema de suspensión activa electromagnética híbrida, compuesta principalmente de un motor lineal y un amortiguador de fluido magnetorreológico. Los resultados indicaron que el sistema híbrido minimizó el consumo energético de las suspensiones electromagnéticas activas.

Con el objetivo de disminuir el tamaño y peso de los amortiguadores electromagnéticos lineales, Duong *et al.* [25] diseñaron y fabricaron un recolector electromagnético monofásico lineal de 8 fases y 8 ranuras con imanes permanentes (Figura 5), y demostraron también que tal dispositivo recolectó una potencia promedio de 96.67 watts. Sin embargo, el mecanismo presentó efectos negativos en las dinámicas del sistema de suspensión. Es evidente que los amortiguadores electromagnéticos lineales proporcionan un mejoramiento significativo tanto en las suspensiones activas como en las semiactivas, sin embargo, el tamaño y peso de estos es el principal inconveniente para su aplicación en sistemas reales, ya que se necesita aumentar el tamaño de los motores electromagnéticos para proporcionar fuerzas grandes de amortiguamiento [5], [26], [27].

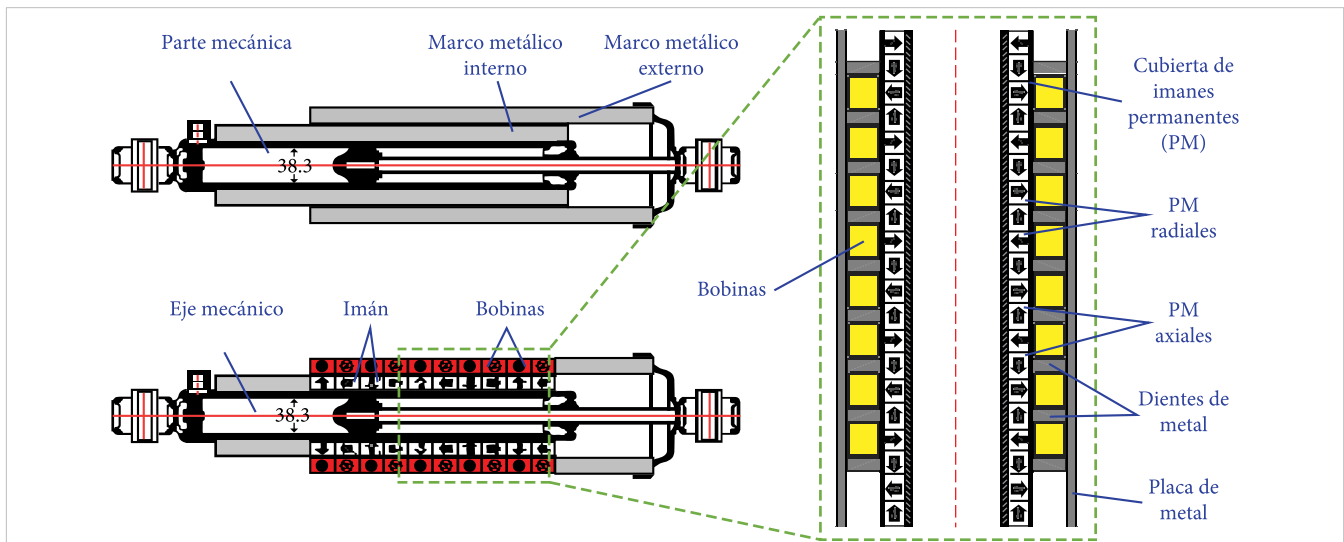


Figura 5. Recolector electromagnético lineal de ocho polos (imagen adaptada y reproducida con el permiso correspondiente [25]).

Recientemente, Lafarge *et al.* [28] diseñaron un amortiguador regenerativo electromagnético lineal (LEH,

por sus siglas en inglés) embebido directamente en el sistema de suspensión. A través del método de diseño

robusto basado en el modelo de Bond Graph Global, el LEH entregó 10 watts, considerando que la velocidad relativa del sistema de suspensión es de 1 m/s, con una eficiencia electromecánica de aproximadamente 29 %. Similarmente, Zhou *et al.* [29] propusieron una suspensión de recolección de energía magnética (MEHS, por sus siglas en inglés) basada en la topología de diseño de los generadores electromagnéticos lineales, demostrando que el MEHS logra regenerar eficazmente la energía vibratoria aleatoria.

En vista del potencial de conversión de energía de los amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales, estos han sido instalados en las entradas y salidas de los túneles de carretera con el objetivo de aprovechar la energía de impacto de los neumáticos del vehículo y así abastecer los requerimientos de energía eléctrica para el alumbrado de los túneles. De hecho, esta tecnología prometedora es útil en lugares donde el acceso a energía eléctrica es difícil. Además, Zhang *et al.* [30] desarrollaron un sistema de recolección de energía cinética de alto voltaje para aplicarlo en los túneles de carretera sustentables, que fue capaz de recolectar un voltaje pico de 194 voltios y un voltaje promedio de 55.2 voltios cuando el vehículo excitaba al dispositivo a una velocidad de 40 km/h.

Muchos investigadores han diseñado recolectores electromagnéticos lineales a partir de diferentes tipos de fuentes de vibración, los cuales aprovechan el fenómeno de levitación magnética para producir electricidad a baja escala [31]–[35]. Algunas aplicaciones de estos dispositivos se encuentran en la regeneración de energía a partir de la energía vibratoria causada por sismos [36], en sistemas de suspensión de vehículos [37], en túneles de viento actuando como sensores autoalimentados [38], en sensores de vibración autoalimentados [39], etc. Adicionalmente, Xiang Zou *et al.* [7], [32] reportaron los principios, métodos y aplicaciones de diferentes tipos de transductores de densidad baja en el aprovechamiento de energía cinética, y además informaron que estos dispositivos son más factibles de utilizar en aplicaciones tales como aeroespaciales, ingeniería biomédica, monitoreo ambiental e ingeniería militar.

3.2. Amortiguadores regenerativos electromecánicos

Los amortiguadores regenerativos electromecánicos se distinguen básicamente por su mecanismo de conversión de movimiento. Los elementos mecánicos del me-

canismo transforman el movimiento vertical bidireccional del sistema de suspensión en movimiento rotacional unidireccional y, posteriormente, accionan un generador eléctrico [40]. Además, estos pueden amplificar la energía cinética por medio de un tren de potencia, y así obtener una densidad alta de regeneración de energía.

Existen diferentes tipos de mecanismos de amplificación de movimiento, algunos de los cuales son los siguientes: tornillo-bola (*ball-screw mechanism*), piñón-cremallera (*rack-pinion mechanism*), tornillo algebraico (*algebraic screw mechanism*), sistema de transmisión basado en engranajes helicoidales (*helical gears transmission*), etc. Inicialmente, Kawamoto *et al.* [41] desarrollaron el primer amortiguador regenerativo basado en el mecanismo tornillo-bola para un sistema de suspensión activa (Figura 6 a). Más tarde, Amati *et al.* [42] estudiaron la factibilidad de utilizar este tipo de mecanismo en suspensiones semiactivas y totalmente activas, y demostraron que la dinámica del sistema de suspensión se deteriora a frecuencias altas de excitación debido al efecto de la constante de inercia (masa equivalente). De hecho, este efecto dinámico es una característica intrínseca del inersor (*inertor*) [43]. Este inconveniente se puede resolver añadiendo elementos de restitución de energía mecánica que proporcionan al sistema un mejor ancho de banda de filtrado de frecuencias [44], [45].

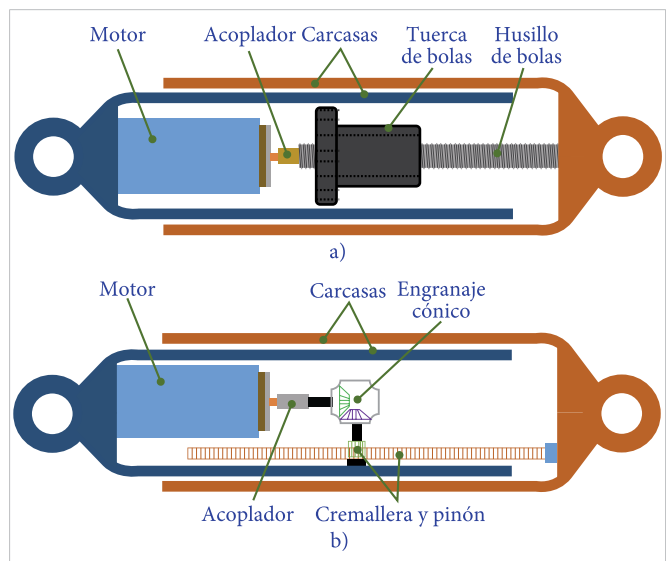


Figura 6. Amortiguadores regenerativos basados en transmisión mecánica: a) transmisión piñón-cremallera y b) transmisión tornillo-bola [46].

