

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA
MOTOCICLETA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

INGENIERO 3296

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Autor: José Luis Cuervo López-Mora

Director: Juan de Norberto Moríñigo

Madrid
Agosto 2016

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

ÍNDICE

Capítulo 1.- Introducción y planteamiento del proyecto	1
Capítulo 2.- Descripción de las tecnologías (estado de la técnica)	1
Capítulo 3.- Descripción del modelo desarrollado	1
Capítulo 4.- Análisis de resultados	1
Capítulo 5.- Conclusiones y viabilidad	1
Capítulo 6.- Bibliografía	1

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Capítulo 1.- Introducción y planteamiento del proyecto

Introducción

Muchos hemos oído hablar de los coches híbridos, los cuales gracias a su funcionamiento obtienen una ventaja de consumo y ahorran contaminación para el medioambiente. Esto se ha logrado economizando el uso que damos a la energía empleada para desplazarnos. Así, con el fin de ahorrar energía y recursos del medio ambiente además de dinero a los usuarios, los vehículos utilizan motores híbridos, reciclan energía que se perdería en la frenada con dispositivos de regeneración de frenada, y de esta forma parte de la energía es recuperada para ser almacenada en la batería del vehículo, mejorando su eficiencia.

En esta línea de mejorar el uso de la energía para favorecer nuestro bolsillo tanto como el medio ambiente, vamos a continuar recogiendo energía de más lugares donde se pueda hacer, en este caso, ¡los amortiguadores del vehículo!

Cada vez que el que el vehículo baja y sube debido a las frenadas, las irregularidades de la calzada y los badenes, los amortiguadores de un vehículo se desplazan, y realizan un trabajo donde se disipa energía de la cantidad de movimiento del vehículo, para el confort del pasajero además de mejorar su seguridad y estabilidad.

Objetivo

Nuestro objetivo, igual que actualmente ya se aprovecha la energía en las ruedas al frenar convirtiéndola en energía eléctrica, va a ser el de convertir el movimiento lineal disipado en los amortiguadores en energía eléctrica cuando éstos realizan su trabajo.

Esta meta, tras un tiempo de reflexión, hemos pensado que se podría realizar a través de inducción eléctrica o bien mediante una turbina accionada por el desplazamiento del líquido contenido en el amortiguador.

La idoneidad de realizar este proyecto radica en que esta aplicación no está disponible todavía a nivel comercial. Además hay que estudiar su viabilidad.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Capítulo 2.- Descripción de las tecnologías (estado de la técnica)

Estado de la técnica

Tras revisar el desarrollo reciente de este proyecto en internet, he comprobado que, actualmente, existen varios equipos que han abordado este proyecto obteniendo resultados:

En primer lugar, la empresa tecnológica ZF pretende poner en el mercado la suspensión activa con capacidad regenerativa de energía para automóviles. Ha establecido un acuerdo de colaboración con Levant Power Corporation para el desarrollo de esta innovación y su comercialización, llamando al dispositivo “Genshock”.

- Referencia 1. -

En segundo lugar podemos ver aquí la descripción de este mismo proyecto realizado por el MIT en vehículos diferentes, encontrando su óptimo en los más pesados, con un consumo eléctrico alto a ser posible, como por ejemplo los camiones frigoríficos, recuperando en carretera una media de unos 6KW de potencia que se podrían emplear para alimentar el frigorífico.

– Referencia 2. -

En tercer lugar hemos revisado una página que trata los distintos sistemas de Recuperación Energética para automóviles, donde discuten por encima de nuestro proyecto en el punto 2.2 y dicen: “permite reducciones de consumo que se encuentran, en prototipos, entre el 2% y el 10%, en función del estado de la vía. Ninguno de estos dos sistemas de suspensión regenerativa está hoy en día en uso, pero no deberían tardar en llegar cuando las necesidades de maximizar la eficiencia de los vehículos sean mayores.”

– Referencia 3. -

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

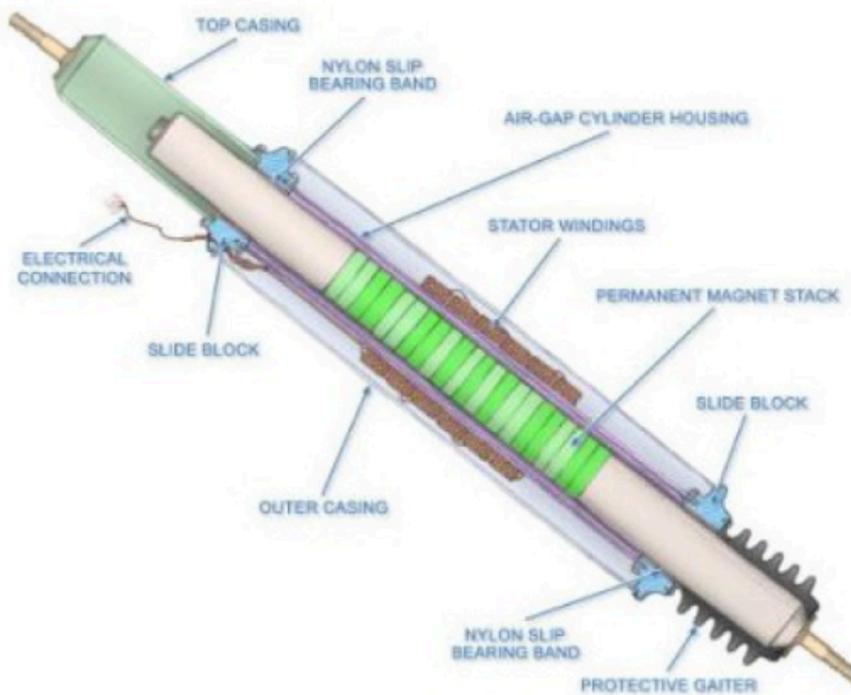


Figura 1. Sistema de regeneración por inducción magnética en un amortiguador. - Referencia 3. -

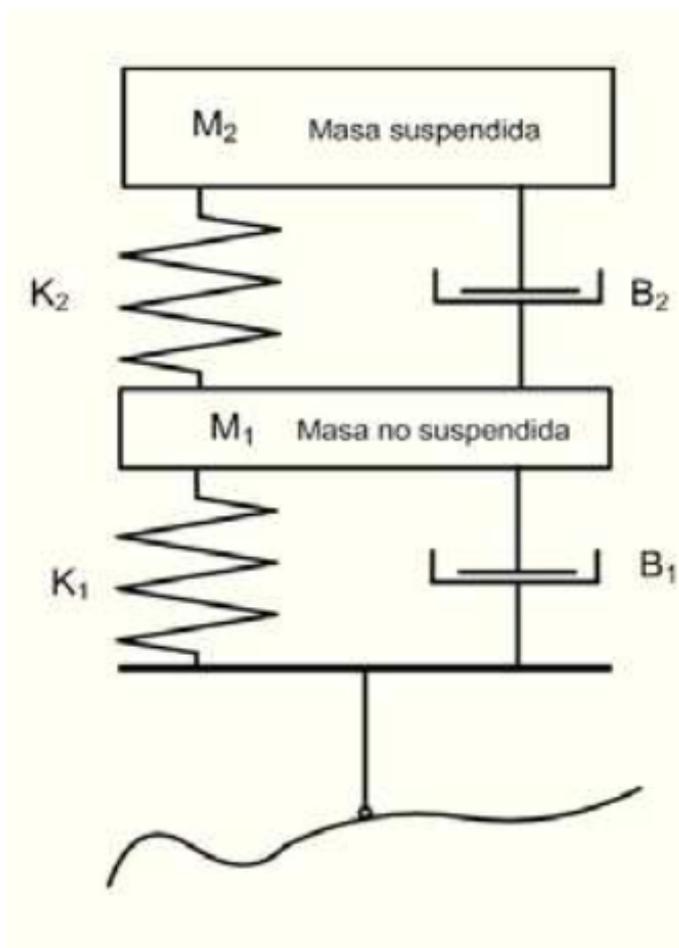
Motivación

Como hemos mencionado antes, nuestra justificación para realizar este proyecto es que existe la posibilidad de ahorrar dinero y contaminación con éste dispositivo a través del reciclaje de energía, en torno a un 2-10% en automóviles. Por otra parte es muy importante que este dispositivo aún no existe a nivel comercial. – Referencia 3. – La justificación de este proyecto es que hace posible el ahorro de energía, dinero y contaminación al medio ambiente.

Capítulo 3.- Descripción del modelo desarrollado

Metodología

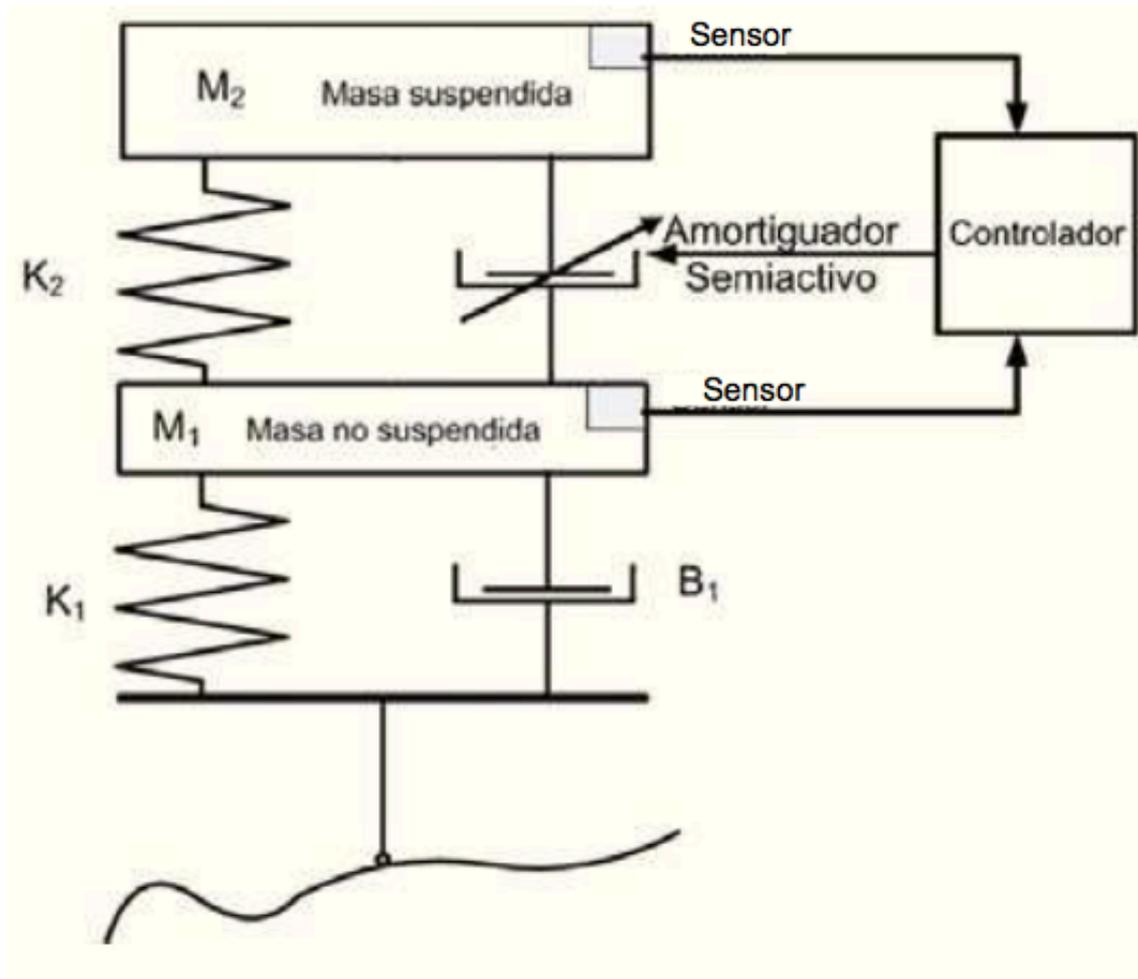
Tras haber estudiado el estado de la cuestión durante un par de meses, he buscado información sobre amortiguadores: existen hidráulico, monotubo, magnético, reológico y de caídas. –Referencia 4. - Tras barajar los tipos de amortiguador que hay y como se les podría añadir diferentes formas de regeneración de energía a cada uno, las opciones descubiertas como las más interesantes me han parecido el magnético(cuando hablamos de suspensión electromagnética quiere decir suspensión con motores activa o semiactiva, no que regenere energía) y el monotubo(hidráulico con dos cámaras, de aceite y gas). Sin duda respectivamente los abordaría por inducción magnética la primera opción y con la conversión de momento cinético de un fluido movido por el amortiguador en una turbina en la segunda opción. El método eléctrico era más cercano a mi y presentía que tendría mejor rendimiento. Procedí a investigar sobre estas dos opciones.



(a) La suspensión pasiva

Figura 2.a. Suspensión pasiva, un amortiguador normal. La masa M_1 es la rueda. - Referencia 13.-

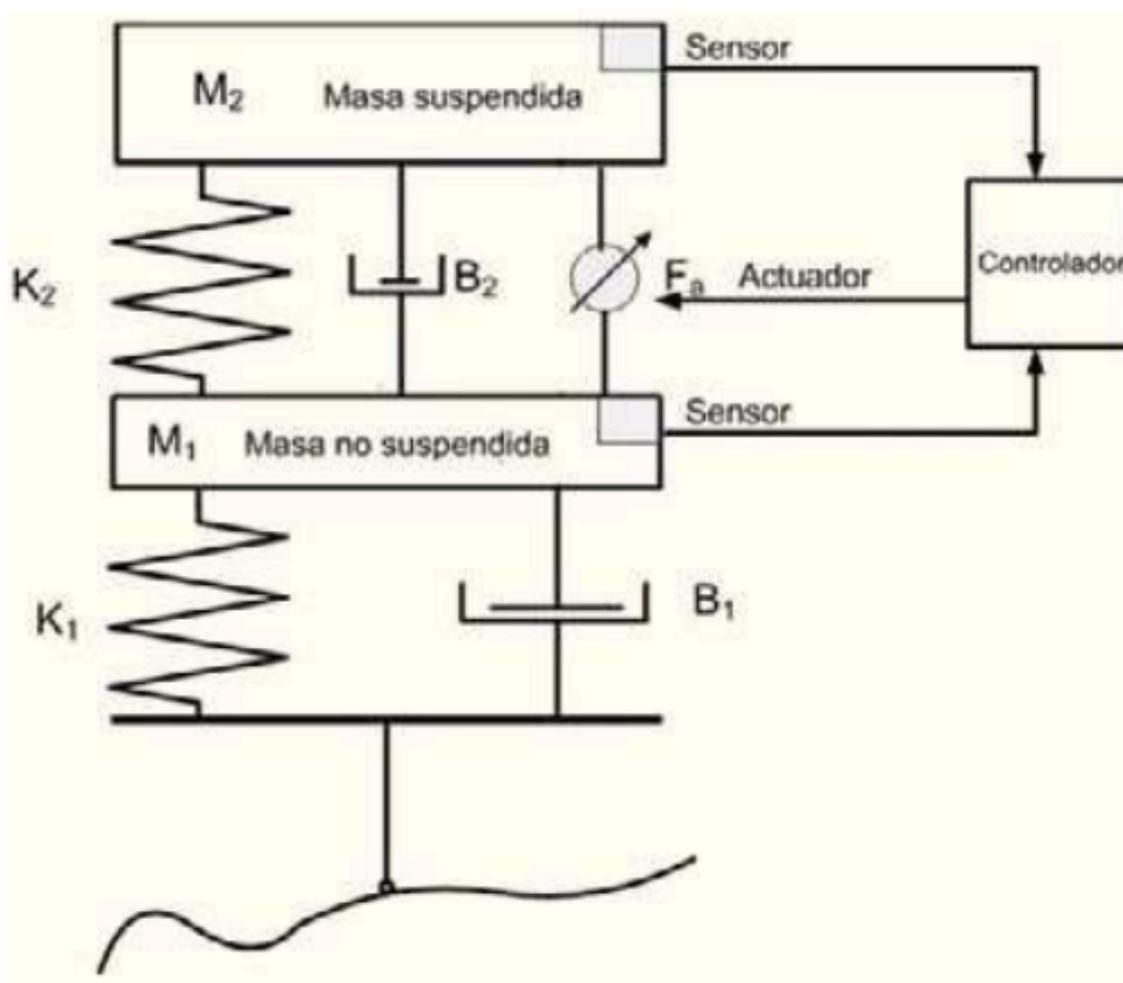
SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA



(c) La suspensión semiactiva

Figura 2.b Suspensión semiactiva, el coeficiente de amortiguamiento es controlado. – Referencia 13.-

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA



(b) La suspensión activa

Figura 2.c Suspensión activa, con un motor controlado introducimos la fuerza que deseamos según un algoritmo entre la rueda (M_1) y el cuerpo del vehículo (M_2) a cada instante de tiempo. -Referencia 13.-

Ahora vamos a plantear la opción del amortiguador monotubo. El cual se plantea con el método de una turbina: recabé más información, y encontré el dispositivo "HybridAir" en coches del grupo PSA, -Referencia 3.- (Apartado 1.2), este dispositivo lo que hace es comprimir aire tomando energía para ello de las ruedas en la frenada, convirtiendo la energía cinética del vehículo en aire comprimido. Luego, a la hora de acelerar, basta con invertir el proceso, empleando el aire comprimido para mover una turbina y dirigir esa energía a las ruedas, desde donde antes había sido almacenada. De cara a introducir este dispositivo en una moto tenía el inconveniente de que era un dispositivo bastante grande con dos tanques de aire y un cierto peso, sin espacio en una moto.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

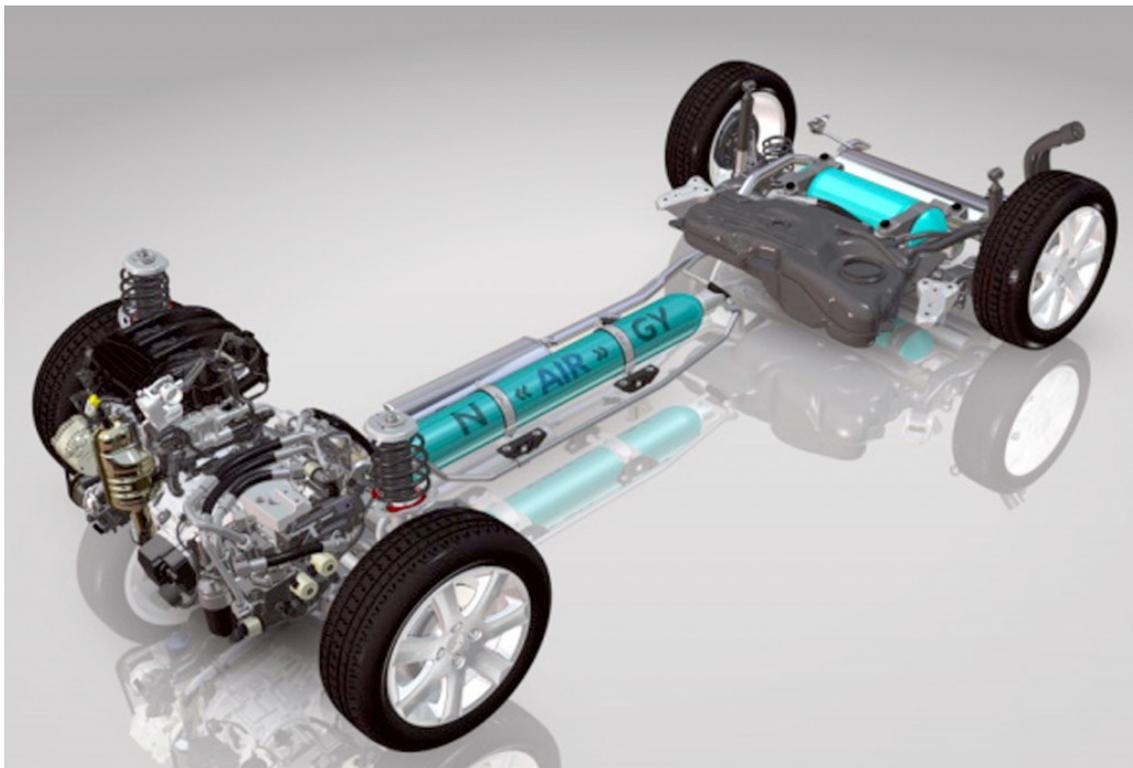


Figura 3. Sistema “Hybrid air” del grupo PSA para regeneración de la frenada. – Referencia 3.-

Para recabar más datos importantes sobre un posible dispositivo con una turbina pequeña introducida en una moto conectada al líquido de los amortiguadores tuve más tarde una cita con un experto en Fluidos y Transmisión de calor, el Doctor Luis Mochón Castro, profesor de ICAI de Mecánica de Fluidos y Transmisión de Calor en la Universidad Pontificia de Comillas, con el que pude sacar los siguientes detalles en claro:

Me desaconsejó usar una turbina porque:

-El sistema es muy grande para un vehículo tan pequeño.

-Las turbinas se diseñan para tener muy buenos rendimientos a un caudal y velocidad del fluido muy precisos, sino el rendimiento cae mucho. Y el punto de funcionamiento del amortiguador parecía ser muy variable (cosa que es cierta), dependiendo de la velocidad del vehículo, la rugosidad del relieve, y si los amortiguadores están trabajando en vibración por la rugosidad del suelo, frenada o pasando un badén u otro bache abrupto.

-A altas frecuencias la turbina no funciona, el movimiento del fluido tiene que ser un “paso de cabras”. Teniendo esto en cuenta para hacer viable como lo hizo el MIT con el camión frigorífico –Referencia 2.-, supongo que su desarrollo se centró en las frenadas y los baches, pasando de largo de la vibración de la carretera.

-Sería posible utilizar una turbina pequeña (pero le parece desaconsejable).

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

-Por otro lado Don Luis me informó de que la energía del muelle del amortiguador no se puede coger, porque sino el amortiguador se quedaría abajo después de comprimirse y que sólo debemos coger la energía que se disipa en el amortiguador, en la "D", en calor disipado.

De esta forma, concluyo en descartar la turbina como método para una motocicleta(vehículo muy pequeño) y a utilizar el de inducción.

Finalmente, una vez escogido el método de la inducción, me puse a estudiar el campo y la idea principal que se me ocurrió era el de una bobina eléctrica atravesada por un imán. Al intentar moverse el imán en el seno de la bobina se generaría una fuerza electromotriz(Voltaje inducido) en la bobina, conectada a la batería de la moto a través de un regulador de tensión y cargándola. A su vez se genera una fuerza física de oposición al movimiento entre el imán y la bobina, es decir, este sistema es equivalente al coeficiente de amortiguamiento "D" de un amortiguador. Estos dos elementos anclados a las dos partes rígidas de un amortiguador sustituirían al líquido de fricción viscosa y la cámara de gas utilizado en los amortiguadores hidráulicos y bitubo(los más simples y populares). Es decir, sólo habría un muelle normal en paralelo con la bobina+imán, igual que en la Figura 1.

Recabando más información descubrí el proyecto "Sound" de Bose, -Referencia 5.1.- donde habían construido una suspensión electromagnética activa asombrosa para coche tras 20 años de investigación, construida con motores eléctricos lineales en el eje del amortiguador de cada rueda, y materiales reológicos. Es capaz de eliminar el cabeceo lateral y frontal del coche totalmente, y la suspensión con sus motores hasta era capaz de hacer saltar el coche sobre una barra de madera de varios cm de grosor igual que un caballo(se puede ver en el video de la -Referencia 5.2.-). El artículo 5.1 dice que el dispositivo regenera energía. Por otro lado cuenta que el sistema era demasiado caro, \$5000, y pesado para ser introducido en los vehículos comerciales, razón por la cual el proyecto fue archivado hace un par de años, pero pretende abaratar costes, al menos un 50%, y sacarlo a la luz pronto.

