

Volantes de Inercia

Resumen

Los volantes de inercia son parte del grupo de sistemas de almacenamiento cinético, el cual ha sido objeto de numerosos estudios, los cuales se han incrementado en los últimos años. Se le podría llamar una tecnología relativamente nueva, aunque este principio tiene inicios muchos años atrás. Esta significa el futuro del almacenamiento de energía y conlleva mucho potencial por explotar. El almacenamiento de energía sigue en desarrollo, como a la vez ya existe en el mercado. Es decir, que diversos parámetros y componentes de los volantes de inercia continúan siendo estudiados desde hace muchos años. Existen muchos sectores con interés en desarrollar volantes altamente eficientes, cada vez más capaces de almacenar más energía por más tiempo, incrementando la velocidad con la que giran e investigando diversos materiales que permitan esto. Numerosos diseños y prototipos han sido realizados, algunos llevados al mercado e incluso probados y utilizados en grandes sectores como la industria automovilística, la industria aeroespacial, y hoy en día tratando de consolidarlas en la industria energética, específicamente en el almacenamiento de energía.

Palabras Clave: Almacenamiento, energía, volante de inercia, tecnología, energía alternativa.

Abstract. Flywheels are part of the huge world of energy storing, which is a studied one from many years ago to the present time, with a strong increase in the last years. It can be named as a fresh technology, even when it comes from the past years. This technology is the future of energy storage and it has a huge potential to develop. It is still in development, even when it is in the actual market. Many components and new ways of usage are being studied, with the purpose of replace conventional batteries and revolutionize this system. Many industries and countries around the world have the interest on developing more technology in relation with this kind of kinetic energy storage, trying to increase the capacity of storage and better times in charge and discharge. Other important thing to improve is the bearing velocity and material that can allow those high velocities. There are many kinds of flywheels in the actual market, available for the type of the design any person is

Eleuterio López
Olivas (1)
Aarón Eduardo López
Piñón

(1) Académico,
Universidad
Autónoma de
Chihuahua

Recibido:
1 de abril de 2024
Aceptado:
23 de abril de 2024

looking for. These designs are being proved and used in industries, such as the motoring industry, both conventional and hybrid cars, even in sport cars and important racing sports, such as Formula 1, Formula E or LeMans. Also, the electric industry has interest on developing new and more efficient designs, allowing to store huge amounts of energy.

Keywords: Storage, energy, flywheel, technology, alternative energy.

Introducción

Hoy en día, es indispensable encontrar nuevas tecnologías en el ámbito del almacenamiento de energía, dado que cuando surge la necesidad de contar con la potencia disponible resulta muy costoso, y algunas veces poco eficiente a la hora de mantener la energía contenida y no generar pérdidas significativas. Los volantes de inercia resultan una gran opción para solucionar este tema, sin embargo, al ser una tecnología nueva, siguen existiendo detalles que no permiten que los costos bajen o que se puedan comercializar y sobreponer ante las baterías convencionales. Esta tecnología cuenta con una variante frente al resto, dado que requiere estar en constante movimiento para almacenar energía. En la actualidad, existen varios tipos de volantes, sin embargo, observando constantes mejorías en su diseño, eficiencia y costos, se espera que se convierta en una gran opción a tomar en cuenta a la hora de pensar en almacenar energía sin importar el sistema al que se desee agregarlo.

Desde hace más de 20 años han existido diferentes volantes de inercia, la evolución ha sido significativa y existen numerosos documentos y diseños disponibles para el análisis y comparación de los nuevos proyectos e investigaciones.

Principio de Funcionamiento

El principio de funcionamiento básico teóricamente indica que un volante de inercia será capaz de almacenar energía gracias al movimiento cinético, una vez que ésta comienza a girar indica que el almacenamiento está comenzando y a mayor velocidad, mayor será la energía acumulada. A esto se le llama el principio rotativo de la masa, se utiliza a energía que se le suministra, convirtiéndola en energía mecánica. La energía que entra al volante proviene de alguna red o un mecanismo generador de energía, así como el volante almacena energía girando cada vez más rápido, también se descarga uniformemente mientras deja

de girar. El volante de inercia rotativo es manejado por un motor eléctrico, el cual se encarga de la transformación de energía mecánica a eléctrica y viceversa. El rodamiento es el que permite que el volante gire, y existen varios tipos de este mismo, generalmente suele ser mecánico, permitiendo el rozamiento de sus partes. También puede ser un rodamiento magnético, actualmente el más avanzado, permitiendo un rodamiento infinito y prácticamente prevenir mantenimiento y aumentar la vida útil considerablemente, dado que esta parte del sistema es la que más suele dañarse y requerir cuidado.

