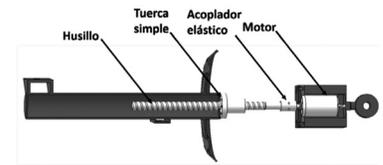


Banco de ensayo para validar el modelo computacional de un cuarto de coche con amortiguador recuperador de energía



Test bench for the validation of a quarter car model fitted with an energy harvesting shock absorber



Lincoln Emilio-Bowen, Jordi Vinolas y José Luis-Olazagoitia

Universidad de Nebrija. DIIA. Dpto de Ingeniería Industrial y Automóvil. Calle Pirineos, 55 - 28040 Madrid. Tfno: +34 914 521100. lbowen@nebrija.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8501> | Recibido: 21/06/2017 • Evaluado: 26/06/2017 • Aceptado: 19/09/2017

ABSTRACT

- The validation of computer models through experiments is essential and is the basis for the credibility of the results obtained from simulations. This paper presents a flexible, low-cost test bench design and a computer model of a quarter car system fitted with a regenerative energy suspension called BS-EHSA (Ball-Screw Energy Harvesting Shock Absorber). A good correlation between experimental results and simulations is obtained. Based on this validated model, a study of the influence of the different BS-EHSA design parameters is carried out in order to obtain optimal values for ride comfort, road handling, energy recovery and energy efficiency. An average power of 15.13 W is attained when the vehicle is driven at 70 Km/h on a road profile ISO 8608 standard class C roughness index.
- **Key Words:** Energy Harvesting Shock Absorber, Suspension, EHSA, Damper, Vehicle.

RESUMEN

La validación de modelos computacionales a través de experimentos es muy importante para dar credibilidad a las simulaciones que se obtienen con dicho modelo. Este artículo presenta tanto el diseño de un banco de ensayo de bajo coste como el modelo computacional del sistema de un cuarto de coche utilizando un amortiguador recuperador de energía llamado: BS-EHSA (*Ball-Screw Energy Harvesting Shock Absorber*).

Los resultados muestran una clara correlación entre los experimentos del banco de ensayo y las simulaciones; además, con el modelo validado, se realiza una sensibilización de los parámetros de diseño del BS-EHSA con el fin de optimizar sus indicadores de confort, adherencia al suelo, recuperación de energía y eficiencia energética. Los resultados de esta optimización muestran que este tipo de amortiguador es capaz de recuperar una potencia media de 15.13W, en una carretera de tipo C y a una velocidad de 70 Km/h.

Palabras Clave: Banco de ensayo, modelo de cuarto de coche, Recuperación de energía en suspensiones, Amortiguamiento, Electromagnetismo.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en los automóviles ha sido un tema recurrente en las últimas décadas, el *Departamento de Energía de Estados Unidos* estimó que de toda la energía química que le in-

roducimos al automóvil solo se emplea entre el 14%-30% para moverlo¹. Cada vez se estudia más los principales focos de disipación [1] para poder reducirla o "reciclarla" con el fin de poder emplearla en otras acciones dentro del mismo vehículo.

Entre las opciones que se han utilizado para "reciclar" la energía de un vehículo se pueden encontrar soluciones como las siguientes: Frenos de recuperación de energía [2], tubos de escape con generación termoeléctrica [3], generación de energía a partir de los gases de combustión interna en el motor [4], generación de energía con materiales piezoeléctricos en las llantas [5], recuperación de energía en las suspensiones [6], etc.

En la recuperación de energía en los amortiguadores de coche se han presentado diversas ideas, ya sea utilizando materiales piezoeléctricos (por ejemplo Xie et al. [7]) o utilizando generadores electromagnéticos lineales (Xuezheng et al. [8], Bodgan Sapinski et al. [9]) o rotacionales. En los generadores eléctricos rotacionales es necesario algún sistema que permita convertir el movimiento de traslación de la suspensión a un movimiento de rotación. Estos mecanismos traslación-rotación pueden ser: Piñón-cremallera (Zhongjie et al. [10]), husillo a bolas (Nicola Amati et al. [11]) y/o transmisión hidráulica (Fang et al. [12]) hydraulic electromagnetic shock absorber (HESA, Galluzzi Renato et al. [13]).

Para el ensayo de todas estas tecnologías debido a la dificultad de poder tomar mediciones en las suspensiones con el coche entero, comúnmente se utiliza como primera aproximación el modelo de cuarto de coche. Éste permite estudiar las características principales que presenta el amortiguador en su conjunto. Las ecuaciones diferenciales que rigen este sistema son muy bien conocidas y de fácil resolución.

En las simulaciones para el estudio del comportamiento dinámico de los mecanismos, aparecen fenómenos no lineales (ej. Fricción, movimientos de inercia, deformaciones elásticas, etc.) de los que a priori es muy difícil obtener sus valores numéricos, pero que pueden alterar el comportamiento del sistema. Es por ello que se intenta, en la medida de lo posible, validar los modelos con experimentos que repliquen tanto las condiciones de contorno como los elementos que intervienen en la simulación. Las validaciones pueden realizarse en bancos de ensayo o en el propio vehículo, de forma embarcada.

Existen en el mercado diversos bancos de ensayo para evaluación de las suspensiones de coches, por ejemplo la empresa MTS

¹ <http://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml>

fabrica máquinas para el ensayo de amortiguadores. Zhongjie [14] emplea la MTS 858 Mini Bronix II para evaluar su amortiguador electromagnético de piñón cremallera. Songye Zhu [15] the research on structural vibration control has mainly focused on 'energy dissipation' strategy using various dampers for hazard mitigation. This paper proposes a novel application of linear motion electromagnetic (EM utiliza también una máquina MTS para validar los modelos eléctricos que tiene de su amortiguador electromagnético lineal. El problema de estas máquinas es su elevado costo, el cual comúnmente ya viene incorporado con el software específico para estas aplicaciones y el hardware.

