

Aplicación de resortes espirales a torsión en materiales compuestos como almacenamiento de energía en el sector ferroviario

Use of composite torsion spiral springs in railway energy storage

Dr. Daniel Fernández Caballero

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid

Dr. Manuel Esperón Míguez

Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Dr. Ingeniería por la Cranfield University

Dr. Víctor Rodríguez de la Cruz

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha defensa del proyecto de investigación: 10.02.2014.

Fecha prestación a la convocatoria: 27.02.2014.

Resumen

Las necesidades energéticas actuales requieren una transformación de las técnicas eficaces en eficientes tanto en producción, transporte como consumo energético. Estas necesidades han impulsado nuevos desarrollos en el ámbito energético, entre los que se encuentran los sistemas de almacenamiento de energía. El avance en ingeniería de materiales hace pensar en la posibilidad del almacenamiento mediante deformación elástica de resortes espirales a torsión. Para ello es necesario estudiar metodológicamente en profundidad este tipo de resortes, así como las posibles vías de optimizar sus características.

Se realiza un análisis de los resortes espirales a torsión, como el elemento constitutivo básico del sistema de almacenamiento; estudiando los diferentes factores de influencia sobre su curva de comportamiento: longitud del fleje, geometría de la espiral de fabricación, variación de la rigidez a flexión a lo largo de la longitud, características de la sección resistente del fleje, espesor del fleje... La selección correcta de dichos parámetros posibilita modular la relación entre el par y el ángulo girado. Se plantea el procedimiento general de diseño en función de la curva de par requerida y de las restricciones establecidas, para cualquier tipo de resorte espiral a torsión, así como uno específico para los resortes clotoidales con variación de su rigidez a lo largo de la generatriz del fleje, por posibilitar estos un estudio analítico.

El planteamiento y estudio, requiere de la validación experimental. Se diseñan resortes fabricados en fibra de vidrio con matriz epoxy debido a su alta tensión admisible respecto al módulo elástico y su baja densidad (alta capacidad de almacenamiento de energía). Se realiza tanto el diseño de la instalación como del plan de ensayos y sistemas de adquisición de datos. Los ensayos llevados a cabo indican la alta correlación entre el modelo teórico y el experimental.

El análisis general planteado se complementa con la optimización del resorte, tanto en la sección resistente como de las configuraciones de montaje. Se realiza el estudio de una sección sandwich multi-componente optimizada para la flexión pura y el almacenamiento máximo de energía.

El trabajo propuesto finaliza con la implantación teórica del resorte como almacenamiento de energía dentro de un vehículo ferroviario. Se plantean los diferentes escenarios de funcionamiento del vehículo y del sistema de almacenamiento de energía, las configuraciones básicas del sistema y los flujos de energía en la sección motriz del vehículo. El estudio se complementa con las simulaciones de la integración del acumulador en un vehículo viario en el cual se simulan la descarga del resorte y la aplicación del freno, las simulaciones electromecánicas del conjunto y la simulación del sistema de control diseñado.

Palabras clave: resortes espirales a torsion, materiales compuestos, almacenamiento de energía.

Abstract

Energy supply requires effective and also efficient techniques in production, transport and final use. In last years so many energy storage systems have been developed. Major advances in the field of composite materials; show that it can be possible the energy storage by the elastic deformation of a torsion spiral spring.

An analytical model is generated to study the different variables affecting the length of the spring strip that can be free or blocked either in the housing or in the shaft. Design parameters are strip length, variation of curvature of the spiral, relation between curvature of shaft and housing and variation of bending stiffness along the spring strip length. There is also a particular design case with a clothoid strip and a linear variation in bending stiffness throughout the length of the strip that leads an analytical torque-shaft rotation curve. According to the application of the spiral spring, different torque - angle characteristic curves are required, so a design process has been developed.

Different torsion spiral springs have been constructed and tested to validate the models. They have been manufactured with fiberglass composite and epoxy matrix. Test benches have also been constructed to validate the model. Tests carried out validate the analytical model with considerable accuracy. This work also analyses the optimization of spiral spring weight. Different materials, resistive section shape and serial and parallel configurations are studied to improve it.