Para mejorar tanto el índice de la comodidad como el índice de regeneración de energía de los amorti-

guadores electromagnéticos basados en el mecanismo tornillo-bola, Zhang *et al.* [47] desarrollaron el control robusto \mathcal{H}_∞ con múltiples requerimientos dinámicos considerando el modelo completo del vehículo. Aunque en esa investigación se reveló que el controlador proporcionó excelentes resultados a bajas frecuencias de excitación (1-4 Hz) para ambos requerimientos dinámicos, no se estudió el índice de la seguridad de conducción (*road handling performance index*) que es de suma importancia a frecuencias altas de excitación. Este inconveniente fue estudiado más tarde por Pires *et al.* [48]: considerando el modelo de una cuarta parte del vehículo, ellos demostraron que cuando el valor de inercia del amortiguador regenerativo es de 50 kg, tanto el índice de la comodidad como el de la seguridad de conducción se degradan drásticamente en un 84 % y 61 %, respectivamente. Sin embargo, cuando la inercia es menor o igual a 20 kg, se mejoran sustancialmente ambos índices de rendimiento. Esto implica que no siempre se pueden lograr simultáneamente tales índices de rendimiento dinámico y obteniendo niveles altos de regeneración de energía en la suspensión regenerativa. De hecho, también este fenómeno dinámico producido ya sea por el mecanismo tornillo-bola o por el mecanismo piñón-cremallera fue estudiado por Yin *et al.* [49].

En términos de la potencia regenerada promedio producida por el amortiguador regenerativo basado en la

transmisión tornillo-bola, Huang *et al.* [50] demostraron que es posible cosechar una potencia promedio de aproximadamente 9 watts, mejorando significativamente tanto los índices de rendimiento dinámico como la capacidad de regeneración de energía del sistema de suspensión de un solo grado de libertad. Adicionalmente, Li *et al.* [51], [52] incrementaron la eficiencia de los regeneradores de energía basados en el mecanismo de tornillo-bola mediante el uso de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSM) de densidad alta de recolección de energía y un convertidor *buck-boost* para controlar los estados de carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía. Además, este dispositivo logró simultáneamente fuerzas de amortiguamiento controlables y una eficiencia de regeneración de energía del 51.81 % - 75.24 %, considerando excitaciones armónicas y estocásticas.

Vale la pena mencionar también que Xie *et al.* [53], [54] diseñaron un amortiguador regenerativo electromecánico que consiste de una transmisión de múltiples mecanismos de tornillo-bola y de varios generadores eléctricos para aumentar el potencial de regeneración de energía (Figura 7). El dispositivo recolectó 32 watts de potencia eléctrica promedio cuando la frecuencia y el desplazamiento de excitación es de 3 Hz y 20 mm, respectivamente.

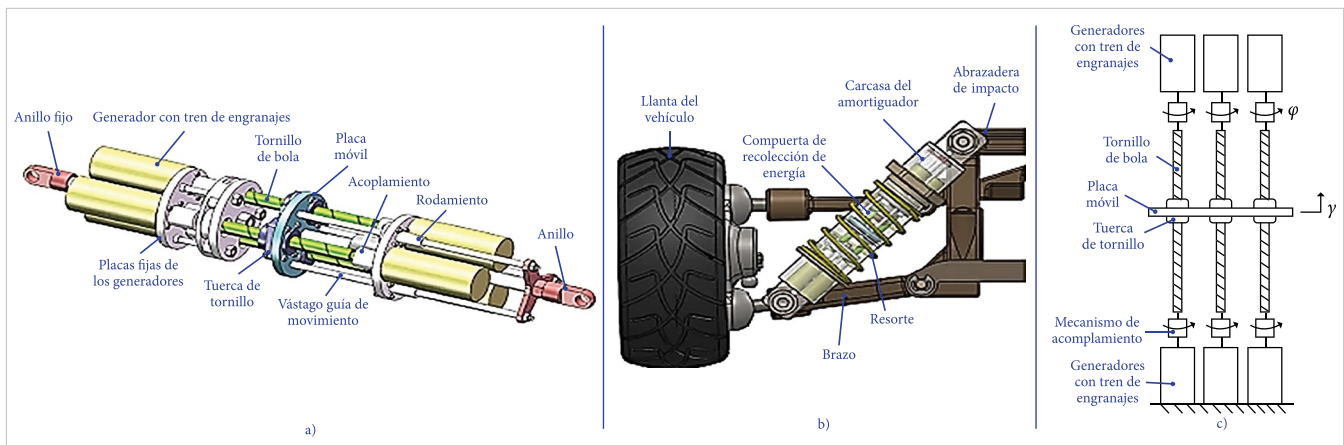


Figura 7. Diagrama del amortiguador electromecánico de recolección de energía basado en múltiples mecanismos de tornillo-bola y generadores eléctricos controlados: a) modelo 3D, b) el amortiguador regenerativo en el sistema de suspensión automotriz y c) diagrama del mecanismo de transmisión de potencia mecánica [53].

Recientemente, un novedoso amortiguador electromecánico con múltiples mecanismos de tornillo-bola fue diseñado por Wang *et al.* [55] (Figura 8). El dispositivo cosechó una potencia promedio de 3.701 watts, con una

eficiencia promedio de 36.4 % bajo el efecto de excitación armónica. Por otra parte, Bai *et al.* [56] propusieron un novedoso amortiguador regenerativo autoalimentado con la capacidad de regeneración de energía y de pro-

porcionar fuerzas de amortiguamiento por medio de un fluido magnetorreológico (Figura 9). Este dispositivo ofreció una capacidad de fuerza de amortiguamiento de 341-2260 newtons, considerando un rango de corriente eléctrica de 0-1 amperio. Además, la potencia promedio de salida del dispositivo fue de 4.5 watts cuando la velocidad de excitación fue de 125 mm/s. Finalmente, Yang *et al.* [57] diseñaron un recolector de energía cinética producida por los movimientos verticales en una bicicleta, cuyo dispositivo consistía básicamente de un mecanismo tornillo-bola, un rectificador de movimiento (embragues unidireccionales) y un sistema de almacenamiento de energía eléctrica basado en supercapacitores. Además, se observó que la potencia de salida del recolector es proporcional a la frecuencia de excitación e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica externa. Este tipo de amortiguador regenerativo logró recolectar un voltaje máximo de salida de 7.8 voltios y una potencia máxima de 0.491 watts, con una eficiencia de conversión total de 52.8 % considerando excitación de tipo armónica.



Figura 8. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en doble transmisión de tornillo-bola: 1) vástago del amortiguador, 2) tornillo izquierdo, 3) tornillo derecho, 4) tuerca del tornillo, 5) embrague unidireccional, 6) engrane, 7) piñón y 8) generador eléctrico [55].

Respecto a los amortiguadores regenerativos basados en el mecanismo piñón-cremallera, estos pueden incrementar la densidad de regeneración de energía a través de un sistema de transmisión de potencia (Figura 6 b). Dado que estos dispositivos utilizan un generador

electromagnético rotatorio, el movimiento vertical oscilatorio del sistema de suspensión se debe convertir en movimiento rotacional unidireccional. Para lograr tal objetivo, este tipo de dispositivo utiliza dos embragues unidireccionales con la finalidad de aprovechar los estados de tensión y de compresión del amortiguador. Además, se utiliza un tren de potencia simple para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico. A diferencia del amortiguador electromecánico basado en la transmisión tornillo-bola, la velocidad de rotación del generador está directamente influenciada por el paso de rosca del tornillo. Sin embargo, al incrementar la relación de transmisión de potencia en ambos dispositivos, se agregan efectos de inercia rotacional al sistema de suspensión. Se ha demostrado que al añadir niveles altos de inercia en estos tipos de amortiguadores se produce un efecto perjudicial en los índices dinámicos del sistema de suspensión.

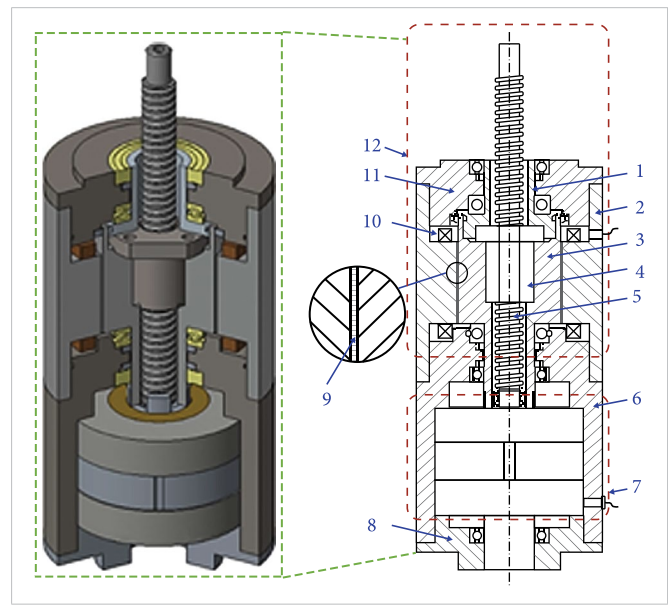


Figura 9. Amortiguador regenerativo electromecánico autoalimentado basado en el mecanismo tornillo-bola: 1) manga de conexión, 2) carcasa del estator, 3) rotor, 4) tuerca del tornillo de bola, 5) eje del tornillo de bola (por ejemplo, vástago de embolo), 6) carcasa del generador, 7) salida de energía eléctrica, 8) cubierta 2, 9) fluido magnetorreológico (FMR), 10) bobina, 11) cubierta 1, 12) mecanismo de amortiguamiento controlable [56].

