



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN

Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ

Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

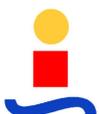
---

---

## CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

---

---



## 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA EDIFICIOS

El almacenamiento energético abarca diversas tecnologías más o menos desarrolladas hasta la fecha como son las baterías electroquímicas, los supercondensadores (double-layer capacitors), el almacenamiento magnético superconductor (SMES), los almacenadores cinéticos de energía (volantes de inercia), el almacenamiento por aire comprimido (CAES), la hidroelectricidad bombeada (pumped hydropower) [7]. Para comparar estos múltiples sistemas se utilizan los conceptos de densidad energética (energía/masa) y densidad de potencia (potencia/masa), con los que se evalúa la capacidad de almacenar y de intercambiar energía por unidad de masa del acumulador respectivamente.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de Ragone donde se sitúan los diversos dispositivos de almacenamiento comentados anteriormente en función de dicha caracterización [9].

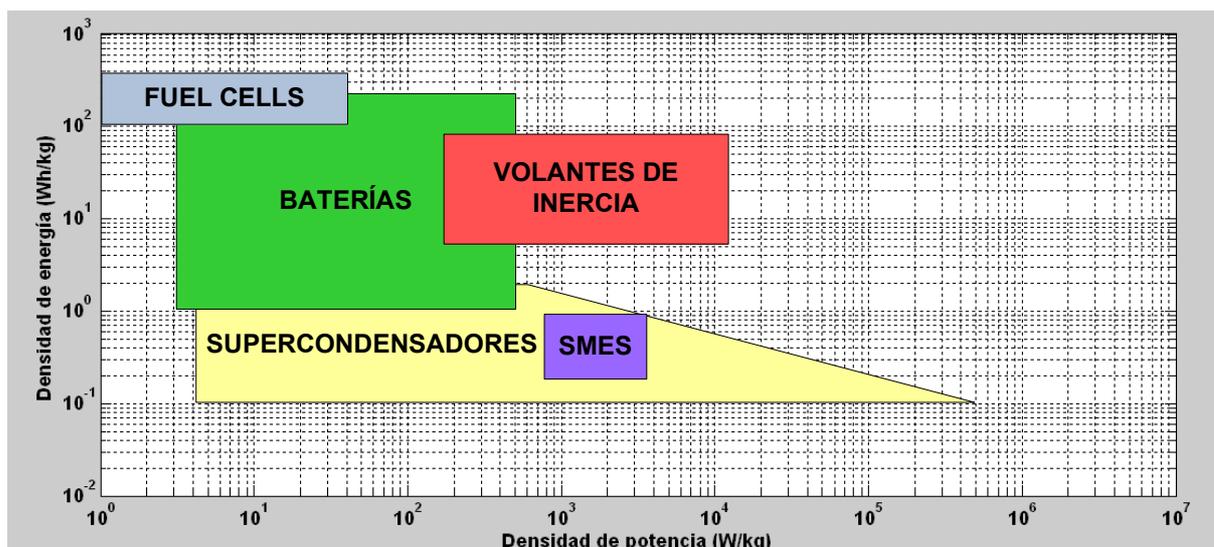


Figura 2.1. Diagrama de Ragone

	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN</b>
	<b>Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ</b>
	<b>Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ</b>

Las características más importantes de los sistemas de almacenamiento integrados en fuentes de energía renovables instaladas en edificios son:

- Gran capacidad de almacenamiento para lograr mantener la potencia suministrada por el sistema de almacenamiento el mayor tiempo posible.
- Sistemas de gran potencia, para conseguir poder responder ante la conexión de cargas puntuales y picos de demanda.
- Tiempos de respuesta rápidos.
- Rendimiento elevado, con bajas tasas de autodescarga.
- Alta potencia y energía específica, para conseguir sistemas de alta potencia y gran capacidad de almacenamiento sin ser muy voluminosos.
- Gran robustez, con operaciones de mantenimiento mínimas, con un valor bajo de MTBF (tasa media entre fallos).
- Larga vida útil, sin sufrir degradación.
- Permitir el almacenamiento a precios competitivos.
- Bajo impacto medioambiental.
- Por último, una alta seguridad del sistema que no ponga en riesgo a las personas o a la estructura del edificio.