There is also a specific work about the electromechanical and electric integration of the torsional spring in a railway system. Simulations about energy flow and energy storage load and down load have been carry out.

Keywords: torsional spiral spring, composite materials, energy storage.

1. Ámbito de la investigación

La investigación realizada se ha llevado a cabo dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad Politécnica de Madrid, más concretamente en la División de Ingeniería de Máquinas. El trabajo está soportado financieramente por varios proyectos, por una parte un proyecto del programa C.E.N.I.T. (Consortios Estratégicos Nacionales de Investigación Técnica) del C.D.T.I. (Centro para el Desarrollo Técnico Industrial) y por otros proyectos P.I.E. (Plan de Innovación Empresarial) de la Comunidad de Madrid.

2. Justificación

Las diferencias entre la energía producida y consumida y la variación de la misma a lo largo del tiempo, hace necesario el diseño de sistemas de almacenamiento de energía como medio de aumentar la eficiencia del sistema energético, tanto macro como microeconómicamente. Los sistemas de almacenamiento permiten reducir las diferencias entre producción y consumo.

La alternativa planteada, es el almacenamiento mediante energía potencial elástica por deformación de un resorte espiral a torsión. Dicha alternativa es conocida y empleada desde hace tiempo, aunque no en almacenamiento industrial de energía. El avance en las últimas décadas de los materiales compuestos, abre las puertas a la utilización de los resortes espirales a torsión como medio de almacenamiento de energía, debido a que este tipo de materiales disponen de valores elevados de tensión máxima admisible y reducida de módulo elástico y densidad. Así, el paso tecnológico planteado va a requerir de nuevas herramientas de desarrollo (análisis y cuantificación de variables de influencia, procedimiento de desarrollo, estudio analítico de la curva característica, desarrollo inverso...) y de análisis de optimización del sistema (cuantificación de variables con influencia inversa sobre especificaciones de diseño, configuración del sistema, sección resistentes...), ya que los órdenes de magnitud de las variables puestas en juego en posibles desarrollos industriales, su no cuantificación y optimización puede implicar que el desarrollo no sea viable.

3. Importancia industrial

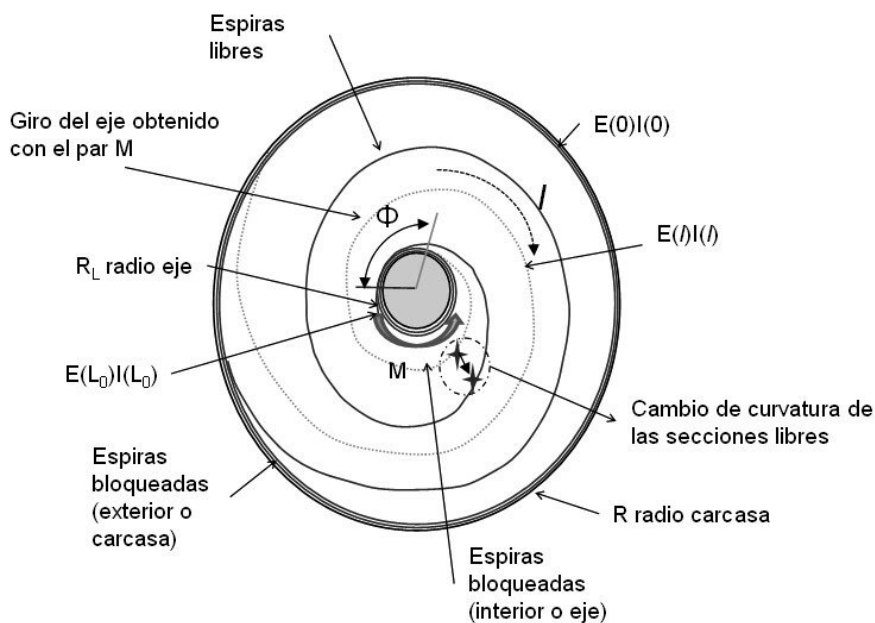
El presente trabajo de investigación analiza la viabilidad técnica de una nueva solución tecnológica en el ámbito del almacenamiento de energía, comparable y competitiva frente a otros sistemas existentes actualmente, así como un procedimiento y modelo de desarrollo del componente básico de los resortes espirales a torsión. La importancia de las investigaciones se establece por una parte al analizar el mercado energético, el cual cuenta con numerosos proyectos científicos y tecnológicos de desarrollo, para cubrir los requerimientos de eficiencia y ahorro energético de la sociedad actual, y por otra el encuadre estratégico de la investigación con las acciones del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación. Tiene relación directa con diferentes acciones estratégicas dentro del “Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011” tanto en lo referente a la energía y cambio climático. La acción estratégica de “Energía y Cambio Climático” se concreta en dos líneas estratégicas donde España es líder: línea 1, energía y mitigación del cambio climático para la producción de energía final limpia y la eficiencia energética, con especial incidencia en el sector transporte y la edificación y línea 2, Movilidad sostenible - transporte. Así mismo, el trabajo de investigación está alineado con el desarrollo e innovación tecnológica sectorial del Plan Nacional, principalmente en los epígrafes relativos a energía, transporte e infraestructuras.