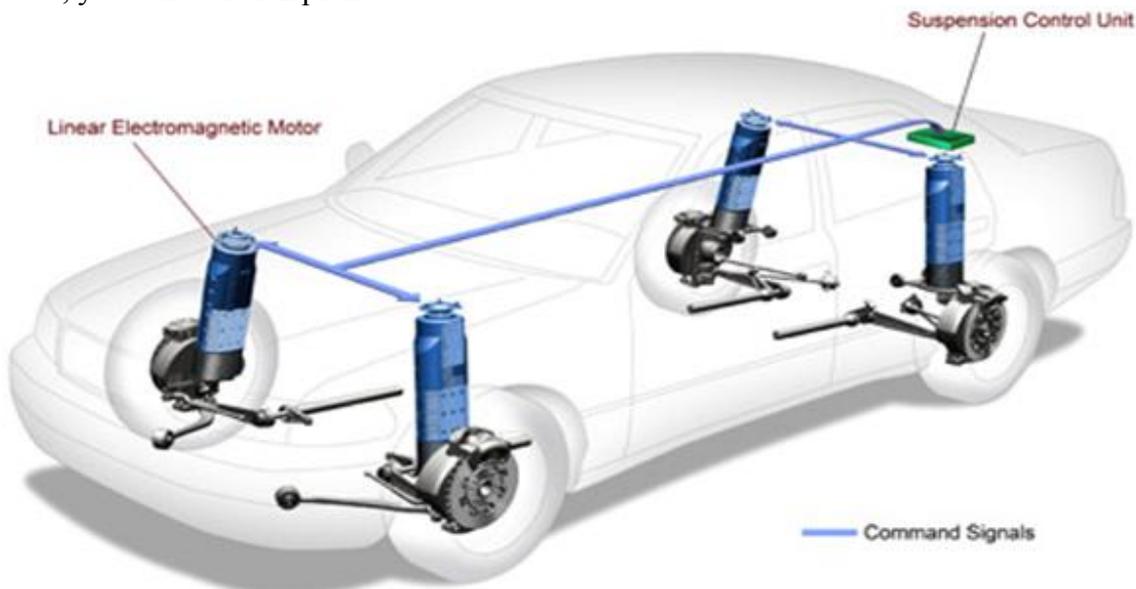


Figura 4.a Suspensión electromagnética activa del Proyecto Sound de Bose –Referencia 5.1-

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

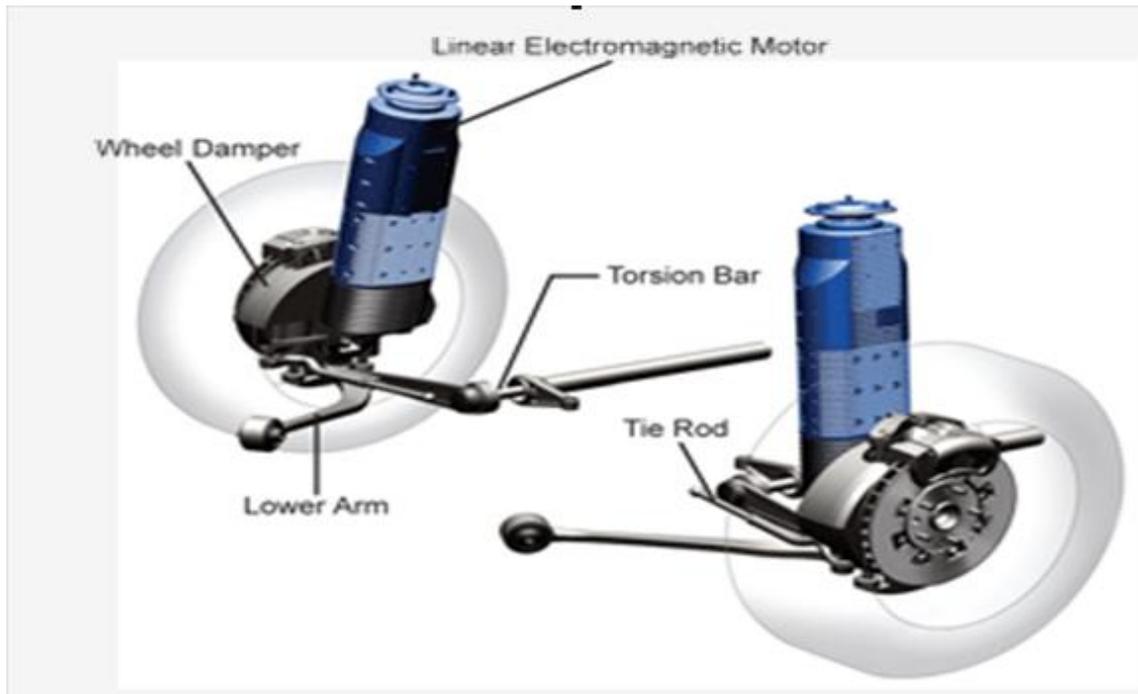


Figura 4.b Motores eléctricos lineales actúan según un control central en los ejes – Referencia 5.1-



Figura 4.c Suspensión electromagnética activa del Proyecto Sound de Bose –Referencia 5.1-

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

En siguiente lugar, estuve informándome y comprobé las posibles patentes que pudiera haber sobre el sistema imán+bobina, ya que podría ser un impedimento en desarrollo del proyecto. Pedí ayuda a un compañero de colegio estudiando la oposición a la oficina de patentes, don Javier Polop Martín, que me pudo facilitar la siguiente información sobre patentes referidas a un dispositivo como el que pretendo desarrollar:

En 2006 se presentó la patente en EEUU –Referencia 6.1.- pero en medio del proceso de concesión la abandonaron porque ya existía una patente anterior, la cual está redactada el año 2001, -Referencia 6.2.- y está vigente hasta 2021. Con esta segunda patente pude saber que el dispositivo no se puede patentar ni utilizar sistemas similares a nivel comercial hasta entonces.

Pero también gracias a -Referencia 6.2.- pude modelar el perfil del suelo de la carretera. Entre las fotos de la patente se encuentra una muestra ejemplo de un perfil de carretera, dato que buscaba y necesitaba. Con las fotos modelé la rugosidad de la calzada con una señal senoidal de amplitud 8mm y periodo 0.7m en base a las fotos. Luego, dos meses más tarde, investigando en Mayo de 2016 sobre el perfil de rugosidad de las carreteras comprobé que estos valores se correspondían con el valor típico según la normativa del Índice Internacional de Carreteras(I.R.I.), que toma valores entre 0-12m/km de “desnivel” acumulado en la calzada por kilómetro, siendo entre 5 y 7 metros valores típicos para calzadas en buen estado. La integral de la señal senoidal “xSuelo” arriba descrita(A=8mm, T=0.7m) de 0 a 1.000m daba un valor 5.06m, comprobando que mi estimación se trata de unos valores de parámetros conservadores e idóneamente seleccionados.

Acto seguido, los siguientes 3 meses realicé el modelo mecánico de los amortiguadores de la moto y un modelo eléctrico no lineal de la inducción imán+bobina(que fue la parte más ardua y larga del proyecto con diferencia). No citaré muchas de las referencias de magnetismo de interés encontradas. En primer lugar estuve tres semanas estudiando varias horas al día el libro de 3º de la carrera de Campos Electromagnéticos -Referencia 7. – para ser capaz de calcular por mi mismo el campo magnético de una espira(y después de una bobina y de un imán) fuera de su eje. Para que cuando por fin conseguí plantear la integral, menuda mi sorpresa, descubrí que era tan complicada que no tenía solución(que no fuera por métodos numéricos). Entonces encontré en internet como calcular por métodos numéricos el campo de una espira fuera de su eje a través de las integrales elípticas de Good –Referencia 8.-.

Voy a exponer la integral que dejé planteada para calcular la inducción entre un imán y una bobina. Primero a calcular el campo magnético de una bobina de N espiras con radio “a” y corriente “I” en un punto P=(x,y,z) fuera de su eje, siendo el eje de coordenadas el centro de uno de la bobina:

Primero procedemos a calcular el campo magnético de una espira de radio “a” y corriente “I” en un punto P=(x,y,z) fuera de su eje según la ley de Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Figura 5.a Ley diferencial de Biot-Savart. -Referencia 12.-

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

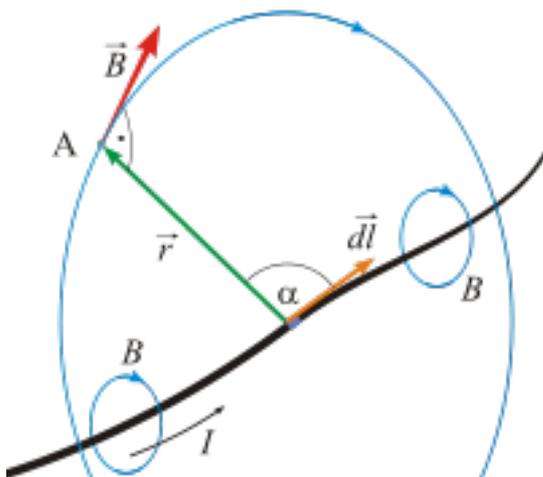


Figura 5.b Vectores de la ley diferencial de Biot-Savart en una imagen de Wikipedia. - Referencia 12.-

Ahora con la ley de Biot-Savart planteamos las componentes diferenciales del campo magnético B para una espira de corriente, como ilustra perfectamente la Universidad del País Vasco en su artículo titulado “La espira”, apartado “Campo magnético producido en un punto fuera del eje” en la página web de la universidad - Referencia 14.-.

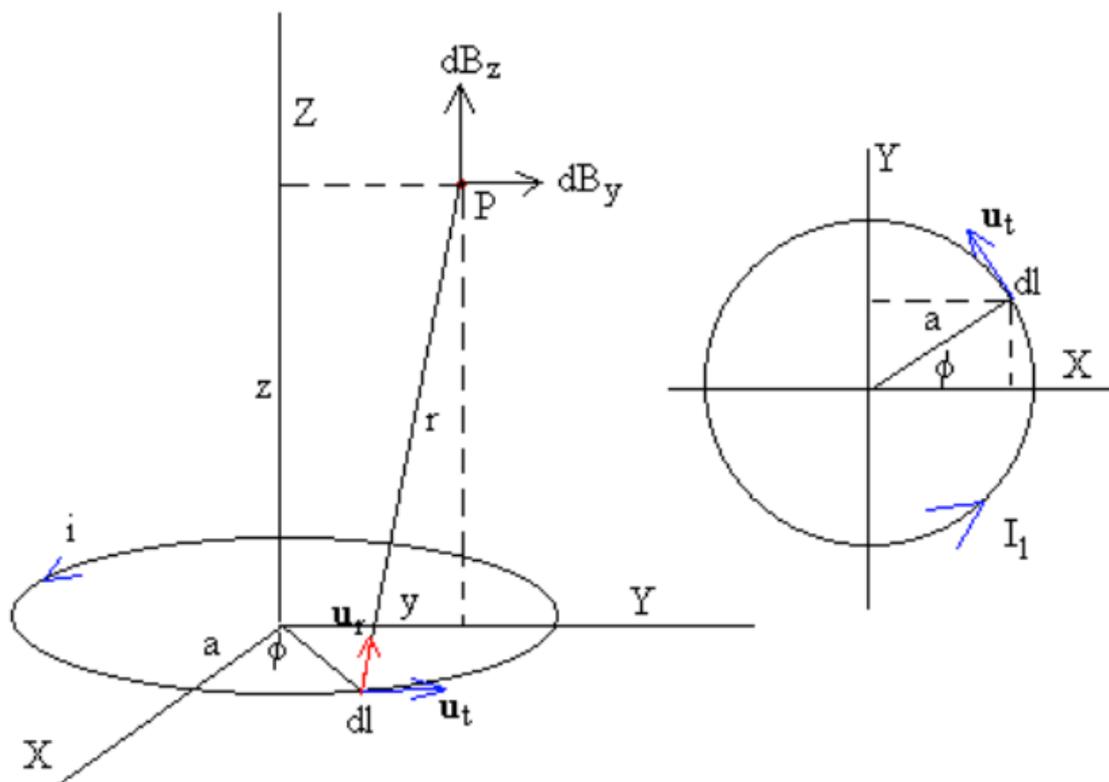


Figura 6.a Campo magnético de una espira en un punto $P=(0,y,z)$ fuera de su eje. El componente en el eje y es nulo por la simetría de la espira. -Referencia 14.-

En la figura 6, “ u_t ” es un vector unitario que señala la dirección y sentido de la corriente, y “ u_r ” es un vector unitario que señala el punto P donde se calcula el campo

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

magnético. La espira tiene un radio “a”, y “dl” es un segmento diferencial del aro de corriente que conforma la espira.

Prosiguiendo con la explicación del País Vasco, obtenemos los módulos que deben tener los vectores en la Figura 6.a:

$$r = \sqrt{a^2 + y^2 + z^2 - 2aysen \phi}$$

$$\mathbf{u}_r = \frac{-a \cos \phi \mathbf{i} + (y - a \text{sen } \phi) \mathbf{j} + z \mathbf{k}}{r}$$

$$\mathbf{u}_t = -\text{sen } \phi \mathbf{i} + \cos \phi \mathbf{j}$$

Figura 6.b –Referencia 14.-

Entonces escribimos el componente de la ley de Biot-Savart en cada eje(x,y,z) y planteamos la integral en coordenadas cilíndricas pues gracias a la simetría axial de la espira es mucho más fácil:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} i \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi}{r^3} d\phi$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} i \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\text{sen } \phi}{r^3} d\phi$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} i \cdot a \int_0^{2\pi} \frac{a - y \cdot \text{sen } \phi}{r^3} d\phi$$

Figura 6.c –Referencia 14.-

Sabiendo que $B_x=0$ por la simetría de la espira, y sustituyendo r nos queda:

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} i \cdot a \cdot z \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\text{sen } \phi}{(a^2 + z^2 + y^2 - 2aysen \phi)^{3/2}} d\phi$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} i \cdot a \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{a - y \cdot \text{sen } \phi}{(a^2 + z^2 + y^2 - 2aysen \phi)^{3/2}} d\phi$$

Figura 6.d –Referencia 14.-

Ahora bien, cuando por fin llegué a este punto, descubrí que esta ecuación no tiene solución. Eso es debido al $\text{sen}(\Phi)^{3/2}$ en el cociente. Pero por suerte, en este mismo enlace de la UPV, tenemos las ecuaciones elípticas de Good para darle una solución a estas integrales, que son las siguientes:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Primero calculamos las funciones E(m) y K(m), y según la tablas de las integrales elípticas de Good -Referencia 15.-, estas son las de primera y segunda especie:

$$\int_0^{\pi} \frac{d\theta}{(b - \cos \theta)^{3/2}} = \frac{m}{2-2m} \sqrt{2m} E(m) \quad E(m) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - m \operatorname{sen}^2 \phi} d\phi \quad m = \frac{2}{1+b}$$

$$\int_0^{\pi} \frac{-\cos \theta d\theta}{(b - \cos \theta)^{3/2}} = \sqrt{2m} K(m) - \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2m} E(m) \quad K(m) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - m \operatorname{sen}^2 \phi}}$$

Figura 6.e –Referencia 14.-

Una vez calculadas, podemos introducir el valor E(m) y K(m) en las siguientes ecuaciones que dan solución a las integrales By Bz:

$$B_y = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{a}{(2ay)^{3/2}} z \left(-\sqrt{2m} K(m) + \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2m} E(m) \right)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{a}{(2ay)^{3/2}} \left(a \frac{m}{2-2m} \sqrt{2m} E(m) + y \sqrt{2m} K(m) - y \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2m} E(m) \right)$$

$$m = \frac{2}{1+b} = \frac{4ay}{a^2 + z^2 + y^2 + 2ay}$$

Figura 6.f –Referencia 14.-

Ahora bien, tenemos un problema, esto es solo el campo magnético de una espira fuera de su eje. Una vez conocidos los componentes Bz y By de una espira, para obtener el campo magnético de una bobina en el punto P:

Dada una bobina de longitud L, situada desde z=0 a z=L en la figura 6.a, y una densidad λ [espiras/m] en el eje vertical, tenemos que sumar el aporte de campo de cada espira. Esto se haría integrando las expresiones By y Bz de la figura 6.d desde z=(Z_p) hasta z=(Z_p-L), siendo Z_p la coordenada Z del punto P.

$$B_{y_{BOBINA}} = \int_{Z=Z_P}^{Z=Z_P-L} \lambda * B_{y_{ESPIRA}} * dz$$

$$B_{z_{BOBINA}} = \int_{Z=Z_P}^{Z=Z_P-L} \lambda * B_{z_{ESPIRA}} * dz$$

Figura 6.g Campo magnético en el en un punto P=(x,y,z) generado por una bobina de una sola capa situada en el eje z y un extremo en el eje de coordenadas de la figura 6.a

Luego, gracias a que el campo de un imán cilíndrico es equivalente a una banda de corriente en su superficie lateral con su mismo momento dipolar magnético, podríamos calcular su campo como si se tratase de otra bobina colocada sobre su

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

superficie lateral con una densidad de corriente superficial que aporte el mismo momento magnético que el que tiene el imán cilíndrico, dadas sus dimensiones.

Momento dipolar magnético de un imán=Volumen* $\rho_{magnetica}$

$\rho_{magnetica}$: densidad de momento dipolar magnético(en función del material magnético, en el caso del neodimio unos 900 [kA/m] –Referencia 16.-)

A continuación, cogiendo B_z de la figura 6.g calculamos el flujo magnético del imán que atraviesa una bobina de cobre en su mismo eje, como el dispositivo en la figura 1, integrando la componente $B_{Z_{IMÁN}}(x, y, z)$ en el volumen de la bobina:

$$\phi_{IMÁN A BOBINA} = \int_{V_{BOBINA}} B_{Z_{IMÁN}} * dv$$

Figura 6.h

Luego, sustituimos “z” por $z(t)$, siendo $z(t)$ el movimiento relativo entre el imán y la bobina, el desarrollado por el amortiguador, y finalmente derivamos el flujo magnético con respecto al tiempo, obteniendo una expresión casi exacta de la FEM inducida entre un imán y una bobina coaxiales.

También podemos aplicar la ecuación de la Fuerza Electromagnética Inducida ec.(17) de la pag.257 del libro de Referencia 7:

$$\frac{d\phi}{dt} = - \int_C (v \times B_{IMÁN}) * ds$$

Figura 6.i

Siendo s la superficie de las espiras de la bobina, C su circulación y “ v ” la velocidad relativa entre bobina e imán.

Por desgracia, todas estas integrales ya no tenían solución a partir de la figura 6.d y o bien hacemos métodos numéricos con ellas, o bien hacemos aproximaciones. En este caso yo he optado por lo segundo.

Cuando estaba mirando que podía hacer con esta integral tan fea sin solución para seguir adelante con el modelado, por suerte encontré en internet tras mucho buscar unas aproximaciones que permitían solucionar las integrales y obtener los resultados como funciones(no lineales) de los parámetros del imán y de la bobina -Referencia 9.- (Artículo Dipolos Magnéticos, premio Rotary 2004). Aproximamos el imán cilíndrico por un dipolo magnético y la bobina la aproximamos con sus N espiras puestas en el lugar de una sola espira, todas compartiendo una única posición. Así obtenemos las funciones de la Fem y la Fuerza[N] entre imán y bobina(ec.12 y ec.14 de la –Referencia 9.-). La función de la ec.14 es un cociente de parámetros físicos del imán y de la bobina multiplicado por la velocidad del imán, de forma que dividiéndolo entre la velocidad, cómodamente obtenemos el coeficiente de amortiguamiento “D” equivalente del conjunto. Escribí un email al investigador don Javier Ruiz Fuertes de la Universidad de

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Valencia, uno de los dos autores del artículo, quien amablemente me respondió explicándome la interpretación del valor del parámetro δ de la ec.14. para poder utilizarla.

Entonces, dando valores sensatos y dentro de los límites de espacio y peso de la moto establezco los parámetros de imán y bobina, para que $D=500[\text{Ns/m}]$, valor típico en una moto de 600cc, obtenido de un artículo facilitado gracias a mi director, don Juan de Norverto Moríñigo, -Referencia 10. - puesto que estuve buscando un valor ejemplo de una D de amortiguador de moto en internet sin poder encontrarlo durante más de 20h en total a lo largo de varios días. Además tuve la suerte de encontrar en ese mismo artículo un modelo mecánico con parámetros ejemplo reales para la simulación de un sistema de un amortiguador de moto. Por otro lado el apartado 2.5 del artículo – Referencia 11.- demuestra que la rueda no es despreciable en el modelado del amortiguador, pues sino este sufre los escalones del relieve de forma mucho más acusada, hasta cinco veces más acusados.

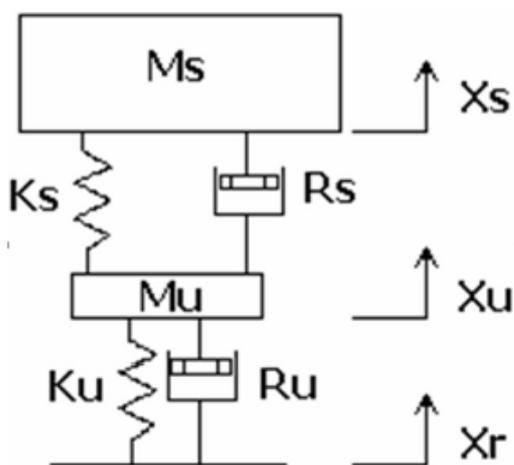


Figure 8. Front Suspension Model

Figura 7. Modelo mecánico del amortiguador delantero de la de moto. -Referencia 10.-

Parameter	Value	unit	Comment
M_u	16	Kg	Unsprung mass
M_s	100	Kg	Sprung mass
K_u	200000	N/m	Tire Stiffness
K_s	Figure 6	N/m	Suspension Stiffness
R_u	100	Ns/m	Tire Damping
R_s	Figure 11	Ns/m	Suspension Damping

Table 1. Motorcycle parameters.

TEST CONDITIONS

Finalmente, tuve una cita el 12 de Julio con un experto en Campos Electromagnéticos, el doctor Fidel Fernández Bernal, profesor de Campos Electromagnéticos y Maquinas Eléctricas en la Universidad Pontificia de Comillas, para comprobar que mi modelado de las ecuaciones de la parte imán+bobina estuviera bien hecho. Me dijo que mi modelo no era preciso porque la aproximación del dipolo magnético es buena en distancias grandes y que lo más exacto sería haber utilizado un programa de métodos numéricos para emular el sistema imán+bobina, cosa que estimó se tardaría en hacer al menos dos meses, por lo que no me da tiempo a hacerlo. En segundo lugar para la regeneración de energía me recomendó que quizás me convendría utilizar una máquina eléctrica rotativa funcionando como generador en lugar del imán+bobina, con la ventaja de que sus características de funcionamiento vienen determinadas por el fabricante. Tampoco me da tiempo a cambiar todo el proyecto a falta de 1 semana para la presentación, llevando 6 meses con la vía de dispositivo que decidí investigar.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Días después, procedo al modelado en Matlab(Simulink), en la Figura 7, juntando mi sistema mecánico(Figura 8) con mi sistema eléctrico no lineal(Figura 9) obteniendo lo siguiente:

Valores dispuestos para el imán y la bobina:

$m=1.44[\text{Am}^2]$ (Momento dipolar del imán)

Diámetro del imán=H imán=1.6cm (un cilindro, resultó ser mucho más pequeño de lo que esperaba)