Básicamente este es el principio de funcionamiento de los volantes de inercia, al ser una tecnología en constante desarrollo, existen bastantes prototipos y diseños, sin embargo, todos deben cumplir con los componentes básicos para lograr los diferentes objetivos sin importar el sector en el que se les requiera o se desee implementar este sistema de almacenamiento. En la Fig. 1 se observa un esquema de los diferentes componentes para desarrollar el principio básico de funcionamiento.

El acomodo de los diferentes componentes, y la ubicación en el sistema, dependerá del diseñador, así como del sector en el que se quiera introducir esta tecnología, es decir, no será lo mismo para un carro eléctrico o híbrido, como para almacenar la energía de un sistema de generación, tal como puede ser un sistema de paneles fotovoltaicos o un sistema de turbinas eólicas.

Modelación matemática

Todos los objetos que tienen movimiento rotativo cuentan con energía cinética, por el concepto conocido como momento de inercia, que tiene que ver con los diversos componentes que forman la masa de un cuerpo y como esta masa se distribuye a lo largo y ancho del cuerpo. También cuentan con velocidad angular, concepto que nos indica que tan rápido se mueve dicho objeto.

Como los volantes de inercia almacenan energía de manera cinética, la fórmula descrita a continuación nos indica la cantidad de energía 'E' almacenada en un volante varía linealmente con el momento de inercia 'I' y con el cuadrado de la velocidad

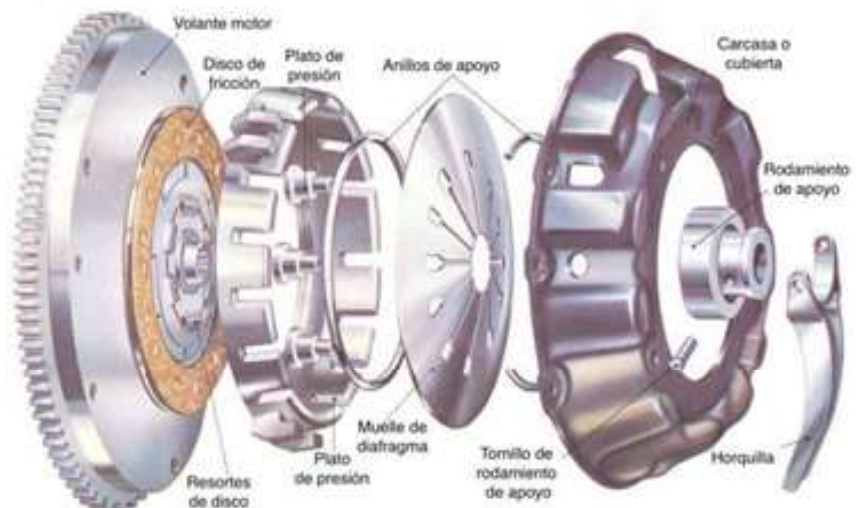


Fig. 1. Componentes básicos en un volante de inercia. Fuente: [1]

angular ‘ ω ’, la cual es, simplemente la velocidad con la que gira el volante.

$$E = 1/2I\omega^2 \tag{1}$$

La solución para encontrar el momento de inercia ‘ I ’ para un volante con forma cilíndrica de masa ‘ m ’ y radio ‘ r ’ será:

$$I = mr^2 \tag{2}$$

Para los volantes de inercia de baja velocidad, la mejor manera de maximizar la capacidad de energía almacenada es aumentar el momento de inercia. Un disco hecho con un material altamente denso, este tipo de volantes poseen la ventaja de ser una tecnología más conocida y sin margen de error y también son más baratas de construir.

Para aplicaciones de alta velocidad, se construyen pequeños discos con materiales con baja densidad y mucha fuerza para mayor capacidad de almacenamiento, sin embargo, los materiales son más caros.

Es importante saber que, por seguridad, debe calcularse primero el nivel de estrés al que se pondrá el volante, con respecto a la cantidad de energía almacenada que se requiera, realizando un diseño, tomando en cuenta la proporcionalidad del momento de inercia y la velocidad angular para definir las medidas y dimensiones.