Los almacenadores de energía que más se acercan a estas características son:

- Sistemas basados en baterías
- Sistemas basados en supercondensadores
- Sistemas basados en volantes de inercia
- Sistemas híbridos, basados en una combinación de los anteriores

## 2. SISTEMAS BASADOS EN BATERÍAS

---

Una batería es un elemento acumulador eléctrico que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Es un generador eléctrico secundario. No produce energía eléctrica en sí, sino que libera la que anteriormente se ha almacenado durante su carga. El número de cargas y descargas vendrá limitado por su vida útil.



Figura 2.2. Baterías estacionarias de Plomo-Ácido

La principal virtud de las baterías es el almacenamiento de gran cantidad de energía frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Una de ellas es la baja velocidad de carga y descarga permitida. Una batería tiene restricciones de tiempos y corrientes de carga y descarga. No tienen la capacidad de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas, cosa que las dañaría. Su rendimiento no es muy elevado, del orden del 80%, debido a su resistencia interna, la cual es notable en los procesos de carga y descarga del dispositivo. Otra característica desfavorable es la propia autodescarga con el tiempo debida a la resistencia de fuga. Algunos tipos de baterías presentan el llamado “efecto memoria”, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad de almacenamiento, debido a corrientes elevadas, altas



temperaturas, al envejecimiento del dispositivo, imposibilitando el aprovechamiento de toda su energía. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos tipos de baterías, que constituyen un problema medioambiental grave. Se están intentando reducir esta toxicidad con la sustitución por nuevas sustancias menos contaminantes.

Entre los tipos de baterías existentes, las principales son las de Plomo-Ácido, NaS, Ni-Cd, Ni-Mh, Li-ión y otras varias. Entre ellas, las baterías de plomo han sido las más desarrolladas y utilizadas en sistemas de potencia [9][10], debido a la mayor energía que son capaces de almacenar. El resto de baterías están siendo utilizadas en aplicaciones donde las restricciones de tamaño y peso son críticas. Las baterías de ión litio son las que mayores ventajas presentan, en cuanto a densidades de energía y potencia específica, eficiencia en el almacenamiento, mayor rendimiento en la descarga, ausencia de efecto memoria, pero por contra, dichos dispositivos son caros y su tecnología aún le queda por madurar. En la actualidad se están llevando a cabo proyectos de investigación cuyo objetivo es el aprovechamiento de las ventajas de este tipo de baterías y el desarrollo de la tecnología [11][12].

Las baterías más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía de fuentes de energía renovables (solar, eólica...) son las baterías estacionarias. Son baterías de plomo-ácido de bajo contenido de antimonio. Ellas poseen unos 2000 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20 % (es decir que la batería estará con un 80% de su carga) y unos 1200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50%. Estas baterías tienen un autodescarga menor del 3% y una eficiencia del 75%. Pueden soportar descargas del 80% y tener una vida de unos 15 años. Son utilizadas en instalaciones de grandes potencias.

Estas baterías se comercializan en celdas unitarias de 2V, o en bancadas que suelen ser de 12V ó 24V que no es más que una asociación encapsulada de celdas unitarias. Estas celdas son capaces de dar altas tasas de energía (Ah). En principio,

	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN</b>
	<b>Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ</b>
	<b>Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ</b>

se podría conseguir la tensión deseada mediante la asociación en serie de estos dispositivos.

Tipo de batería	Capacidades máximas	$\eta$	Precio (€/kWh)	Nº ciclos carga y descarga	Auto-descarga	Observaciones
Plomo-Ácido	10MW 40MWh	$\approx 75\%$	50-150	1000 2000	2-5% Al mes	Pesadas, baja energía específica
Níquel Cadmio (NiCd)	27MW 6.75MWh	$\approx 75\%$	200-600	3000	5-20% al mes	Alta descarga, baja energía específica
Sulfuro de sodio (NaS)	9.6MW 64MWh	$\approx 89\%$	-	2500	0%	Incorporan calentadores: temperaturas de operación $\approx 325^{\circ}\text{C}$
Ión-Litio	En desarrollo	$\approx 99\%$	700-1000	3000	1% al mes	Alta energía específica, alto coste

Tabla 1. Tabla comparativa de los principales tipos de baterías [9].