Con el objetivo de analizar paramétricamente este efecto dinámico, Li *et al.* [58] diseñaron y evaluaron la capacidad de regeneración de energía de un amortiguador regenerativo basado en la transmisión piñón-cremallera. Además, en esa investigación se recalcó que la eficiencia mecánica de este tipo de dispositivos se encuentra en el rango 33-63 % considerando diferentes frecuencias

de excitación y de cargas eléctricas del generador eléctrico. En las pruebas experimentales se demostró que el dispositivo fue capaz de recolectar una potencia pico de 67.5 watts y una potencia media de 19.2 watts, considerando que la velocidad del vehículo es de 48 km/h. Sin embargo, el dispositivo sufrió efectos perjudiciales en el sistema de transmisión de potencia a frecuencias altas de excitación [59]. De hecho, estos investigadores afirmaron que el amortiguador electromecánico con transmisión tornillo-bola presenta mayor dificultad de operación a frecuencias altas de excitación mayores a 7 Hz, a diferencia del amortiguador electromecánico con transmisión piñón-cremallera ofreció mejor rendimiento a frecuencias altas.

Recientemente, Guo *et al.* [60] realizaron un estudio sobre el efecto dinámico del amortiguador electromecánico con y sin mecanismo de rectificación de movimiento en diferentes tipos de vehículos. Ellos demostraron que el amortiguador regenerativo sin mecanismo de rectificación funciona mejor considerando niveles bajos de inercia rotacional, lo cual significa que no se alteran drásticamente los índices dinámicos del sistema de suspensión. Además, el amortiguador electromecánico con mecanismo de rectificación presenta mayor robustez a frecuencias altas de excitación que el anterior. Es importante notar que, para ambos casos de diseño, la cantidad de inercia incluida en el mecanismo de transmisión se debe considerar seriamente para el análisis dinámico de recolección de energía y de los índices dinámicos del sistema. De hecho, esta consideración de diseño fue también reafirmada por Zhang *et al.* [11], [61], quienes diseñaron un amortiguador regenerativo basado en una transmisión mecánica que consistía de un sistema de doble embrague para aprovechar los estados (tensión y compresión) del movimiento del amortiguador (Figura 10).

Este amortiguador regenerativo recolectó una potencia promedio de 4.302 watts con una eficiencia del 44.24 %, considerando excitación armónica a 2.5 Hz y 7.5 mm de frecuencia y amplitud, respectivamente. En vista del potencial de amplificación de movimiento de este tipo de amortiguador, se han realizado investigaciones recientes sobre el potencial de regeneración de energía vibratoria en las suspensiones de los ferrocarriles y en los cables de transmisión de energía eléctrica [62], [63].

Por otra parte, el amortiguador electromecánico basado en el mecanismo tornillo algebraico (*algebraic screw*

mechanism) ha sido propuesto recientemente para resolver los inconvenientes de ineficiencia de regeneración de energía de los amortiguadores regenerativos basados ya sea en la transmisión de tipo tornillo-bola o en la de piñón-cremallera [64]. De hecho, Maravandi y Moallem [65] propusieron un cosechador de energía basado en el diseño estructural del mecanismo de tornillo algebraico, el cual está compuesto de un mecanismo de dos eslabones móviles (*two-leg mechanism*) para convertir el movimiento vertical bidireccional en movimiento rotacional unidireccional, un reductor de transmisión de potencia, y un motor sin escobillas (*brushless*) rotatorio de tres fases. Además, este dispositivo demostró una eficiencia de regeneración de energía del 78 %. Aunque, el dispositivo demostró una eficiencia elevada de regeneración de energía, los niveles de amortiguamiento eran pobres.

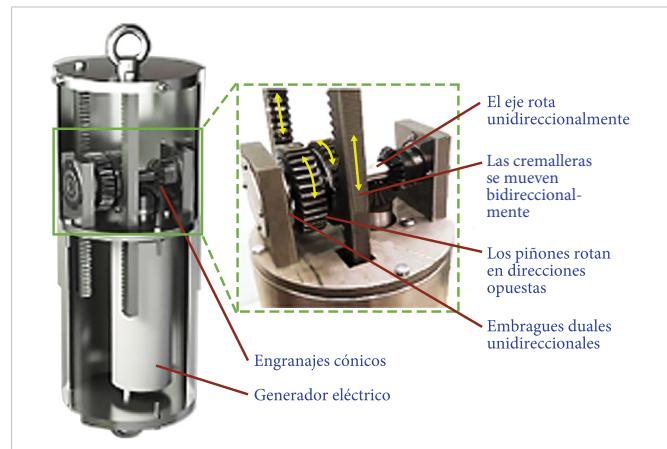


Figura 10. Amortiguador regenerativo electromecánico con transmisión piñón-cremallera y con doble sistema de embragues unidireccionales [11].

Basado en este tipo de mecanismo de conversión de movimiento, Syuhri *et al.* [66] diseñaron un cosechador de energía cinética que utilizaba una transmisión de engranajes epicíclicos para aumentar la velocidad de rotación del eje generador electromagnético. Se observó que el valor máximo para la potencia mecánica y regenerativa se alcanza en 4.67 y 3.14 watts, respectivamente. Esto significa que la eficiencia del dispositivo se encuentra en 67.29 %, es decir, puede convertir el 67.29 % de la energía mecánica en energía eléctrica, mientras que el 32.71 % se disipa en forma de calor. Esto se debe principalmente al fenómeno de fricción mecánica, las no linealidades y los efectos elásticos del dispositivo. A su vez, Zhang *et al.* [67], [68] diseñaron y construyeron un amortiguador regenerativo electromecánico de

accionamiento directo e indirecto, compuesto principalmente por un mecanismo novedoso de conversión y amplificación de movimiento llamado mecanismo de brazo-dentado (*arm-teeth mechanism*) que convierte el movimiento vertical bidireccional en movimiento rotacional unidireccional (Figura 11). El dispositivo presentó un buen compromiso entre el índice del confort y el de la regeneración de energía hasta 13 Hz de frecuencia de excitación. Sin embargo, el dispositivo puede sufrir daños estructurales bajo el efecto de frecuencias altas de excitación, que generalmente ocurren cuando la velocidad de conducción del vehículo es grande. Más tarde, los mismos autores realizaron un análisis de sensibilidad paramétrica considerando los modelos dinámicos de la cuarta parte, la mitad y el completo del vehículo, determinando que el amortiguador regenerativo trabaja mejor a baja frecuencia de excitación [69].

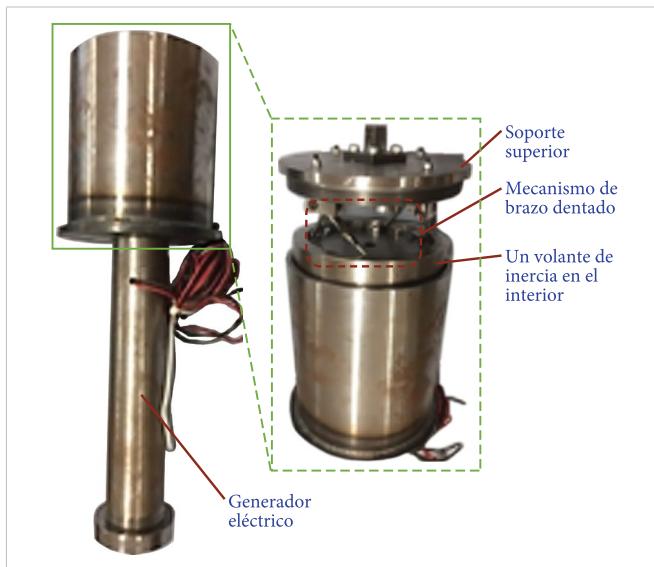


Figura 11. Amortiguador electromecánico de accionamiento indirecto basado en el mecanismo de brazo-dentado [68].

Inspirados en el trabajo de Zhang *et al.* [69], Abdelkareem *et al.* [70] demostraron teóricamente mediante simulaciones numéricas exhaustivas que el amortiguador regenerativo mostrado en la Figura 11 puede cosechar hasta 200 watts cuando se acopla a modelos dinámicos de vehículos pesados con semirremolque articulado. Por otro lado, Salman *et al.* [71] diseñaron un amortiguador regenerativo electromecánico basado principalmente en un módulo de transmisión de potencia mecánica, el cual consta de engranajes helicoidales y embragues unidireccionales de rodillos cónicos que convierten el movimiento vertical bidireccional del eje en movimiento rotacional unidireccional (Figura 12).

El dispositivo demostró la capacidad de regenerar la energía vibratoria con una eficiencia promedio del 40 % y además se obtuvo también una potencia promedio de 270 watts, considerando una frecuencia de excitación de 2.5 Hz y una amplitud de vibración de 5 mm. Aunque este transductor electromecánico demostró eficiencia alta de regeneración de energía cinética, se deben realizar más estudios en términos de viabilidad de implementación, efectos positivos y perjudiciales en los índices dinámicos del sistema de suspensión, y análisis mecánico de los elementos estructurales, etc. Vale la pena mencionar que la eficiencia de regeneración de energía de estos dispositivos se encuentra entre el 5 % y 70 %, tal como se presentó en el trabajo de Múčka [72].