Materiales de construcción

Los materiales utilizados para el disco del volante de inercia son un tema de principal importancia, los cuales deberán ser seleccionados a partir de varias necesidades de diseño.

Con los volantes de baja velocidad, se requieren discos con gran densidad como el hierro fundido, mientras que, para volantes de alta velocidad, se requieren discos con baja densidad y gran fuerza, utilizando materiales como el kevlar, el cual es un plástico reforzado con vidrio, carbono o fibras especiales.

En la Tabla 1, se encuentran listadas las fuerzas específicas de

Material	Fuerza específica (kJ/kg)
Hierro Fundido	19
Acero de Carbono	44
Aleación de acero	100
Madera (haya)	130
Kevlar	1700
S-glass	1900
Grafito	8900

Tabla 1. Fuerzas específicas para los diferentes materiales. Fuente: Elaboración Propia.

algunos de los materiales más utilizados para la construcción de los volantes de inercia.

En la Tabla 2 se puede ver la comparación de las capacidades para almacenar energía de los volantes de inercia típicos.

Vigilancia tecnológica

Existen una gran variedad de documentos publicados desde muchos años atrás. Es interesante y necesario observar las tendencias sobre los trabajos publicados para saber que países son los pioneros en este tema, así como la curva con relación al incremento de la publicación de diferentes documentos en los últimos años.

En la Fig. 2 se observa una gráfica de barras que indica los países con más publicaciones de cualquier tipo en relación con los volantes de inercia. Se conoce que esta tecnología principalmente la desarrollan países como Estados Unidos y Japón, tomando en cuenta que son pioneros también en las industrias automotrices, que a lo largo del desarrollo de sus diseños han introducido diferentes tipos de volantes.

En la Fig. 3, se observa la curva que indica el incremento en investigación y publicación de documentos desde 1996 hasta el año 2019. En comparación a otras tecnologías en el mismo ámbito, se puede decir que esta tecnología es relativamente vieja, sin embargo, la utilización y diseños actuales han cambiado significativamente, así como los sistemas a los que se integra.

En la Fig. 4, se indica el número de documentos existentes se-

Material	Densidad 10 ³ kg/m ³	Energía útil 10 ³ J/kg	Masa del volante 10 ³ kg
Madera	0.55	21	1720
Acero Suave	7.8	29.5	1220
S-glass	1.9	70.5	509
Acero martensítico	8	86.4	417
Carbono 60% fibra	1.55	185.4	194
Kevlar 60% fibra	1.4	274.3	131

Tabla 2. Capacidades para almacenar energía de los diferentes materiales típicos utilizados para la fabricación de los volantes de inercia. Fuente: [9].

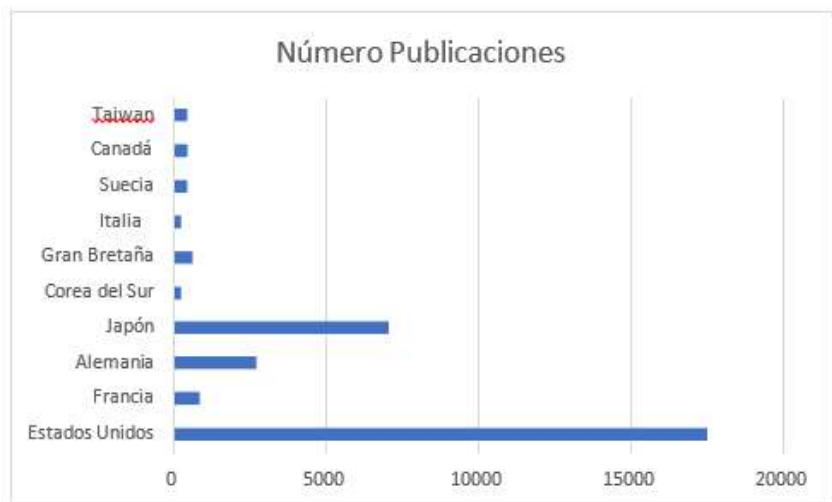


Fig. 2. Principales países con publicaciones referidas a los volantes de inercia. Fuente: Elaboración Propia.



Fig. 3. Curva en relación al crecimiento de los documentos publicados de 1996 al 2019. Fuente: Elaboración Propia.