### 3. SISTEMAS BASADOS EN SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electroestáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional a gran escala. Un supercondensador puede llegar a tener capacidades del orden de la centena de faradios. Los supercondensadores son caracterizados por poder ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración. Ello es debido a que el almacenamiento de cargas es puramente electrostático.

En los últimos años, los supercondensadores han surgido como una alternativa o complemento importante para otros dispositivos de producción o almacenamiento de energía eléctrica como las pilas de combustible o las baterías [13][14]. La principal virtud del primero frente a los dos últimos es la mayor potencia que es capaz de suministrar. Otras características de los supercondensadores son la rapidez de carga y descarga, pueden proporcionar corrientes de carga altas (cosa que daña a las baterías), alto número de ciclos de carga/descarga, no necesitan mantenimiento, trabajan en condiciones de temperatura muy adversas y por último, no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías.

La principal desventaja de los supercondensadores es la limitada capacidad de almacenar energía, y a día de hoy, su mayor precio. En realidad debido a sus diferentes prestaciones, condensadores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, si no más bien se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercondensador aporta la potencia [15].



Figura 2.3. Supercondensadores varios



El incremento de energía almacenada en este dispositivo viene dada por la siguiente expresión, en Julios:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Siendo  $V_1$  y  $V_2$  las tensiones que marcan la profundidad del almacenamiento.

Los materiales estudiados como electrodos para supercondensadores son principalmente de tres tipos: óxidos de metales de transición, polímeros conductores y materiales de carbono activados. Con óxidos metálicos se han conseguido valores de capacidad muy altos, pero estos supercondensadores tienen la desventaja de que son excesivamente caros y por lo tanto sólo se utilizan en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial. El uso de polímeros conductores también puede dar lugar a capacidades relativamente altas, pero estos materiales presentan el inconveniente de que sufren hinchamiento y contracción, lo cual es indeseable puesto que pueden ocasionar la degradación de los electrodos durante los ciclos de carga y descarga. Finalmente, los materiales de carbono se presentan como los materiales activos del electrodo más atractivos, debido a su bajo coste relativo, elevado área superficial (pueden superar los  $2500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) y gran disponibilidad. Además, los materiales de carbono pueden presentar unas estructuras diferentes (materiales gráfiticos, grafitizables o no grafitizables) y están disponibles en una gran variedad de formas (fibras, telas, aerogeles o nanotubos).

Se puede decir que, actualmente, sólo los supercondensadores basados en carbono, o también llamados condensadores de doble capa (double-layer capacitors), han conseguido llegar a la etapa de comercialización.

### **3.1.1 Resumen de características principales**

- Altas Capacidades: ~ 1-3000 F
- Densidad de energía: ~ 1-10 Wh/Kg

- Densidad de potencia: ~ 1-10 kW/Kg
- Tiempos de carga y descarga: ~ minutos, segundos
- Número de ciclos de carga y descarga: ~  $10^6$
- Tensión de trabajo Limitada: ~ 10-100V
- Rendimiento eléctrico: ~ 98%
- Muy baja autodescarga
- Precio relativamente Alto
- No necesitan mantenimiento
- No poseen elementos tóxicos
- Resistencia a condiciones adversas de temperatura

#### 4. SISTEMAS BASADOS EN VOLANTES DE INERCIA

---

Los almacenadores de energía basados en volantes de inercia almacenan la electricidad en forma de energía cinética. Estos sistemas se basan en la inercia mecánica, en la que un disco gira alrededor de su eje teniendo una cierta energía cinética la cuál es aumentada o disminuida según se aumente o reduzca la velocidad de giro del disco.

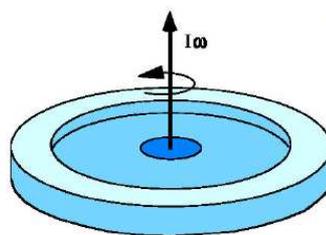


Figura 2.4. Volante de inercia



La energía cinética almacenada en un disco rodante depende de su momento de inercia  $I$  y de la velocidad de rotación  $\omega$  según la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{I}{2} \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2)$$

Siendo  $\omega_1$  y  $\omega_2$  las velocidades angulares que marcan la profundidad del almacenamiento.