Rbobina=4 cm

Rhilo=1.5mm

N=100

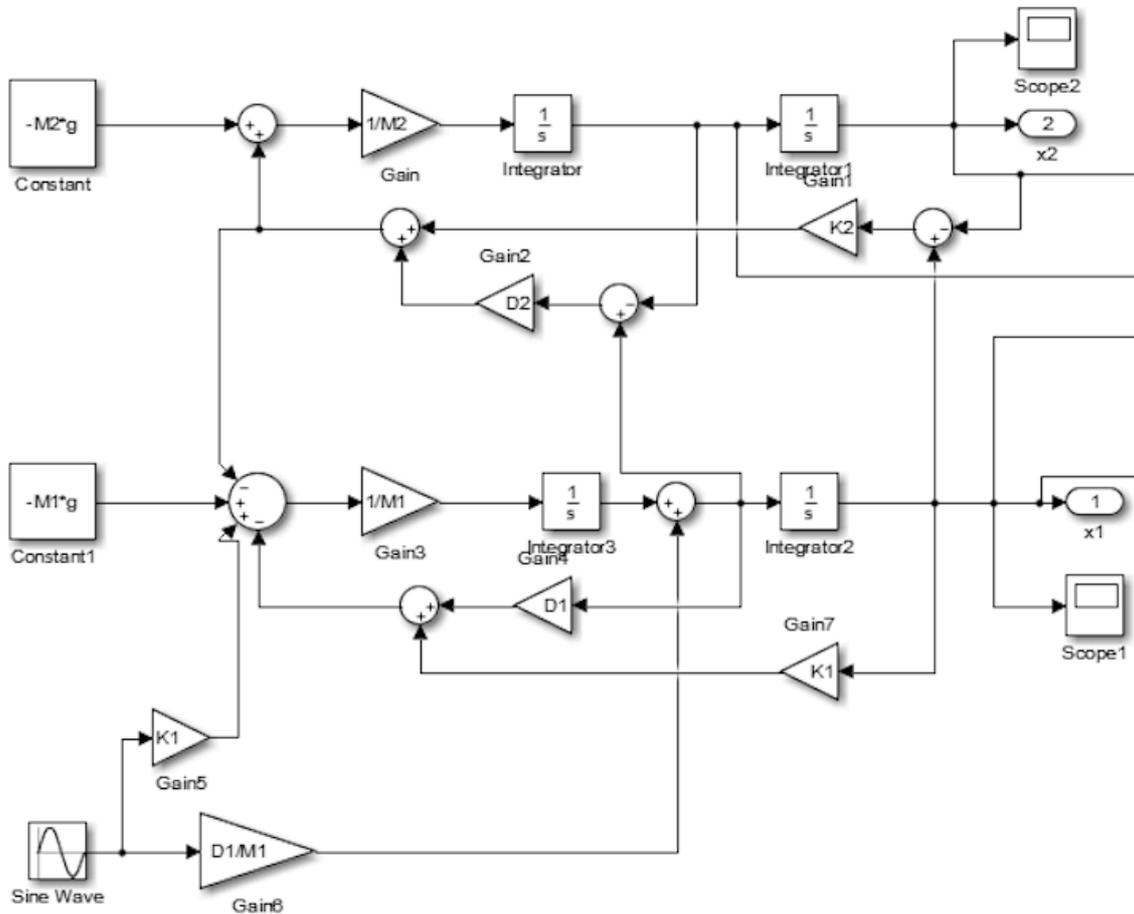


Figura 8. Modelo mecánico lineal

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

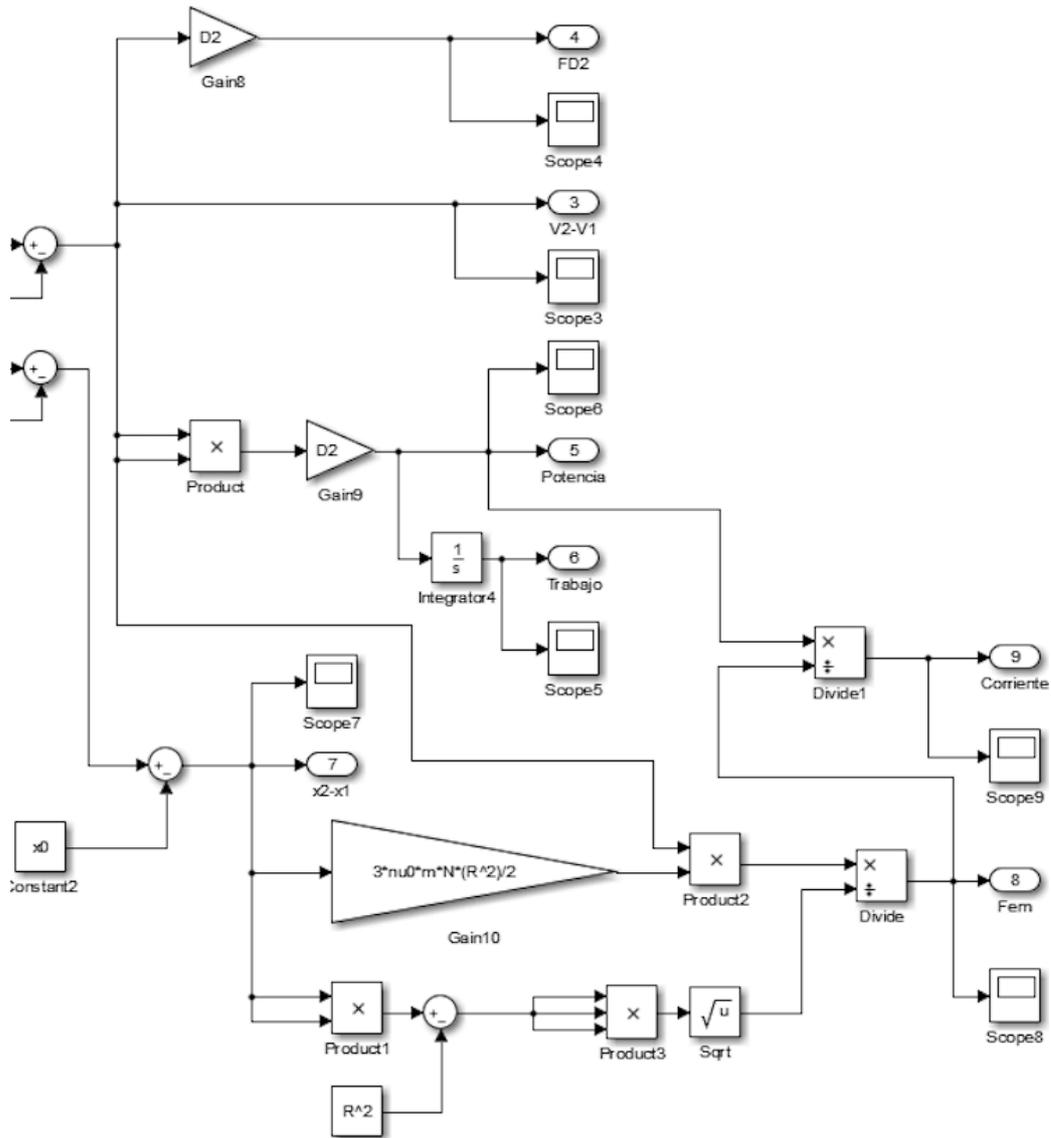


Figura 9. Modelo eléctrico no lineal

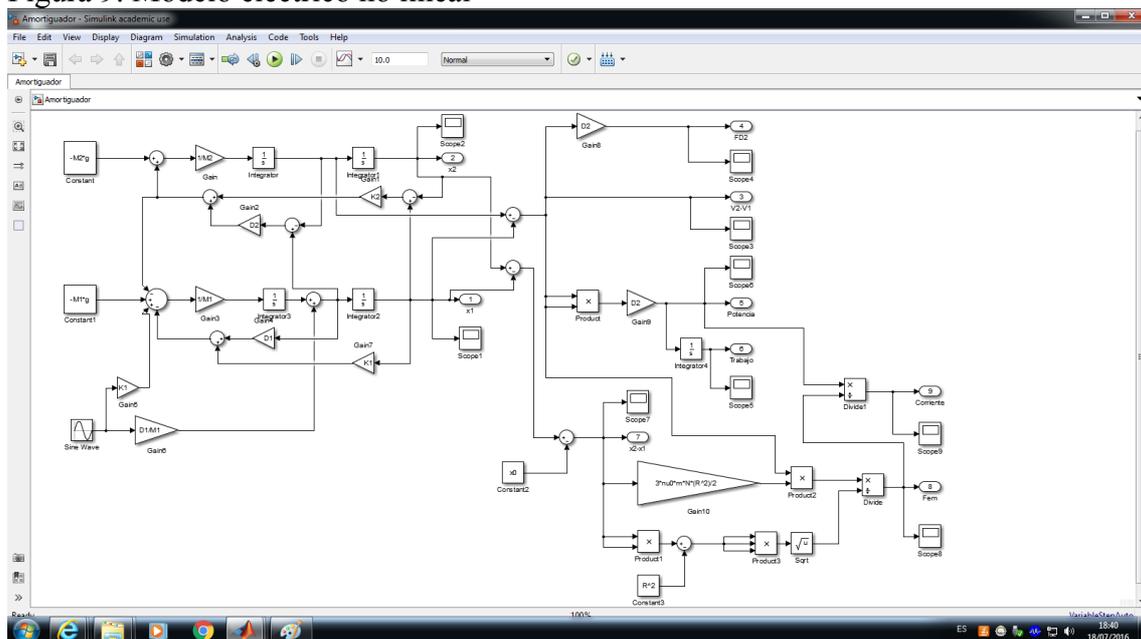


Figura 10. Modelo Completo

Capítulo 4.- Análisis de resultados

Resultados

Las situaciones externas que van a hacer trabajar a los amortiguadores van a ser principalmente tres casos: la vibración por el perfil rugoso de la calzada, la frenada y los badenes. Teniendo esto en cuenta, procedemos a definir las entradas del sistema mecánico en estos 3 casos:

1. Vibración por el perfil rugoso de la calzada: X_s es una señal de senoidal de Amplitud 8mm y periodo(0.7m/(80km/h)), con el vehículo circulando a 80km/h.

2. Frenada: Cuando frenamos se produce un cabeceo entre los ejes delantero y trasero del vehículo, que según la –Referencia se traduce en una fuerza que se apoya alternando entre el eje delantero y trasero del vehículo de forma senoidal. Así aproximamos la fuerza del cabeceo sobre el amortiguador delantero como una senoidal de amplitud proporcional al peso de la moto(Amplitud=80N, Periodo=1s).

3. Bades: Los modelo como medio periodo de una señal senoidal con una amplitud de 20cm y una anchura de 20cm(bastante abrupto) dividido por la velocidad máxima del vehículo(40 Km/h). Este caso nos interesa estudiarlo para no quemar nuestro dispositivo con el golpe.

Finalmente, procedo a simular, con los siguientes parámetros en el script de matlab:

```
clc
clear
s=tf('s');

% generic model for a 600cc motorcycle

%parámetros mecánicos del sistema del amortiguador:

M1=16;           % Masa de la rueda [Kg]
M2=(170+80)/2;  % Masa de la mitad del cuerpo de la moto [Kg]
K1=200000;      % Constante elástica del muelle equivalente de la
rueda [N/m]
K2=6400;        % Constante elástica del amortiguador [N/m]
D1=100;         % Constante de amortiguación equivalente de la rueda
[N/(m/s)]
%D2=500;        % Constante de amortiguación del amortiguador [N/(m/s)]
AmplitudFrenada=250*2*M2/800; % Fuerza del cabeceo de la moto durante
la
                % frenada proporcional respecto a un coche de 800 Kg
[N]
g=9.8;          % Gravedad [m/s^2]
x0= -(M1+M2)*g/K1; %Posición de x1(posición vertical de la rueda) con
el
                % coche en reposo sobre la calzada
Ke=2;           % Relación de transformación  $Ke=V_i/V_{out}$  buscada por el
```

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

```

                                % regulador de tensión que se colocaría a la salida de
la
                                % bobina para enganchar a la batería

% Electric parameters:

nu0=4*pi*10^-7; % permeabilidad magnética en el vacío [N/A^2]

%Parámetros del imán:

m=100; % Momento dipolar magnetico del im.n [A*m]
momento_Neodimio=9e5; %Momento dipolar magnetico del Neodimo [A/m^2]
radioiman=(m/(momento_Neodimio*2*pi^2))^(1/3);% radio y altura del
iman [m]
DensidadNeodimio=6800; % Densidad del neodimio [Kg/m3]
PesoNeodimio=2*pi^2*radioiman^3*DensidadNeodimio; %Peso del iman [Kg]

%Parametros de la bobina:

ro=5.81e6; % Conductancia del cobre [1/(Ohmio*m)]
N=400; % Numero de espiras
a=0.0005; % radio del conductor [m]
b=8*a^2; % Grosor de la pared de la bobina [m]
R=radioiman+b/2;% Radio medio de la bobina [m]
l=N*(2*a)^2/b; % Longitud de la bobina [m]
Rl=0.0172*(2*pi*R*N)/(pi*(a*1000)^2); %Aproximacion en Omnios de la
% Resistencia a 20 ∫ C
L=0.8*N^2*(R*100)^2/(15.4*(R*100)+22.8*(l*100)+25.4*(b*100))/10^6;
% Inductancia de una bobina de varias capas en uH
DensidadCu=9860;% Densidad del cobre [Kg/m^3]
PesoCu=2*pi*R*N*pi*a^2*DensidadCu; %Peso del cobre [Kg]
PesoTotal=PesoCu+PesoNeodimio; %Peso total de neodimio y cobre [Kg]
delta=2*a;
D2=45*nu0^2*m^2*ro*delta/(128*8*a^4); %D2 equivalente de la
% bobina+imán [N/(m/s)]
```

Y obtengo los siguientes resultados:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Si disminuimos el radio del hilo de la bobina, el valor del parámetro D2 se dispara, de esta forma la bobina ya pesa 1.74kg y no merece la pena aumentarlo más. El radio de la bobina tampoco se puede aumentar mucho más porque sino el amortiguador no cabría en su sitio. El imán resultante del cálculo es muy pequeño. El valor de la Fem resultante en el modelado es muy pequeña también pero no se puede aumentar más para cumplir las condiciones dichas.

La intensidad de salida en la bobina se dispara hasta valores desorbitados, hasta el orden de 100 kAmperios en régimen permanente. Esto se debe a que el cálculo de la intensidad instantánea como la potencia instantánea disipada por el amortiguador D2 ($P=D2*(v2-v1)^2$) entre la FEM inducida en la bobina, al tener valores de milivoltios, hace que la intensidad tenga valores de kAmperios. Esto no puede ser posible, ya que la moto estallaría como una central eléctrica en llamas con esos valores de intensidad. Después de varios días reflexionando, llegué a la conclusión de que la ecuación adoptada para el cálculo de la fuerza física inducida[N] entre el dipolo y la bobina, (ec.14) del artículo de la -Referencia 9.- era incorrecta. Me parecía raro que FD2 en el sistema de simulink sólo dependiera de la velocidad relativa del imán pero no de la distancia entre imán y bobina, mientras que la FEM si dependía de $1/(x2-x1)^{(5/2)}$ -Figura 5.- porque para que la potencia eléctrica y mecánica disipadas coincidan, la FEM debería ser proporcional a FD2 en este sentido. De esta forma, dejé este modelo y me puse a buscar una solución para el calculo de FD2: adopte un sistema de ecuaciones a partir de la -Referencia 17.- donde pude comprobar que la fuerza entre imán y bobina si dependía de $1/(x2-x1)^{(5/2)}$. Además la intensidad la calculé a partir del circuito eléctrico en el que quiero introducir la bobina.

De esta forma, adopto las siguientes ecuaciones de la -Referencia 17.- de la Universidad de Pais Vasco:

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{3\mu\mu_0 I a^2}{2} \frac{z}{(z^2 + a^2)^{5/2}}$$

Figura 11.a Fuerza experimentada por el imán que atraviesa una espira por su eje, siendo I la intensidad y "a" el radio de la espira, $\mu\mu_0$ la permeabilidad magnética del medio y z la posición del imán en el eje de la espira, estando la espira en z=0. En nuestro caso multiplicamos su valor por "N" espiras.

$$V_z = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{3\mu_0\mu a^2}{2} \frac{z}{(a^2 + z^2)^{5/2}} \frac{dz}{dt}$$

Figura 11.b Voltaje inducido(FEM) por el imán sobre la espira cuyo eje atraviesa a una velocidad $\frac{dz}{dt}$, siendo z la posición del imán en el eje de la espira. En nuestro caso multiplicamos su valor por "N" espiras.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

El circuito eléctrico equivalente de la Bobina es el siguiente:

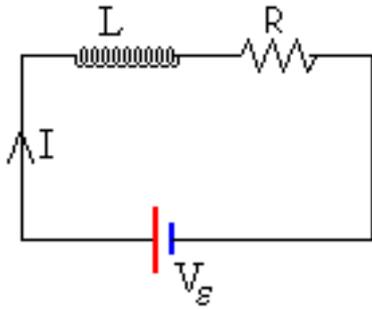


Figura 11.c Siendo L y R su inductancia y resistencia.

$$V_{\epsilon} - L \frac{dI}{dt} = IR$$

Figura 11.d Esta es la ecuación del circuito de la bobina. Más tarde la conectaríamos a través de un autorregulador de tensión de relación $N1/N2 = V_{IN}/110 * 1.3$ (Variable y controlado) a una batería de 110V de moto eléctrica, con lo cual el circuito eléctrico cambia ligeramente a:

$$V_{FEM} * \left(1 - \frac{1}{1.3}\right) - L \frac{dI}{dt} = IR$$

Y la potencia absorbida sería:

$$P_{BATERIA} = V_{FEM} \left(\frac{1}{1.3}\right) * I$$

Con las nuevas ecuaciones escogidas sustituimos la constante D2 de la parte mecánica por el siguiente bloque no lineal:

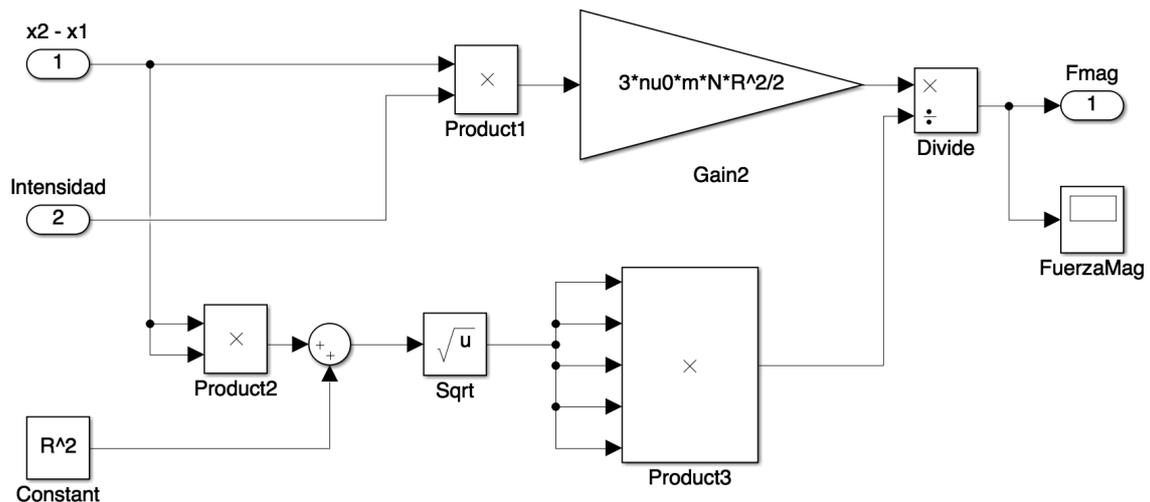


Figura 11.e Cálculo de la fuerza entre imán y bobina.

Para el voltaje inducido:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

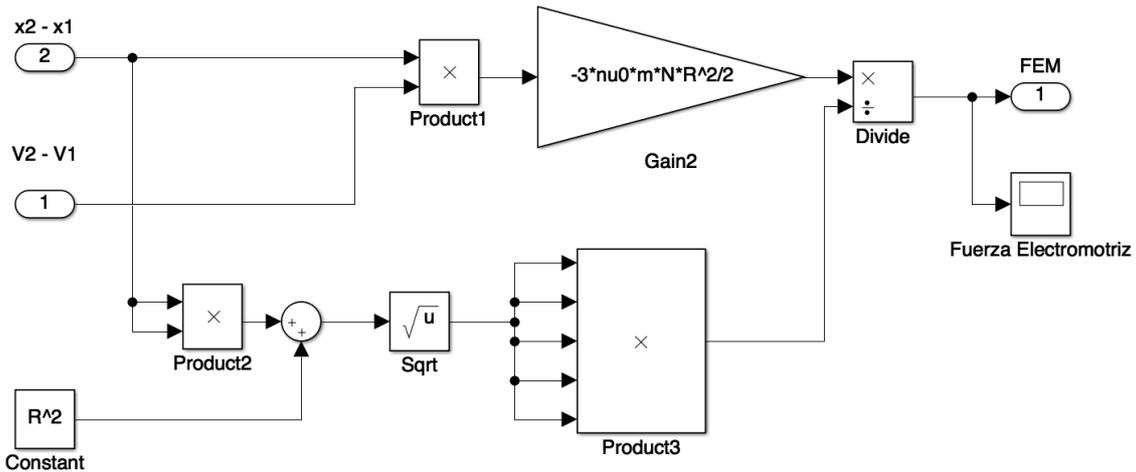


Figura 11.d Cálculo de la Fuerza Electromotriz generada por el imán en la bobina.

Y para la intensidad inducida:

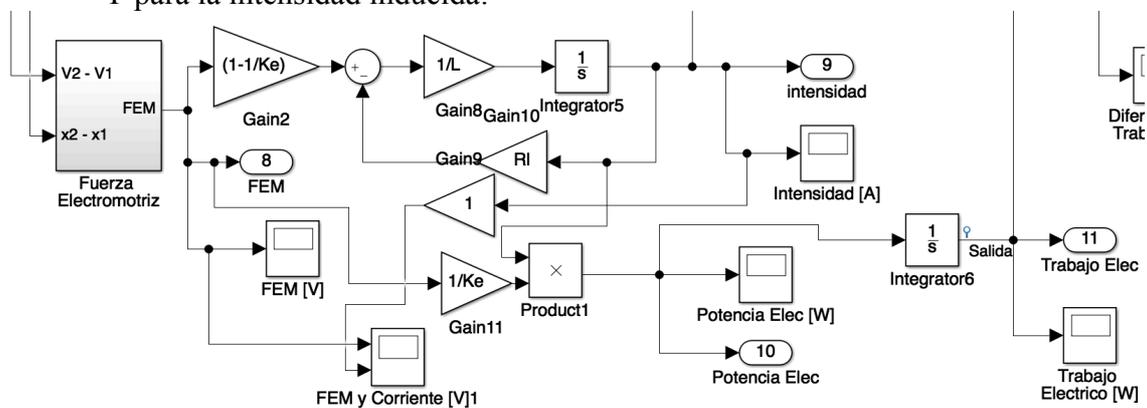


Figura 11.e Ke es la constante 1.3 arriba mencionada. La intensidad en la bobina es el output 9.

Así, procedo a estudiar en primer lugar la **potencia disipada por D2 en el sistema mecánico tradicional** para calcular la **energía disponible** en su trabajo y ver sus valores normales de trabajo. Como hemos dicho antes, diferenciando entre los tres casos principales de trabajo del amortiguador:

1. Vibración por el perfil rugoso de la calzada (Xs es una señal de senoidal de Amplitud 8mm y periodo(0.7m/(80km/h)), con el vehículo circulando a 80km/h):

Esquema:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

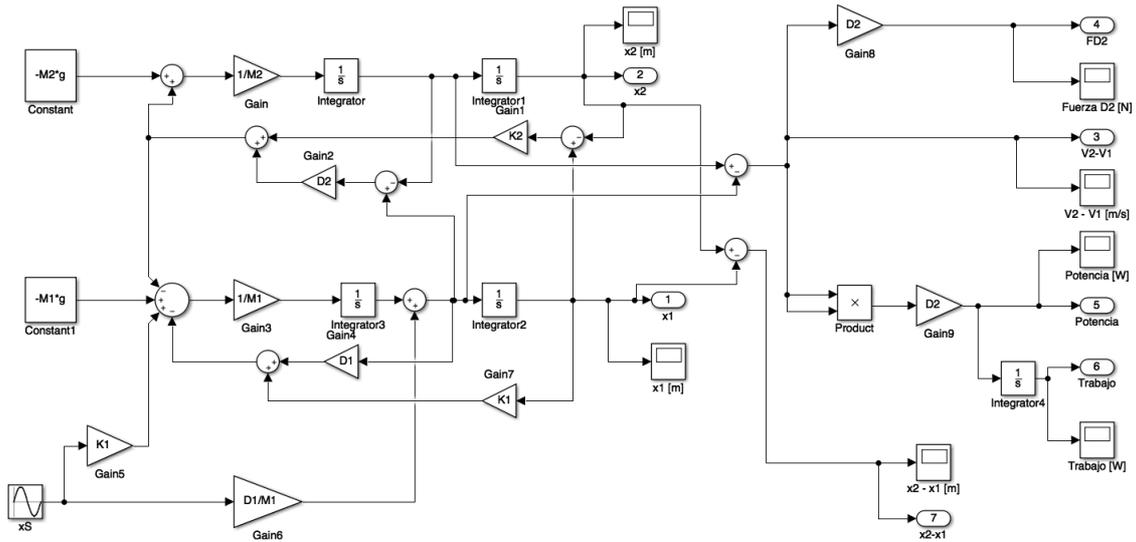


Figura 11.a Esquema del sistema para simular el amortiguador con el suelo rugoso como input.