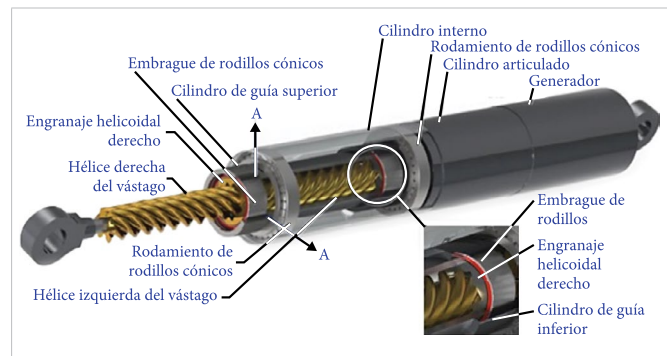


Figura 12. Amortiguador regenerativo con transmisión mecánica de engranajes helicoidales y embragues unidireccionales de rodillos [71].

Durante los últimos años, las investigaciones en este sentido se han orientado en el mejoramiento del mecanismo de conversión de movimiento, utilizando diferentes tipos de transmisiones mecánicas para aumentar la eficiencia de conversión de energía. Li *et al.* [73] propusieron un novedoso mecanismo de conversión de movimiento vertical bidireccional usando dos cremalleras de roscas helicoidales opuestas, dos engranes helicoidales de diámetros diferentes y embragues unidireccionales (*overrunning clutch*) (Figura 13). Los resultados experimentales demostraron que la eficiencia máxima de conversión de energía mecánica del dispositivo fue de 65.02 %, considerando excitación de tipo armónica.

Aunque, el amortiguador regenerativo basado principalmente en la transmisión cremallera-engranes helicoidales de roscas opuestas logra una alta densidad de regeneración de energía, muchos aspectos de diseño mecánico no se consideraron, principalmente, las cargas de empuje que generan los engranes helicoidales que, de hecho, perjudican a los embragues. Otro tipo de mecanismo de conversión de movimiento novedoso fue diseñado por

Ali et al. [74], quienes en lugar de utilizar una cremallera o un tornillo como elementos primarios de conversión de movimiento, recurrieron a una leva cilíndrica de ranura helicoidal acoplada a un seguidor. Parte de la leva se conecta a un pequeño diferencial basado en engranes cónicos y en cojinetes bidireccionales (*two-way bearing*) para producir un movimiento rotacional unidireccional (Figura 14). Cuando el dispositivo se sometió a evaluación experimental, la eficiencia de regeneración de energía fue 51.4 % bajo excitación armónica.

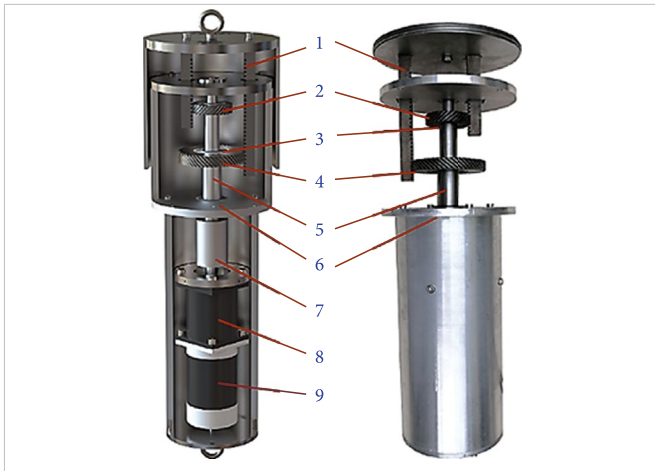


Figura 13. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en cremalleras y engranes helicoidales de roscas opuestas: 1) cremallera helicoidal, 2) engrane helicoidal para producir rotación horaria, 3) embrague unidireccional, 4) engrane helicoidal para generar rotación anti-horaria, 5) eje de accionamiento, 6) placa circular inferior, 7) acoplador mecánico, 8) caja de engranes planetarios y 9) el generador eléctrico (*DC brushless motor*) [73].

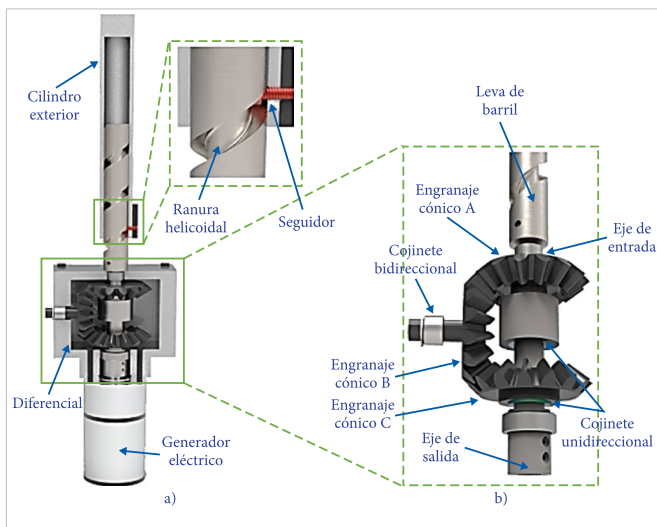


Figura 14. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en el mecanismo leva de barril-diferencial: a) vista lateral del transductor electromecánico y b) módulo de transmisión de potencia mecánica [74].

Es importante mencionar que algunas compañías de la industria automotriz, como Audi, Hyundai y Honda, están desarrollando amortiguadores regenerativos rotatorios que ya están siendo instalados en vehículos comerciales. De hecho, el grupo de investigación de Audi presentó un novedoso sistema de regeneración de energía vibratoria llamado amortiguador regenerativo electromecánico rotatorio (eRot), que fue manufacturado utilizando elementos de transmisión mecánica [75]. Sin embargo, es de esperarse que las industrias automotrices no revelen los secretos del funcionamiento de dicha tecnología.

Inspirado en la tecnología de los amortiguadores regenerativos rotatorios, Galluzzi et al. [76] diseñaron un amortiguador similar al eRot que consiste básicamente de un sistema de eslabonamiento, una caja de cambios para convertir el movimiento vertical bidireccional de la suspensión en movimiento rotacional unidireccional y de una máquina eléctrica para producir electricidad (Figura 15). Los autores demostraron experimentalmente que la eficiencia de regeneración de energía del transductor regenerativo rotatorio es de 59.86 % y que su capacidad de producir fuerzas de amortiguamiento es elevada.

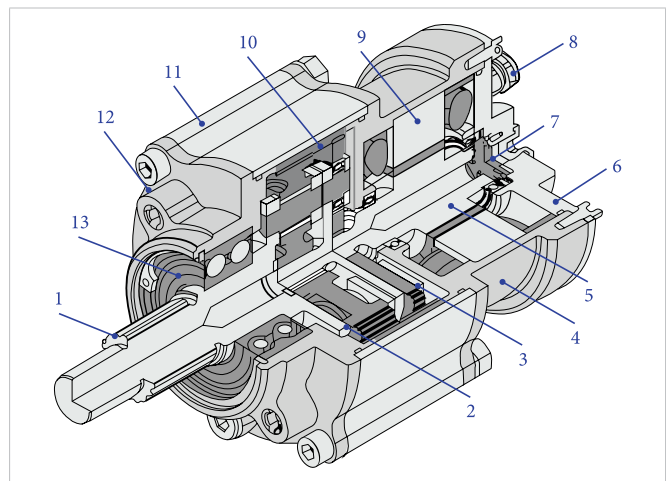


Figura 15. Vista isométrica del amortiguador regenerativo rotatorio: 1) eje estriado de entrada, 2) primera etapa, 3) segunda etapa, 4) carcasa del motor, 5) rotor, 6) cubierta posterior, 7) sensor de posición angular, 8) prensaestopas [x4], 9) estator, 10) corona exterior tipo anillo, 11) carcasa de la caja de cambios, 12) cubierta frontal y 13) cojinete de entrada [76].

3.2. Amortiguadores regenerativos electrohidráulicos

Los amortiguadores regenerativos electrohidráulicos están compuestos principalmente de válvulas de retención (*check valves*), tuberías hidráulicas, motores y

bombas hidráulicas, acumulador de gas o aceite y un generador eléctrico. Las válvulas de retención se utilizan para direccionar el flujo de fluido en las tuberías y proporcionar las fuerzas de amortiguamiento requeridas por el sistema de suspensión, mientras que el acumulador hidráulico se utilizan para garantizar la estabilidad de los niveles de fuerza de amortiguamiento en los estados de compresión y tensión del amortiguador. Cuando el fluido entra al motor hidráulico, se produce trabajo mecánico directamente. Luego, esta energía mecánica se transforma en electricidad por medio de un generador electromagnético rotatorio [77]-[79].

Aunque, el costo de estos tipos de dispositivos es alto, estos proporcionan fuerzas grandes de amortiguamiento sin aumentar su tamaño físico, comparado con los amortiguadores regenerativos electromecánicos y los electromagnéticos lineales. Al emplear un circuito hidráulico, es posible regular los impactos a frecuencias altas y, así mismo, suavizar la respuesta del rotor del generador. En aplicaciones reales, un sistema hidráulico es más durable debido a que el desgaste por fricción entre sus componentes mecánicos y el flujo de fluido es menor que el de un sistema mecánico compuesto de elementos sólidos (piñón-cremallera o tornillo-bola). Por esta razón, los amortiguadores hidráulicos disfrutaron de una de las mayores participaciones en el mercado de la industria automotriz.