Su funcionamiento se basa en la energía eléctrica transferida para cargar o descargar el volante con una maquina eléctrica según ésta funcione como motor o como generador. Cuando actúa como motor, la energía eléctrica suministrada al bobinado del estator es convertida en un par y aplicada al rotor del volante. Cuando trabaja como generador, la energía cinética almacenada en el volante aplica un par a la maquina, la cual lo convierte en energía eléctrica.

Los sistemas de almacenamiento cinéticos de energía basados en volantes de inercia (FESS – Flywheel energy storage systems) están caracterizados por ser capaces de proporcionar picos muy altos de potencia, de hecho la potencia de pico de entrada/salida esta limitada sólo por la potencia del convertidor usado, mientras que la energía almacenada en el módulo está determinada por la velocidad, la masa y la geometría del volante de inercia. Los FESS tienen una alta densidad de potencia y tienen una durabilidad “infinita” en número de ciclo de trabajo, así que su principal aplicación es en sistemas que implican un gran número de ciclos de carga y descarga, como en el transporte y en la mejora de la calidad de la red eléctrica.

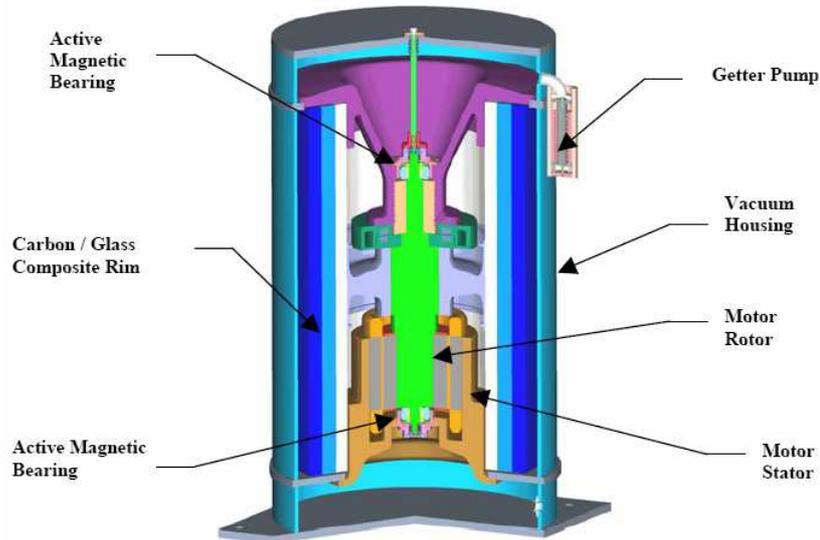


Figura 2.5. Componentes de un volante de inercia [16]

Las recientes mejoras en los materiales, en los rodamientos y en la electrónica de potencia hacen de los volantes de inercia una competitiva elección para un gran número de aplicaciones de almacenamiento de energía [17][18]. El progreso en la electrónica de potencia, con el desarrollo de los IGBTs, hace posible operar con volantes a altas potencias. Por su parte, el uso de nuevos materiales compuestos permite altas velocidades de giro consiguiéndose densidades de potencia muy altas.

Los sistemas de almacenamiento basados en volantes de inercia son capaces de almacenar hasta 500 MJ [18] y rangos de potencia de pico desde kilovatios a megavatios. La capacidad de manejar grandes niveles de potencia es una de sus principales ventajas frente a otros sistemas de almacenamiento. Otra característica importante es la rápida respuesta en los volantes de inercia, pudiendo descargarse/cargarse totalmente en pocos minutos. Por todo ello, estas características los hacen útiles para multitud de aplicaciones, como pueden ser:



- Como dispositivos para suavizar el funcionamiento de instalaciones generadoras de energía eléctrica mediante energía eólica y energía fotovoltaica, así como de diversas aplicaciones eléctricas industriales.
- Conectados a la red eléctrica para proveer de potencia en los momentos de pico de demanda, y para proporcionar protección contra las perturbaciones de tensión en la red eléctrica reduciendo la distorsión armónica y eliminando los huecos de tensión.