Resultados obtenidos:

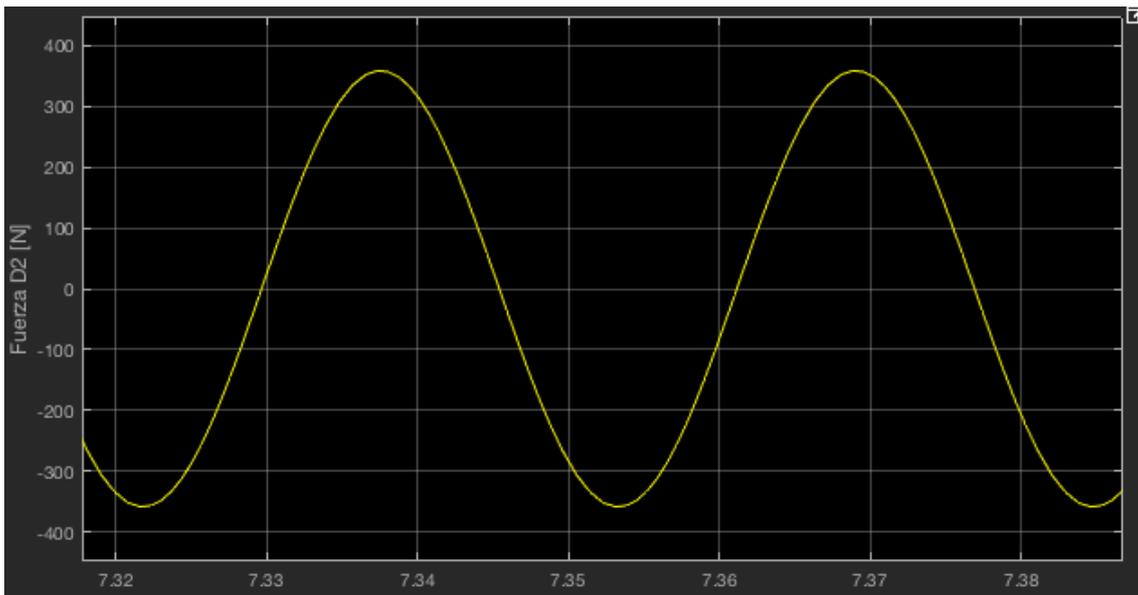


Figura 11.b Fuerza realizada por D2 [N]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

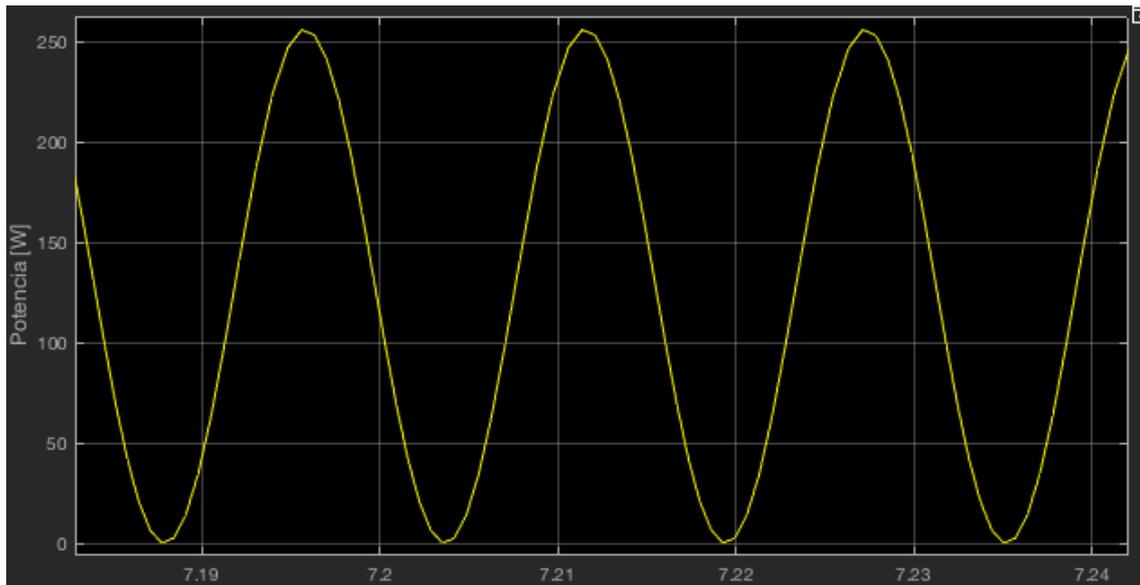


Figura 11.c Potencia disipada por D2 [W]

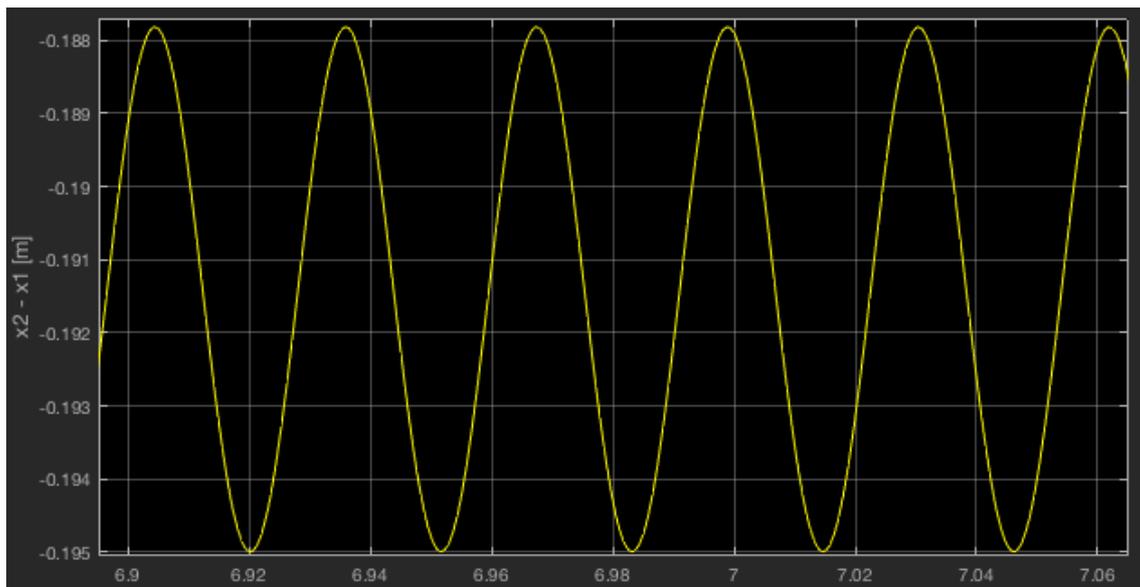


Figura 11.d $x_2 - x_1$ [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

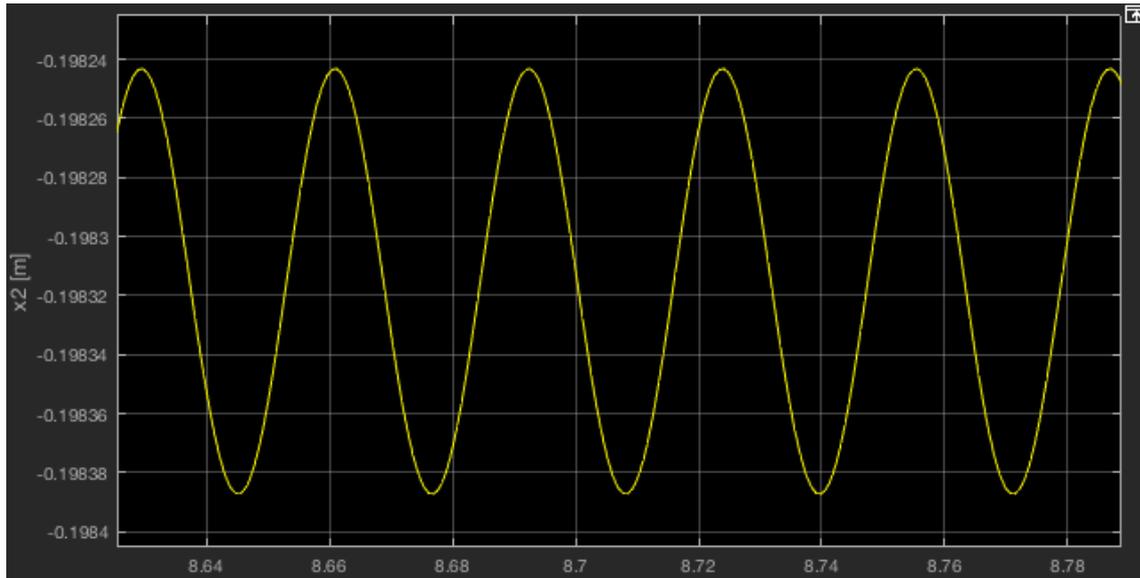


Figura 11.e x_2 [m]

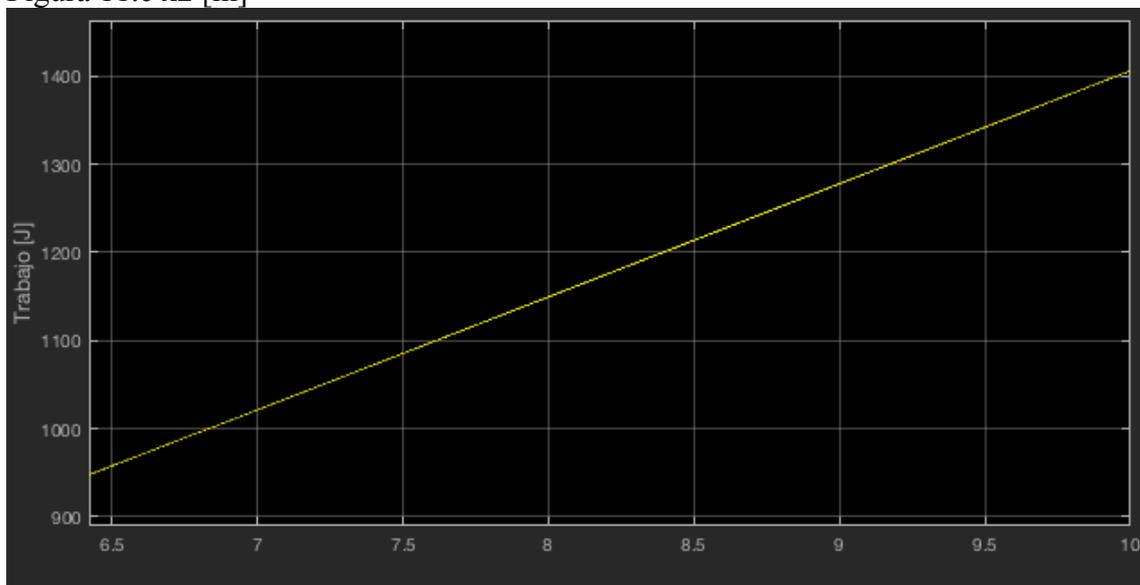


Figura 11.f Trabajo despejado por D2 [J]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

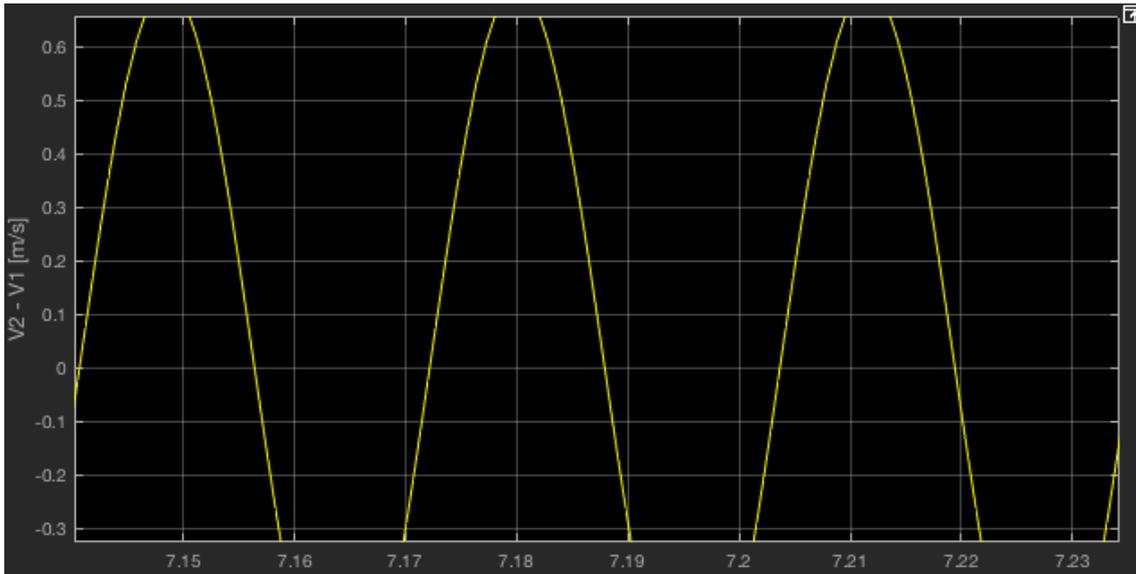


Figura 11.g V2-V1 [m/s]

Conclusiones

- $x_2 - x_1$ es el desplazamiento del amortiguador, que oscila 8 cm de pico a pico.
- X_2 es la posición de la masa de la moto, que oscila menos de 0.2 cm pico-pico debido al relieve, asegurando el confort frente a esta perturbación.
- FD_2 es la fuerza del amortiguador ejercida por su coeficiente de amortiguamiento D_2 , que oscila con una amplitud de unos 350 N.
- La potencia disipada por D_2 , calculada como $D_2 \cdot (v_1 - v_2)^2$, tiene 250W pico-pico, y es la potencia aprovechable por el amortiguador. Teniendo en cuenta que una moto eléctrica Zero S consume entre 5 y 10 kWh cada 100km y pesa 170 kg en vacío, y unos 270 Kg en carga, supongo que podemos aproximar su consumo extra como $7.5 \text{ kWh} / 270 \text{ kg} = 27.7 \text{ Wh}$ por kilo extra de peso. De esta forma, si podemos crear un dispositivo con una producción de energía superior a 27.7 W/Kg , tendremos un dispositivo energéticamente rentable.
- El trabajo total de la figura 16 nos da una pendiente de unos 125W, con lo cual, en estas condiciones, ¡sabemos que existen 125W de energía aprovechables en el sistema! Lo cual nos dejaría un margen de unos 4.51 Kg extra de peso para el dispositivo a diseñar, para un rendimiento perfecto. Con estas nociones en mente, procedo a calcular la bobina y el imán del sistema.

Ahora, procedemos a simular el mismo sistema para un badén y para el cabeceo de frenada como entradas:

2. Frenada: (fuerza senoidal de Amplitud=80N, Periodo=1s sobre la masa M2):

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Esquema:

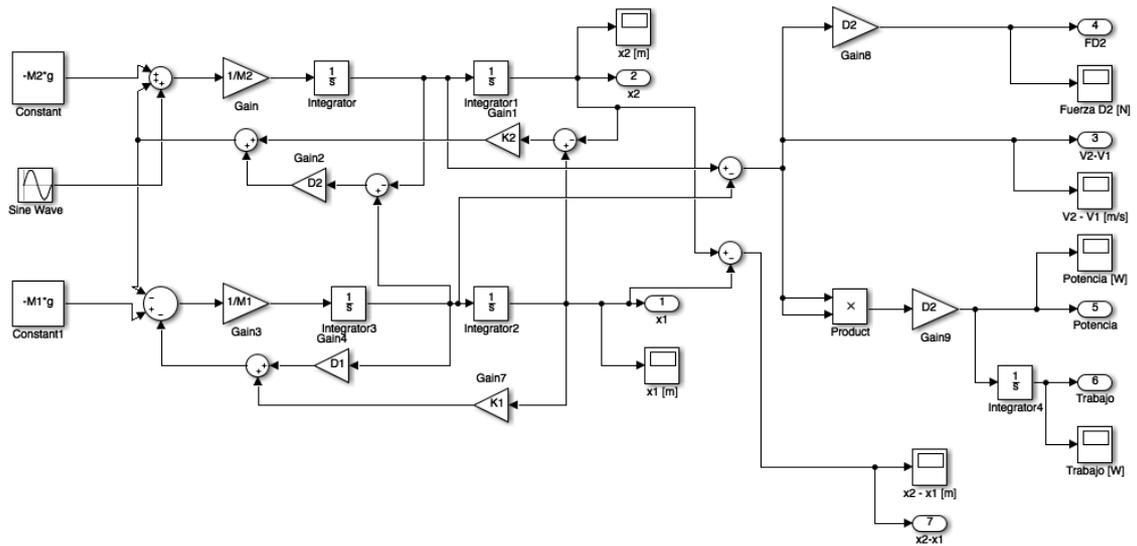


Figura 12.a Esquema del sistema para simular el amortiguador con la oscilación de frenada como input.

Resultados obtenidos:

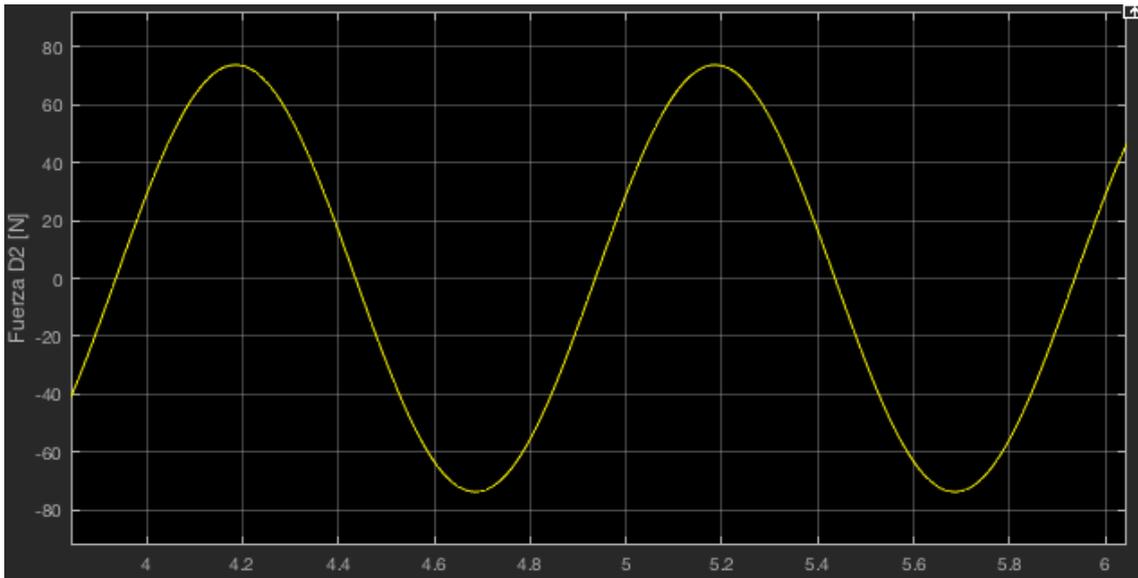


Figura 12.b Fuerza realizada por D2 [N]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

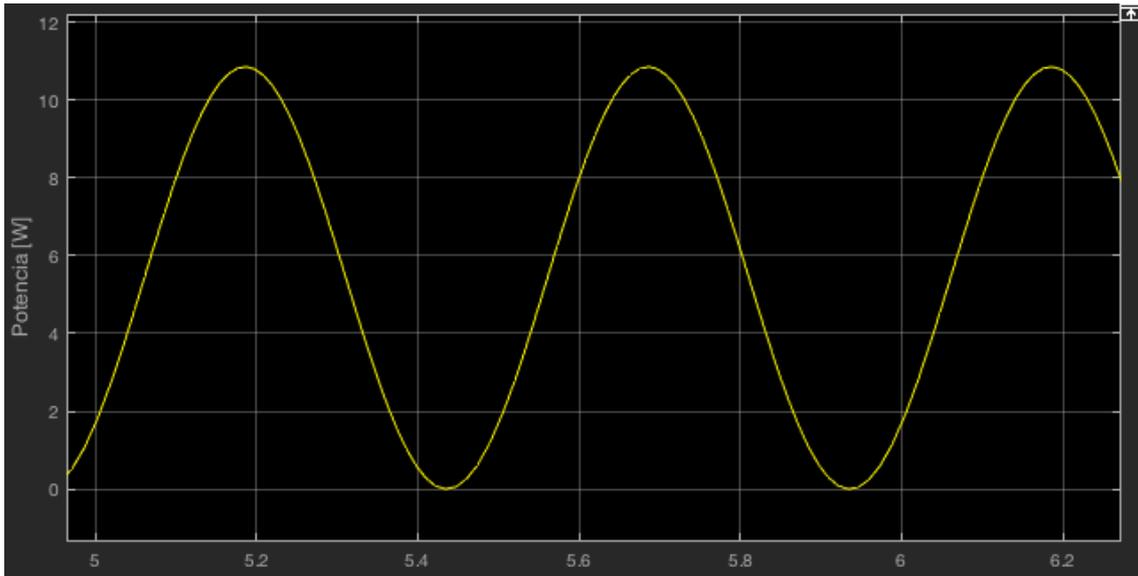


Figura 12.c Potencia disipada por D2 [W]

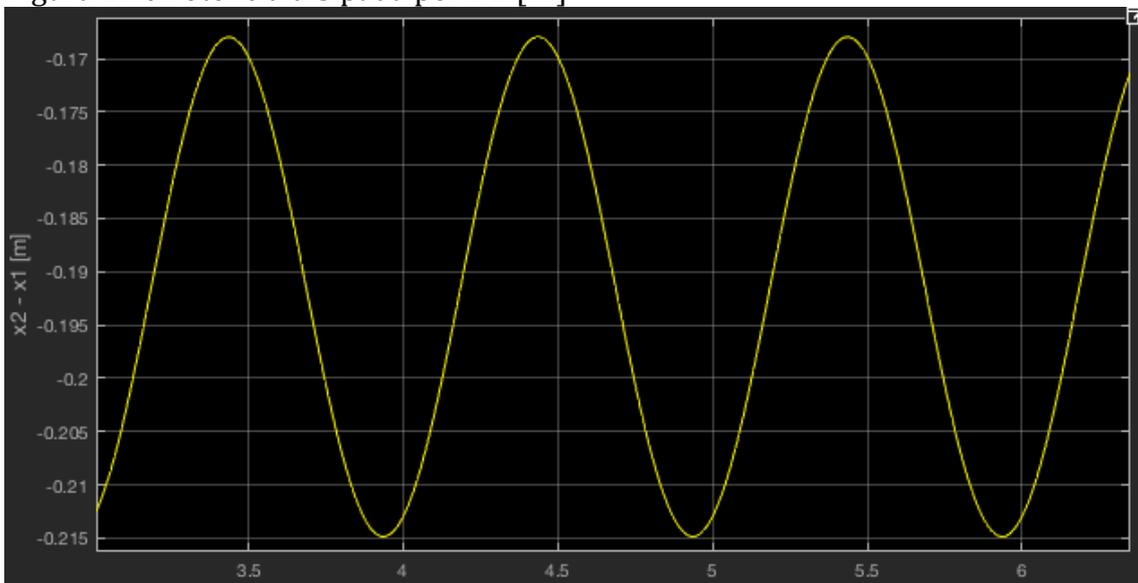
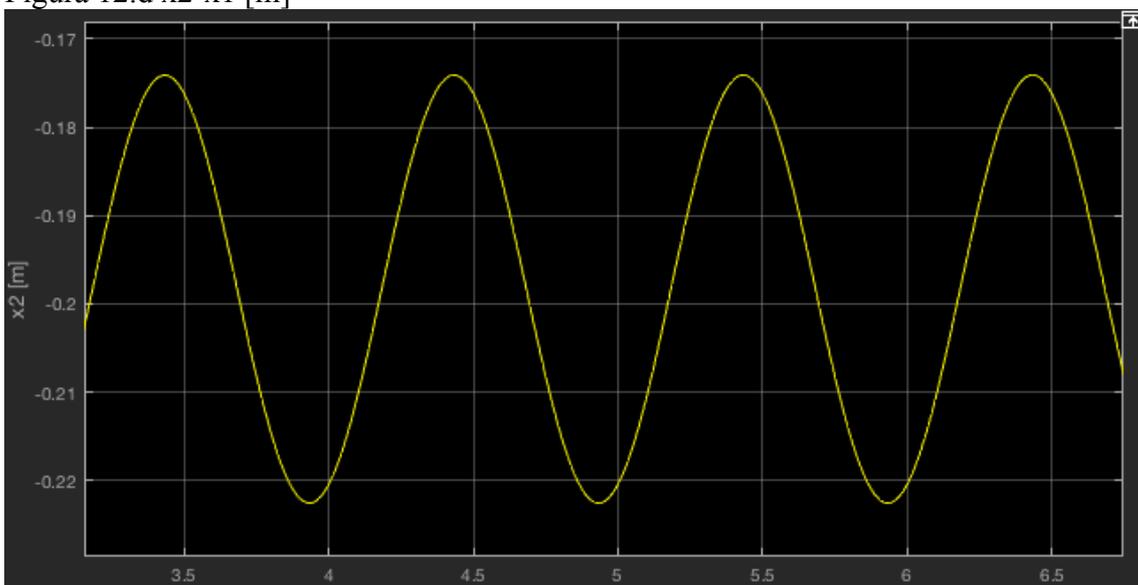


Figura 12.d $x_2 - x_1$ [m]



SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Figura 12.e x2 [m]

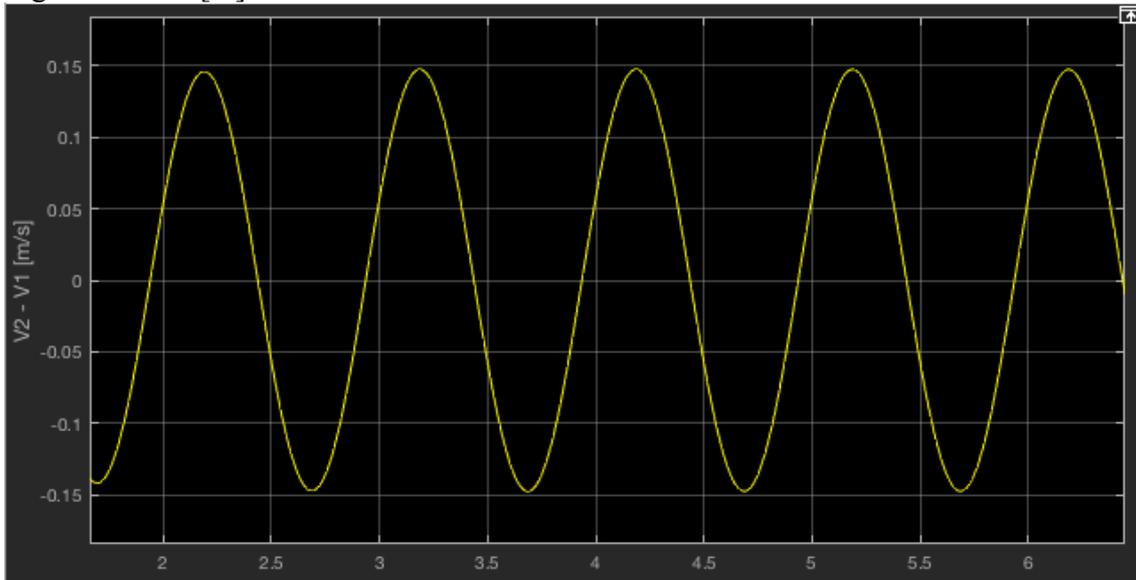


Figura 12.f $V2 - V1$ [m/s]

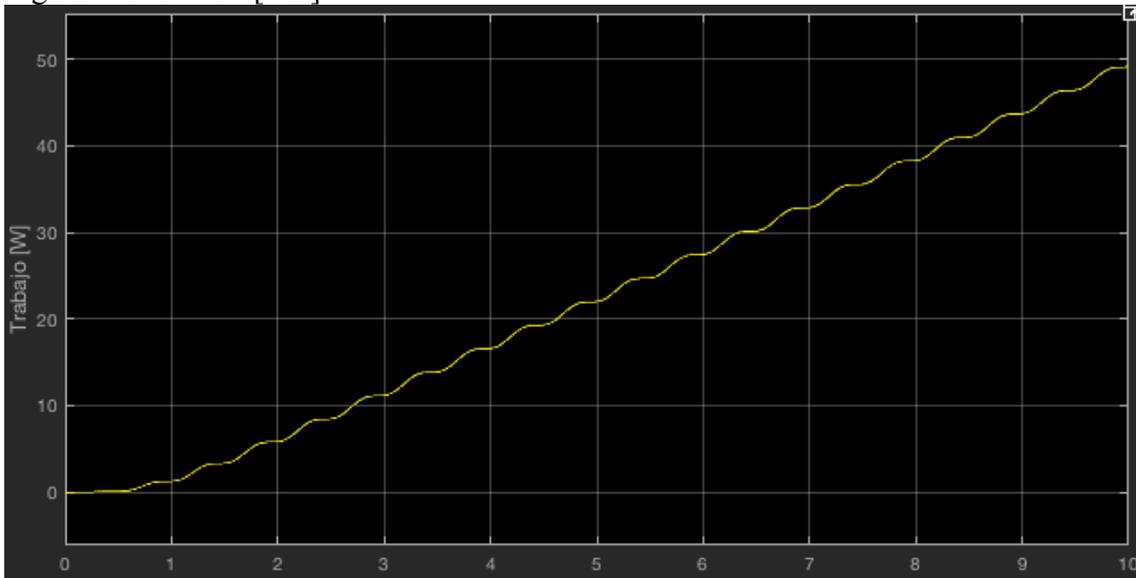


Figura 12.g Trabajo despejado por D2 [W]

Conclusiones

- $x_2 - x_1$ sigue dando valores similares.
- X_2 oscila varios centímetros.
- FD_2 es la fuerza del amortiguador menor que en la vibración.
- La potencia disipada por D_2 , es mucho menor que en la vibración.
- El trabajo total de este caso nos da una pendiente de unos 5W, esperaba que fuera mucho mayor que la de la vibración. No he conseguido encontrar ningún error que indique que está mal calculada. La amplitud de la Fuerza entrada de cabeceo en M_2 es de 80N; si la subimos a 1000 N, lo que sería casi la mitad del peso de los 250Kg de la moto, las graficas suben hasta 800W de energía producida. Esto sería un cabeceo que dejaría la rueda trasera cerca de levantarse. Como durante la conducción en carretera sólo frenamos durante estimo el 2.5% del tiempo y en torno a el 5-10% en ciudad, voy a centrarme en recuperar en

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

energía en la vibración, además las frenadas suaves producirán muy poco cabeceo.