Por otro lado, muchos autores han diseñado su propio banco de ensayos, ya sea para el estudio del cuarto de coche, medio coche o solo para el ensayo de la suspensión. Lei Zuo [16] diseña su propio banco de ensayo, utilizando un vibrador para simular la reacción de la carretera y con la ayuda del osciloscopio poder observar la respuesta temporal, así mismo lo hizo Bart Gysen [17], solo que en su caso era para las pruebas de un amortiguador electromagnético activo. Bogdan Sapinski et al. [18] fabrica un banco de ensayo que trabaja de forma horizontal para realizar experimentos en un amortiguador magnetorológico para recuperación de energía. Andrea Tonoli et al. [19] valida su modelo de suspensión electromecánica, en un banco de ensayo diseñado para testear a comportamiento dinámicos.

El presente artículo tiene dos objetivos: En primer lugar, el de presentar un innovador diseño de banco de ensayo (de configuración horizontal) para el estudio de suspensiones en cuarto de coche, de bajo coste y flexible para ajustarse a diversos tipo de suspensiones. En segundo lugar, se valida un modelo computacional de un amortiguador electromagnético de husillo a bolas, permitiendo analizar los resultados tanto de potencia disipada/recuperada como de amortiguamiento de vibraciones.

2. BS-EHSA Y MODELO DE CUARTO DE COCHE

El amortiguador recuperador de energía basado en husillo a

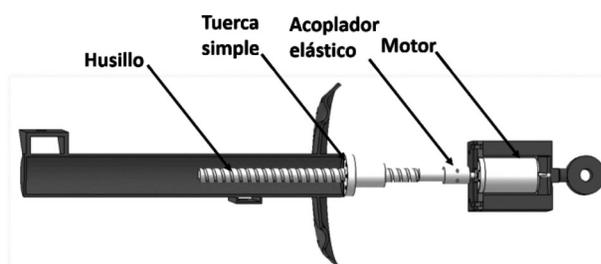


Fig. 1: Modelo CAD de un amortiguador electromagnético con transmisión de husillo a bolas

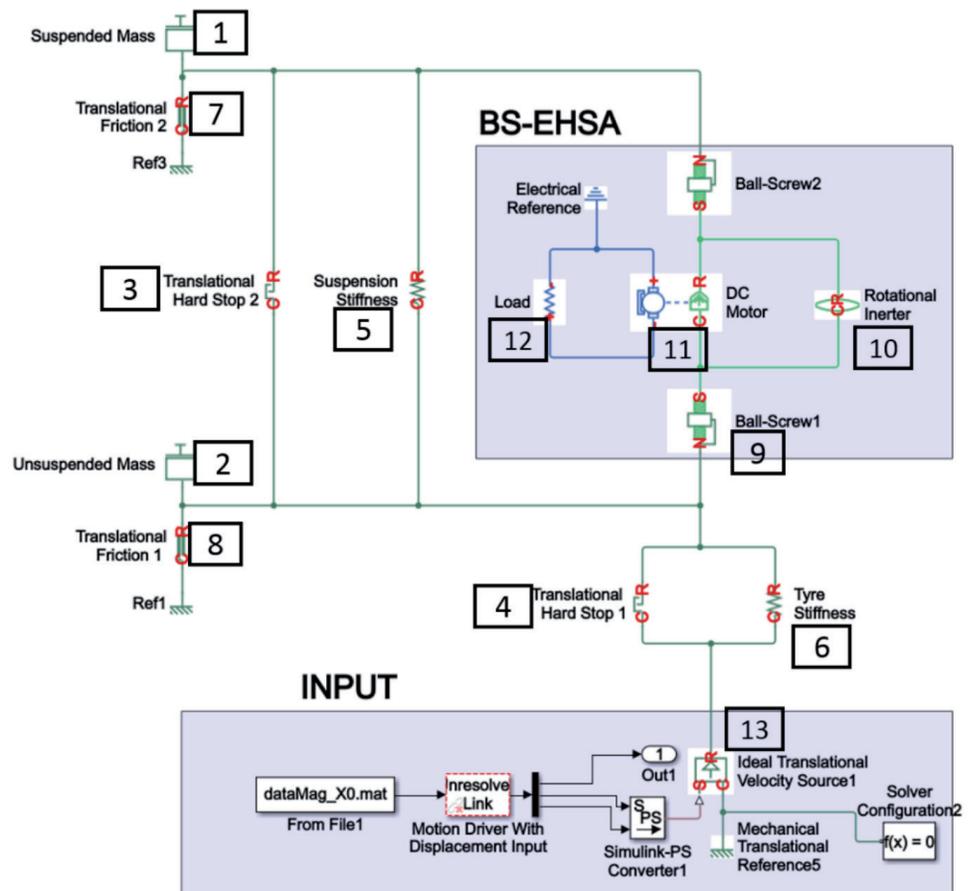


Fig. 2: Modelo de cuarto de coche utilizando un amortiguador electromagnético con husillo a bolas en Simscape/Matlab

bolas (Ball-Screw Energy Harvesting Shock Absorber BS-EHSA), consiste en la utilización de un husillo a bolas para pasar de ese movimiento de traslación existente en los amortiguadores, a un movimiento de rotación. De esta forma, al acoplar un generador en su extremo obtenemos un potencial eléctrico (ver Fig. 1). Este tipo de tecnología ha sido estudiada por múltiples autores, como N. Amatia, A. Tonoli y A. Festini [11] [20], donde se diseñan y modelan este tipo de EHSA haciendo un estudio teórico de los parámetros de diseño para su fabricación. Por otro lado Guoguang Zhang [21] fabrica un BS-EHSA, que no solo trabaja como recuperador de energía sino que también lo emplea como una suspensión activa.