Por otro lado, hay que tener en cuenta uno de los parámetros más importantes de los FESS, que es la eficiencia energética, que depende mucho de las pérdidas del sistema. El volante debe superar continuamente sus pérdidas mecánicas, ya que hay un rozamiento en los rodamientos que lo sostienen y una fricción con el aire.

Para reducir estas pérdidas los volantes de inercia son generalmente encapsulados en una carcasa a presión muy pequeña o en vacío como mejor opción, para eliminar el rozamiento con el aire y así disminuir las pérdidas mecánicas. Por otro lado, para minimizar las pérdidas de rozamiento en el eje, se eligen rodamientos magnéticos, quedando el volante girando casi suspendido dentro de su alojamiento.

Además, hay que tener en cuenta las pérdidas en el cableado de la máquina que acciona el volante ya que suelen trabajar con grandes corrientes. Para reducir estas pérdidas se debe dimensionar correctamente el cableado de la máquina.

Otro factor a tener en cuenta es su ubicación en cuanto a la seguridad se refiere, ya que se debe tener una adecuada contención por posible fallos en un volante girando a velocidades muy elevadas, por lo que en muchas ocasiones, por motivos de seguridad, el volante tiene que estar enterrado en un foso.

#### ***4.1.1 Resumen de características principales***

- Alta densidad de potencia: 30 – 600 W/kg



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN**

**Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ**

**Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ**

- Alta densidad de energía: 5 – 80 Wh/Kg
- Rangos de potencia: 50 kW – 4 MW
- Rangos de energía: 100 kWh – 100 MWh
- Tiempos de descargas posibles menores de 5 minutos
- Tiempo de vida casi independiente de ciclos de carga/descarga
- Fácil medida de la carga mediante la velocidad de rotación
- No se requiere un mantenimiento
- Tiempo de recarga cortos
- Bajo impacto medioambiental de sus materiales constructivos



## 5. SISTEMAS HÍBRIDOS

---

Una alternativa en creciente uso en los sistemas de almacenamiento, es la utilización de sistemas híbridos en los que se usa al menos dos tecnologías de almacenamiento diferentes. Esta tendencia se basa normalmente en utilizar la tecnología de baterías junto con otra, ya sea supercondensadores o volantes de inercia, siendo ésta última la encargada de suministrar o almacenar los picos de potencia en la demanda o en la generación de energía respectivamente. De esta forma se permite a las baterías a entrar en funcionamiento poco a poco, hasta que puedan funcionar en régimen permanente. Consiguiéndose una menor degradación y una mayor vida útil de las baterías, lo que mejora la fiabilidad de estos sistemas.

Los sistemas híbridos presentan la ventaja de una mayor flexibilidad y de reducir las desventajas del uso de baterías. Por contra, se tiene un control más complejo del sistema global.

Los sistemas híbridos más típicos son:

### 5.1. Baterías junto a volantes de inercia

---

Estos sistemas se basan en un conjunto de baterías que se encargan de almacenar o suministrar la energía en régimen permanente. Funcionando en paralelo con el sistema de baterías, se colocan volantes de inercia en paralelo que son los encargados de almacenar o suministrar la energía debida a las transiciones rápidas de potencia en la generación o consumo respectivamente.

Por ejemplo, demandas bruscas de corrientes son perjudiciales para las baterías ya que reducen su vida útil. Por tanto, el escalón de demanda inicial no debe ser suministrado por las mismas. El volante de inercia es el encargado de dar esa punta de potencia inicial rápidamente, descargándose poco a poco. El sistema de baterías

a su vez, irá aportando una rampa controlada ascendente de potencia, haciendo que la potencia a aportar mediante el flywheel vaya disminuyendo. De esta forma, llegará el punto en el que la bancada de baterías se encuentre suministrando la potencia en régimen permanente, no descargándose más el volante de inercia.