Otro de los objetivos tecnológicos del Plan Nacional, es la aplicación de los sistemas de acumulación en el consumo final energético, y en concreto en el transporte, al ser uno de los sistemas cuya implantación posibilita mayor eficiencia global. Dentro de los objetivos se encuentra buscar un sistema de transporte más integrado, seguro, eficiente, sostenible y respetuoso con el entorno.

4. Modelo generalizado de resortes espirales a torsión

Se desarrolla la base conceptual de los resortes espirales a torsión y se modeliza de forma metodológica, el comportamiento así como la influencia de los parámetros de diseño en la curva característica par – ángulo girado. Se plantea un procedimiento general partiendo de las especificaciones de diseño, curva característica a proporcionar y limitaciones de diseño, radio de árbol, carcasa, longitud y espesor del fleje. Conjuntamente al enfoque estático se plantea el modelo energético de comportamiento para cálculo de la curva característica y deformación de la carcasa.

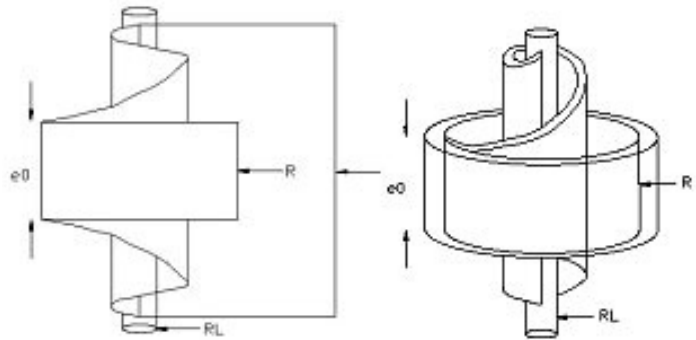
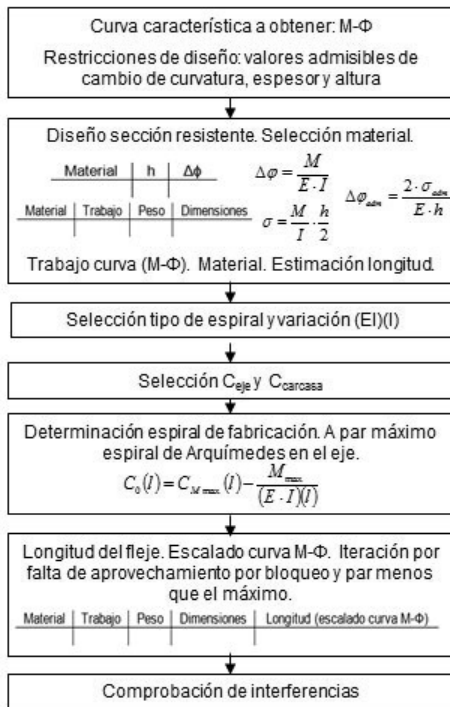
Un resorte espiral a torsión está constituido por un fleje (habitualmente con forma espiral) unido a una carcasa (normalmente como elemento fijo) y a un árbol (como elemento móvil). Según la curvatura de las espiras y la longitud del fleje, estas se pueden encontrar libres, bloqueadas en el árbol (si su curvatura es mayor que la de éste) o bloqueadas en la carcasa (si su curvatura es menor que la de ésta). Al aplicar par las espiras irán eventualmente desbloqueándose de la carcasa y bloqueándose en el árbol.