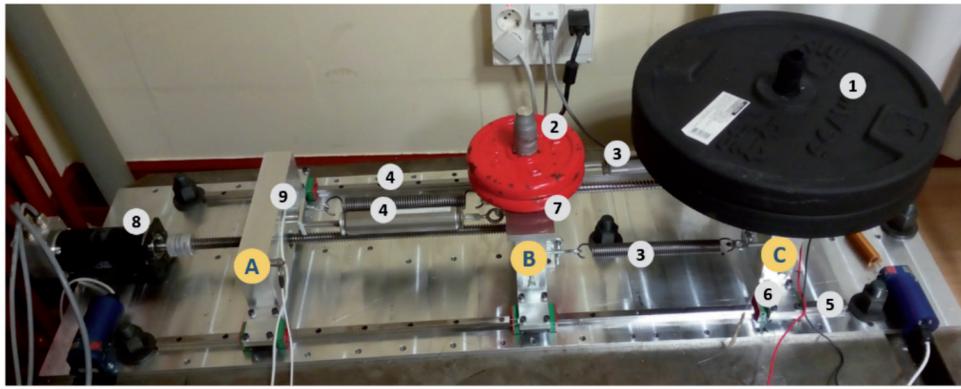
El modelo dinámico equivalente (m_{eq} , c_{eq} y k_{eq}) en el dominio de la frecuencia fue obtenido anteriormente por Zhongjie Li et al. [10], en su caso lo desarrolló utilizando un sistema de transmisión piñón-cremallera, para el caso de transmisión con husillo a bolas, se adapta a:

$$m_{eq} = \frac{J_m + \frac{J_s}{\eta_{bs}}}{\tau^2} \quad (1)$$

$$c_{eq} = \frac{K_t K_{re} R_{tot}}{\tau^2 \eta_{bs} (R_{tot}^2 + L_i^2 \omega^2)} \quad (2)$$

$$k_{eq} = \frac{K_t K_{re} l_i \omega^2}{\tau^2 \eta_{bs} (R_{tot}^2 + L_i^2 \omega^2)} \quad (3)$$

De esta forma se tiene que la m_{eq} , no solamente depende de la inercia del husillo J_s y la del motor J_m , sino también del paso τ con el que se fabrica el husillo. Por otro lado la c_{eq} y k_{eq} , depende de las constantes de par K_t y voltaje K_{re} del generador, al igual que de la resistencia R_{tot} y la inductancia L_i , tanto interna como externa



inductancia interna y sus constantes electromagnéticas. El elemento 12 es la carga eléctrica a la que estará conectado el amortiguador electro-magnético. El elemento 13 representa el desplazamiento de entrada al sistema.

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYO

El banco de ensayo que se describe a continuación representa el comportamiento de un cuarto de coche. Para ello se debe de contar con un mecanismo que tenga dos grados libertad, cada uno con sus respectivas masas, dos guías lineales en paralelo que dirijan el movimiento en los dos sentidos, un sistema de excitación para poder dar la entrada al sistema y sensores para registrar el comportamiento del sistema.

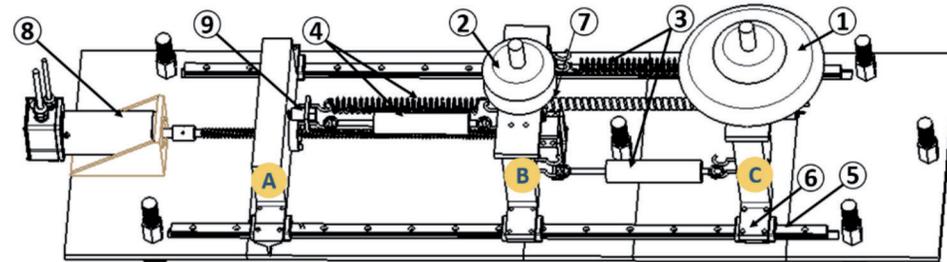


Fig. 3: Abajo: Modelo CAD del banco de ensayo. Arriba: Banco de ensayo real

en el generador, la frecuencia de excitación en el sistema ω , y el paso τ con el que se fabrica el husillo. Es importante recordar que la eficiencia de un husillo η_{bs} viene determinada no solo por el nivel de fricción que presenta, sino también por el diámetro y el paso del husillo.

El modelo de cuarto de coche contiene los principales componentes que intervienen en la dinámica de un coche, que son:

- m_2 : Representa la masa de un cuarto de lo que es la carrocería del coche y todo lo que contiene interiormente (motor, tapizado, etc.).
- m_1 : Representa la masa de las ruedas con todo el sistema que se encuentran acoplados a él (barra estabilizadoras, sistema de frenos, etc.).
- k_1 : Representa la rigidez de la rueda.
- k_2 : Representa la rigidez que se tiene entre la rueda y la carrocería.
- c : Representa la amortiguación entre la masa no suspendida y la masa suspendida.

En este caso en lugar del amortiguador convencional c , se desea colocar un amortiguador electromagnético utilizando la transmisión de husillo a bolas (BS-EHSA), como se muestra en la Fig. 1.

El banco de ensayo fabricado, tiene como objetivo la validación de un modelo computacional propio desarrollado en *Simscape* (de la empresa *Mathworks*). El modelo (ver Fig. 2) coincide con las ecuaciones diferenciales presentes para el modelo de cuarto de coche, incluyendo las ecuaciones presentadas en la sección 2: De amortiguamiento ceq , rigidez keq y masa equivalente meq para el BS-EHSA. Los elementos 1 y 2 representan tanto las masas suspendida como la no suspendida. Los elementos 3 y 4 tienen como finalidad limitar el desplazamiento de los muelles 5 y 6 en extensión y compresión. Los elementos 7 y 8 son las fricciones presentes en el banco de ensayo debido al desplazamiento. Los elementos 9 y 10, tienen que ver con el husillo, el primero permite cambiar el tipo de movimiento (de traslación a rotación o viceversa) en el que se le indica el paso del husillo junto con la eficiencia, el segundo representa el fenómeno conocido como "inertor", que se debe a la inercia tanto del motor como del husillo. El elemento 11 representa al motor DC, en el que viene incluido tanto su resistencia e

El banco de ensayo, aparte de permitir validar el modelo, permite estudiar el comportamiento de un amortiguador BS-EHSA. Este banco de ensayo (ver Fig. 3) incluye los siguientes elementos:

1. Masa suspendida (m_2)
2. Masa no suspendida (m_1)
3. Muelles de compresión y tracción entre la masa suspendida y la no suspendida (k_2)
4. Muelles de compresión y tracción entre la entrada y la masa no suspendida (k_1)
5. Guías lineales
6. Patines de bolas
7. Husillo a bolas
8. Motor de corriente continua que se utiliza como actuador del sistema
9. Célula de carga que monitorea la fuerza de entrada al sistema.