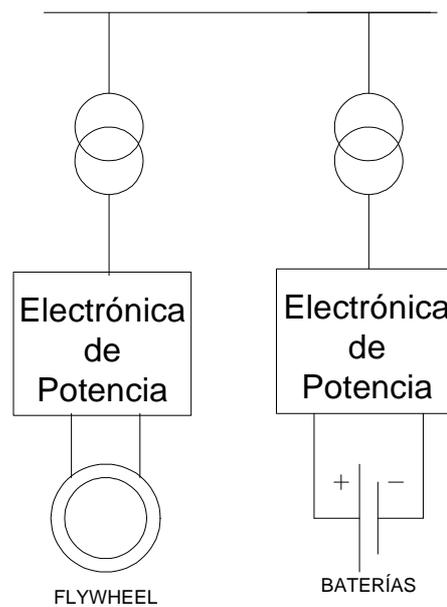


Figura 2.6. Sistema almacenamiento I. Volantes de inercia y baterías

## 5.2. Baterías junto a supercondensadores

Estos sistemas se basan en un conjunto de baterías que se encargan de almacenar o suministrar la energía en régimen permanente. Funcionando en paralelo con el sistema de baterías, se colocan una serie de supercondensadores que son los encargados de almacenar o suministrar la energía debida a las transiciones rápidas de potencia en la generación o consumo respectivamente.

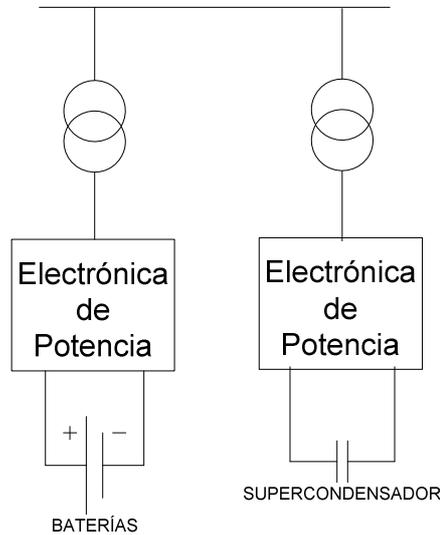


Figura 2.7. Sistema almacenamiento híbrido. Supercondensadores y baterías

## 6. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO PARA LA EDIFICACIÓN

### 6.1. Análisis tecnológico

Según las características que son deseables para los sistemas de almacenamiento para la edificación y que fueron expuestas en el punto 1 de este Capítulo, se realiza un cuadro comparativo entre las diferentes tecnologías con el fin de identificar cual es la óptima para su integración en sistemas de generación de energías renovables instaladas en edificios.

A continuación se muestra una tabla comparativa de los principales almacenadores contemplados:



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN**

**Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ**

**Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ**

	Baterías de Plomo-Ácido	Volantes de Inercia	Super-condensadores
Mecanismo almacenamiento	Químico	Mecánico	Electroestático
Potencia Específica	20 - 200 W/kg	30 - 600 W/kg	1 - 10 kW/kg
Energía Específica	20 - 50 Wh/kg	10 - 80 Wh/kg	1-10 Wh/kg
Potencia de sistemas	1kW - 1MW	50 kW - 4MW	
Energía de sistemas	Hasta 40 MWh	Hasta 100MWh	
Tiempo carga/descarga	Horas	< 5 min	Minutos o segundos
Número cargas/descargas	1000 - 2000	1000000	1000000
Tiempo de vida	3 - 5 años	> 20 años	> 20 años
Autodescarga al mes	2 - 5%	2%	1%
Eficiencia eléctrica	88 - 92%	90 - 95%	98%
Eficiencia total	≈ 75%	≈ 90%	≈ 90%
Estado de la tecnología	Maduro	En desarrollo	En desarrollo

Tabla 2.1 Tabla comparativa de los almacenadores contemplados

Con esta tabla se pueden comparar las tres tecnologías estudiadas y una combinación de ellas. Se observa que la tecnología basada en supercondensadores y volantes de inercia son semejantes en cuanto a características básicas, teniendo los supercondensadores tiempos de respuesta más rápidos, sin embargo, los volante de inercia poseen una mayor energía almacenada lo que les permite



	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN</b>
	<b>Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ</b>
	<b>Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ</b>

mantener la potencia suministrada durante un tiempo mayor, lo cual lo hace más adecuado para su uso en los edificios. En cambio los supercondensadores solo disponen de energía para intervalos de tiempos muy cortos a potencia nominal, lo que los hace inadecuados para su uso en edificios, aunque si podrían utilizarse junto a baterías en sistemas híbridos.