En vista del potencial de la capacidad de amortiguación de estos tipos de amortiguadores regenerativos, Fang *et al.* [80] fabricaron un amortiguador regenerativo electrohidráulico (HESA) y demostraron experimentalmente que el dispositivo cosechó aproximadamente 200 watts con una eficiencia del 16.6 %. Más tarde, Li y Tse [81] propusieron un amortiguador electrohidráulico sin mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento y observaron que se producían fuerzas de impacto en el dispositivo a frecuencias altas de excitación (Figura 16).

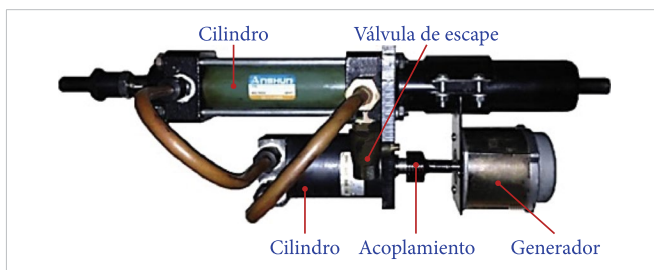


Figura 16. Amortiguador regenerativo electrohidráulico sin mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento [81].

Además, Li *et al.* [82] diseñaron y fabricaron un amortiguador regenerativo electrohidráulico que consistía básicamente de cuatro válvulas de retención, un motor hidráulico y un generador eléctrico de tres fases. Las válvulas de retención se utilizaron para crear un mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento (HMR, por sus siglas en inglés) del flujo de fluido, y posteriormente accionar el eje de motor hidráulico en una sola dirección. El HMR se utilizó para disminuir las fuerzas de impacto del dispositivo y, así mismo, suavizar la respuesta del rotor del generador. El trabajo mecánico producido por el motor hidráulico se transformó en energía eléctrica útil a través de un generador eléctrico trifásico.

En dicha investigación se reveló que, el dispositivo logró recolectar una potencia instantánea de 248.8 watts y una potencia promedio de 114.1 watts con una eficiencia máxima de regeneración de energía del 38.81 % cuando la frecuencia de excitación fue de 2 Hz y 8 mm de amplitud de vibración (Figura 17 a). Adicionalmente, el proceso de recolección de energía, rectificación de movimiento del flujo de fluido y de rectificación de la energía alterna a energía directa se muestra en la Figura 17 b). Nótese que en este proceso, el núcleo del diseño del amortiguador regenerativo es un cilindro hidráulico, el cual se divide en dos cámaras por un pistón.

La razón de utilizar un cilindro con dos vástagos es para garantizar que el flujo de aceite entre las dos cámaras sea idéntico. Uno de los vástagos se conecta directamente a una terminal del amortiguador mientras que la otra se acopla a través de un acoplamiento flexible. Los dos puertos (11 y 12) del cilindro se conectan a los dos puertos (21 y 22) del motor hidráulico a través de un rectificador hidráulico. El eje de salida de este motor se conecta a un generador electromagnético trifásico, cuya electricidad de salida se utiliza para cubrir la demanda de potencia eléctrica del tren de propulsión.

El diseño del mecanismo de rectificación hidráulico hace posible que la transferencia de energía de vibración en el sistema de regeneración de energía del amortiguador se realice de manera suave, es decir, las fuerzas de impacto se reducen. De esta manera, el dispositivo puede lograr simultáneamente tanto la capacidad de amortiguamiento requerido como la regeneración de energía cinética.

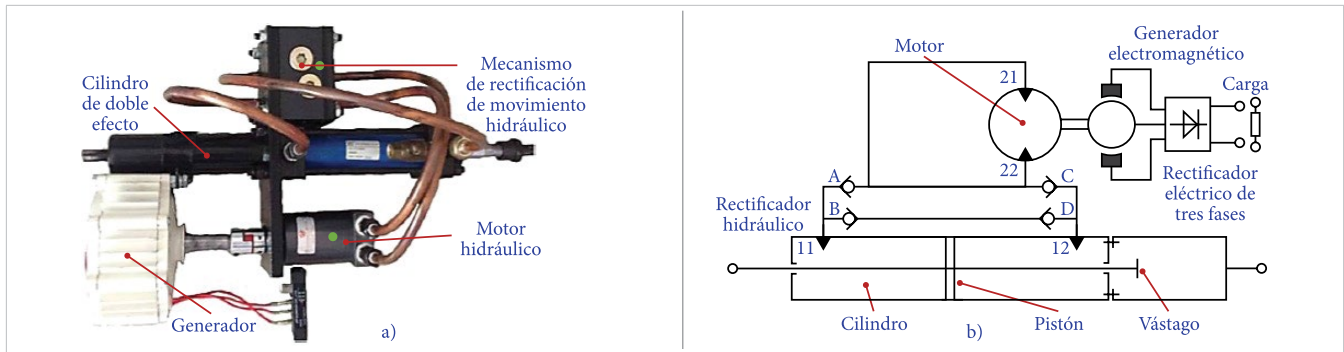


Figura 17. Amortiguador regenerativo electrohidráulico con mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento: a) dispositivo en 3D y b) circuito de recolección de energía [82].

Adicionalmente, Zhang *et al.* [83] propusieron un amortiguador regenerativo electrohidráulico con HMR que proporciona amortiguamiento asimétrico para lograr eficientemente fuerzas de adherencia de los neumáticos sobre la carretera. Con el objetivo de cuantificar la capacidad de regeneración de energía, se utilizaron algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés), considerando los radios del cilindro y del vástago del amortiguador, el gasto volumétrico de la bomba hidráulica y las cargas eléctricas del generador electromagnético. A través de la optimización GA, el dispositivo proporcionó una potencia cosechada de 33.4 watts con una eficiencia de regeneración de energía del 70-73 % cuando la frecuencia de excitación fue de 1.67 Hz y la amplitud de desplazamiento de 50 mm.

Más tarde, Zhang *et al.* [84] diseñaron y realizaron pruebas experimentales de un amortiguador electrohidráulico de doble tubo con la capacidad de regeneración de energía para su uso en sistemas de suspensión semiactiva y activa (Figura 18). Este dispositivo consiste de un tubo interno ubicado entre el tubo de presión y el tubo de reserva, el cual tiene un orificio de circulación para conectar la cavidad superior con la entrada del motor hidráulico. La salida del motor hidráulico está conectada a la cavidad de reserva a través de la tubería de aceite. Para lograr un flujo de fluido unidireccional, se añade una válvula de retención en la cara superior del pistón y otra en la base del amortiguador. El mecanismo de rectificación del flujo del fluido solo contiene dos válvulas de retención con el objetivo de reducir el tamaño del amortiguador regenerativo, el cual también permite que el proceso de operación sea más sencillo que los anteriores. Nótese que el nitrógeno funciona principalmente como un acumulador hidráulico, el cual le proporciona estabilidad al nivel de presión en el flujo del fluido en ambos estados de movimiento del dispositivo.

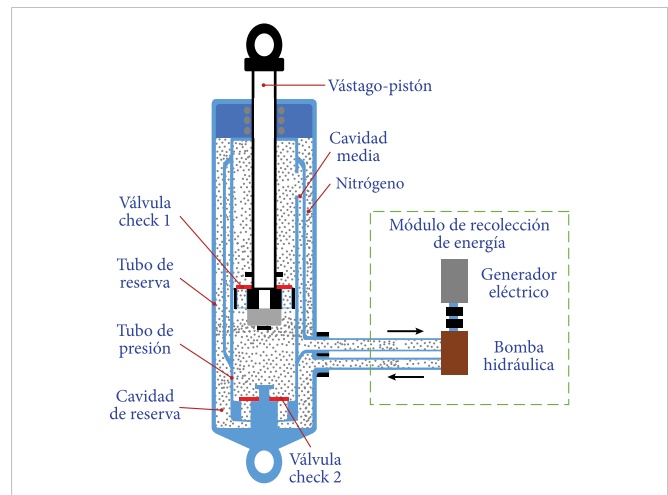


Figura 18. Amortiguador regenerativo electrohidráulico de doble tubo con mecanismo de rectificación de movimiento [84].

En otro estudio, Galluzzi *et al.* [85], [86] mejoraron el diseño de los amortiguadores regenerativos electrohidráulicos, considerando aspectos de diseño sumamente importantes, tales como las pérdidas de energía hidráulica en el circuito hidrostático, la eficiencia volumétrica e hidráulica del motor hidráulico, la eficiencia mecánica y la eficiencia eléctrica del generador eléctrico. Posteriormente, mediante planos de eficiencias establecidos por los niveles de fuerza-velocidad del fluido en el motor hidráulico se determinó que el dispositivo proporcionó una eficiencia máxima de conversión de energía del 41.7 %.

Con el objetivo de mejorar la capacidad de regeneración de energía vibratoria y las dinámicas dominantes de los vehículos, Zou *et al.* [6], [87]–[89] propusieron un sistema de suspensión interconectado por amortiguadores regenerativos electrohidráulicos (HIS-HESA, por sus siglas en inglés). La idea subyacente de conectar todos los amortiguadores regenerativos a una unidad central de conversión de energía hidráulica a

electricidad es para reducir el número de componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos. Así, el sistema regenerativo consistía principalmente de cuatro amortiguadores hidráulicos con mecanismos de conversión de movimiento del flujo de fluido (HMR), dos acumuladores de presión baja y alta, un motor hidráulico y un circuito eléctrico de generación de potencia eléctrica.