El funcionamiento del banco de ensayo para realizar los experimentos y la validación del modelo computacional es el siguiente:

1. Con ayuda de un motor de corriente continua que tiene acoplado a su eje un husillo trapezoidal, se ejerce un par a una rosca cilíndrica que está fija dentro de la pieza "A" de la Fig. 3.
2. La pieza "A" está apoyada sobre los patines de las guías lineales, teniendo únicamente un movimiento de traslación.
3. Los datos de la fuerza de entrada se adquieren por medio de una célula de carga que está roscada por un extremo a la pieza "A" y por el otro extremo a una placa que a través de dos ganchos se sujetan dos muelles (uno de compresión y otro de tracción). Con esto se garantiza que la fuerza que se le inserta al sistema de cuarto de coche sea adquirido a través de la célula de carga o sensor.
4. Los dos muelles transmiten la fuerza de entrada a la pieza "B" de la Fig. 3. La pieza "B" se asienta sobre los patines de la guía lineales teniendo un movimiento únicamente de traslación, en el que se apoya la masa no suspendida.
5. La pieza "B" tiene instalada una tuerca en el que se inserta un husillo, de tal forma que el movimiento de traslación de la pieza le transmite una fuerza a la tuerca que esta a su vez le transmite un par al husillo, haciéndolo girar sobre su

propio eje, que terminará moviendo el eje de un generador. Todo este sistema (tuerca, husillo, motor) representará un amortiguador electromagnético BS-EHSA. Así mismo, esta pieza tiene enganchado un par de muelles a ambos lados que estarán sujetos a la vez con la masa suspendida.

6. La fuerza producida tanto de los muelles como del husillo hacen mover a la pieza "C" de la Fig. 3 sobre la que se le apoya la masa suspendida.
7. Con ayuda de tres acelerómetros, situados en las piezas "A", "B" y "C", se obtienen los desplazamientos de la entrada del sistema, de la masa no suspendida y de la masa suspendida.
8. El desplazamiento de entrada obtenido por el acelerómetro se utiliza como entrada en el modelo de Simscape (Fig. 2). Se comparan los resultados de simulación de la fuerza de entrada, los desplazamientos y el voltaje en los bornes del generador con los experimentales.

3.1. ACTUADOR Y SENSORES DEL SISTEMA

Para la entrada al sistema se ha optado por utilizar un motor maxon EC-60, que se maneja con una controladora EPOS2 70/10. Para el control de giro y velocidad del motor, se usa un CompactRio NI cdaq-9178 con el módulo NI 9401, de la empresa National Instrument, el cual permite enviar señales digitales TTL, utilizando el software de Labview.

Los sensores que se utilizan son: Una célula de carga, XFTC300, que se emplea para registrar la fuerza que se introduce al sistema, tres acelerómetros, uno para la entrada del sistema, otro para la masa no suspendida y el último para la masa suspendida. Para obtener el desplazamiento a partir de la aceleración, se utilizará el método descrito por José Ribeiro et al [22], que ha sido validado con sensores de hilo POSIWIRE, coincidiendo la magnitudes de los acelerómetros + método FFT-DDI con los valores del sensor de hilo.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

En esta sección se muestran los resultados con los que se valida el modelo computacional desarrollado en Simscape comparándolos con los resultados experimentales, tanto del cuarto de coche como del modelo BS-EHSA.

A partir del instrumental descrito en las secciones anteriores, se procede a realizar tres tipos de experimentos: Dos experimentos

son para la validación del modelo BS-EHSA y el tercero es para el modelo de cuarto de coche. El primer experimento consiste en darle un movimiento oscilatorio en la entrada del sistema de dos grados de libertad (ver Fig. 3), y tomar los valores de desplazamiento de la masa suspendida, la fuerza de entrada y la potencia generada, los resultados se presentan en la sección 4.1. El segundo y tercer experimento consiste a sí mismo en introducir una entrada sinusoidal, pero esta vez a un sistema de un grado de libertad, teniendo como resultados el desplazamiento de la masa, la fuerza de entrada y la potencia generada, los resultados se presentan en la sección 4.2. La diferencia entre el segundo y el tercer experimento son las masas que se utilizan y la resistencia que se conecta al generador.

Para cada uno de los experimentos, se mide la proximidad de los resultados experimentales con los de la simulación computacional a través de Δ_{et} (ecuación 4), que representa la distancia cuadrática media entre los resultados experimentales y los resultados de simulación. Esto permite obtener un valor escalar normalizado que da la suma cuadrática de diferencia entre los N datos experimentales (y_{exp}) y los de simulación (y_{sim}).

$$\|\Delta_{et}\| = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_n^{exp} - y_n^{sim}|^2}}{\max(y^{sim}) - \min(y^{sim})} \quad (4)$$

4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CUARTO DE COCHE

Los resultados de comparación entre la simulación y los ensayos experimentales se observan en la Fig. 4. El primer gráfico (Fig. 4 arriba-izquierda) muestra el valor de la fuerza experimental, captada por la célula de carga, y el valor de las simulaciones. El segundo gráfico (Fig. 4 arriba-derecha) nos indica el desplazamiento de la masa suspendida, mientras que el tercer gráfico (Fig. 4 abajo-izquierda) muestra el valor de la potencia que se obtiene en los bornes de la resistencia eléctrica conectada. Los mismos resultados se repiten para un sistema de 1 grado de libertad (ver Fig. 5 y Fig. 6). Para este experimento se ha utilizado 40 Kg de masa suspendida y 10 Kg de masa no suspendida.