3. Badenes(medio periodo de una señal senoidal con una amplitud de 20cm y una anchura de 20cm/(40 Km/h)). Este caso es de especial intereser para no quemar nuestro dispositivo):

Esquema:

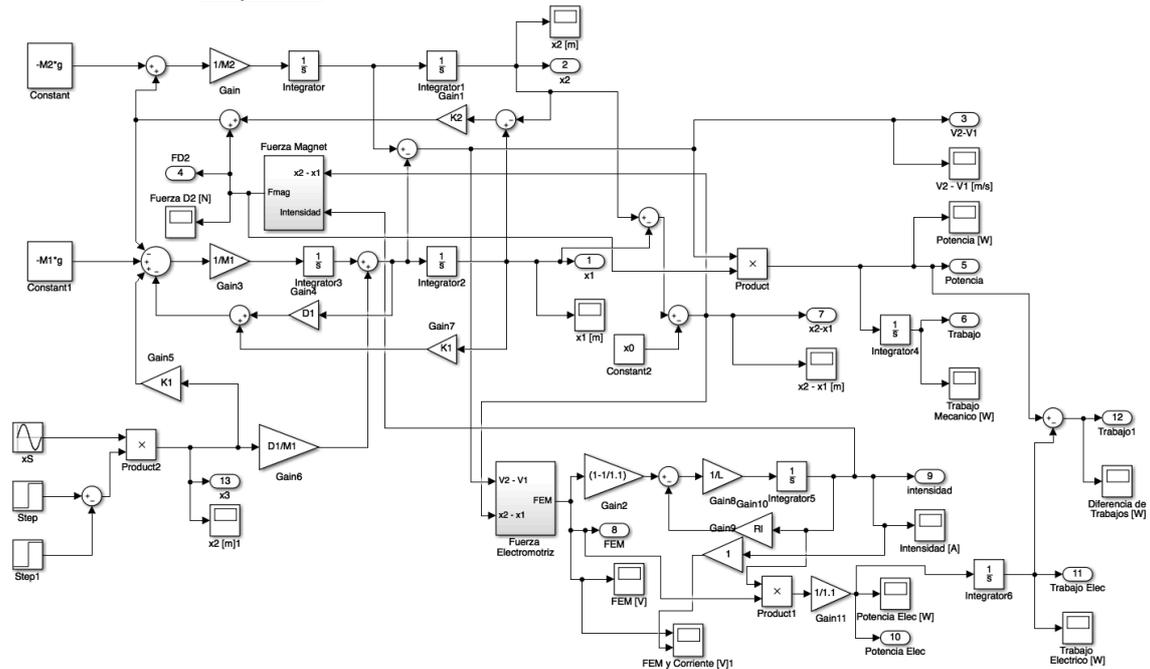
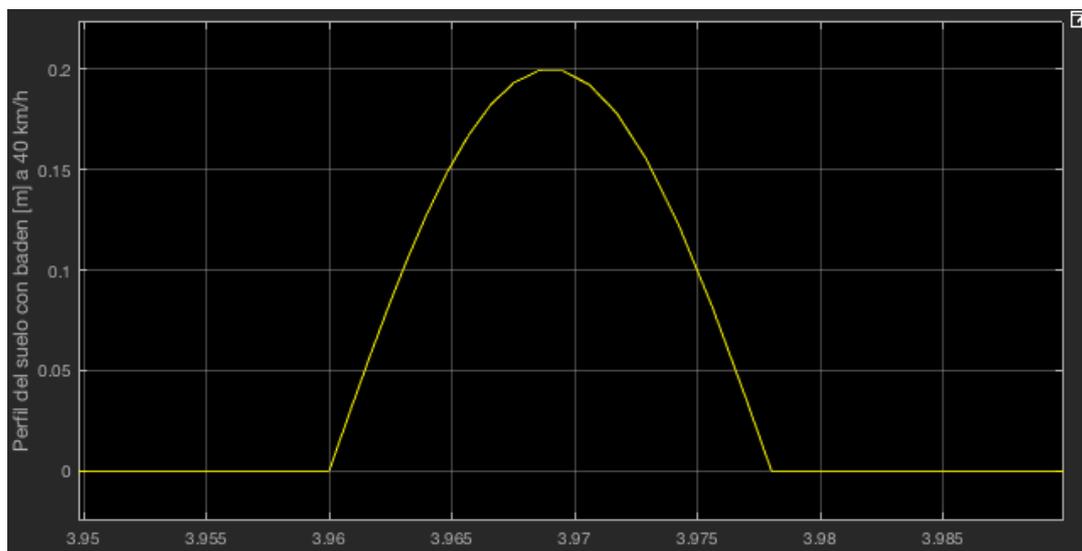


Figura 13.a Esquema del sistema corregido para simular el amortiguador con un badén como input.

Resultados obtenidos:



SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Figura 13.b Perfil de entrada del suelo con badén [m], el eje de abscisas es el tiempo, viajando a 40 km/h.

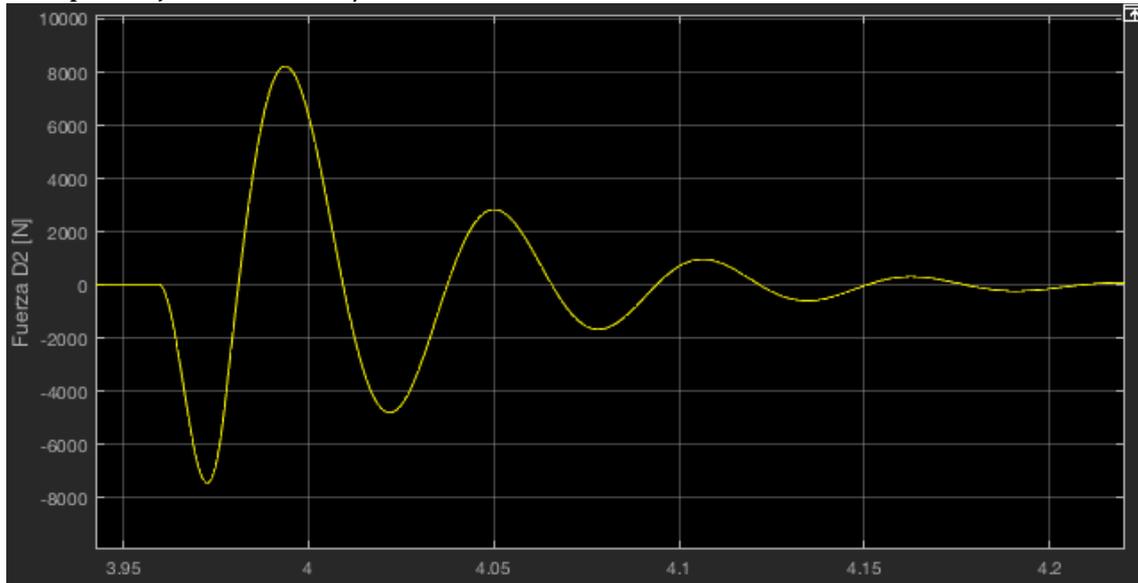


Figura 13.c Fuerza realizada por D2 [N]

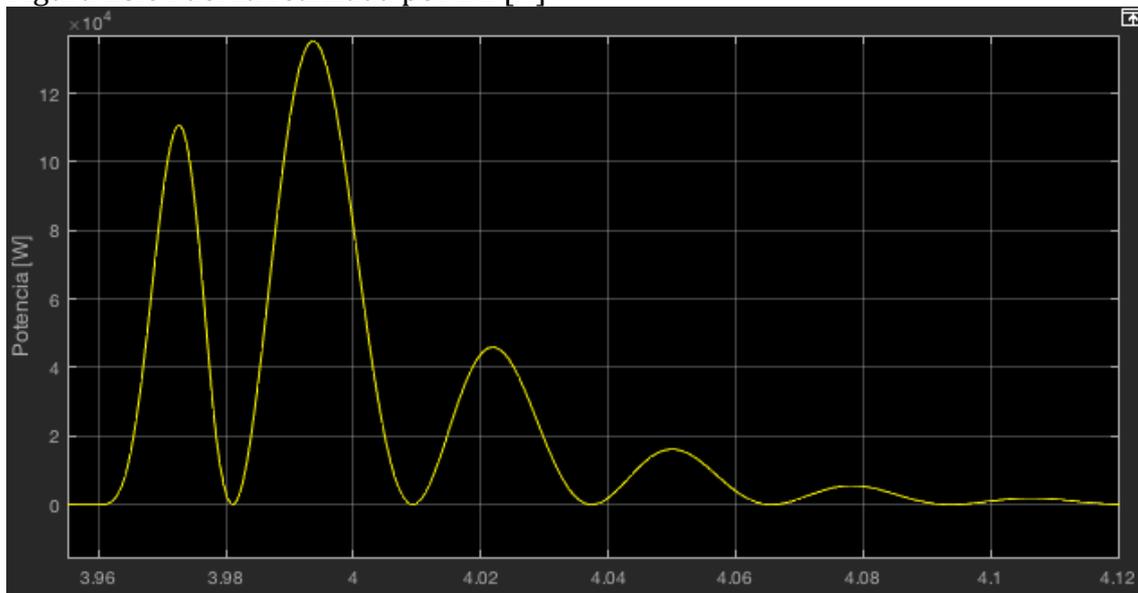


Figura 13.d Potencia disipada por D2 [W]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

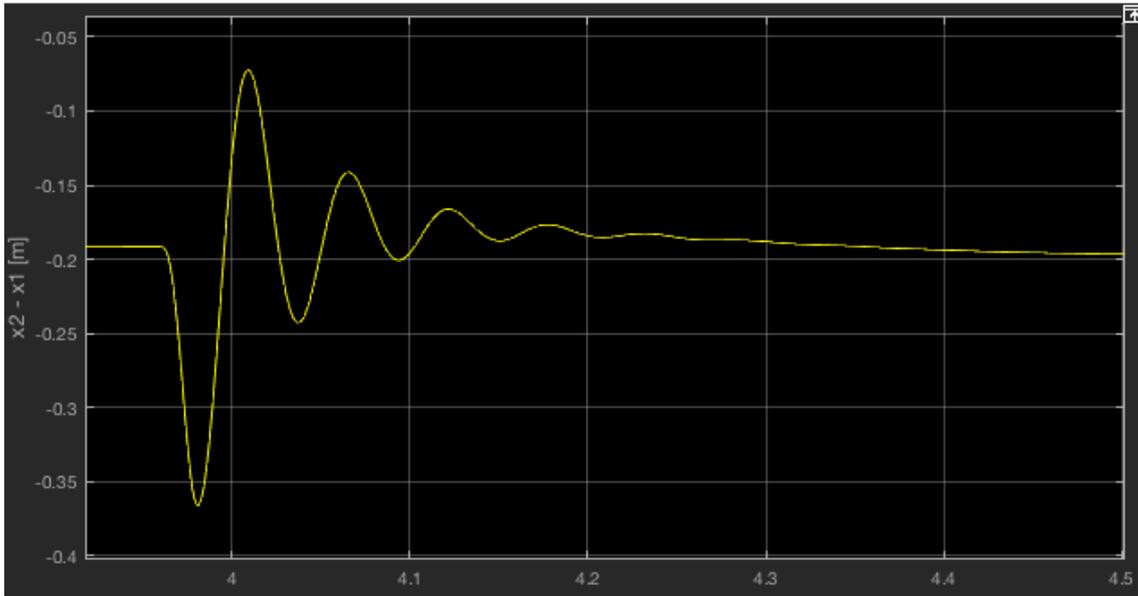


Figura 13.e $x_2 - x_1$ [m]

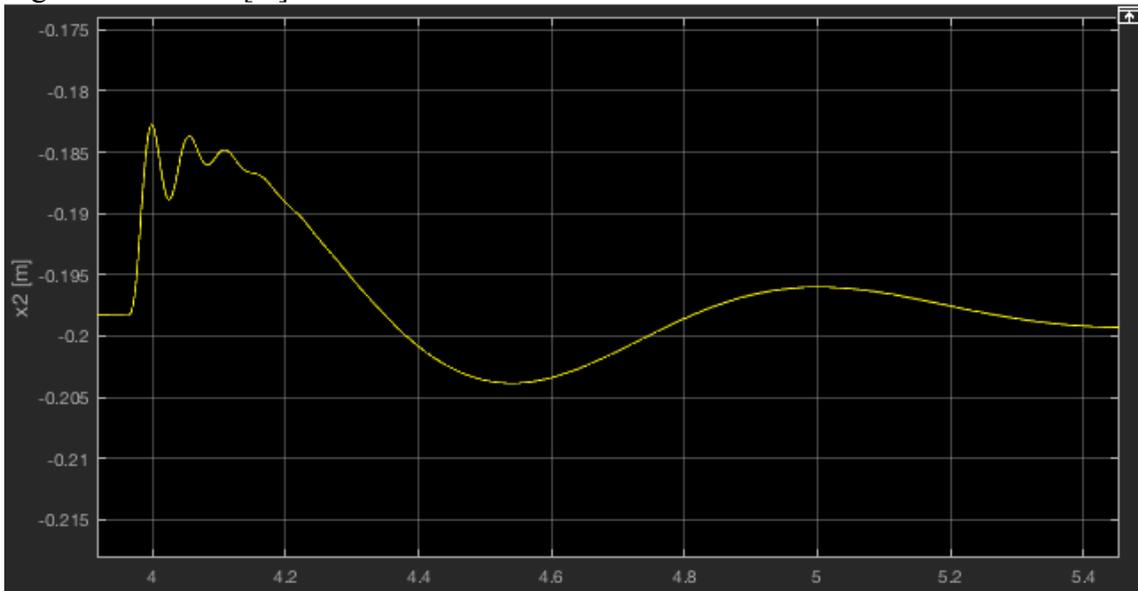


Figura 13.f x_2 [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

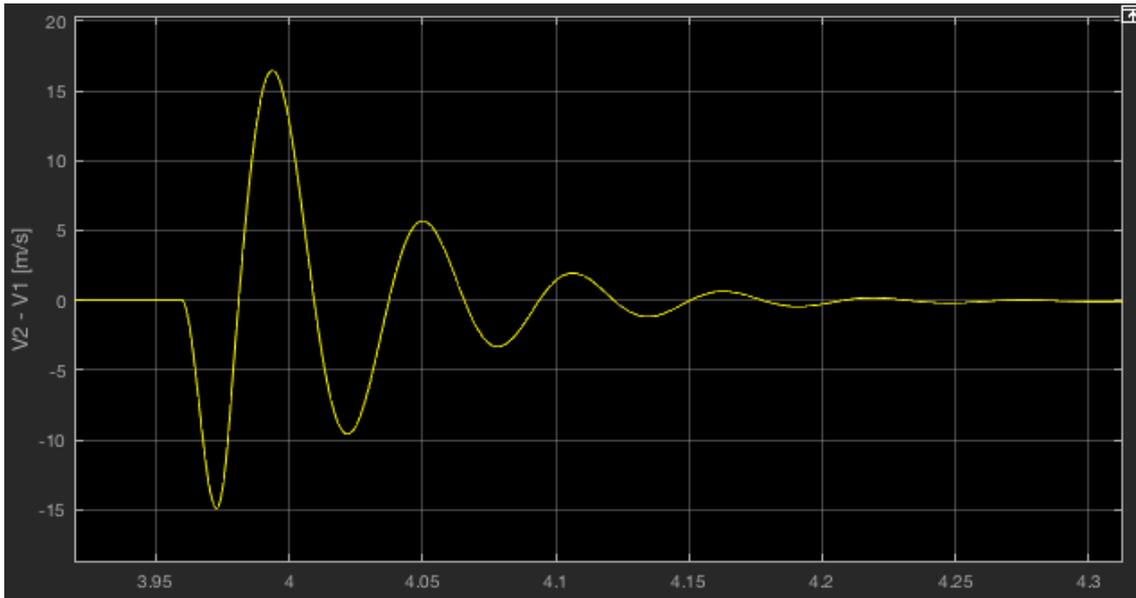


Figura 13.g $V2-V1$ [m/s]

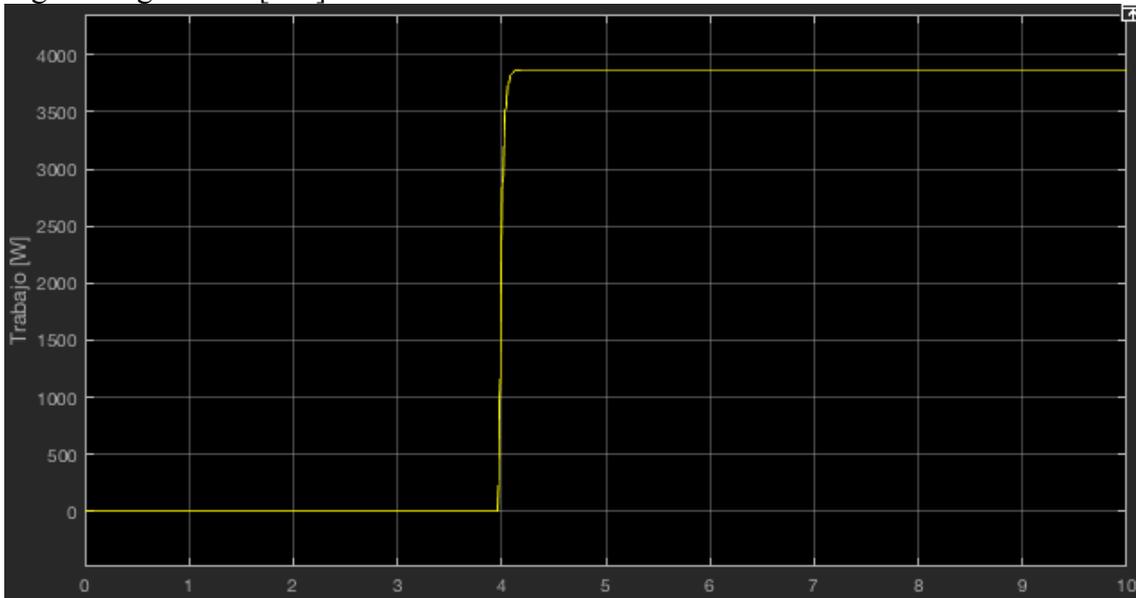


Figura 13.h Trabajo despedido por D2 [W]

Conclusiones

- $x2$ y $x1$ pegan un saltito como era de esperar.
- FD2 mete un pico de 8kN.
- La potencia disipada por D2 mete dos picos enormes de 11 y 13kW, aunque solo duran 20ms cada semiperiodo. Habría que diseñar la bobina particularmente para ser capaz de resistir estos embates.
- En cuanto al trabajo disipado obtenemos un escalón de 4kJ, pero nos sería muy difícil aprovecharlo sin quemar la bobina. Por tanto creo que lo más adecuado sería poner un “isolator”(otro amortiguador de emergencia pequeño en serie con el principal) diseñado para en estos casos de pico, absorber el golpe del badén, o sino ingeniar alguna medida diferente que haga que el dispositivo no se queme en esta situación.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Ahora, procedo a exponer los resultados en los tres casos de trabajo de nuevo pero con el modelo no lineal de imán+bobina construido en Matlab y que tanto trabajo nos ha traído:

El script utilizado en Matlab ha sido:

```
clc
clear
s=tf('s');

% generic model for a 600cc motorcycle

%parametros mecanicos del sistema del amortiguador:

M1=16;           % Masa de la rueda [Kg]
M2=(170+80)/2;  % Masa de la mitad del cuerpo de la moto [Kg]
K1=200000;      % Constante elástica del muelle equivalente de la
rueda [N/m]
K2=6400;        % Constante elástica del amortiguador [N/m]
D1=100;         % Constante de amortiguación equivalente de la rueda
[N/(m/s)]
D2=500;         % Constante de amortiguación del amortiguador
[N/(m/s)]
AmplitudFrenada=250*2*M2/800; % Fuerza del cabeceo de la moto durante
la
                    % frenada proporcional respecto a un coche de 800 Kg
[N]
g=9.8;          % Gravedad [m/s^2]
x0= -M2*g/K2;  % Posición de x1(posición vertical de la rueda) con el
                    % coche en reposo sobre la calzada
Ke=1.3;         % Relacion de transformación Ke=Vi/Vout buscada por
el
                    % regulador de tensión que se colocaría a la salida de
la
                    % bobina para enganchar a la batería

% Electric parameters:

nu0=4*pi*10^-7; % permeabilidad magnetica en el vacio [N/A^2]
```

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

`%Parametros del iman:`

```
m=100;           % Momento dipolar magnetico del im•n [A*m]
momento_Neodimio=9e5; %Momento dipolar magnetico del Neodimo [A/m^2]
radioiman=(m/(momento_Neodimio*2*pi))^(1/3);% radio del iman dado que
           % su altura es el doble del radio [m]
DensidadNeodimio=6800; % Densidad del neodimio [Kg/m3]
PesoNeodimio=2*pi*radioiman^3*DensidadNeodimio; %Peso del iman [Kg]
```

`%Parametros de la bobina de varias capas:`

```
ro=5.81e6;       % Conductancia del cobre [1/(Ohmio*m)]
N=400;          % Numero de espiras
a=0.0005;       % radio del conductor [m]
b=20*a^2;       % Grosor de la pared de la bobina [m]
R=radioiman+b/2;% Radio medio de la bobina [m]
l=N*(2*a)^2/b;  % Longitud de la bobina [m]
Rl=0.0172*(2*pi*R*N)/(pi*(a*1000)^2); %Aproximacion en Ohmios de la
           % Resistencia a 20 ∫ C
L=0.8*N^2*(R*100)^2/(15.4*(R*100)+22.8*(l*100)+25.4*(b*100))/10^6;
           % Inductancia de una bobina de varias capas en uH
DensidadCu=9860; % Densidad del cobre [Kg/m^3]
PesoCu=2*pi*R*N*pi*a^2*DensidadCu; % Peso del cobre [Kg]
PesoTotal=PesoCu+PesoNeodimio; % Peso total del neodimio y el cobre
[Kg]
```

Así obtenemos los parámetros:

AmplitudFrenada= 78 N
Altura del imán(l)=2.61*2 cm
Radioimán= 2.61 cm
Peso del Imán= 0.75 kg
Longitud bobina = 2 cm
Radio medio bobina=3.61 cm
L= 11 mH
Rl= 1.98 Ω
Peso bobina=.70kg
Peso total=1.45 Kg

La inductancia esta calculada con una fórmula muy específica para bobinas de varias capas del cap. 33 Construcción de una bobina de varias capas con núcleo de aire de la página web Análisis de circuitos en Ingeniería –Referencia 18.- que es un compendio de conocimiento y problemas resueltos:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