De acuerdo a los resultados numéricos obtenidos, el HIS-HESA puede recolectar una potencia de alrededor de 190 watts, considerando las dinámicas de un modelo vehículo de siete grados de libertad (*full vehicle suspension system*). Adicionalmente, este sistema regenerativo mejoró tanto el índice del confort como el de la seguridad de conducción en un 33 % y 20 %, respectivamente. Los autores también recalcaron que el uso de este dispositivo es para camiones pesados debido a que estos disipan mayor cantidad de energía cinética comparado con los otros tipos de vehículos. También, se observó un equilibrio entre el índice del confort y la capacidad de regeneración de energía cuando la resistencia externa del generador eléctrico varía.

En vista de estos resultados teóricos, Qin *et al.* [90] desarrollaron recientemente la experimentación de la suspensión regenerativa interconectada hidráulicamente (EH-HIS), demostrando cualitativamente una mejora significativa en la capacidad de regeneración de energía y en los índices de rendimiento de la suspensión. En términos cuantitativos, el EH-HIS cosechó una potencia promedio de 82 watts con una eficiencia de 18 %, considerando que la frecuencia y amplitud de excitación son 2 Hz y 20 mm, respectivamente.

Recientemente, la compañía Levant Power Corp. desarrolló un amortiguador regenerativo electrohidráulico compactado llamado GenShock, con el objetivo de aumentar la eficiencia del combustible de los vehículos de pasajeros y, simultáneamente, proporcionar fuerzas activas al sistema de suspensión [91]. Tal como ha sido reportado por Abdelkareem *et al.* [5], [92], [93], existen muchas oportunidades de investigación en el tema de la regeneración de energía vibratoria en las suspensiones automotrices. En los próximos años, se espera que se instalen nuevos amortiguadores regenerativos no solo en camiones pesados, porque en ellos existe mayor potencial de regeneración de energía, sino también en vehículos de pasajeros.

IV. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

El concepto de regeneración de energía vibratoria en las suspensiones automotrices es una línea de investigación prometedora en energías limpias, sin embargo, para lograr tal objetivo se requiere cubrir muchos aspectos de filosofía de diseño de los amortiguadores regenerativos. De hecho, los esfuerzos de investigación científica se han centrado principalmente en el mejoramiento del mecanismo de conversión y amplificación de energía mecánica ya sea para los amortiguadores regenerativos electromecánicos o para los electrohidráulicos. Con el objetivo de asegurar la asequibilidad del uso de amortiguadores regenerativos en vehículos eléctricos puros y en híbridos, se recomiendan realizar los siguientes estudios:

- Para evaluar de manera realista la eficiencia de conversión de energía mecánica de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos electromecánicos, es necesario incluir en el modelado matemático las no linealidades, la eficiencia del generador eléctrico, los efectos elásticos de los elementos estructurales, la eficiencia mecánica, etc.
- Evaluar el potencial de regeneración de energía vibratoria para cada tipo de amortiguador regenerativo electromecánico no lineal acoplado al modelo de vehículo completo, considerando condiciones reales de conducción.
- Formular problemas de optimización multiobjetivo con la finalidad de optimizar los parámetros involucrados en el mecanismo de conversión de movimiento, del generador eléctrico, en efectos inerciales parasitarios, en los análisis de fatiga de los elementos estructurales, etc.
- Aunque se ha demostrado en la literatura que el potencial de regeneración de energía de un sistema de suspensión regenerativa depende fuertemente de la velocidad de conducción del vehículo, la rugosidad de la carretera y de la rigidez del neumático, se recomienda realizar análisis de sensibilidad paramétrica en la capacidad de regeneración de energía para cada tipo de amortiguador, variando sus parámetros físicos.
- En la literatura se observó que los amortiguadores regenerativos rotatorios pueden superar a los electromecánicos, electromagnéticos e incluso a los

electrohidráulicos en la capacidad de regeneración de energía y en la de producir fuerzas grandes de amortiguamiento. Sin embargo, no se reportó un análisis de sensibilidad paramétrica exhaustivo en lo que respecta a los índices de rendimiento del sistema de suspensión basado en el amortiguador regenerativo rotatorio.

- Se ha demostrado teórica y experimentalmente que las suspensiones interconectadas hidráulicamente basadas en amortiguadores regenerativos electrohidráulicos presentan mayor potencial de regeneración de energía y un índice de rendimiento dinámico superior a las suspensiones convencionales. Sería conveniente realizar un análisis comparativo entre las suspensiones automotrices basadas en transductores regenerativos rotatorios con aquellas compuestas de amortiguadores regenerativos electrohidráulicos.
- En vista del potencial dinámico del amortiguador regenerativo rotatorio, sería conveniente diseñar leyes de control con la finalidad de diseñar una suspensión regenerativa autoalimentada y, posteriormente, comparar los resultados con los de la suspensión regenerativa basada en los amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales autoalimentados.
- También sería conveniente realizar pruebas de campo del amortiguador regenerativo rotatorio acoplado a una suspensión automotriz.
- Diseñar leyes de control para la gestión adecuada de la energía almacenada en el banco de supercondensadores, ultracapacitores y baterías electroquímicas.

Es cierto que, a medida que aumentan los problemas energéticos en la industria de la transportación, al igual que el sistema de recuperación de energía cinética (KERS), los amortiguadores regenerativos pueden contribuir de manera sustancial en la mejora de los estados de salud del sistema de baterías que alimenta, ya sea a un tren de potencia eléctrico o a un tren de potencia híbrido. Esto ha originado un incremento significativo en la investigación científica no solo en la mejora de estos tipos de dispositivos, sino en abordarlos como cosechadores de energía marítima, energía vibratoria producida por sismos y energía cinética producida por las turbulencias del aire que inciden sobre los cables, entre otras.

REFERENCIAS

- [1] L. Pugi, M. Pagliai, A. Nocentini, G. Lutzemberger y A. Pretto, "Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking", *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 96-115, 2017, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.11.047](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.047).
- [2] K. Itani, A. De Bernardinis, Z. Khatir y A. Jammal, "Comparative analysis of two hybrid energy storage systems used in a two front wheel driven electric vehicle during extreme start-up and regenerative braking operations", *Energy Convers. Manag.*, vol. 144, pp. 69-87, 2017, doi: [10.1016/j.enconman.2017.04.036](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.036).
- [3] L. Li, Y. Zhang, C. Yang, B. Yan y C. M. Martinez, "Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus", *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 299-314, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2015.12.077](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.077).
- [4] D. Zhao, "Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke-Zhao thermo-acoustic-piezo system", *Energy Convers. Manag.*, vol. 66, pp. 87-97, 2013, doi: [10.1016/j.enconman.2012.09.025](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.025).
- [5] M. A. A. Abdelkareem et al., "Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review", *Appl. Energy*, vol. 229, no. jul., pp. 672-699, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.08.030](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030).
- [6] J. Zou, X. Guo, M. A. A. Abdelkareem, L. Xu y J. Zhang, "Modelling and ride analysis of a hydraulic interconnected suspension based on the hydraulic energy regenerative shock absorbers", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 127, pp. 345-369, 2019, doi: [10.1016/j.ymssp.2019.02.047](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.047).
- [7] H. X. Zou et al., "Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: Principles, methods and applications", *Appl. Energy*, vol. 255, no. feb., 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113871](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113871).
- [8] D. Shi, P. Pisu, L. Chen, S. Wang y R. Wang, "Control design and fuel economy investigation of power split HEV with energy regeneration of suspension", *Appl. Energy*, vol. 182(C), pp. 576-589, 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.08.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.034).
- [9] ISO, "ISO 8608:2016 Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data", ISO.org.