Al ser una tecnología con muchos años de existencia, su desarrollo ha sido significativo, haciendo de los volantes de inercia un gran avance en cuanto a eficiencia, diseño y adecuándolas a cada caso según las necesidades.

gún el tipo que sea. La mayor parte de estos son de tipo artículos de investigación.

En la Fig. 5, se observa una gráfica con los principales autores en el ámbito de los volantes de inercia, con mayores publicaciones de cualquier tipo.

Estado del Arte

Una de las principales desventajas que se presentaba es la fricción al girar los discos de los volantes a gran velocidad, por lo que uno de los grandes desarrollos para corregir este problema fue la introducción del rodamiento magnético, el cual elimina la fricción y las pérdidas de este tipo, incrementando también,

la velocidad angular de los discos, permitiendo mayores capacidades de almacenamiento, carga y descarga. En la Fig. 6 se observa un prototipo de un volante de inercia con rodamiento magnético y sus componentes básicos

Con respecto al motor, lo mejor en la actualidad es una máquina magnética permanente, el cual ofrece gran eficiencia, gran torque del rotor y gran densidad de poder. Existen dos tipos principales de motores:

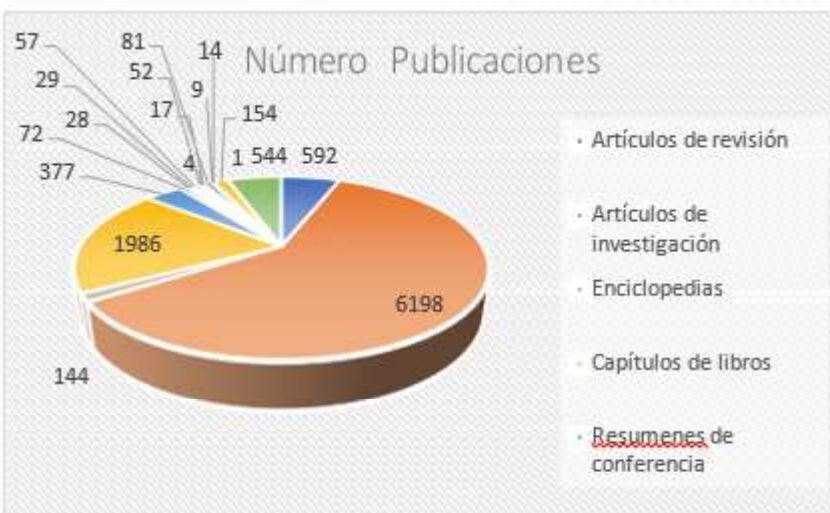


Fig. 4. Número de publicaciones por tipo. Fuente: Elaboración Propia.

- Máquina magnética permanente con flujo axial (AFPM)
- Máquina magnética permanente con flujo radial (RFPM)

En la Fig. 7 se observa una imagen con las máquinas magnéticas permanentes con flujo axial y radial.

Casos de éxito.

El primer caso de interés es el llamado Gyrobus, que se encuentra en Suiza desde mediados del siglo XX, cuyo principal objetivo era buscar una alternativa diferente a las baterías, menos ruido y evitar que el cableado fuera visible en la parte superior del camión. Este camión puede cargarse completamente entre 30 segundos y 3 minutos, contando con una autonomía de 6 a 7 km entre 50-60 kmh. En la Fig. 8, una imagen del Gyrobus en plena actividad.

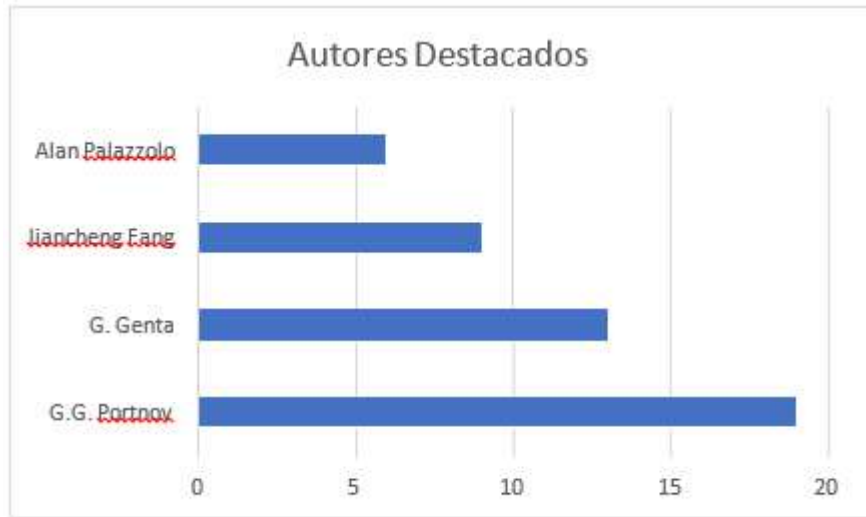


Fig. 5. Gráfica con el nombre de los principales autores de documentos con relación a los volantes de inercia. Fuente: Elaboración Propia.