En los resultados, podemos observar en primer lugar la fuerza recogida por la célula de carga. Tal como está construido el banco de ensayo, esta célula de carga recoge la fuerza a la que está

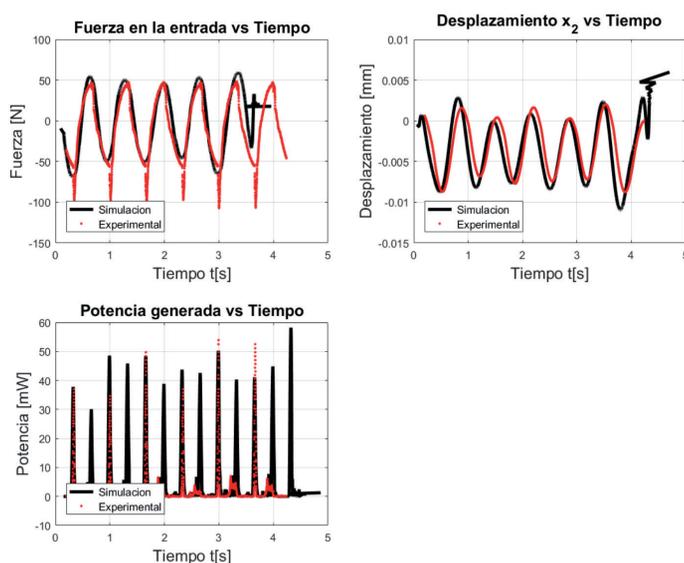


Fig. 4: Resultados de fuerza, desplazamiento y potencia, tanto experimental como de la simulación computacional del sistema de dos grados de libertad, sometido a una entrada oscilatoria

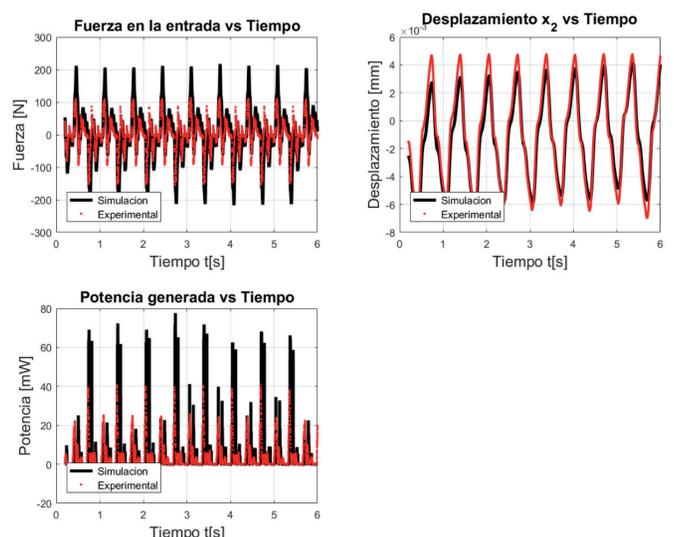


Fig. 5: Resultados de fuerza, desplazamiento y potencia, tanto experimental como de la simulación computacional del sistema de un grado de libertad, para masa suspendida de 20 Kg y resistencia eléctrica de 15 ohm, sometido a una entrada oscilatoria

sometida el primer par de muelles. Como el desplazamiento de entrada es el mismo tanto para la simulación como para el experimento, la fuerza recogida por el sensor nos puede dar una idea del desplazamiento de la masa no suspendida. En la Fig. 4 se puede observar que la comparación de resultados entre la simulación y los experimentos son aceptables, teniendo un $\Delta t = 0.45$ hay que recordar que al tener dos muelles, uno de tracción y otro de compresión, la linealidad de k_1 se ve afectada, sobre todo al trabajar en los límites de elongación o compresión.

La segunda gráfica muestra el desplazamiento de la masa suspendida x_2 , este resultado se ve afectado por todo los elementos de fricción que participan en el experimento, sin embargo sus resultados están acorde a las simulaciones, teniendo un $\Delta t = 0.11$ (ver el gráfico arriba derecha de la Fig. 4). Y por último la tercera gráfica muestra la potencia recuperada del generador teniendo un $\Delta t = 0.26$ (ver el gráfico inferior izquierda de la Fig. 4).

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO BS-EHSA

Para este experimento se ha modificado el banco de ensayo para únicamente trabajar con un solo grado de libertad (ver Fig. 14). Se hicieron dos pruebas, cambiando tanto la masa como la resistencia eléctrica conectada al generador. Los resultados de la Fig. 5 muestra los resultados del primer ensayo utilizando una masa de 20 Kg y una resistencia eléctrica de 15 Ω .

En los resultados mostrados anteriormente, en primer lugar podemos observar que la fuerza recogida por la célula de carga se ajusta muy bien a los valores de nos da la simulación, teniendo un $\Delta t = 0.10$. En la gráfica del desplazamiento de la masa se tiene un $\Delta t = 0.09$. En la gráfica de la potencia recuperada el desfase entre la señal de la simulación como la experimental se podría situar en torno 0.1s. Sin embargo, se tiene un $\Delta t = 0.15$.

En la Fig. 6 se muestra los mismos resultados de la segunda prueba utilizando, en este caso los valores de masa de 40 Kg y resistencia eléctrica de 1 Ω .

En este último experimento, para los resultados de fuerza, se tiene un $\Delta t = 0.14$. Para los resultados de desplazamiento, se tiene un $\Delta t = 0.12$. Y para los resultados de potencia, se tiene un $\Delta t = 0.15$.

Como se pueden observar de los resultados, tanto de la Fig. 5 y la Fig. 6, el modelo computacional del BS-EHSA desarrollado

en Simscape, se comporta de forma aceptable con respecto a los resultados mostrados en los experimentos.