- <https://www.iso.org/standard/71202.html> (acceso mar. 20, 2022).
- [10] X. Xie y Q. Wang, “A mathematical model for piezoelectric ring energy harvesting technology from vehicle tires”, *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 94, pp. 113-127, 2015, doi: 10.1016/j.ijengsci.2015.05.004.
- [11] Z. Zhang et al., “A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle”, *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 177-188, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.054.
- [12] D. Karnopp, “Permanent Magnet Linear Motors Used as Variable Mechanical Dampers for Vehicle Suspensions”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 18, no. 4, pp. 187-200, 1989, doi: 10.1080/00423118908968918.
- [13] Y. Suda y T. Shiiba, “A New Hybrid Suspension System with Active Control and Energy Regeneration”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 24, supl. 1, pp. 641-654, 1996, doi: 10.1080/00423119608969226.
- [14] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani y Y. Zhou, “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 4, pp. 1-10, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/4/045003.
- [15] B. L. J. Gysen, T. P. J. Van Der Sande, J. J. H. Paulides y E. A. Lomonova, “Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension”, en *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1384-1393, may. 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2131160.
- [16] B. Ebrahimi, H. Bolandhemmat, M. B. Khamesee y F. Golnaraghi, “A hybrid electromagnetic shock absorber for active vehicle suspension systems”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 49, nos. 1-2, pp. 311-332, 2011, doi: 10.1080/00423111003602400.
- [17] E. Asadi, R. Ribeiro, M. B. Khamesee y A. Khajepour, “A new adaptive hybrid electromagnetic damper: modelling, optimization, and experiment”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 7, pp. 1-14, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/7/075003.
- [18] G. Hu, Y. Lu, S. Sun y W. Li, “Performance Analysis of a Magnetorheological Damper with Energy Harvesting Ability”, *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-10, 2016, doi: 10.1155/2016/2959763.
- [19] L. Chen, D. Shi, R. Wang y H. Zhou, “Energy conservation analysis and control of hybrid active semiactive suspension with three regulating damping levels”, *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-14, 2016, doi: 10.1155/2016/6196542.
- [20] C. Chen y W. -H. Liao, “A self-sensing magnetorheological damper with power generation”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 2, pp. 1-14, 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/2/025014.
- [21] K. -M. Choi, H. -J. Jung, H. -J. Lee y S. -W. Cho, “Feasibility study of an MR damper-based smart passive control system employing an electromagnetic induction device”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, pp. 2323-2329, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/036.
- [22] Y. -T. Choi y N. M. Wereley, “Self-Powered Magnetorheological Dampers”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 131, no. 4, pp. 1-5, 2009, doi: 10.1115/1.3142882.
- [23] Z. Gao, S. Chen, Y. Zhao y Z. Liu, “Numerical evaluation of compatibility between comfort and energy recovery based on energy flow mechanism inside electromagnetic active suspension”, *Energy*, vol. 170, no. 5, pp. 521-536, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.193.
- [24] R. Ding, R. Wang, X. Meng y L. Chen, “Energy consumption sensitivity analysis and energy-reduction control of hybrid electromagnetic active suspension”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 134, no. 301, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.106301.
- [25] M. -T. Duong, Y. -D. Chun, P. -W. Han, B. -G. Park, D. -J. Bang and J. -K. Lee, “Optimal Design of a Novel Single-Phase 8-Slot 8-Pole Tubular Electromagnetic Shock Absorber to Harvest Energy”, en *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 2, pp. 1180-1190, feb. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2898591.
- [26] Z. Jin-qiu, P. Zhi-zhao, Z. Lei y Z. Yu, “A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles”, en *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2013, vol. III, pp. 3-6, ISBN: 978-988-19252-9-9.
- [27] L. Zuo y X. Tang, “Large-scale vibration energy harvesting”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 11, pp. 1405-1430, 2013, doi: 10.1177/1045389X13486707.

- [28] B. Lafarge, S. Grondel, C. Delebarre, O. Curea y C. Richard, "Linear electromagnetic energy harvester system embedded on a vehicle suspension : From modeling to performance analysis", *Energy*, vol. 225(C), pp. 1-16, 2021, doi: [10.1016/j.energy.2021.119991](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119991).
- [29] R. Zhou et al., "Experimental validations of a magnetic energy-harvesting suspension and its potential application for self-powered sensing", *Energy*, vol. 239(C), pp. 1-13, 2022, doi: [10.1016/j.energy.2021.122205](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122205).
- [30] Z. Zhang, X. Zhang, Y. Rasim, C. Wang, B. Du y Y. Yuan, "Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators", *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 152-161, 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2015.11.096](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.096).
- [31] K. Kecik, A. Mitura, S. Lenci y J. Warminska, "Energy harvesting from a magnetic levitation system", *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 94, pp. 200-206, 2017, doi: [10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021](https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021).
- [32] C. Wei y X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 1-18, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2017.01.073](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073).
- [33] A. Haroun, I. Yamada y S. Warisawa, "Study of electromagnetic vibration energy harvesting with free/impact motion for low frequency operation", *J. Sound Vib.*, vol. 349, pp. 389-402, 2015, doi: [10.1016/j.jsv.2015.03.048](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.048).
- [34] Z. Liu, X. Wang, S. Ding, R. Zhang y L. McNabb, "A new concept of speed amplified nonlinear electromagnetic vibration energy harvester through fixed pulley wheel mechanisms and magnetic springs", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 126, pp. 305-325, 2019, doi: [10.1016/j.ymssp.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.010).
- [35] M. Gao, Y. Wang, Y. Wang y P. Wang, "Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation", *Appl. Energy*, vol. 220, pp. 856-875, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.03.170](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.170).
- [36] S. Zhu, W. A. Shen y Y. L. Xu, "Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing", *Eng. Struct.*, vol. 34, pp. 198-212, 2012, doi: [10.1016/j.engstruct.2011.09.024](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.024).
- [37] C. Wei y H. Taghavifar, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half-vehicle model", *Energy*, vol. 134, pp. 279-288, 2017, doi: [10.1016/j.energy.2017.06.034](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.034).
- [38] L. B. Zhang, H. L. Dai, A. Abdelkefi, S. X. Lin y L. Wang, "Theoretical modeling, wind tunnel measurements, and realistic environment testing of galloping-based electromagnetic energy harvesters", *Appl. Energy*, vol. 254(C), 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113737](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113737).
- [39] M. -L. Seol, S. -B. Jeon, J. -W. Han y Y. -K. Choi, "Ferrofluid-based triboelectric-electromagnetic hybrid generator for sensitive and sustainable vibration energy harvesting", *Nano Energy*, vol. 31, pp. 233-238, 2017, doi: [10.1016/j.nanoen.2016.11.038](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.11.038).
- [40] A. Tonoli, N. Amati, J. G. Detoni, R. Galluzzi y E. Gasparin, "Modelling and validation of electromechanical shock absorbers", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 51, no. 8, pp. 1186-1199, 2013, doi: [10.1080/00423114.2013.789538](https://doi.org/10.1080/00423114.2013.789538).
- [41] Y. Kawamoto, Y. Suda, H. Inoue y T. Kondo, "Modeling of Electromagnetic Damper for Automobile Suspension", *J. Syst. Des. Dyn.*, vol. 1, no. 3, pp. 524-535, 2007, doi: [10.1299/jsdd.1.524](https://doi.org/10.1299/jsdd.1.524).
- [42] N. Amati, A. Festini y A. Tonoli, "Design of electromagnetic shock absorbers for automotive suspensions", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 49, no. 12, pp. 1913-1928, 2011, doi: [10.1080/00423114.2011.554560](https://doi.org/10.1080/00423114.2011.554560).
- [43] M. C. Smith, "The Inerter: A Retrospective", *Annu. Rev. Control. Robot. Auton. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 361-391, 2020, doi: [10.1146/annurev-control-053018-023917](https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023917).
- [44] K. E. Graves, P. G. Iovenitti y D. Toncich, "Electromagnetic regenerative damping in vehicle suspension systems", *Int. J. Veh. Des.*, vol. 24, no. 2/3, pp. 182-197, 2000, doi: [10.1504/IJVD.2000.005181](https://doi.org/10.1504/IJVD.2000.005181).
- [45] M. Montazeri-Gh y O. Kaviani-pour, "Investigation of the passive electromagnetic damper", *Acta Mech.*, vol. 223, no. 12, pp. 2633-2646, 2012, doi: [10.1007/s00707-012-0735-8](https://doi.org/10.1007/s00707-012-0735-8).
- [46] X. Wang, *Frequency Analysis of Vibration Energy Harvesting Systems*. Estados Unidos de América: Elsevier, 2016, ISBN: 978-0-12-802321-1.