Un caso en el mundo de carreras de autos es el Audi e-tron Quattro, el primero en su tipo en ganar la famosa y controvertida carrera de 24 horas “Le Mans”, en la cual compiten grandes marcas de autos como lo son Ferrari, Nissan, o Audi en este caso, desarrollando el primer auto ganador para su nombre, con el e-tron Quattro, un auto que introdujo un volante de inercia para su sistema de almacenamiento de energía, permitiendo la distribución de la energía generada según se deseara. Esta *flywheel* se ubico debajo del piloto y fue suministrada por *Williams Hybrid Power*, era capaz de girar a 45,000 rpm. En la Fig. 9 se ilustra una imagen de este auto en el premio Le Mans.

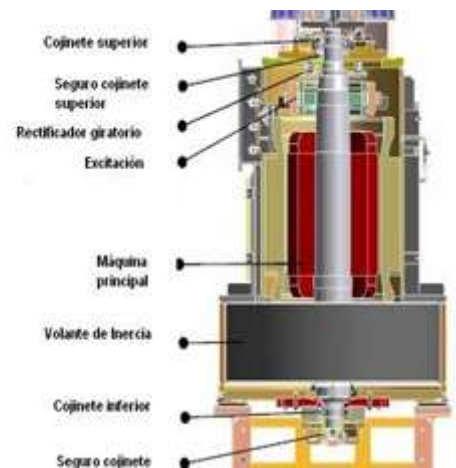


Fig. 6. Esquema de volante de inercia con rodamiento magnético. Fuente: [2].

En Yokowaga, Irlanda a partir del 2015 se estableció un sistema de control Híbrido- *flywheels* para almacenar energía re-

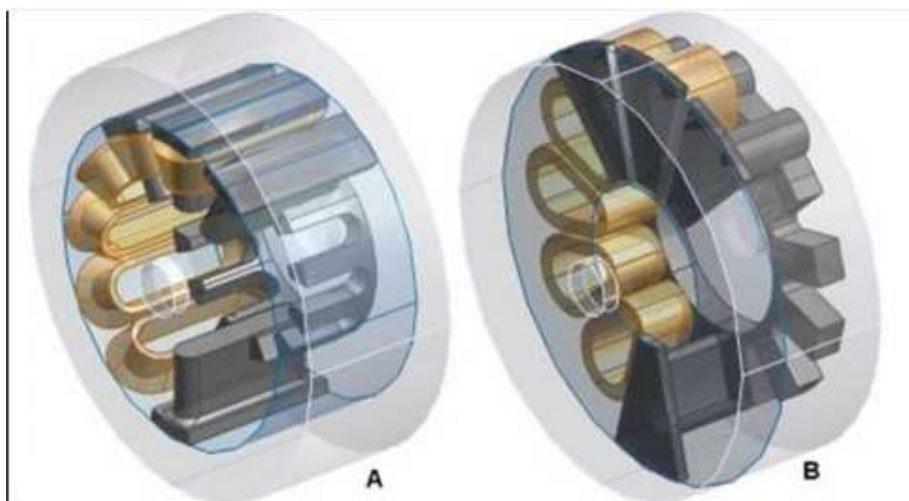


Fig. 7. Máquinas magnéticas permanentes con flujo axial y radial, respectivamente. Fuente: [3].



Fig. 8. Gyrobus en Suiza. Fuente: [4].



Fig. 9. Audi e-tron Quattro en carrera Le Mans. Fuente: [5].

Fig. 10. Sistema de control con volantes de inercia. Fuente: [6].