Se estudian los esfuerzos principales que existen en el fleje (flexión, cortadura y tracción- compresión de las espiras) y los posibles condicionantes que permitan la simplificación del problema (despreciar efectos de cortadura y tracción – compresión, con lo que se puede suponer flexión pura), ante el requerimiento de obtener un comportamiento de par - ángulo girado especificado.

Para el análisis de la curva característica (par - ángulo girado) del resorte se debe tener en cuenta que el ángulo girado por el resorte, para un par dado $\Phi(M)$, es obtenible mediante las contribuciones al giro de las espiras libres $\Phi_l(M)$ y las bloqueadas en el árbol $\theta(M)$ y en la carcasa $\beta(M)$. El trabajo presentado establece la forma de calcular dichos valores en función tanto del par aplicado como de la posición longitudinal del fleje.

Definidos los parámetros anteriores es posible realizar la construcción de las curvas características del fleje a diferentes pares. Una vez definida la longitud del resorte y construida la curva característica, puede darse el caso que en ciertas posiciones a lo largo de la longitud no se ajuste la curva obtenida con la especificada. Si esto ocurre se deberá modificar localmente los valores de la rigidez a flexión para lograr dicho ajuste. A continuación se plantea el flujograma del procedimiento de diseño de los resortes.



Un caso particular de resortes espirales a torsión son los que tienen curva generatriz clotoidal y variación de rigidez a flexión a lo largo de la longitud del fleje. De manera general es posible definir una curvatura generalizada o aproximación mediante ecuación linealizada de la curva para cualquier resorte. Con ello se puede proceder a realizar un estudio analítico similar al que se desarrolla a continuación, teniendo en cuenta el error cometido en la aproximación de la espiral definida respecto a la expresión polinómica.

La curva clotoidal tiene la característica peculiar que su deformada vuelve a ser otra clotoide. Los parámetros de esta segunda clotoide pueden ser obtenidos de manera sencilla, en función de los parámetros de diseño.

Al permanecer invariable la longitud total del resorte con el par aplicado (ya que las cargas de tracción – compresión y cortadura se consideran despreciables frente a las de flexión, según ha sido analizado con anterioridad) la zona de espiras no bloqueadas se extenderá desde la longitud bloqueada en la carcasa hasta la longitud equivalente a la total menos la bloqueada en el árbol.

La unión de estas dos características permite definir una curva analítica de comportamiento del resorte en función del par aplicado. Esto se logra con una metodología análoga a la del caso general, siendo ambas metodologías coherentes en los puntos de convergencia.

5. Materiales empleados. Optimización del fleje

Una vez analizadas las características técnicas y el procedimiento de diseño de resortes espirales a torsión, se plantean los materiales con los que fabricar el fleje y las posibles optimizaciones de su peso, dimensiones y energía almacenada entre otras. La optimización se puede llevar a cabo a través del material, de la sección resistente (tanto su forma geométrica como los diferentes materiales que la pueden constituir logrando que cada una de las secciones trabaje a su tensión máxima) o de las posibles configuraciones de montaje (en serie o en paralelo manteniéndose el mismo ángulo girado o el mismo par).

La energía adquirida por un volumen cualquiera cuando se somete a sollicitaciones de flexión pura, es directamente proporcional al cuadrado de la tensión axial alcanzada e inversamente proporcional a la rigidez del material que compone la sección. Además, depende de la geometría concreta del cuerpo sometido a flexión. Sin embargo, el parámetro que interesa optimizar no es tanto la cantidad de energía absorbida, si no la capacidad de almacenamiento por unidad de peso, es decir la densidad de energía, lo que implica que también se optimizará el coste económico.

En cuanto al material empleado interesa utilizar un material con una elevada resistencia mecánica en dirección axial, y rigidez y densidad lo más reducidas posible. El reto es, entonces, encontrar un material que alcance el mejor compromiso entre estas tres variables. Este proceso de selección del material adecuado no es, como pudiera parecer a simple vista, nada trivial, debido a la gran cantidad de factores que se ponen en juego. Por consiguiente, en este trabajo se dedica un apartado específico a este aspecto.