- [47] G. Zhang, J. Cao y F. Yu, "Design of active and energy-regenerative controllers for DC-motor-based suspension", *Mechatronics*, vol. 22, no. 8, pp. 1124-1134, 2012, doi: [10.1016/j.mechatronics.2012.09.007](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.09.007).
- [48] L. Pires, M. C. Smith, N. E. Houghton y R. A. McMahon, "Design trade-offs for energy regeneration and control in vehicle suspensions", *Int. J. Control*, pp. 1-18, 2013, doi: [10.1080/00207179.2013.830197](https://doi.org/10.1080/00207179.2013.830197).
- [49] J. Yin, X. Chen, J. Li y L. Wu, "Investigation of equivalent unsprung mass and nonlinear features of electromagnetic actuated active suspension", *Shock Vib.*, vol. 2015, pp. 1-8, 2015, doi: [10.1155/2015/624712](https://doi.org/10.1155/2015/624712).
- [50] B. Huang, C. -Y. Hsieh, F. Golnaraghi y M. Moallem, "Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation", *J. Sound Vib.*, vol. 357, pp. 16-34, 2015, doi: [10.1016/j.jsv.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.004).
- [51] S. Li, J. Xu, X. Pu, T. Tao y X. Mei, "A novel design of a damping failure free energy-harvesting shock absorber system", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 132, pp. 640-653, 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.07.004).
- [52] S. Li, J. Xu, X. Pu, T. Tao, H. Gao y X. Mei, "Energy-Harvesting Variable / Constant Damping Suspension", *Energy*, vol. 189, 2019, doi: [10.1016/j.energy.2019.116199](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116199).
- [53] L. Xie, J. Li, X. Li, L. Huang y S. Cai, "Damping-tunable energy-harvesting vehicle damper with multiple controlled generators: Design, modeling and experiments", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 99, pp. 859-872, 2018, doi: [10.1016/j.ymsp.2017.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.07.005).
- [54] L. Xie, J. Li, S. Cai y X. Li, "Electromagnetic Energy-Harvesting Damper With Multiple Independently Controlled Transducers: On-Demand Damping and Optimal Energy Regeneration", en *IEEE ASME Trans Mechatron*, vol. 22, no. 6, pp. 2705-2713, dic. 2017, doi: [10.1109/TMECH.2017.2758783](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2758783).
- [55] Z. Wang, T. Zhang, Z. Zhang, Y. Yuan y Y. Liu, "A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles", *Energy Built Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 36-49, 2019, doi: [10.1016/j.enbenv.2019.09.004](https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.09.004).
- [56] X. -X. Bai, W. -M. Zhong, Q. Zou, A. -D. Zhu y J. Sun, "Principle, design and validation of a power-generated magnetorheological energy absorber with velocity self-sensing capability", *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 7, pp. 1-18, 2018, doi: [10.1088/1361-665X/aac7ef](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac7ef).
- [57] Y. Yang, Y. Pian y Q. Liu, "Design of energy harvester using rotating motion rectifier and its application on bicycle", *Energy*, vol. 179, pp. 222-231, 2019, doi: [10.1016/j.energy.2019.05.036](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.036).
- [58] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin y Y. -x. Qin, "Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests", en *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 1065-1074, mar. 2013, doi: [10.1109/TVT.2012.2229308](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2229308).
- [59] Z. Li, L. Zuo, J. Kuang y G. Luhrs, "Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier", *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, pp. 1-10, 2013, doi: [10.1088/0964-1726/22/2/025008](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025008).
- [60] S. Guo, Y. Liu, L. Xu, X. Guo y L. Zuo, "Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 7, pp. 1-25, 2016, doi: [10.1080/00423114.2016.1174276](https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1174276).
- [61] Z. Zhang et al., "Corrigendum to 'A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle' [Appl. Energy 178 (2016) 177-188]", *Appl. Energy*, vol. 254, 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113634](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113634).
- [62] X. Zhang, Z. Zhang, H. Pan, W. Salman, Y. Yuan y Y. Liu, "A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads", *Energy Convers. Manag.*, vol. 118, pp. 287-294, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.04.012](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012).
- [63] H. Wang, C. He, S. Lv y H. Sun, "A new electromagnetic vibrational energy harvesting device for swaying cables", *Appl. Energy*, vol. 228(C), pp. 2448-2461, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.07.059](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.059).
- [64] R. Sabzehgar, A. Maravandi y M. Moallem, "Energy Regenerative Suspension Using an Algebraic Screw Linkage Mechanism", en *IEEE/ASME Trans.*

- Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1251-1259, ag. 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2277854.
- [65] A. Maravandi y M. Moallem, "Regenerative Shock Absorber Using a Two-Leg Motion Conversion Mechanism", en *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 2853-2861, dic. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2015.2395437.
- [66] A. Syuhri, W. Hadi y S. N. H. Syuhri, "Damping properties and energy evaluation of a regenerative shock absorber", *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 12, pp. 1385-1397, 2017, doi: 10.1007/s12008-017-0440-x.
- [67] R. Zhang y X. Wang, "Parameter study and optimization of a half-vehicle suspension system model integrated with an arm-teeth regenerative shock absorber using Taguchi method", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 126, pp. 65-81, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.02.020.
- [68] R. Zhang, X. Wang, E. Shami, S. John, L. Zuo y C. Wang, "A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional direct-drive regenerative shock absorber", *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 111-127, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.096.
- [69] R. Zhang, L. Zhao, X. Qiu, H. Zhang y X. Wang, "A comprehensive comparison of the vehicle vibration energy harvesting abilities of the regenerative shock absorbers predicted by the quarter, half and full vehicle suspension system models", *Appl. Energy*, vol. 272, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115180.
- [70] M. A. A. Abdelkareem, R. Zhang, X. Jing, X. Wang y M. K. A. Ali, "Characterization and implementation of a double-sided arm-toothed indirect-drive rotary electromagnetic energy-harvesting shock absorber in a full semi-trailer truck suspension platform", *Energy*, vol. 239, parte A, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121976.
- [71] W. Salman et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles", *Energy*, vol. 159, pp. 361-372, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.152.
- [72] P. Můčka, "Energy-harvesting potential of automobile suspension", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 12, pp. 1651-1670, 2016, doi: 10.1080/00423114.2016.1227077.
- [73] H. Li et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses", *Appl. Energy*, vol. 295, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117020.
- [74] A. Ali, L. Qi, T. Zhang, H. Li, A. Azam y Z. Zhang, "Design of novel energy-harvesting regenerative shock absorber using barrel cam follower mechanism to power the auxiliaries of a driverless electric bus", *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 48, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101565.
- [75] BioAge Group, "Audi developing electromechanical rotary dampers; potential for energy recuperation from suspension; 48V", *GreenCarCongress.com*. <https://www.greencarcongress.com/2016/08/audi-developing-electromechanical-rotary-dampers-potential-for-energy-recuperation-from-suspension-4.html> (acceso jul. 15, 2020).
- [76] R. Galluzzi, S. Circosta, N. Amati y A. Tonoli, "Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions", *Mechatronics*, vol. 77, ag. 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102580.
- [77] J. Mi, L. Xu, S. Guo, L. Meng y M. A. A. Abdelkareem, "Energy harvesting potential comparison study of a novel railway vehicle bogie system with the hydraulic-electromagnetic energy-regenerative shock absorber", en *Proc. 2017 Jt. Rail Conf.*, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, abr. 4-7, 2017, doi: 10.1115/JRC2017-2241.
- [78] K. Ahmad y M. Alam, "Design and Simulated Analysis of Regenerative Suspension System with Hydraulic Cylinder, Motor and Dynamo", *SAE Tech. Pap.*, 2017, doi:10.4271/2017-01-1284.
- [79] H. Zhang, X. Guo, L. Xu, S. Hu y Z. Fang, "Parameters analysis of hydraulic-electrical energy regenerative absorber on suspension performance", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 6, 2014, doi: 10.1155/2014/836502.
- [80] Z. Fang, X. Guo, L. Xu y H. Zhang, "Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 5, pp. 1-9, 2013, doi: 10.1155/2013/943528.
- [81] C. Li y P. W. Tse, "Fabrication and testing of an energy-harvesting hydraulic damper", *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 6, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/6/065024.

- [82] C. Li, R. Zhu, M. Liang y S. Yang, “Integration of shock absorption and energy harvesting using a hydraulic rectifier”, *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 17, pp. 3904-3916, 2014, doi: [10.1016/j.jsv.2014.04.020](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.04.020).
- [83] Y. Zhang, X. Zhang, M. Zhan, K. Guo, F. Zhao y Z. Liu, “Study on a novel hydraulic pumping regenerative suspension for vehicles”, *J. Franklin Inst.*, vol. 352, no. 2, pp. 485-499, 2015, doi: [10.1016/j.jfranklin.2014.06.005](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.06.005).
- [84] Y. Zhang, H. Chen, K. Guo, X. Zhang y S. E. Li, “Electro-hydraulic damper for energy harvesting suspension: Modeling, prototyping and experimental validation”, *Appl. Energy*, vol. 199, pp. 1-12, 2017, doi: [10.1016/j.apenergy.2017.04.085](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.085).
- [85] R. Galluzzi et al., “Regenerative Shock Absorbers and the Role of the Motion Rectifier”, *SAE Tech. Pap.*, 2016, doi: [10.4271/2016-01-1552](https://doi.org/10.4271/2016-01-1552).
- [86] R. Galluzzi, Y. Xu, N. Amati y A. Tonoli, “Optimized design and characterization of motor-pump unit for energy-regenerative shock absorbers”, *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 16-27, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2017.10.100](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.100).
- [87] J. Zou et al., “Simulation Research of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on a Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorber”, *SAE Tech. Pap.*, 2018, doi: [10.4271/2018-01-0582](https://doi.org/10.4271/2018-01-0582).
- [88] J. Zou, X. Guo, L. Xu, G. Tan, C. Zhang y J. Zhang, “Design, Modeling y Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension”, *Shock Vib.*, vol. 2017, 2017, doi: [10.1155/2017/3186584](https://doi.org/10.1155/2017/3186584).
- [89] M. Peng, X. Guo, J. Zou y C. Zhang, “Simulation Study on Vehicle Road Performance with Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber”, *SAE Tech. Pap.*, 2016, doi: [10.4271/2016-01-1550](https://doi.org/10.4271/2016-01-1550).
- [90] B. Qin, Y. Chen, Z. Chen y L. Zuo, “Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 166, pp. 1-21, 2022, doi: [10.1016/j.ymsp.2021.108456](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108456).
- [91] BioAge Group, “ZF and start-up Levant Power partnering on first fully active, regenerative suspension for automobiles”. GreenCarCongress.com. <https://www.greencarcongress.com/2013/08/20130828-zflevant.html> (acceso jul. 15, 2020).
- [92] M. A. A. Abdelkareem, L. Xu, X. Jing, A. B. M. Eldaly, J. Zou y M. K. A. Ali, “Field measurements of the harvestable power potentiality of an off-road sport-utility vehicle”, *Measurement*, vol. 179, 2021, doi: [10.1016/j.measurement.2021.109381](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109381).
- [93] M. A. A. Abdelkareem et al., “Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 110, pp. 307-332, 2018, doi: [10.1016/j.ymsp.2018.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.03.009).

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).