5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO COMPUTACIONAL

Una vez que el modelo de BS-EHSA se ha validado, se puede utilizar el modelo para hacer un análisis de sensibilidad, que nos permita observar la respuesta del sistema cambiando los parámetros de diseño. En este apartado se analizará el comportamiento que tiene esta clase de amortiguador, al cambiar dos parámetros de su diseño: el paso del husillo τ y la carga externa que se conecta al generador Re . Para esto se utilizarán como resultado, cuatro indicadores que nos pueden dar una visión sobre la dinámica que tendríamos en el coche y la energía que recuperamos. Para los siguientes ensayos, no se ha tomado en cuenta los parámetros de fricción.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se utilizará el mismo modelo que se presentó en la sección 2. Sin embargo, se utilizarán los valores de un coche estándar y como entrada tendremos una señal sinusoidal de 20 mm y 5 Hz.

El primer indicador será el valor medio de la potencia recuperada P_g , debido a que una de las funciones de este tipo de tecnología es "recuperar" energía de las suspensiones del vehículo.

El segundo indicador será la eficiencia del BS-EHSA para recuperar energía, que tiene que ver con la potencia que se "recupera" con respecto a la potencia que se utiliza para amortiguar. Este indicador será la razón entre el valor medio de la potencia recuperada P_g y la potencia disipada P_d :

$$\eta_g = \frac{rms(P_g)}{rms(P_d)} \tag{5}$$

El tercer indicador será el valor medio del parámetro de confort aw , rms . Una de las funciones de los amortiguadores en los vehículos es el proporcionar confort en la cabina de los pasajeros. Este parámetro se puede ver reflejado con la aceleración media de la masa suspendida [23]. Sin embargo, el ser humano es más sensible a diversas frecuencias de excitación. Por eso se ha utilizado el filtro diseñado por L. Zuo et al. [24] que prioriza esas frecuencias:

$$H_{2631} = \frac{80.03s^2 + 989s + 0.02108}{s^3 + 78.9s^2 + 2142s + 5614} \tag{6}$$

El cuarto indicador tiene que ver con otra función que cumple los amortiguadores, que consiste en aumentar la adherencia de la rueda con la carretera. Este indicador representa la razón entre la fuerza por la deflexión de la rueda y la fuerza estática del vehículo.

$$\eta_{rh} = \frac{k_1(x_1 - x_0)}{(m_s + m_u)g} \tag{7}$$

En la Fig. 7, se muestran los resultados del análisis de sensibilidad con respecto al paso del husillo τ , el cual es un parámetro que tiene cierta flexibilidad al momento de fabricar el husillo. Se muestra la respuesta de los cuatro indicadores: Potencia recuperada P_g , eficiencia energética η_g , confort aw , rms y "road handling" η_{rh} , para diversos valores del paso del husillo τ mm/rev. Para una entrada de 20 mm de amplitud y frecuencia de 5 Hz. Se tiene que:

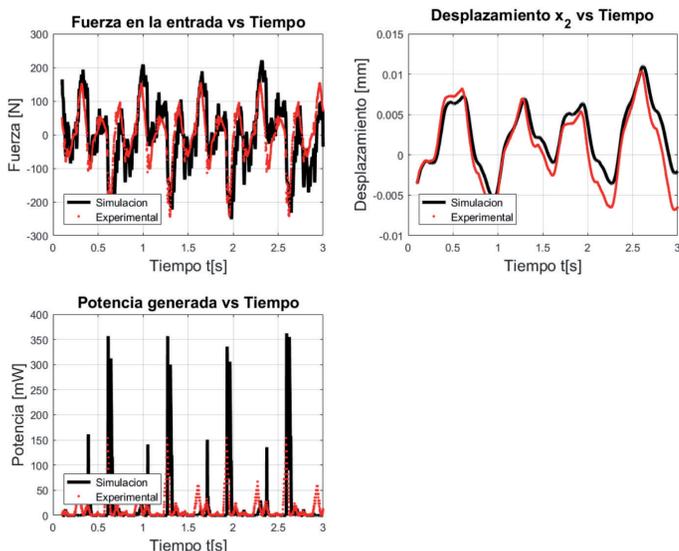


Fig. 6: Resultados de fuerza, desplazamiento y potencia, tanto experimental como de la simulación computacional del sistema de un grado de libertad, para masa suspendida de 40 Kg y resistencia eléctrica de 1 ohm, sometido a una entrada oscilatoria

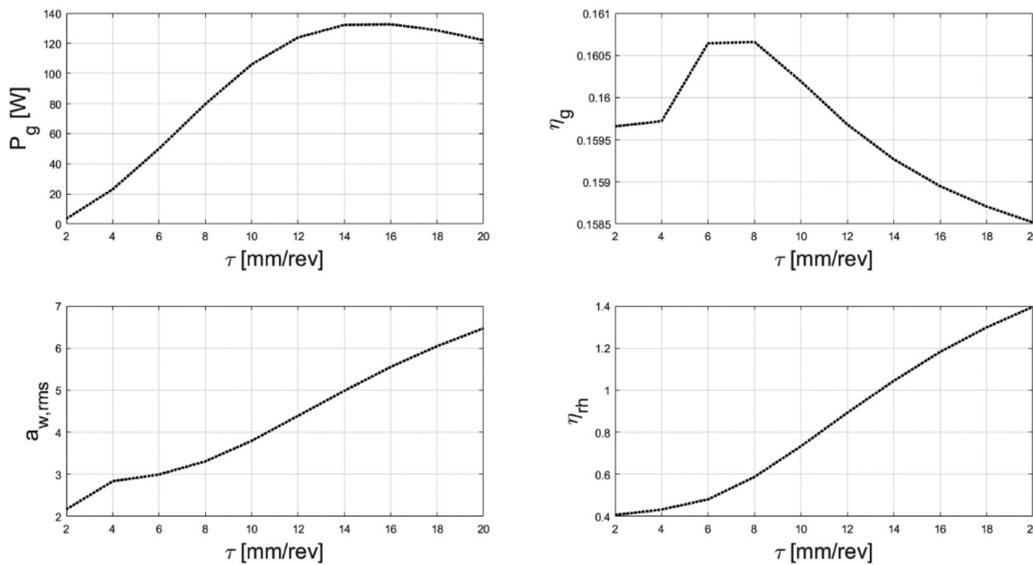


Fig. 7: Resultados de análisis de sensibilidad con respecto al paso del husillo t [mm/rev]