De la geometría de la sección resistente dependerá principalmente que se pueda alcanzar una tensión cercana o igual a la admisible. Las sollicitaciones de flexión pura provocan una distribución lineal de deformaciones axiales esto hace que las fibras más alejadas de la fibra neutra, tanto a tracción como a compresión, trabajen al completo de su capacidad.

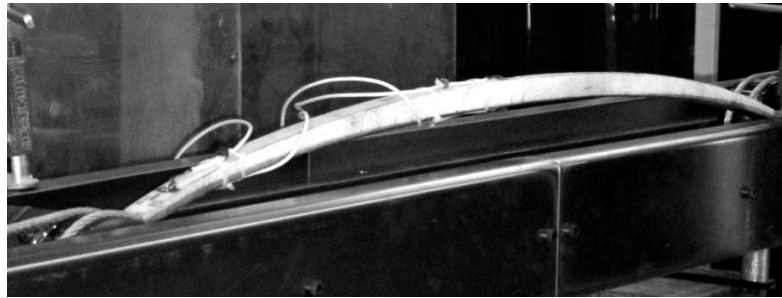
Como punto de partida del proceso de optimización de la sección resistente, se toma una geometría sencilla, concretamente una sección rectangular maciza con el que se fabricó el resorte del primer prototipo del acumulador de energía. De ahí se logra desarrollar una sección sándwich multicomponente optimizada y se plantea la alternativa novedosa de una sección extruida.

Respecto a la sección sándwich, que es la alternativa tecnológica más factible con el estado de la técnica actual, se ha desarrollado un procedimiento de diseño para poder dimensionar vigas con sección sándwich sometidas a flexión pura. Para ello, se va a suponer el caso más general posible, con una viga compuesta por tres materiales diferentes; uno para la piel de tracción, otro más rígido para la de compresión y un tercero para el núcleo. Para la optimización del diseño se utiliza el cambio de curvatura como un parámetro de entrada. A partir del cambio de curvatura de cada sección, se pueden calcular también las distancias entre la fibra neutra y la piel más cargada, tanto a tracción como a compresión, para que trabajen a la tensión máximas de diseño.

Conjuntamente con la optimización de la densidad de energía se estudian posibles problemas derivados de dicha optimización, como son los estudios relativos al posible fallo de la piel de compresión debido a efectos de pandeo global así como local y otros posibles modos de fallo de la sección sándwich.

Antes de llevar a cabo los ensayos correspondientes al modelo desarrollado, se decidió realizar una serie de simulaciones por elementos finitos, aunque estas simulaciones no sustituyen a los ensayos propiamente dichos, ya que por ejemplo el pandeo local de la piel de compresión o los concentradores de tensiones no son simulados con el modelo desarrollado. Una vez analizadas las simulaciones se debe realizar una correcta sensorización. En este caso, como el objetivo de los ensayos es comprobar el comportamiento de la zona central de las probetas para verificar la aparición de los esfuerzos provocados por las sollicitaciones de flexión pura, se utilizan galgas orientadas longitudinalmente y situadas en la mitad de la longitud de la probeta, una en la piel de tracción y otra en la de compresión.

Una vez colocadas las galgas, se procede a anclar la muestra a las poleas sollicitadoras del banco de ensayos. Ha sido desarrollado un banco de ensayos especial ya que los bancos de flexión a tres y cuatro puntos generarían esfuerzos de despegado de las pieles. El par se debe ir aplicando a través del volante situado al final del husillo. La curvatura de la probeta irá aumentando gradualmente hasta que se produzca la rotura de la misma.