Fig. 11. Sistema de almacenamiento de energía en NY. Fuente: [6]

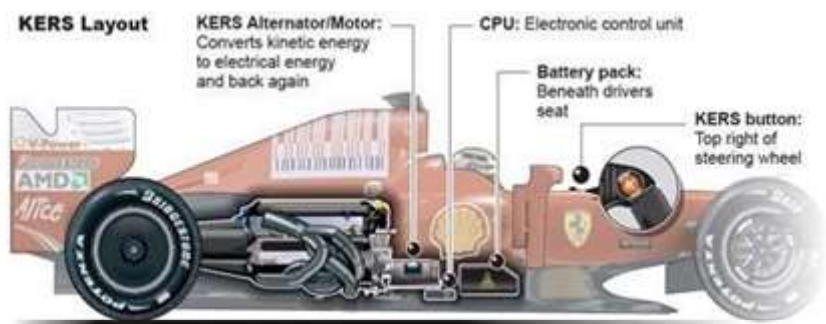


Fig. 12. Sistema KERS en auto de Fórmula 1. Fuente: [7].

novable en Rhode, un condado de Irlanda. Esta planta trabaja junto al sistema irlandés de transmisión para conectarse a la red eléctrica. Cuenta con dos unidades híbrido-*flywheel* del fabricante Beacon Power de 160kW y baterías con capacidad de 240kW. En la Fig. 10, una vista aérea del sistema de control.

En Stephentown, Nueva York, Beacon Power instala un sistema de almacenamiento con volantes de inercia, 200 en total. Se llevan a cabo entre 3000 y 5000 ciclos de carga y descarga completos en un año. En este caso también se conecta al sistema de transmisión. En la Fig. 11 se aprecia el sistema de volantes de inercia.

Otro caso de éxito conocido es el de la escudería Ferrari en la

Formula 1, en el cual los autos pueden hacer uso de un volante de inercia para que toda la energía que se produce al alcanzar altas velocidades no solo se expulse como calor o ruido, sino que sea aprovechada por el volante para producir caballos de fuerza extras para alcanzar una velocidad alta en menor tiempo. Cada piloto tiene derecho a usar este sistema llamado KERS 7 segundos por vuelta. En la Fig. 12 se observa el sistema KERS en un carro de Fórmula 1.

Discusión

La primera línea de continuación y desarrollo de esta tecnología es en la investigación de diferentes materiales para lograr bajar los precios de construcción de los volantes de inercia, dado que una de las principales problemáticas, como se comentó antes, es el alto costo en relación a las baterías convencionales. Es verdad que presentan numerosas ventajas en comparación a los diferentes sistemas que existen para almacenar energía. Hoy en día, los volantes de inercia han comenzado a reemplazar a las baterías en diversos sistemas donde sea posible implementarlos, tales como granjas solares de grandes magnitudes, carros eléctricos e híbridos, etc.

Sin duda alguna se sabe que los volantes de inercia constantemente se actualizan y mejoran, tal es el caso que grandes compañías han invertido mucho en este tema. Introduciendo los volantes en el transporte público de grandes ciudades, en automóviles de alta gama para el público y automóviles de exhibición y competición.

Es bien sabido que el uso de combustibles fósiles provoca grandes problemáticas y consecuencias irreversibles en el tema de contaminación, por lo que el uso de los volantes de inercia, así como de tecnologías similares, erradican o contribuyen a que poco a poco se vaya disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles.

Conclusiones

Este tipo de tecnologías están en constante desarrollo e investigación, esto debido a la necesidad de reemplazar las convencionalidades que conocemos, disminuir precios y reemplazar sistemas antiguos y poco eficientes. Un aspecto importante a mencionar es el hecho de la dependencia y la costumbre que se tiene a usar los combustibles fósiles, por lo que es necesario un cambio de cultura, así como un entendimiento de la necesidad de evolucionar e implementar nuevas tecnologías.

Los volantes de inercia representan una gran oportunidad hacia el futuro para utilizarlos en dispositivos y sistemas que se utilicen cotidianamente, dado que funcionan tanto para ahorrar combustible, así como para hacer equipo con sistemas eléctricos, con el fin de almacenar energía con el fin de tenerla disponible y obtener muy pocas pérdidas. También se pueden utilizar para el uso inmediato de la energía, es decir, almacenando energía de sistemas que utilicen motores o máquinas para reutilizar la energía almacenada en el volante evitando que el motor se desgaste y se trabaje al máximo. Todo esto gracias a que los primeros prototipos de volantes han sido elaborados y estudiados desde hace muchos años atrás, provocando nuevas mejoras y adelantos significativos. Gracias a la gran diversidad de volantes de inercia que existen, es posible la utilización de éstos en una gran variedad de sistemas de diferentes magnitudes y diferentes áreas.