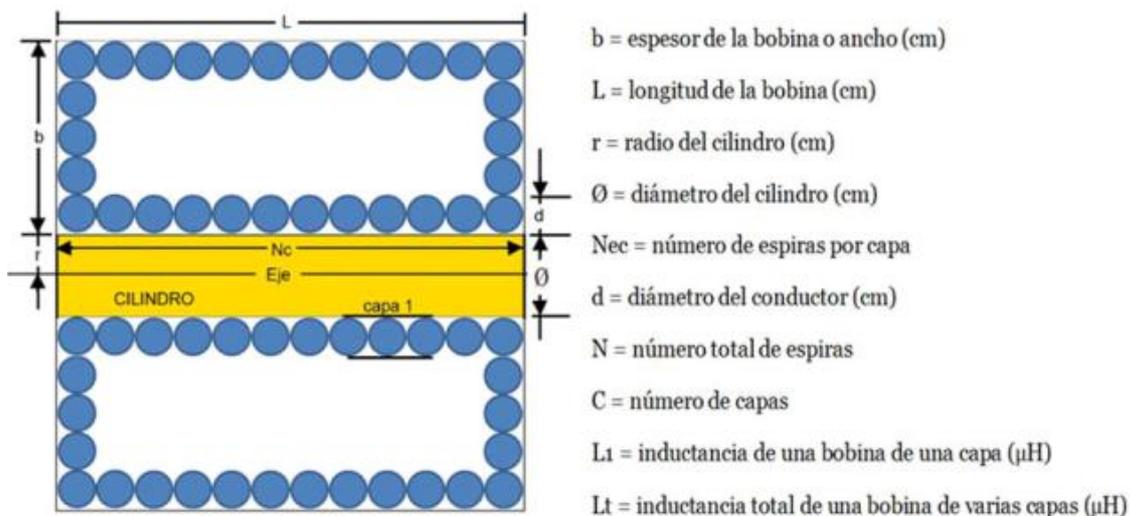


Figura 14.a Bobina de varias capas con núcleo de aire y sus parámetros. –Referencia 18.-

Ejemplo 1

CÁLCULO DE UNA BOBINA CON NÚCLEO DE AIRE				
Valores de entrada ejemplo 1 (Cambie únicamente las celdas en amarillo)				
radio del cilindro	diámetro de la bobina	Número total de espiras	Longitud	diámetro del conductor
$r(\text{cm})$	$\emptyset(\text{cm})$	N	$L(\text{cm})$	$d(\text{cm})$
1,6	3,2	2400	5	0,064
$r(\text{mm})$	$\emptyset(\text{mm})$	N	$L(\text{mm})$	$d(\text{mm})$
16	32	2400	50	0,64
valores de salida				
espesor	Número de capas	Número espiras x capa	Inductancia una capa	Inductancia total de la bobina
$b(\text{cm})$	C	N_{ec}	$L_1(\mu H)$	$L_t(\mu H)$
$b = d^2 \frac{N}{L}$	$C = \frac{b}{d} = d \frac{N}{L}$	$N_{ec} = \frac{L}{d}$	$L_1 = \frac{N_{ec}^2 r^2}{22,8r + 25,4L}$	$L_t = \frac{0,8N^2 r^2}{15,4r + 22,8L + 25,4b}$
1,97	30,7	78,1	95,6	62,6E+03

Figura 14.b Cálculo de la resistencia y la inductancia de la bobina –Referencia 18.-

Ahora, procedemos a la simulación:

1. Vibración por el perfil rugoso de la calzada a 80 km/h :

Esquema:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

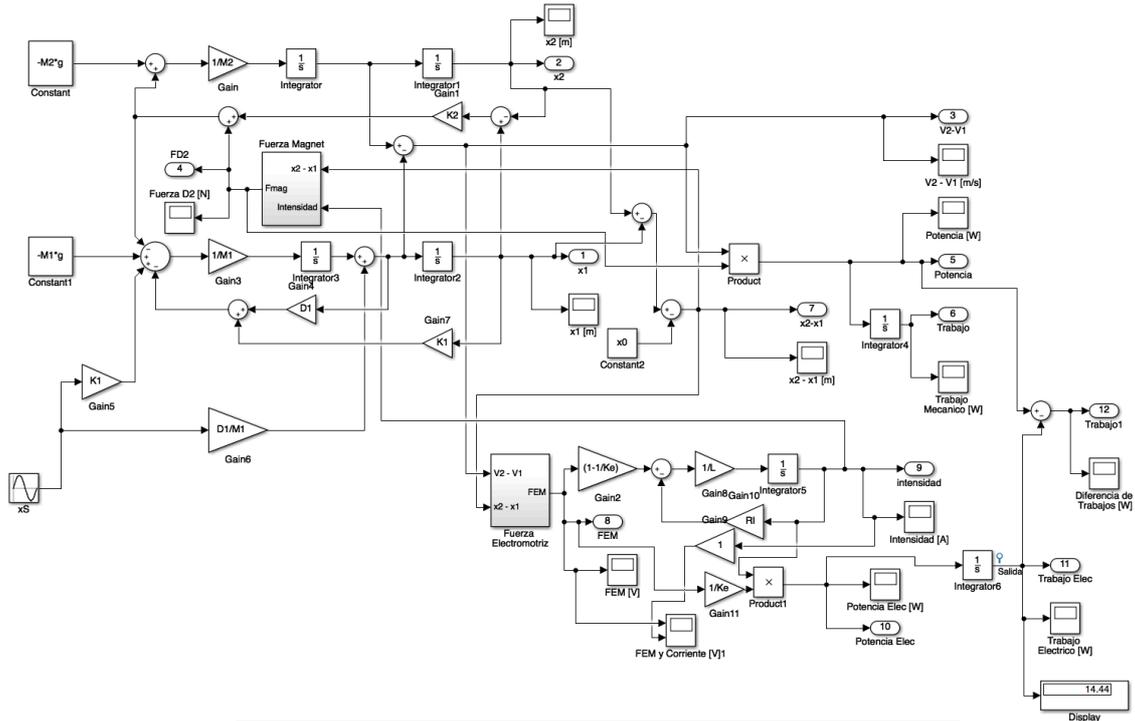


Figura 15.a Esquema de simulación para la vibración debida al suelo xs rugoso

Resultados

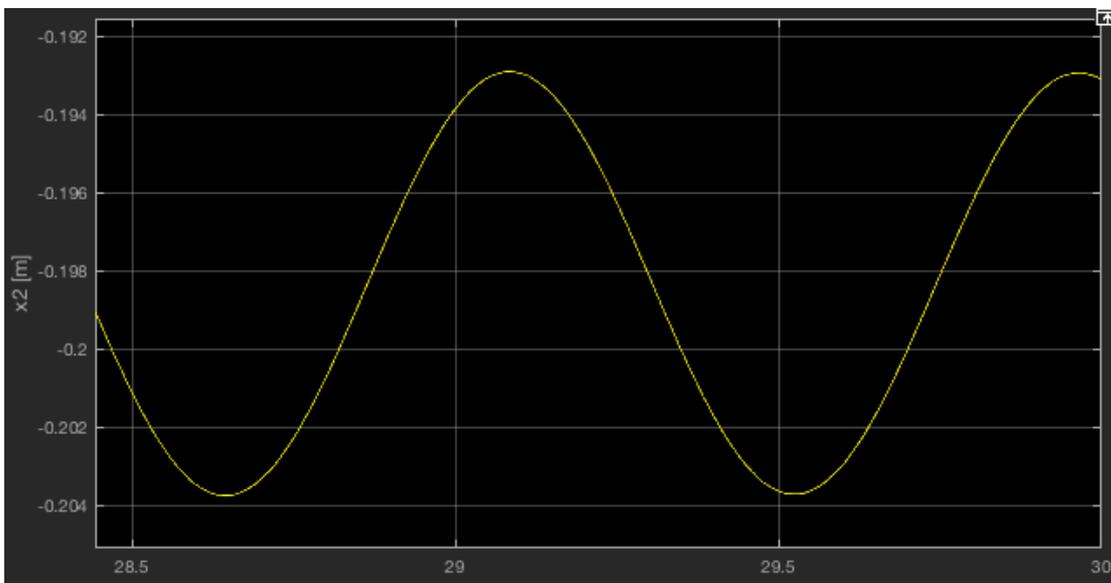


Figura 15.b x_2 [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

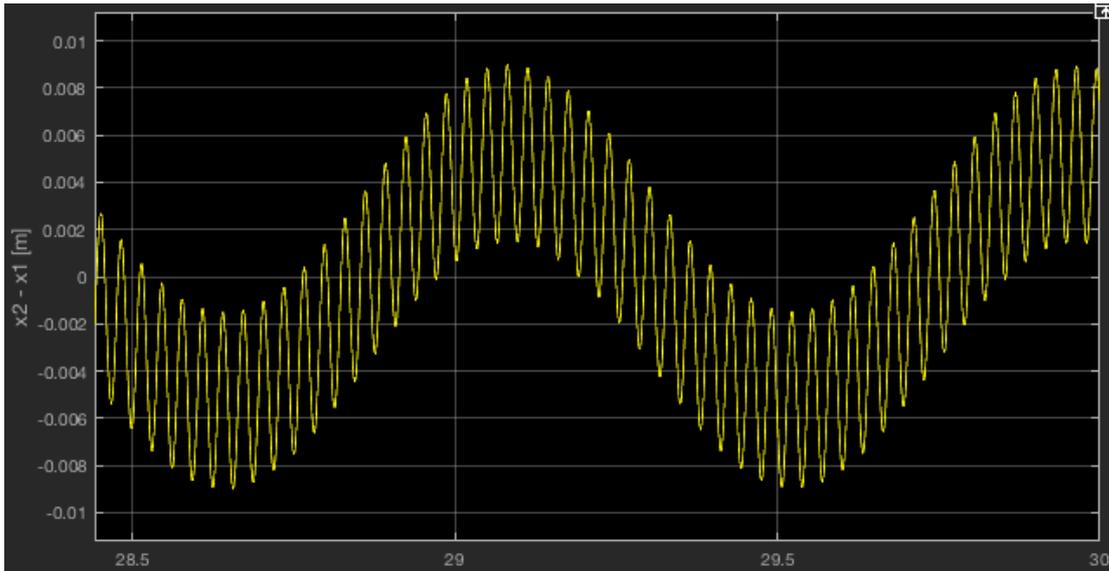


Figura 15.c $x_2 - x_1$ [m]

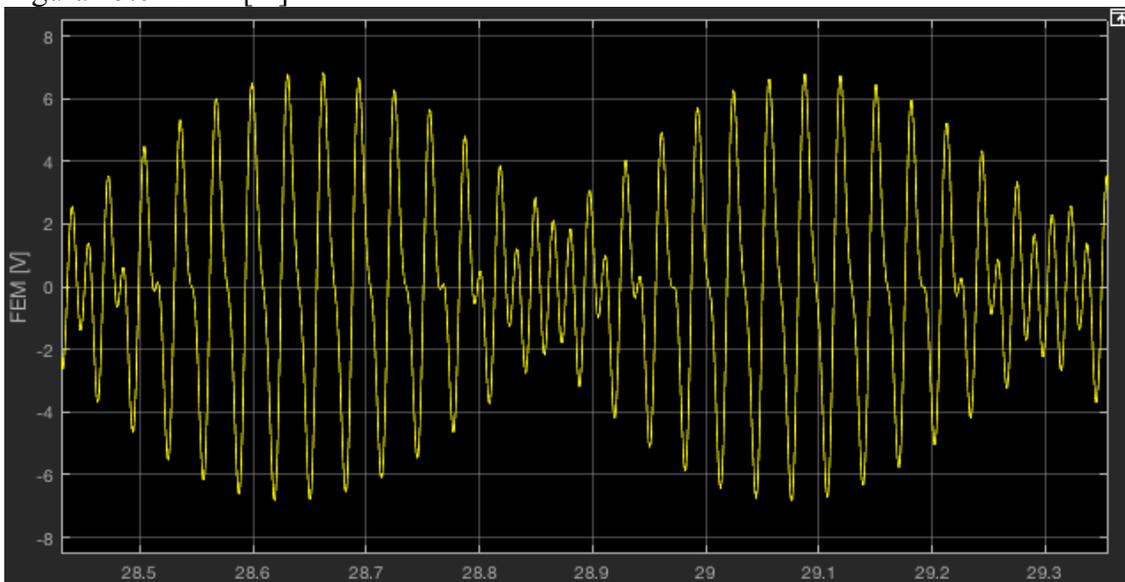


Figura 15.d FEM [V]

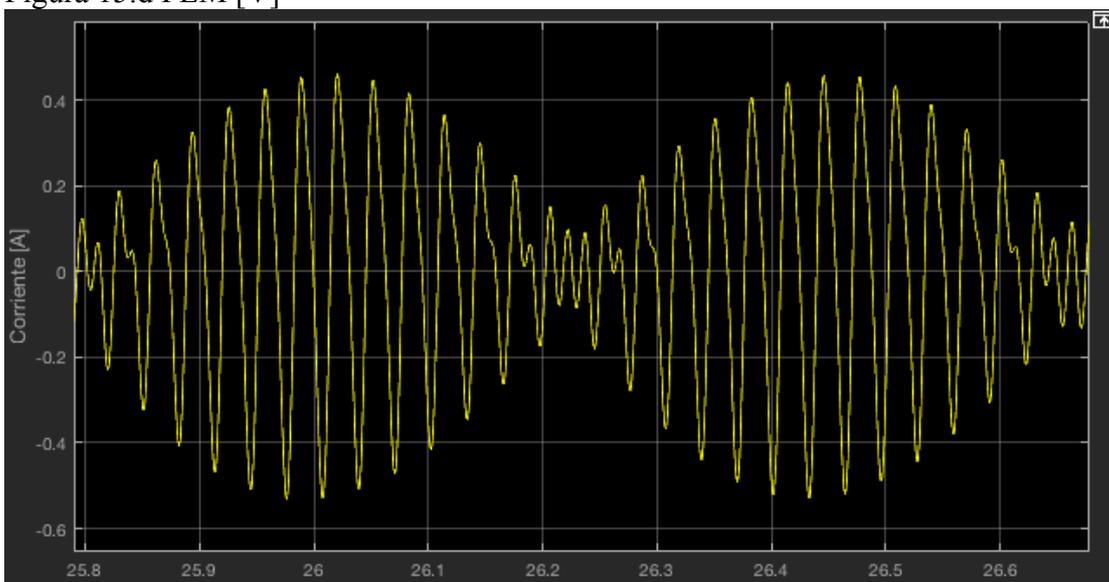


Figura 15.e Corriente [A]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

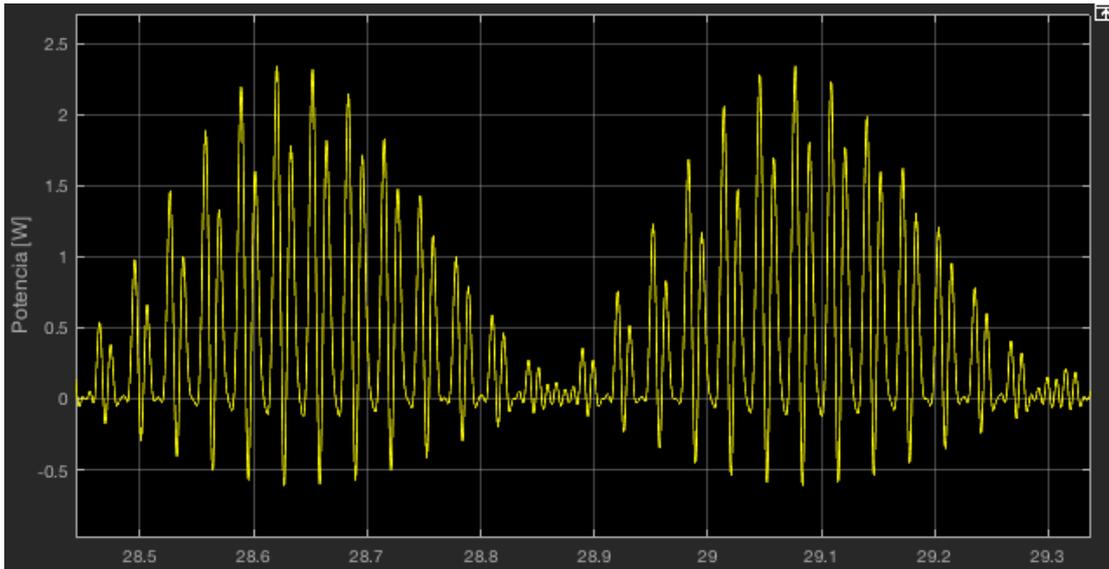


Figura 15.f Potencia [W]

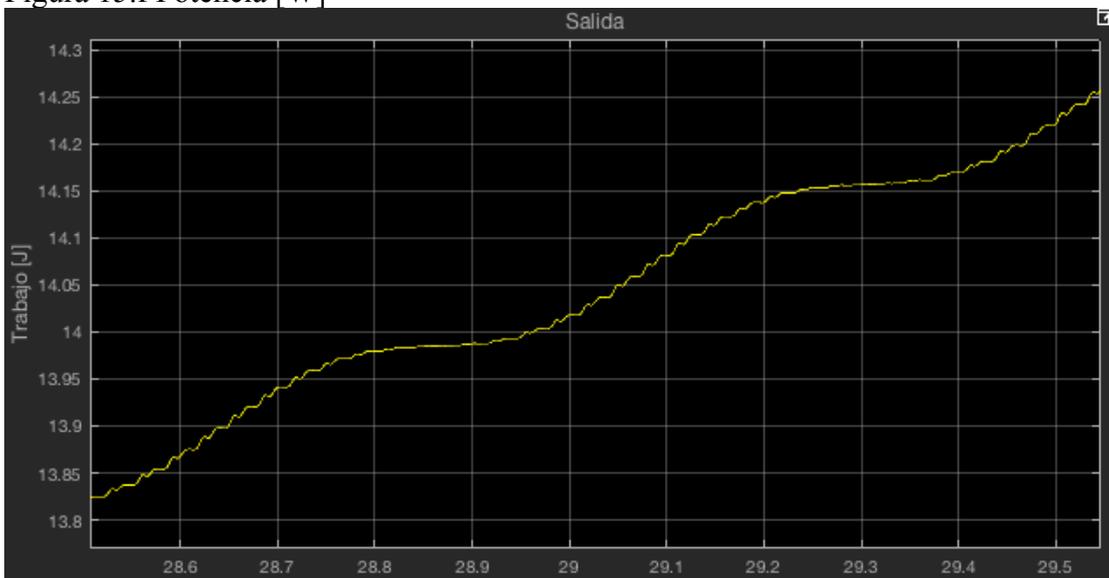
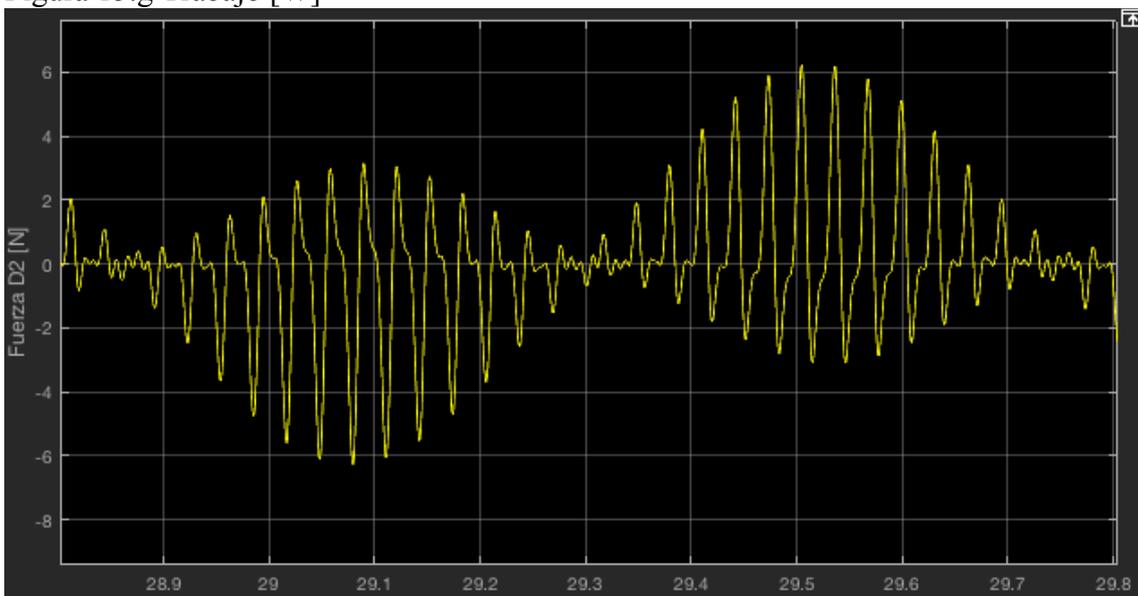


Figura 15.g Trabajo [W]



SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Figura 15.h Fuerza D2 [N]

Conclusiones

-Por desgracia, como podemos ver los valores que hemos obtenido son muy pequeños, generando una potencia muy pequeña en esta situación. Insuficiente para que sea rentable el método. Pero explorando valores, veamos ahora que pasa a 40 km/h:

1. Vibración por el perfil rugoso de la calzada a 40 km/h :

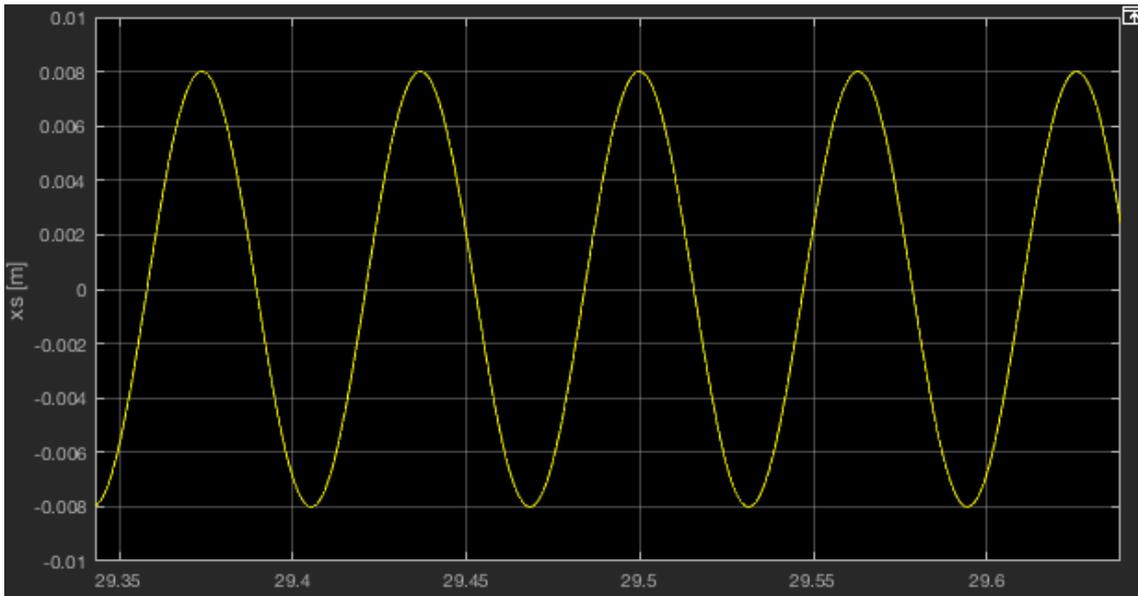
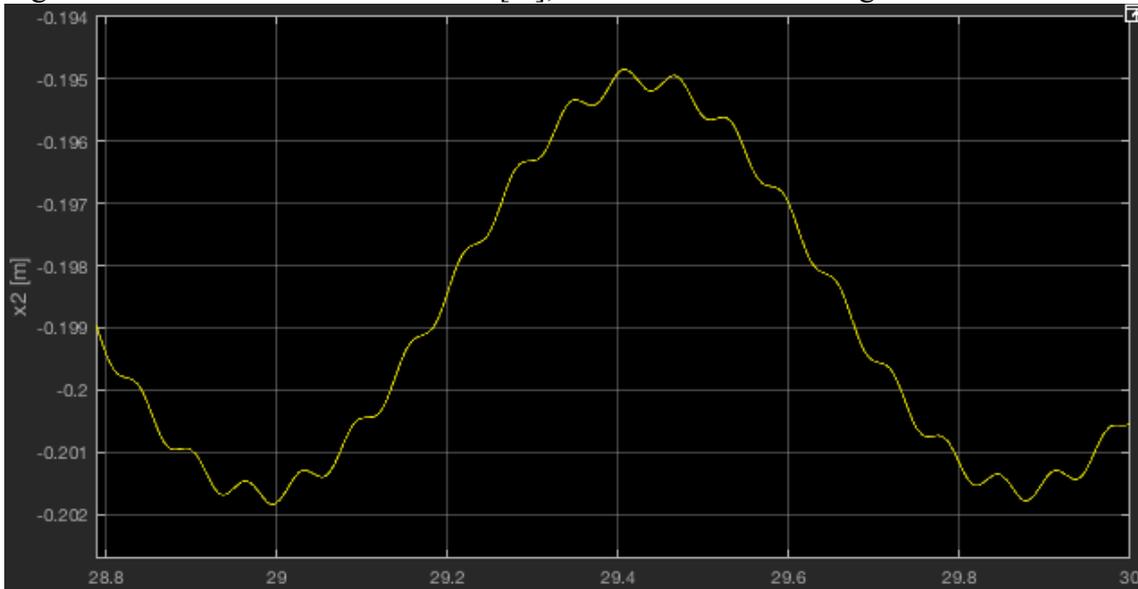


Figura 16.a Perfil del suelo a 40 km/h [m]; las abscisas están en segundos.