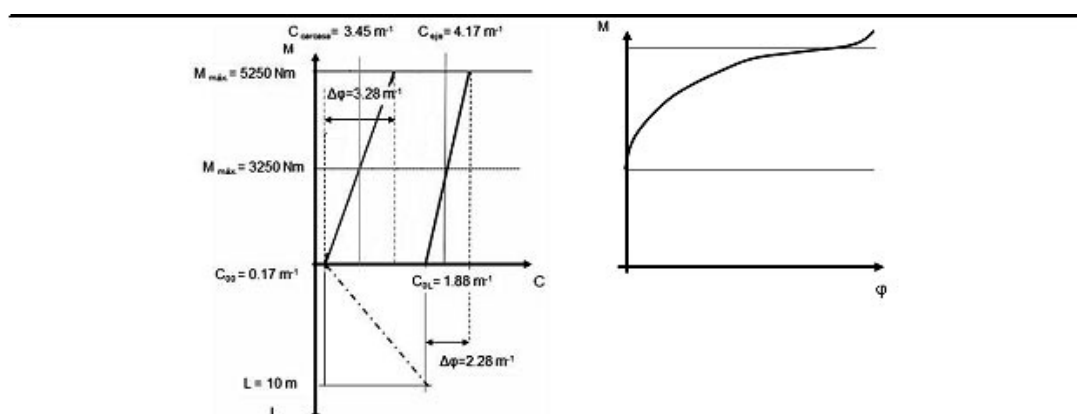
Una vez se ha llevado a cabo, el diseño, fabricación, y validación del mecanismo de ensayos a flexión pura, se puede pasar, al ensayo de las muestras propiamente dichas. Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron ensayos de flexión pura sobre probetas con sección sándwich. El diseño de la sección monolítica optimizada se ha presentado como una posibilidad que podría ser una alternativa al sándwich en determinadas circunstancias. Sin embargo su completo desarrollo necesitaría de un estudio mucho más profundo que escapa a los objetivos de este trabajo.

6. Diseño, fabricación y validación experimental de un resorte monolítico para curva característica de baja viabilidad

La curva generatriz del fleje del resorte de baja variabilidad del par debe tener inicialmente longitud bloqueada en la carcasa cuyo desbloqueo y bloqueo en el árbol conllevará la baja variabilidad. Para ello se va a utilizar una curva generatriz clotoidal, curvatura dependiente linealmente con la longitud, y variación del módulo a flexión inversamente proporcional a la longitud, siendo más resistente en la unión con el árbol que con la carcasa.

Mediante el modelo desarrollado se ha comprobado la deformada del resorte a par nominal así como su rango de variabilidad. Se ha comprobado que la deformada obtenida es análoga mediante el cálculo teórico, asumiendo un error de convergencia del 5% tanto en la fuerza como en el desplazamiento y de un error del 0,5% en el par. El modelo también permite realizar el cálculo del posicionamiento de las diferentes espiras del resorte en los distintos estados de carga.

En las simulaciones planteadas se comprueba la constancia de esfuerzos flectores y esfuerzos cortantes despreciables, observándose la validez de hipótesis de constancia del par a lo largo de toda la longitud del fleje. La tensión alcanzada en el resorte diseñado respecto a la máxima admisible especificada proporciona, a par nominal, un coeficiente de seguridad en el diseño de 1,25.



Para la fabricación del resorte, se van a emplear nueve capas de fibra de vidrio HP unidireccional, las cuales se extiende con la geometría adecuada (al tener forma espiral, la curvatura va a implicar que cada una de las capas del fleje tengan diferentes medidas), sobre una superficie plana, y se procederá a impregnarla con resina epoxy. Tras la adición de la resina las capas se recubren con plástico protector y son curadas a temperatura ambiente durante doce horas aproximadamente para lograr la gelificación de la resina. Pasado dicho tiempo, se procede a dar forma el resorte, para ello, se colocan las capas alrededor del árbol, para continuar posicionando las diferentes capas en el molde metálico diseñado con la geometría de fabricación del resorte. Cuando todas las capas están situadas en el molde, se instalará el contra molde, de tal manera que entre ambas piezas se ejerza presión necesaria para un curado correcto de las capas de material compuesto. Para garantizar el correcto desmolde del resorte, se aplica desmoldeante tanto en el molde como en el contra molde. Una vez el resorte se ha introducido entre el molde y el contra molde, se debe proceder al curado del mismo. Para ello se introduce toda la estructura en un horno a el proceso de curado propiamente dicho.