Referencias.

- Andriollo, M., Benato, R., and Tortella, A. (2020). Design and modeling of an integrated flywheel magnetic suspension for kinetic energy storage systems. *Energies* 13.
- Martin, J.E., Rohwer, L.E.S., and Stupak, J. (2016). Elastic magnetic composites for energy storage flywheels. *Composites Part B: Engineering* 97, 141–149
- McTigue, J.D., and White, A.J. (2018). A comparison of radial-flow and axial-flow packed beds for thermal energy storage. *Applied Energy* 227, 533–541.
- Plomer, J., and First, J. (2015). Flywheel energy storage retrofit system for hybrid and electric vehicles. In *2015 Smart Cities Symposium Prague, SCSP 2015*, (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.), p
- Audi Media Centre (2013). The Audi R18 e-tron quattro.
- Multiple (2011). Beacon Power builds first 20 MW Flywheel Plant. (cover story). *Worldwide Energy* 22, 1–2.
- Greenwood, C. (2008). Formula 1 mechanical hybrid applied to mainstream automotive. *VDI Berichte* 711–723
- Pullen, K.R., and Dhand, A. (2014). Mechanical and electrical flywheel hybrid technology to store energy in vehicles. In *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation*, (Elsevier Inc.), pp. 476–504.
- Kale, V., and Secanell, M. (2018). A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems. *Energy Reports* 4, 576–585.
- Glinkowski, M., Guglielmo, A., Oudalov, A., Rackliffe, G., Rose, B., Scholtz, E., Verma, L., and Yang, F. (2017). Microgrids. In *Smart Grids: Clouds, Communications, Open Source, and*

- Automation, (CRC Press), pp. 213–249.
- Miller, J.M. (2017). Flywheels. In *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, (CRC Press), pp. 189–194.
- Hedlund, M., Lundin, J., de Santiago, J., Abrahamsson, J., and Bernhoff, H. (2015). Flywheel energy storage for automotive applications. *Energies* 8, 10636–10663.
- Awadallah, M.A., and Venkatesh, B. (2015). Energy storage in flywheels: An overview. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 38, 183–193
- Dvorsky, E., Rakova, L., and Hejtmankova, P. (2017). Grid frequency regulation by recycling electrical energy in flywheels. In *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, (Technical University of Kosice), pp. 159–164
- Breeze, P. (2018). Flywheels. In *Power System Energy Storage Technologies*, (Elsevier), pp. 53–59
- Bender, D. (2016). Chapter 10 – Flywheels. In *Storing Energy*, pp. 183–201
- Wicki, S., and Hansen, E.G. (2017). Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage. *Journal of Cleaner Production* 162, 1118–1134.
- Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., and Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. In *Energy Procedia*, (Elsevier Ltd), pp. 4561–4568
- Olabi, A.G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy* 136, 1–6.
- Amiryar, M.E., and Pullen, K.R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences* 7.
- Mongird, K., Fotedar, V., Viswanathan, V., Koritarov, V., Balducci, P., Hadjerioua, B., and Alam, J. (2019). Energy storage technology and cost characterization report. Pacific Northwest National Laboratory 1–120
- Gugenheimer, J., Wolf, D., Eiriksson, E.R., Maes, P., and Rukzio, E. (2016). GyroVR: Simulating inertia in virtual reality using head worn flywheels. In *UIST 2016 - Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, (Association for Computing Machinery, Inc), pp. 227–232
- Jiang, L., Zhang, W., Ma, G.J., and Wu, C.W. (2017). Shape optimization of energy storage flywheel rotor. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 55, 739–750
- Bender, D. (2016). Flywheels. In *Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources*, (Elsevier Inc.), pp. 183–201
- Farhadi, M., and Mohammed, O. (2016). Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 52, 1953–1962.
- Kitade, S., and Pullen, K. (2017). Flywheel. In *Comprehensive Composite Materials II*, (Elsevier), pp. 545–555.

- Breeze, P. (2019). Power System Energy Storage Technologies. In Power Generation Technologies, (Elsevier), pp. 219–249
- Pullen, K.R. (2019). The Status and Future of Flywheel Energy Storage. *Joule* 3, 1394–1399.
- Dvorsky, E., Raková, L., and Hejtmánková, P. (2018). Electric power system inertia increasing by flywheels. In 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 - Proceedings, (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.), pp. 1–5.