Figuras 16.b x_2 [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

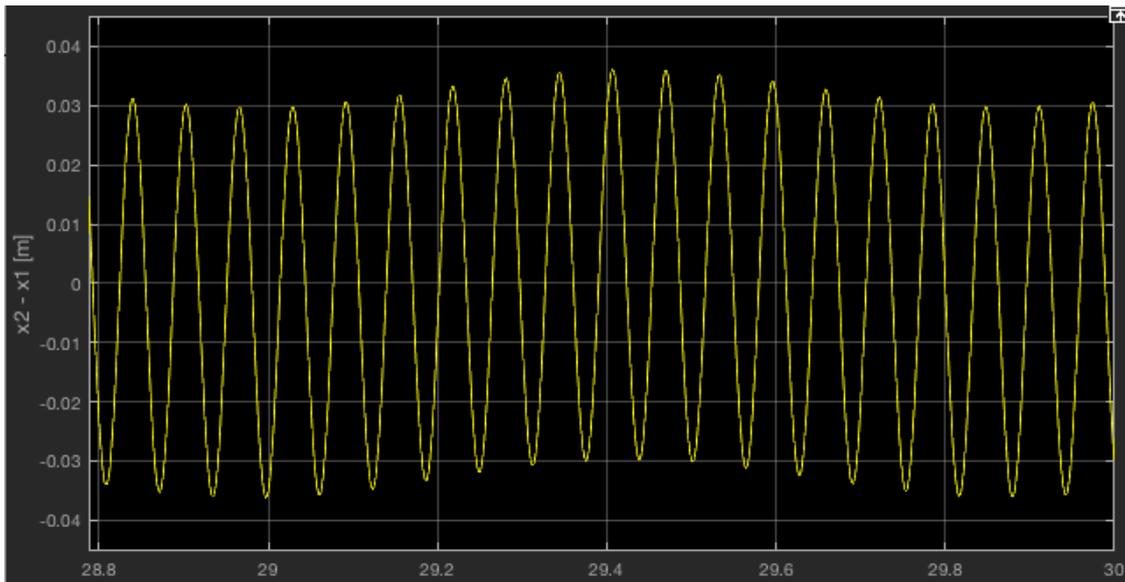


Figura 16.c $x_2 - x_1$ [m]

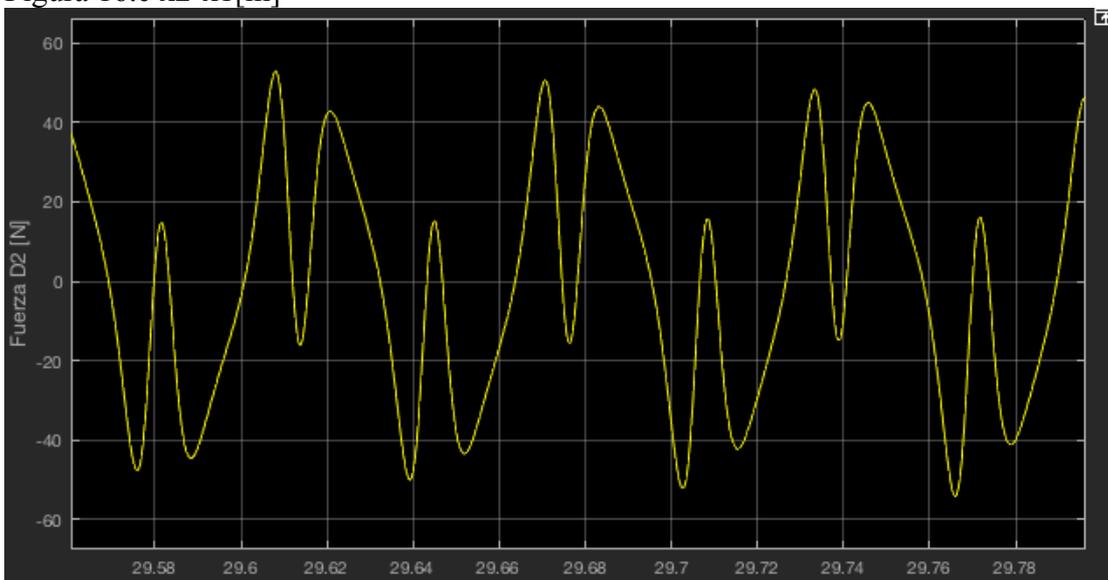


Figura 16.d Fuerza D2 [N]

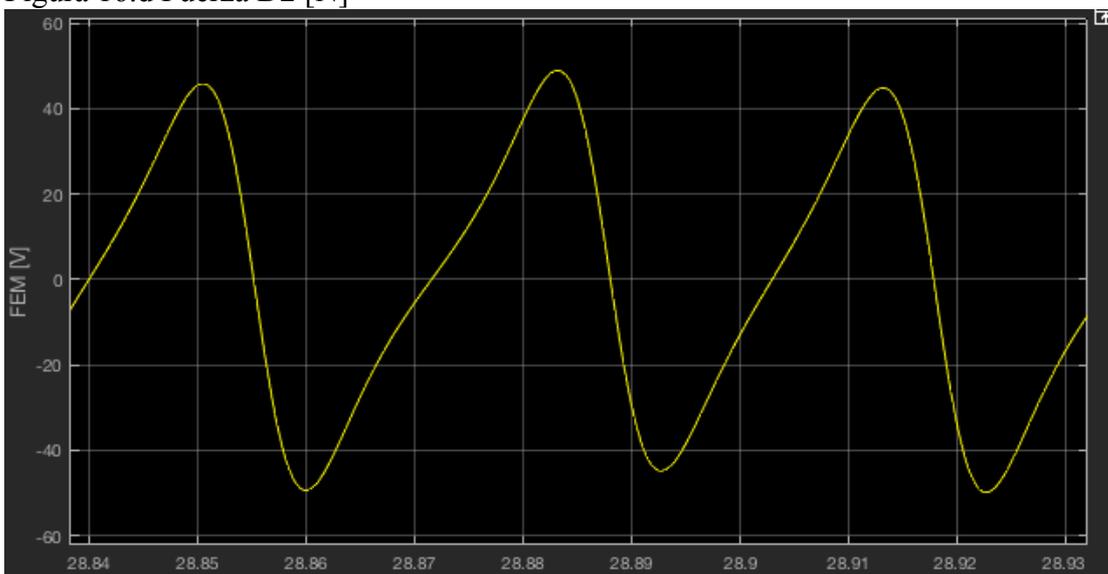


Figura 16.d FEM [V]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

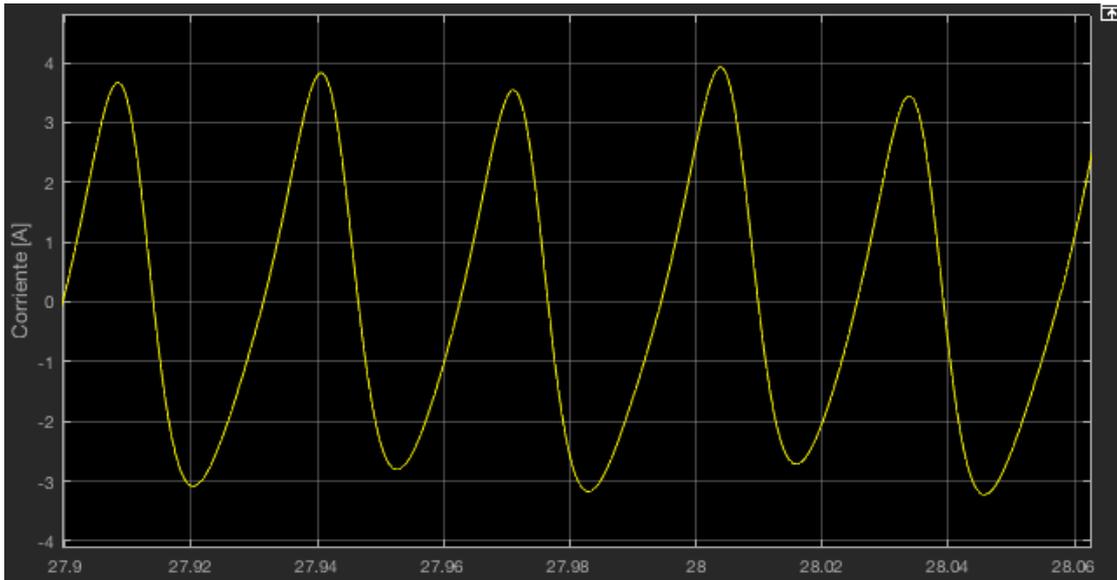


Figura 16.e Corriente[A]

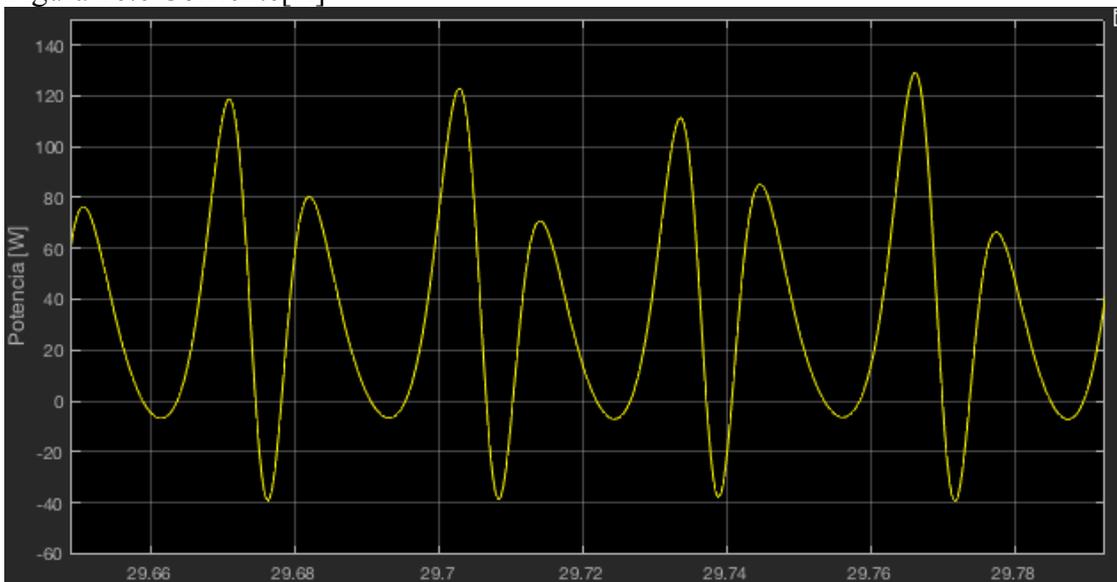
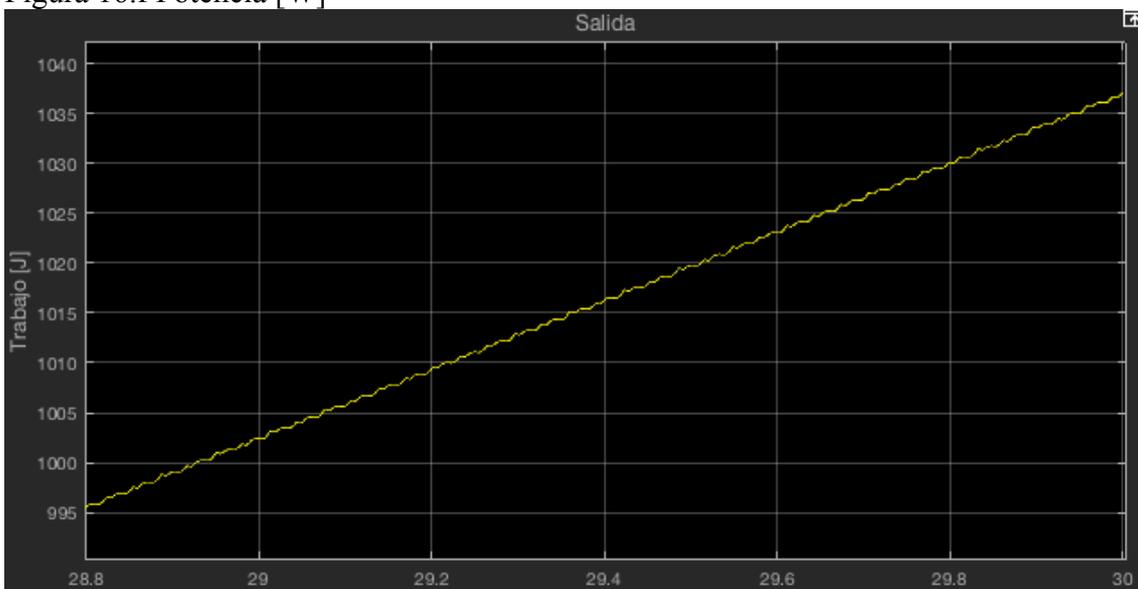


Figura 16.f Potencia [W]



SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

Figura 16.g Trabajo [J]; una pendiente de valor medio $P=(1037J-1002J)/(30s-29s)=35W$

Conclusiones

-A esta velocidad, el incremento de peso(1.2kg) ¡sí merece la potencia obtenida! (35W) Esto lo he calculado a través de una moto eléctrica ejemplo, la cual consume unos 22W/kg. Más adelante analizaremos económicamente este resultado.

-Creo que la parte mecánica del modelo actúa de filtro paso bajo para las frecuencias altas.

2. Caso de Frenada: (fuerza senoidal de Amplitud=80N, Periodo=1s sobre la masa M2):

Esquema:

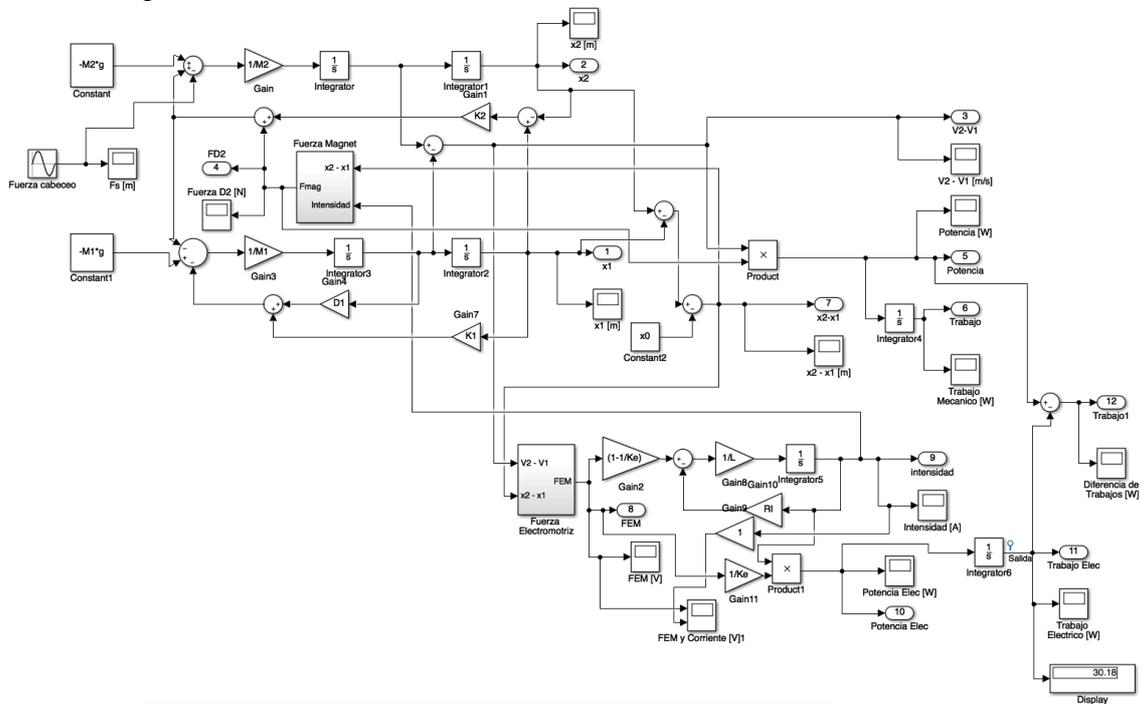


Figura 17.a Esquema con input de Frenada(Fs)

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

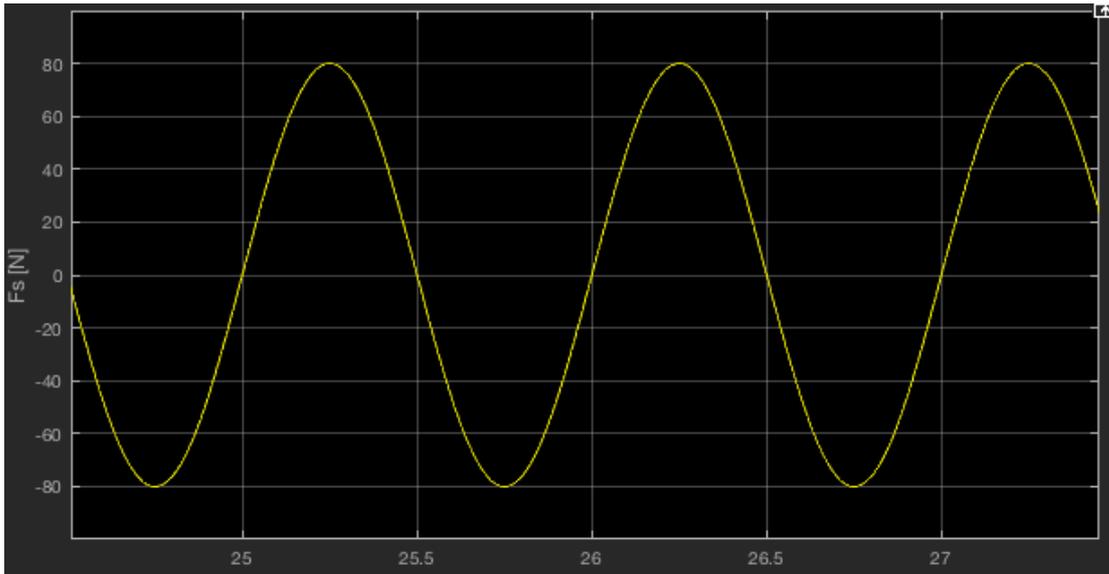


Figura 17.b Fuerza de entrada sobre M2 [N]

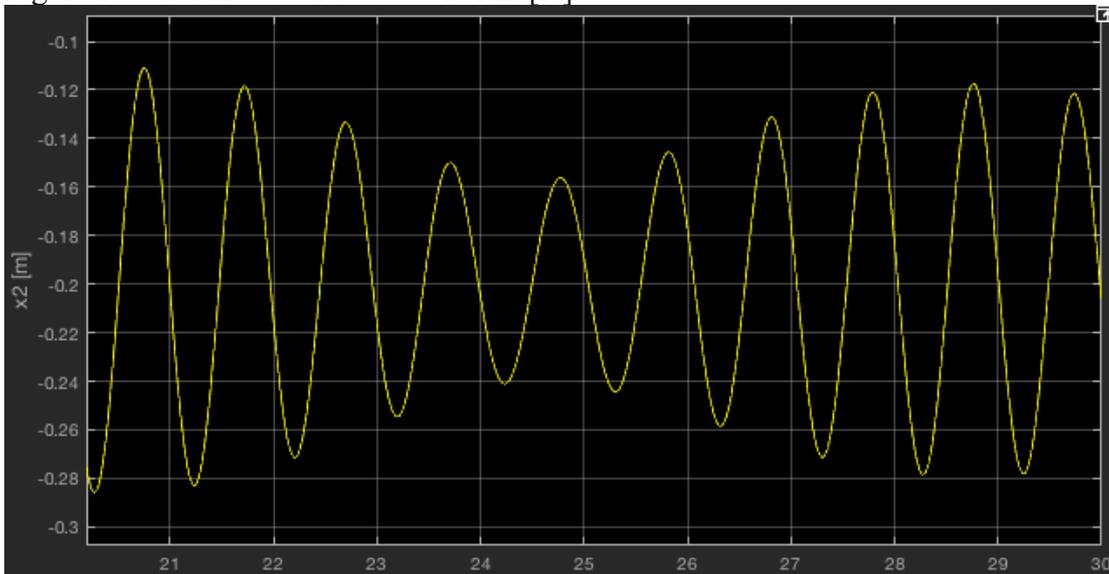


Figura 17.c x_2 [m]

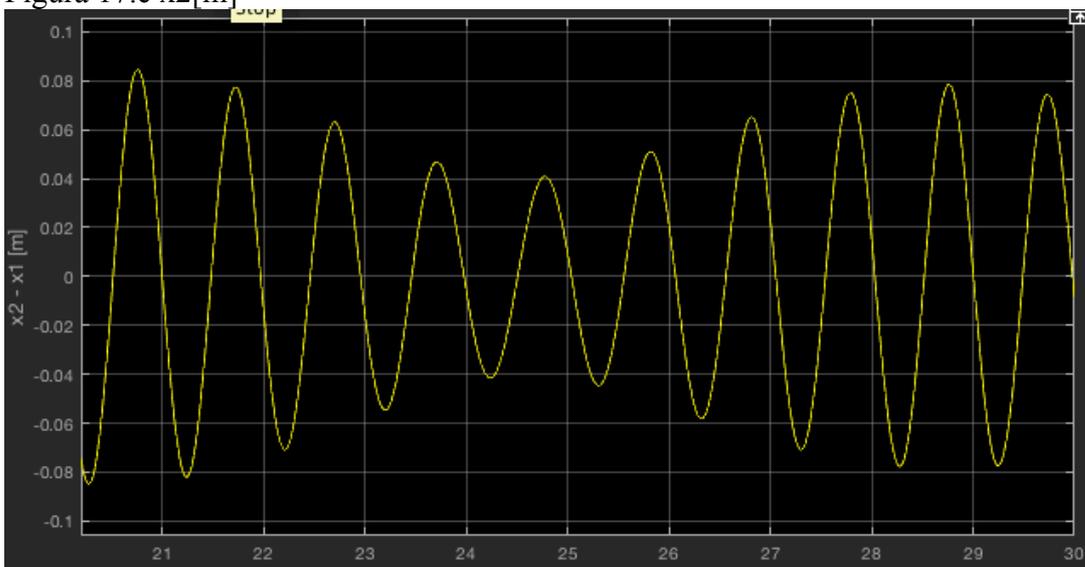


Figura 17.d $x_2 - x_1$ [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

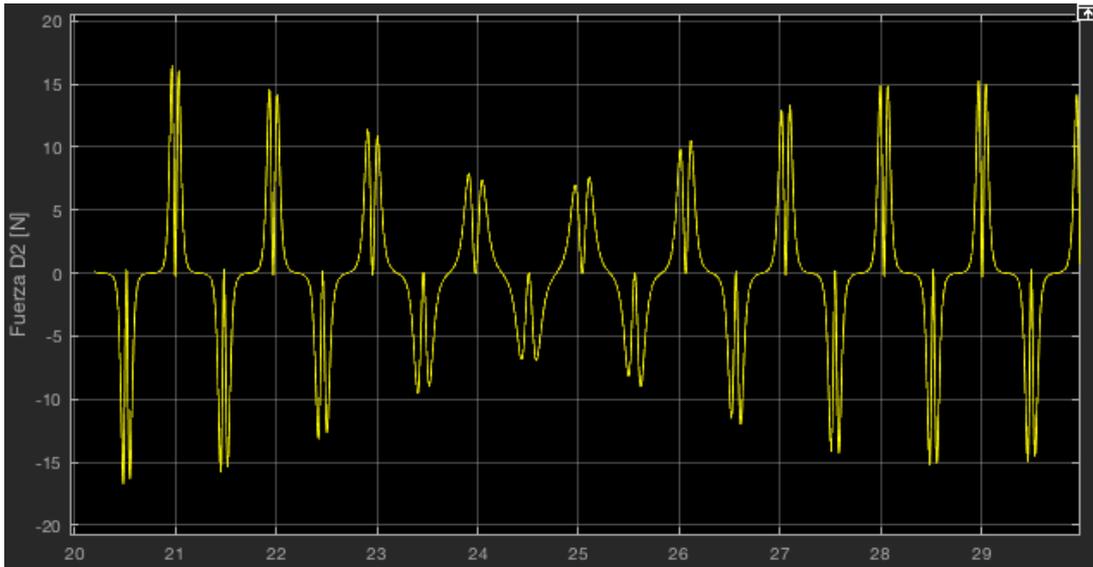


Figura 17.e F D2[N]