La función global del banco de ensayos consiste en caracterizar el comportamiento del resorte tanto en el proceso de carga como en la descarga. El primer gran conjunto de ensayos a los que se va a someter al prototipo son los de recepción de los componentes, tanto fabricados (árbol, bastidor, trinquete...) como comerciales (motor, reductora...), donde se comprobará que han sido fabricados según especificaciones y que sus características técnicas son las requeridas. Una vez analizados los elementos por separado se realizan los ensayos de funcionamiento en conjunto y control previo de integración de sistemas, ensayo de cadena cinemática y ensayo de seguridad electromecánica.

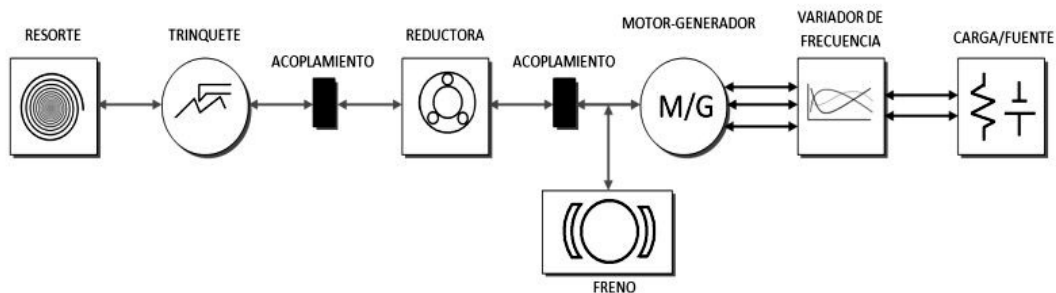
Todos los ensayos anteriores, han dando un resultado satisfactorio, por lo que se continúan con el resto de los ensayos. Conjuntamente con dichos ensayos se ha analizado las diferencias entre el diseño especificado y las características del prototipo desarrollado, por ejemplo módulo de elasticidad, espesor de la viga, rigidez a flexión o radio del árbol. Se plantean de forma resumida los siguientes: Ensayo de comportamiento, carga y descarga del resorte. Ensayo de análisis de tensiones. Análisis de repetibilidad de resultados y plausibilidad modelo - ensayo.

Los ensayos analizados sobre el prototipo permiten plantear que tanto el modelo general de resortes espirales a torsión como el modelo particular para resortes con curva generatriz clotoïdal con variación de la rigidez a flexión con la longitud, desarrollados, permiten el análisis y la modulación de la curva característica par - ángulo girado según especificación. El punto de error máximo en la curva característica es de un 12%, siendo el error medio ponderado a lo largo de toda la curva un valor muy inferior a éste, con error de repetibilidad tras cinco ensayos del 6%. El análisis energético realizado conjuntamente con la curva par - ángulo girado proporciona un error en el flujo energético de carga - descarga y transmisión en la cadena cinemática del 3,9%.

7. Integración del acumulador de energía dentro de un vehículo viario

El objetivo final de este desarrollo es la aplicación del acumulador de energía mediante el empleo de resortes a un vehículo viario de transporte público de viajeros. Para recargar el acumulador se instalarán conexiones eléctricas en cada parada. La energía transferida al acumulador debería ser suficiente para que el vehículo recorra la distancia entre dos paradas consecutivas.

Para una correcta integración del acumulador del vehículo y asentar una base correcta sobre la que diseñar se analizan los distintos casos de funcionamiento del conjunto (parada, arranque en vacío, arranque en carga, funcionamiento en carga, retención en carga, frenado y funcionamiento en marcha atrás). No solo es importante analizar cómo debe comportarse el acumulador en función de las necesidades de potencia del vehículo, sino que es vital analizar el paso de un escenario al siguiente, es decir, los transitorios de funcionamiento. Así mismo se analizan las dos configuraciones la mecánica y la electromecánica (con dos alternativas de diseño la carga descarga a través del eje y de la carcasa).