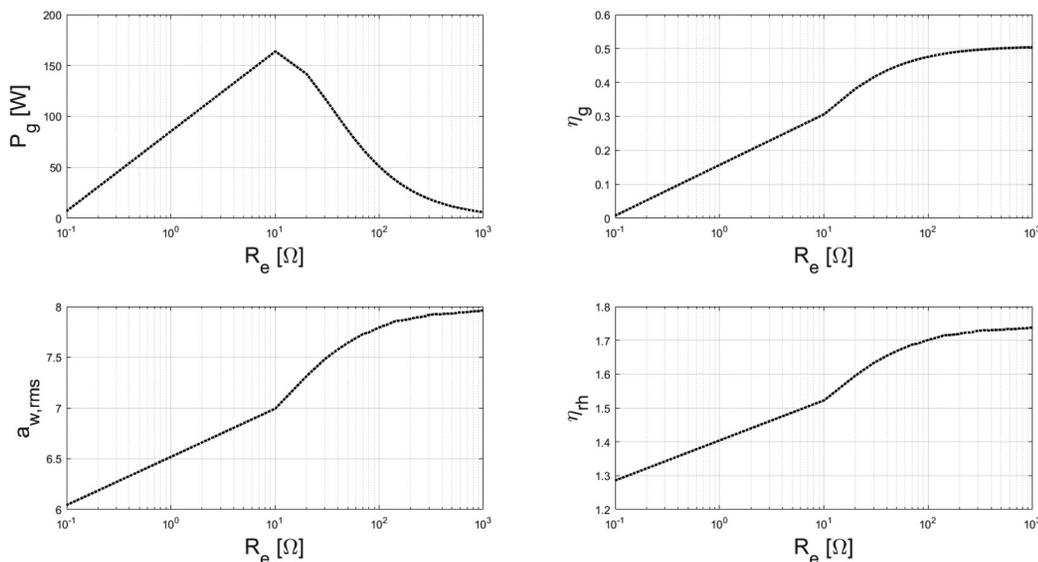


Fig. 8: Resultados de análisis de sensibilidad con respecto a la resistencia conectada al generador R_e [Ω]

- Al aumentar el paso del husillo aumenta la potencia generada, teniendo un máximo en los 16mm/rev.
- El nivel de confort disminuye cuanto mayor sea el paso del husillo, debido a que la magnitud de la aceleración media aumenta.
- La eficiencia energética tiene un máximo entre los de 6-8 mm/rev.
- La adherencia del coche al pavimento empeora cuanto mayor sea el paso del husillo, debido a que la diferencia media entre el desplazamiento de entrada (irregularidades de la carretera) y el desplazamiento de la rueda aumenta.

En la Fig. 8, se muestran los resultados de los cuatro indicadores pero está vez variando la carga eléctrica conectada al generador. Para este análisis se tiene que:

- El BS-EHSA presenta una mayor cantidad de potencia generada teniendo una carga cercana a los 10Ω.
- El nivel de confort disminuye cuanto mayor sea la carga que se le conecta al generador.
- La eficiencia energética aumenta a mayor carga, teniendo un límite cercano al 50%.

- La adherencia del coche al pavimento empeora a mayor carga conectada.

Priorizando únicamente la potencia que se puede "recuperar" con este tipo de tecnología, $\tau = 16$ mm/rev y $R_e = 10\Omega$, la máxima cantidad de potencia media recuperada en un solo amortiguador, conduciendo en una carretera regular a 70Km/h, es de 15.13W y picos de 80W. Esta potencia eléctrica que se genera se puede acondicionar para poder almacenarla en la batería del propio coche.

Para el análisis de sensibilidad llevado a cabo en esta sección se han utilizado los valores iniciales del BS-EHSA variando únicamente los parámetros del paso del husillo y la resistencia eléctrica. Sin embargo, para cada valor de la influencia de en los cuatros indicadores varía.

Si se aumenta la velocidad del vehículo, por ejemplo a 80 Km/h la potencia generada aumenta a 17.27W, mientras que si se mejora el índice de rugosidad en la carretera, por ejemplo utilizando una carretera de clasificación B, la potencia generada disminuye 4.32W. Este tipo

de tecnologías mejoran la autonomía de los coches eléctricos y disminuyen la cantidad de consumo de combustible fósil en los coches híbridos.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño de un banco de ensayo horizontal para la validación de modelos de cuarto de coche utilizando en este caso un amortiguador BS-EHSA (*Ball-Screw Energy Harvesting Shock Absorber*). Se muestran tanto las pruebas experimentales como sus simulaciones. La mayor dificultad de ajuste entre estas dos reside en las incertidumbres que se tiene por las fricciones de las partes móviles. Sin embargo, las pruebas de validación muestran resultados aceptables, obteniendo una clara correlación entre los experimentos y el modelo computacional. Tal como se ha visto, el artículo presenta tanto la validación del sistema de un grado de libertad (masa en serie con el amortiguador y el muelle), como con dos grados de libertad.

La novedad del sistema reside en su bajo coste, comparándolo con máquinas de ensayo diseñado por otros autores [25] o pro-

ductos comerciales como la de MTS, y en la flexibilidad que tiene para ajustarse a otros tipos de suspensiones. Además el presente artículo muestra el modelo computacional creado en *Simscape* del sistema de cuarto de coche utilizando el BS-EHSA. Mostrando, con el modelo ya validado, un estudio de sensibilidad de sus parámetros y el potencial de energía que se puede recuperar utilizando esta clase suspensión.

Existen diversas soluciones de diseño de banco de ensayos para suspensiones, en nuestro caso se ha optado por configurar el banco de ensayo de forma horizontal para poder obtener una mayor estabilidad al momento de excitar el sistema. Sin embargo al situarlo de forma horizontal se han presentado problemas con la fricción, sobre todo con respecto a la fricción de coulomb, la cual aumenta a medida que aumenta el peso que le añadimos. Para las simulaciones presentadas en este artículo los valores de fricción se han obtenido de forma empírica.