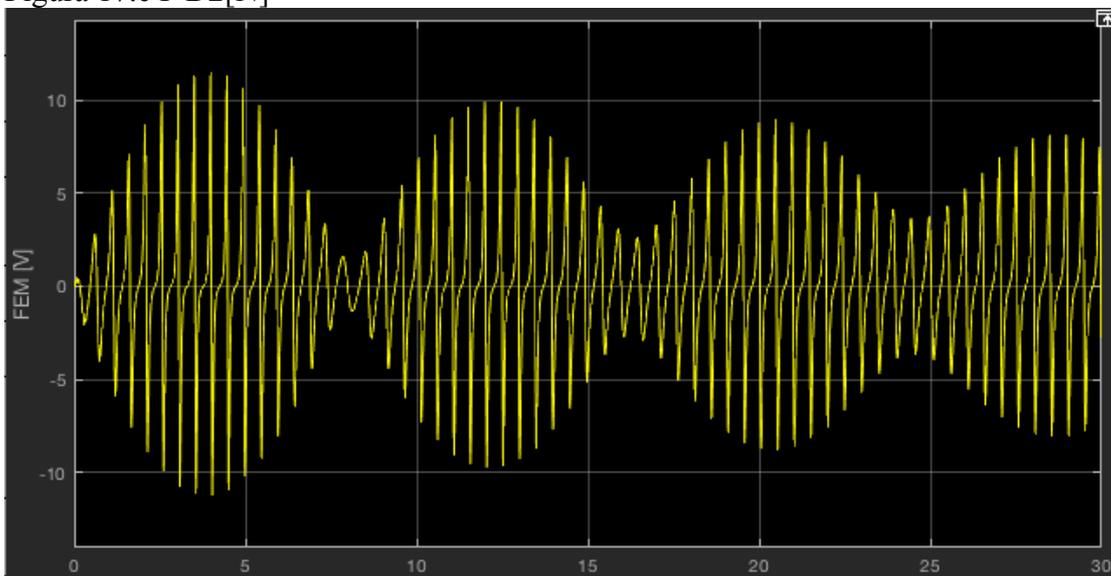


Figura 17.f FEM[V]

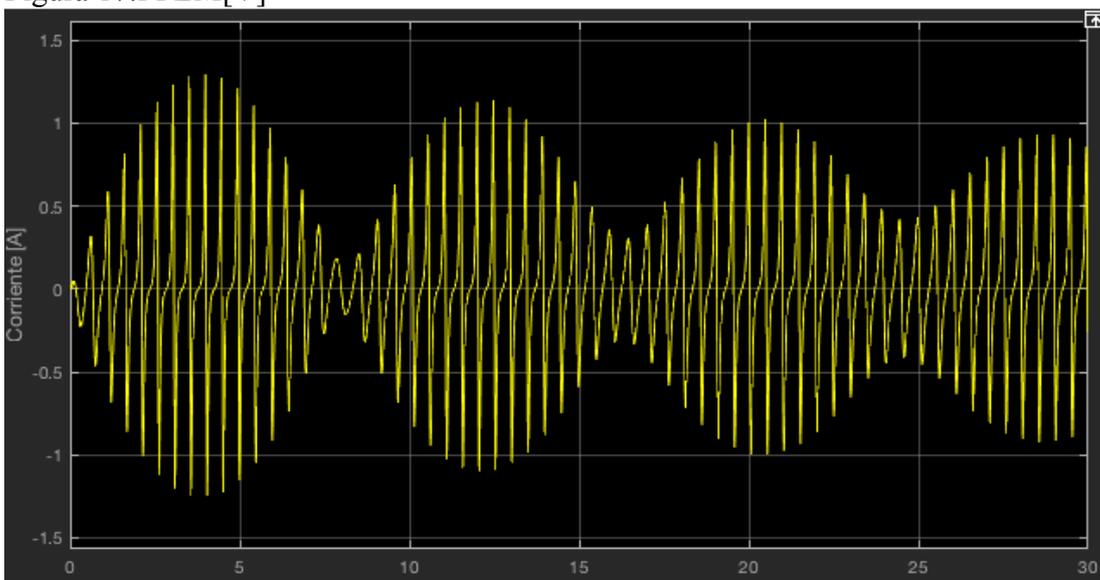


Figura 17.g Corriente[A]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

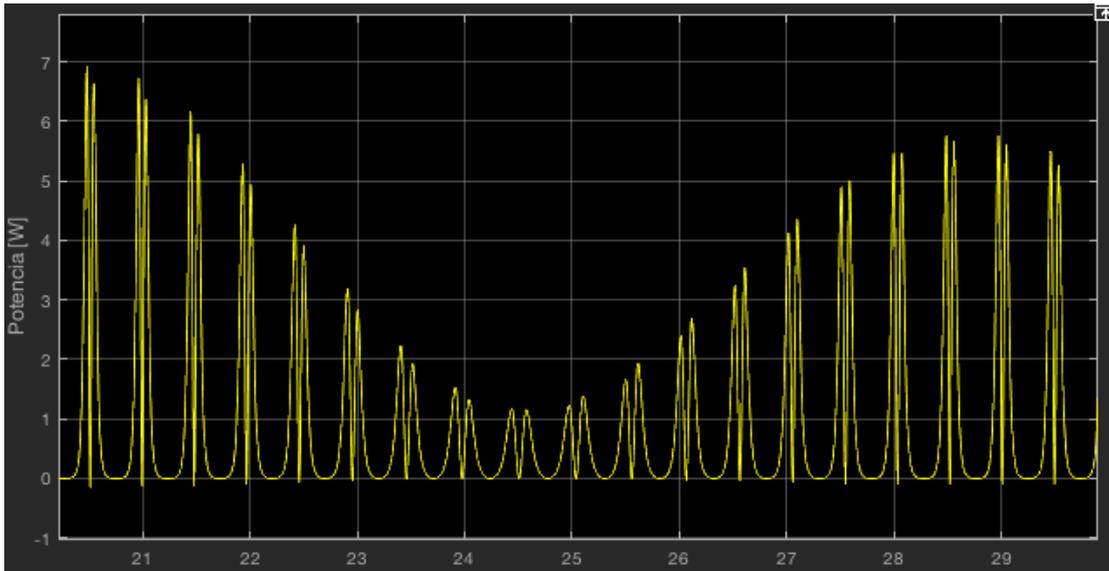


Figura 17.h Potencia[W]

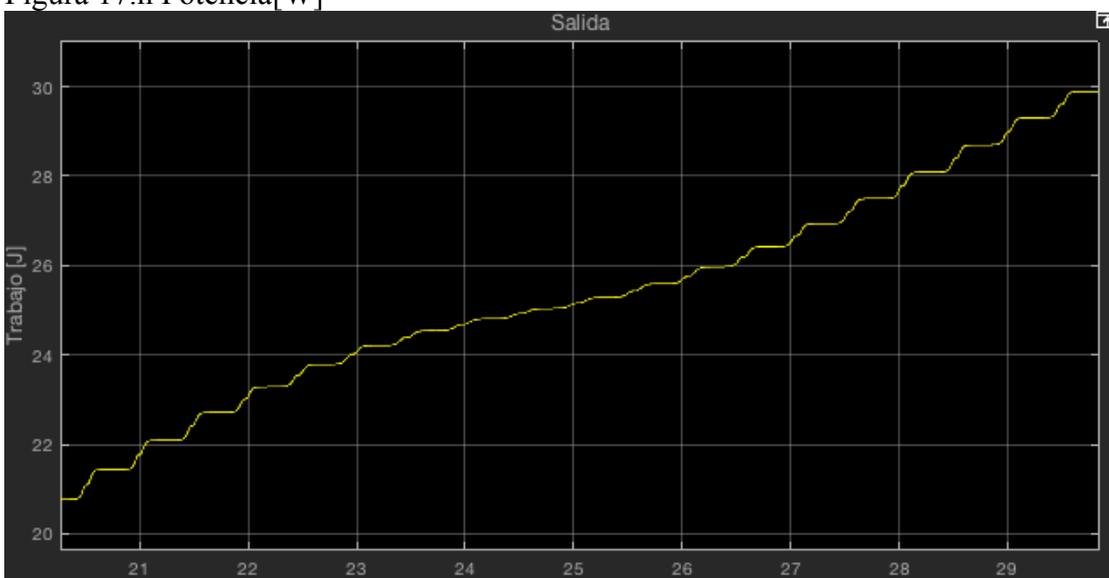


Figura 17.i Trabajo[J]

Conclusiones

- Como podemos ver, el trabajo obtenido con esta configuración de parámetros durante la frenada tampoco es útil. He orientado la obtención de energía a la vibración del suelo debido a que es la fuente de entrada más segura y continua.
- Por otro lado quiero añadir que habría que estudiar añadir un “isolator” en serie con el amortiguador principal o poner alguna otra medida para que en los picos de badenes y similares el dispositivo no se queme.

Análisis Económico de los resultados

Vamos a intentar sacar en claro si este dispositivo puede ser económicamente viable o no:

1. Datos de interés:

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

- Precio del neodimio: 60€/kg.
- Precio del cobre: 7€/kg
- Moto eléctrica Zero S –Referencia 19.-: Batería con 9.8 kWh de capacidad y bornas de 110V/220V de trabajo. Autonomía: 100-200 km. Peso: 171 kg en vacío.
- Peso de Cobre empleado: 0.7 kg
- Peso de Neodimio empleado: 0.75 Kg
- Peso estimado conservador de la parte para fricción viscosa del amortiguador: 0.2 kg
- Potencia obtenida con el dispositivo: 35 W

2. Cálculos:

- Consumo moto Zero S = $9.8 \text{ kWh} / (100-200 \text{ km}) = 5-10 \text{ kWh} / 100 \text{ km}$.
- Consumo a 100 km/h = $7.5 \text{ kWh} / 100 \text{ km} * 100 \text{ km/h} = 7.5 \text{ kW}$
- Consumo por kg de peso en carga a 100 km/h de media:
Consumo = $7.5 \text{ kW} / (171 \text{ kg} + 80 \text{ kg} + 20 \text{ kg}) = 27.6 \text{ kW/kg}$
- Peso extra del dispositivo cobre+Neodimio: $0.7 \text{ kg} + 0.75 \text{ kg} - 0.2 \text{ kg} = 1.25 \text{ kg}$
- Ahorro de potencia = $35 \text{ W} - 27.6 \text{ W/kg} * 1.25 \text{ kg} = 0.5 \text{ W}$ es decir, que el ahorro de potencia es mínimo en este caso.
- Precio del Cobre+Neodimio = $0.7 \text{ kg} * 7 \text{ €/kg} + 0.75 * 60 \text{ €/kg} = 50 \text{ €}$.

Finalmente, probando varias velocidades en el caso de la vibración del suelo, esta encuentra su pico a 47 km/h:

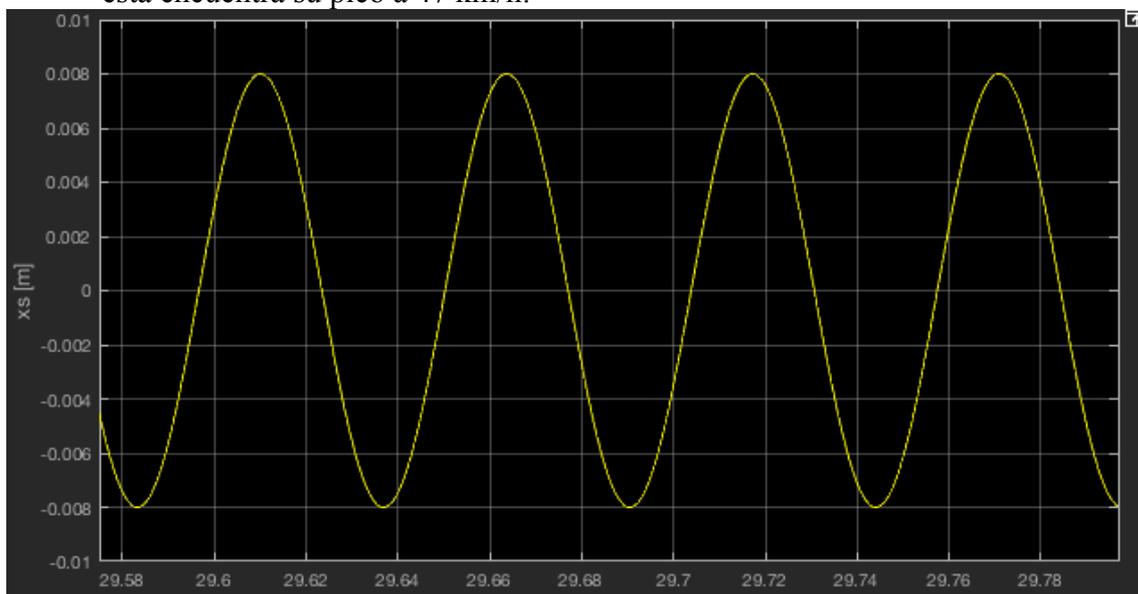


Figura 18.a Señal de entrada x_s a 47 km/h [m]

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

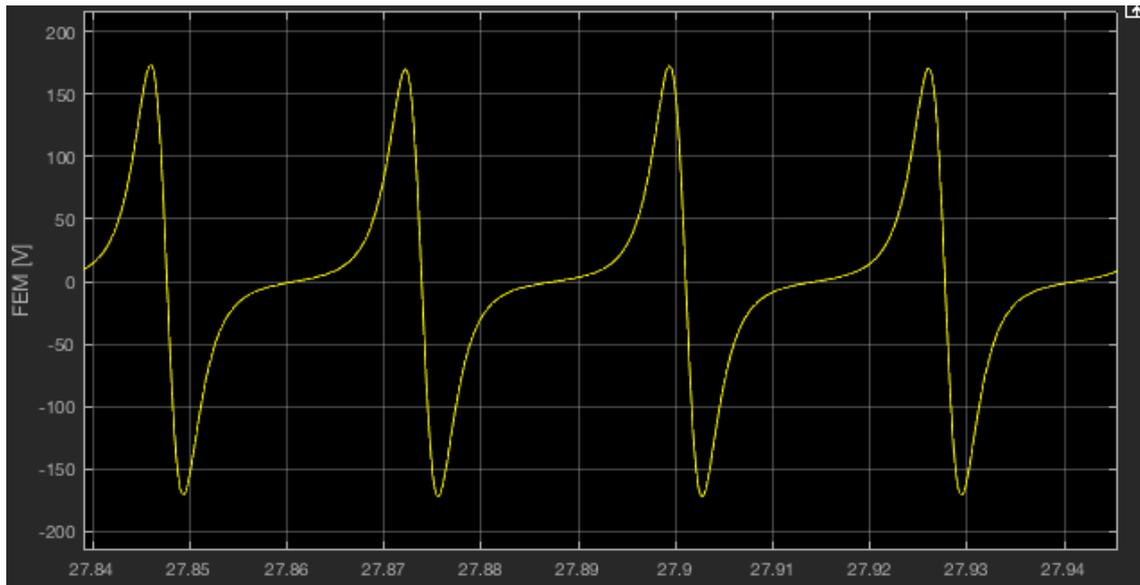


Figura 18.b FEM[V]

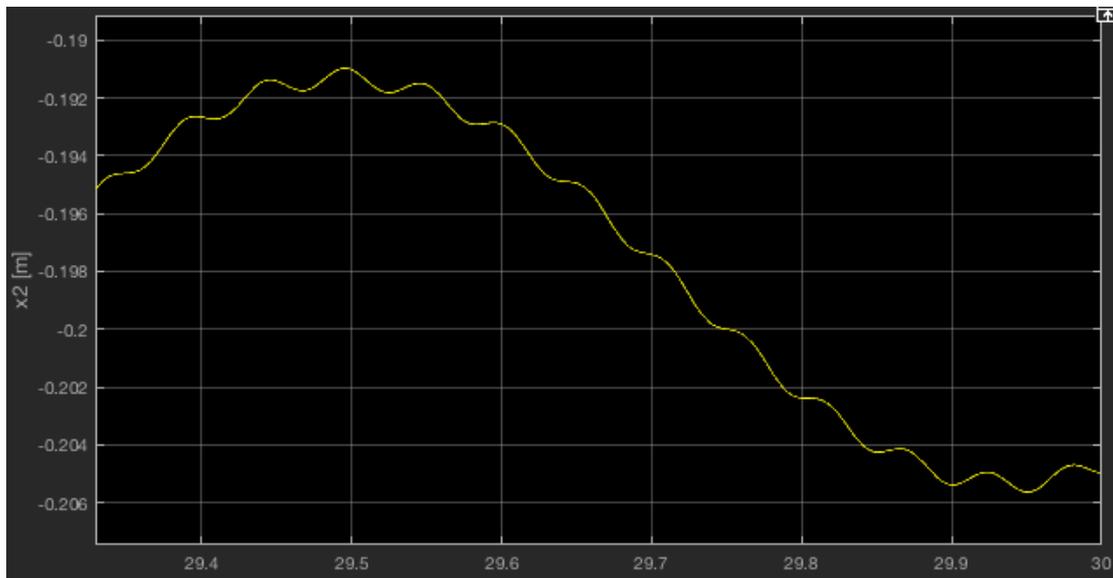


Figura 18.c x_2 [m] es la posición de M2, la masa de la moto, y parece que no oscila en exceso.

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

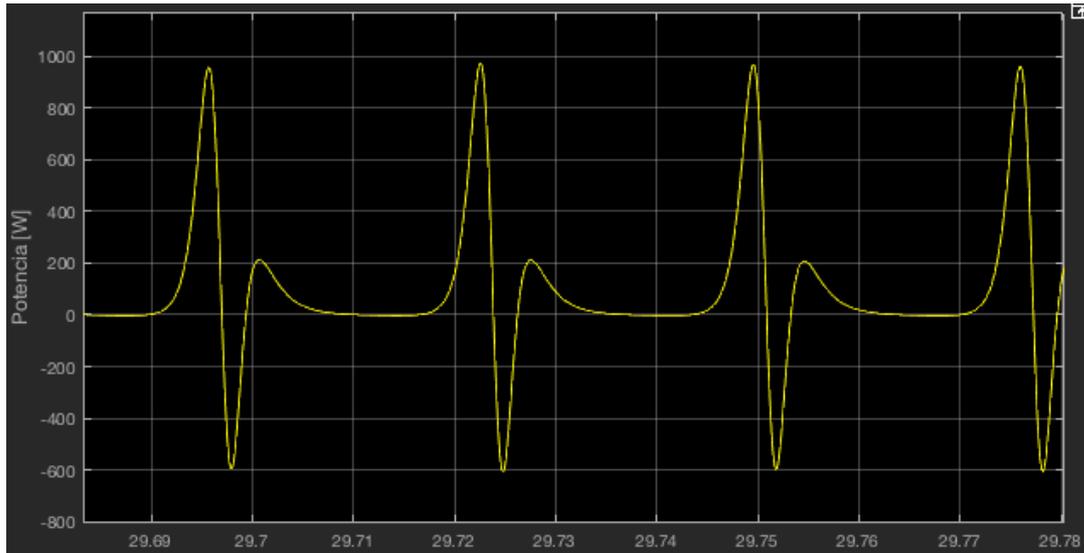


Figura 18.d Potencia [W] es bastante grande, y en ciertos puntos es negativa.

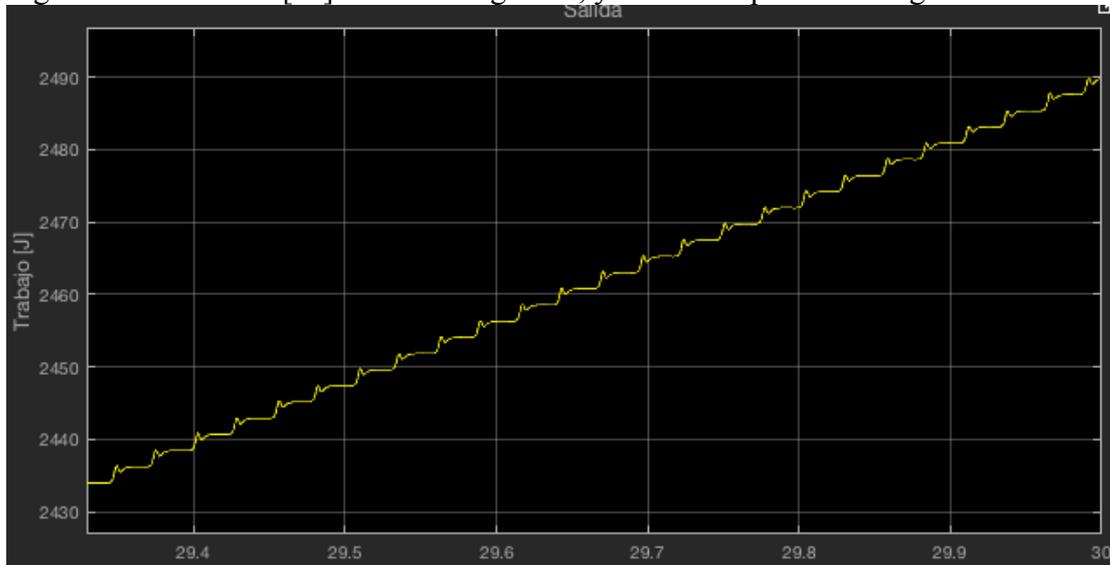


Figura 18.e Trabajo [J] Potencia media= $(2490\text{J}-2440\text{J})/(30\text{s}-29.4\text{s})=83.33\text{W}$!

Conclusiones

-Si pudiéramos poner algún control activo sobre el dispositivo para que esté todo el rato actuando en este régimen, ¡sí podríamos ahorrar energía útil!

-Energía ahorrada= $83.33\text{W}-27.6\text{W}/\text{kg} \cdot 1.25\text{kg}=48.83\text{W}$. Y seguramente este número se pueda aumentar. Se podría probar a poner un condensador en serie con la bobina y más cosas.

-Ahorro de consumo: $48.83\text{W}/7.5\text{kW}=0.65\%$ de consumo reducido. Está complicado, pero si tratásemos con una moto de menor consumo, el ahorro de consumo y el aumento de autonomía porcentual sería mayor. Dado que la energía eléctrica es muy barata, unos 10 céntimos/(1 kWh), la mejora más destacable aquí creo que sería el aumento de la autonomía más que la reducción de consumo, a cambio de unos pocos euros.

Capítulo 6.- Bibliografía

Referencias

1. <http://www.diariomotor.com/tecmovía/2013/08/28/suspension-regenerativa-para-automoviles-mucho-mas-cerca-gracias-a-zf/>
2. <http://www.amazings.com/ciencia/noticias/010409e.html>
3. <http://www.pistonudos.com/reportajes/la-revolucion-de-los-sistemas-de-recuperacion-energetica/>
4. https://es.wikipedia.org/wiki/Amortiguador_%28automóvil%29
- 5.1. <http://www.autonocion.com/el-sistema-de-la-suspension-mas-avanzado-de-la-historia-continua-siendo-una-quimera/>
- 5.2. https://www.youtube.com/watch?v=xeg_nInW64k
- 5.3. <http://www.motorpasion.com/videos-de-coches/suspension-electromagnetica-de->

SISTEMA RECUPERADOR DE ENERGÍA EN SUSPENSIONES PARA MOTOCICLETA

bose

5.4. <http://www.autonocion.com/bose-suspension-electromagnetica-para-vehiculos-parte-i/>

5.5. <http://www.autonocion.com/bose-suspension-electromagnetica-para-vehiculos-parte-ii/>

5.6. <http://www.autonocion.com/bose-suspension-electromagnetica-para-vehiculos-parte-iii/>

5.7. <http://www.pistonudos.com/reportajes/la-revolucion-de-los-sistemas-de-recuperacion-energetica/>

6.1. <https://patents.google.com/patent/US20070175716A1/en?q=shock+absorber&q=inductive>

6.2. <https://patents.google.com/patent/US6952060B2/en?q=shock+absorber&q=inductive>

7. Electricidad y Magnetismo – Segunda edición – Berkeley physics course – volumen 2, segunda edición. Autor Edward M. Purcell, Gehard Gade University Professor. Editorial Reverte.

8. http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/elecmagnet/campo_magnetico/espira/espira.html

9. http://www.uv.es/martined/tecweb/Dipolos_magneticos.pdf

10. Artículo: Improve the Motorcycle Front Suspension through a Gas Spring. Autores: J.A. Calvo*, M.J. López-Boada, L. Real, J.L. San Román

11. https://books.google.es/books?id=ST5hfaUMx0YC&pg=SA6-PA9&lpg=SA6-PA9&dq=rozamiento+viscoso+amortiguador+moto&source=bl&ots=SCpV66zU6z&sig=eBm9xHmrkDXuYGHu_Mv_6tGTTiI&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwivvOa0q77MAhUDPRQKHQu3CXAQ6AEIHDA#v=onepage&q=rozamiento%20viscoso%20amortiguador%20moto&f=false

12. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Biot-Savart

13. [HURE13] Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión.

Autores: Jorge Hurel Ezeta, Anthony Mandow, Alfonso García Cerezo. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial (2013).

https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0ahUKEwjdtar9genOAhXF7RQKHVilC78QFggfMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.elsevier.es%2Fes-revista-revista-iberoamericana-automat-e-informatica-331-pdf-90195906-S300&usq=AFQjCNFpTSdQUEMt3pZqELwe_vzekIWm0Q&bvm=bv.131286987,d.d

24

14. http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/elecmagnet/campo_magnetico/espira/espira.html

15. Good R. H. Elliptic integrals, the forgotten functions. Eur. J. Phys. 22 (2001) pp. 119-126.

16. https://www.supermagnete.de/eng/data_table.php

17. <http://www.sc.edu/es/sbweb/fisica/elecmagnet/induccion/iman/iman.htm>

18. <https:// analisisdecircuitos1.wordpress.com/parte-2-circuitos-en-estado-transitorio/capitulo-33-proyecto-construccion-de-una-bobina-de-varias-capas-con-nucleo-de-aire/>

19. <http://www.zeromotorcycles.com/es/zero-s>

20.