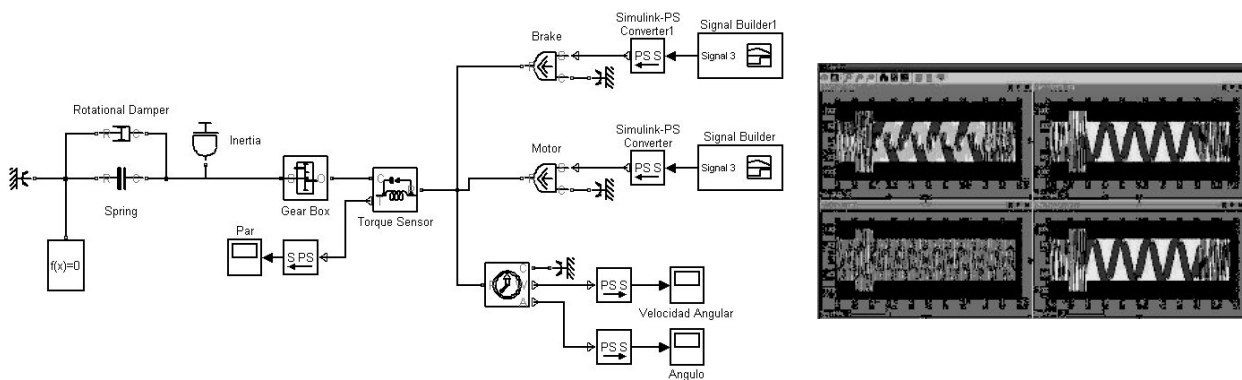
Otro análisis importante es el del trabajo del grupo motor-generador cuando se demande potencia del sistema o cuando se inyecte energía para ser almacenada. Es análogo analizar el comportamiento como motor y como generador ya que las curvas de par velocidad y potencia velocidad se desvían menos de un 5%. Dado que se operaría en la zona de par constante del resorte se debe, mediante la electrónica de potencia, trabajar siempre igualando el par con el fin de mantener un régimen de giro con el que obtener la potencia necesaria en cada momento. Se establecen estudios pormenorizados de la operación a máximo régimen y a mínima velocidad.

Una vez analizadas las configuraciones y sus principales características se estudian y establecen los flujos de energía entre los diferentes componentes del acumulador. El almacenador maneja la energía en dos sentidos. Cuando el acumulador se carga, la energía, obtenida de una toma de corriente o mediante regeneración, fluye a través del variador que comunica la energía eléctrica al motor. A través del árbol de transmisión se comprime el resorte. Durante la carga se conecta el trinquete con el fin de evitar descargas accidentales. Cuando se descarga el resorte se debe primero desconectar el trinquete para permitir así el giro en dirección opuesta a la de carga. Tras esta operación se desconecta el freno y da como consigna de velocidad al resorte un valor negativo. Cuando la energía se extrae del acumulador de energía mediante deformación elástica ésta sigue el camino opuesto al descrito anteriormente.

Dado que el fin del acumulador es intercambiar energía con el conjunto de sistemas del vehículo se ha optado por conectar el almacenador al bus de corriente continua. Al conectar el acumulador al bus de corriente continua se simplifica el montaje al tratarse de una conducción que recorre en vehículo en toda su longitud y que dispone de tomas en numerosos puntos. Se evita de este modo instalar nuevos conductores con lo que se facilita el diseño final.

8. Simulaciones de la integración del acumulador en un vehículo viario

Con el fin de llevar a cabo un diseño del sistema de control del acumulador aplicado al vehículo se han llevado a cabo modelizaciones del sistema de control y del sistema de almacenamiento. Los modelos empleados combinan la modelización de elementos mecánicos con elementos de regulación de manera que puede analizarse de forma más intuitiva el efecto que parámetros mecánicos tienen sobre el control del acumulador. Las simulaciones se han realizado empleando Simulink por tratarse de un programa de gran potencia y de uso intuitivo. Para la modelización de la parte mecánica se ha empleado el paquete Simscape que incluye diversos elementos preconfigurados que han facilitado el desarrollo de modelos. Para la parte eléctrica se ha empleado la librería SimPowerSystems. Por ejemplo se plantea el esquema básico del proceso de carga.



9. Conclusiones

Los trabajos realizados son de ámbito multidisciplinar y permiten disponer de un desarrollo base para la integración de un sistema de acumulación basado en resortes espirales a torsión en la industria ferroviario. Por todo ello se considera que se aporta un estudio riguroso y estructurado de alto nivel tecnológico basado en proyectos de I+D+i. Con base a estas propiedades del trabajo desarrollado se ha optado por su envío e inscripción a la III convocatoria del citado premio.