El amortiguador BS-EHSA tiene la capacidad de poder compactar su diseño a las dimensiones de un amortiguador convencional, debido a la poca cantidad de partes mecánicas que intervienen. Sin embargo, se ha podido observar de los experimentos que las tolerancias tanto dimensionales como geométricas, juegan un papel importante, tanto en la fricción como en las holguras que existe entre sus partes mecánicas, afectando al final en la eficiencia del sistema.

Se han realizado simulaciones del potencial de energía que se puede recuperar en el BS-EHSA optimizando sus parámetros, teniendo en cuenta indicadores de: confort, adherencia al suelo, recuperación de energía y eficiencia energética, dando como resultado una generación media de potencia de 15.13W, a una velocidad de 70Km/h con un tipo de carretera clasificación C, según la norma ISO 8608:1995.

Este tipo de tecnologías pueden ser utilizadas para mejorar la autonomía de los coches eléctricos o disminuir la cantidad de consumo de combustible fósil en los coches híbridos.

Como futuras líneas de investigación se propone la optimización de este tipo de tecnología con algoritmos multi-objetivos como pueden ser los algoritmos genéticos. Además, se espera la construcción de un primer prototipo del BS-EHSA para su instalación en un coche real.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 82–102, 2013.
- [2] L. Li, Y. Zhang, C. Yang, B. Yan, and C. Marina Martinez, "Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus," *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 299–314, Mar. 2016.
- [3] X. Liu, C. Li, Y. D. Deng, and C. Q. Su, "An energy-harvesting system using thermoelectric power generation for automotive application," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 67, pp. 510–516, 2015.
- [4] R. Saidur, M. Rezaei, W. K. Muzammil, M. H. Hassan, S. Paria, and M. Hasanuzzaman, "Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5649–5659, 2012.
- [5] J. Lee and B. Choi, "Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 32–38, 2014.
- [6] P. Můčka, "Energy-harvesting potential of automobile suspension," *Vehicle System Dynamics*, vol. 54, no. 12, pp. 1651–1670, 2016.
- [7] X. D. Xie and Q. Wang, "Energy harvesting from a vehicle suspension system," *Energy*, vol. 86, pp. 385–392, 2015.
- [8] X. Jiang, Y. Li, and L. Jianchun, "Design and modelling of a novel linear

electromagnetic vibration energy harvester," *International Journal of Applied electromagnetics and mechanics*, vol. 46, pp. 165–183, 2014.

- [9] B. Sapiński, "Energy-harvesting linear MR damper: prototyping and testing," *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 3, p. 035021, 2014.
- [10] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin, and Y. Qin, "Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 1065–1074, Mar. 2013.
- [11] N. Amati, A. Festini, and A. Tonoli, "Design of electromagnetic shock absorbers for automotive suspensions," *Vehicle System Dynamics*, vol. 49, no. 12, pp. 1913–1928, 2011.
- [12] Z. Fang, X. Guo, L. Xu, and H. Zhang, "Experimental Study of Damping and Energy Regeneration Characteristics of a Hydraulic Electromagnetic Shock Absorber," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, pp. 943528–943528, May 2013.
- [13] R. Galluzzi, A. Tonoli, N. Amati, G. Curcuruto, P. Torino, P. Conti, G. Greco, A. Nepote, and M. Marelli, "Regenerative Shock Absorbers and the Role of the Motion Rectifier," *SAE International*, 2016.
- [14] Z. Li, L. Zuo, J. Kuang, and G. Luhrs, "Energy-Harvesting Shock Absorber with a Mechanical Motion Rectifier," *Smart Materials and Structures*, pp. 1–15, 2012.
- [15] S. Zhu, W. A. Shen, and Y. L. Xu, "Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing," *Engineering Structures*, vol. 34, pp. 198–212, 2012.
- [16] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, and Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions," *Smart Materials and Structures*, vol. 19, no. 4, p. 045003, 2010.
- [17] B. L. J. Gysen, S. Member, J. L. G. Janssen, S. Member, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, and S. Member, "Design Aspects of an Active Electromagnetic Suspension System for Automotive Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1589–1597, 2009.
- [18] B. Sapiński, M. Rosół, and M. Węgrzynowski, "Investigation of an energy harvesting MR damper in a vibration control system," *Smart Materials and Structures*, vol. 25, no. 12, p. 125017, 2016.
- [19] A. Tonoli, N. Amati, J. G. Detoni, R. Galluzzi, and E. Gasparin, "Modelling and validation of electromechanical shock absorbers," *Vehicle System Dynamics*, vol. 51, no. 8, pp. 1186–1199, 2013.
- [20] A. Canova, F. Cavalli, S. Carabelli, A. Festini, A. Tonoli, and G. Caviasso, "Electromagnetic shock absorbers for automotive suspensions: Electromechanical design," *Proceedings of ESDA*, 2006.
- [21] G. Zhang, J. Cao, and F. Yu, "Design of active and energy-regenerative controllers for DC-motor-based suspension," *Mechatronics*, vol. 22, no. 8, pp. 1124–1134, 2012.
- [22] J. G. T. Ribeiro, J. T. P. de Castro, and J. L. F. Freire, "Using the FFT-DDI method to measure displacements with piezoelectric, resistive and ICP accelerometers," *CiteSeerX Scientific Literature Digital Library and Search Engine*, 2003.
- [23] International Organization for Standardization, "ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock—Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration—Part 1: General Requirements," 1997.
- [24] L. Zuo and S. A. Nayfeh, "Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 265, no. 2, pp. 459–465, 2003.
- [25] J. I. Szombach, "Prototipos Prototipos Maquina para ensayo de amortiguadores convencionales," no. August, 2015.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen todo el apoyo financiero del proyecto nacional POWER Ref. ENE2014-57043-R, proyecto financiado por el Ministerio Español de Competitividad y Economía, en el que actualmente la Universidad de Nebrija se encuentra trabajando junto con la Universidad de Castilla La Mancha y la Universidad de Jaén.