En lo que se refiere a las baterías de plomo-ácido comparadas con las otras dos tecnologías, éstas tienen desventajas en cuanto a que sufren una degradación en sus características en cada ciclo de carga y descarga, tienen una vida útil mucho menor y rendimientos pequeños. Además, las baterías tienen MTBF (tasa media entre fallos) del orden de 10 veces menores que en los volantes y supercondensadores, así como que las baterías necesitan operaciones de mantenimiento regulares no siendo éstas necesarias en los otros dos sistemas. Sin embargo, las ventajas de las baterías de plomo-ácido son su bajo coste, y su gran energía almacenada, siendo este parámetro similar a los volantes de inercia, pero mucho mayores que los supercondensadores. A pesar de esto, el uso exclusivamente de baterías no es adecuado para sistemas donde puede haber transiciones de potencia grandes, un gran número de ciclos de carga y descarga y en los que se necesita una rápida respuesta, ya que origina una degradación importante, lo cual unido a su corta vida útil en comparación con otras tecnologías hace a estos sistemas ineficaces a largo plazo.

Por otro lado hay que tener en cuenta que la única tecnología completamente desarrollada hasta la fecha son las baterías de plomo-ácido, estando el resto en desarrollo. Así, los supercondensadores y los almacenadores cinéticos ya tienen aplicaciones comerciales y están siendo instalados en multitud de lugares.

Por tanto, desde un punto de vista tecnológico, los sistemas más adecuados para su uso en la edificación son los sistemas de almacenamiento cinéticos y la tecnología

	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN</b>
	<b>Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ</b>
	<b>Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ</b>

híbrida, en la que se usan baterías estacionarias y otra tecnología de almacenamiento.

## 6.2. Análisis económico

Para el análisis económico de las diferentes tecnologías de almacenamiento hay que tener en cuenta además del precio que cuesta el kW de los dispositivos en cuestión, la vida útil y el rendimiento del sistema como parámetros más importantes.

	Baterías de Plomo-Ácido	Volantes de Inercia	Super-Condensadores
Tiempo de vida	3 - 5 años	> 20 años	> 20 años
Autodescarga al mes	2 - 5%	2%	1%
Eficiencia eléctrica	88 - 92%	90 - 95%	98%
Eficiencia total	≈ 75%	≈ 90%	≈ 90%
Operaciones de mantenimiento	Altas	Mínimas	Mínimas
Precio por kilovatio	50 - 200 €	250 - 500 €	

Tabla 2.2. Tabla comparativa de los almacenadores contemplados

Se observa en la tabla que la tecnología de menor precio por kW son las baterías estacionarias, esto se debe a que esta tecnología está completamente desarrollada y presenta precios más competitivos. Sin embargo, esta seguida de cerca en cuanto a precio de los volantes de inercia. Ahora bien, si se tiene en cuenta la vida útil del



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN**

**Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ**

**Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ**

dispositivo, el tanto por ciento de autodescarga mensual y la eficiencia del sistema global se observa que los almacenadores cinéticos son los más recomendables.

Así, por ejemplo para el dimensionamiento de un sistema con tecnología híbrida, la mayor parte de la inversión se realizará para las baterías ya que serán las encargadas de dar respuesta al sistema en régimen permanente, y se necesitará una menor inversión para la tecnología de volantes de inercia o supercondensadores que se disponga en paralelo para los picos de potencia. Esta inversión es pequeña, puesto que no se necesitarán muchos equipos de la otra tecnología ya que la energía a almacenar será pequeña comparada con la energía del sistema global.

Si comparamos esta situación de diseño con un sistema basado únicamente en almacenamiento cinético la inversión a realizar será mayor puesto que el precio de estos es mayor que los de las baterías, y en esta ocasión toda la energía del sistema deberá ser proporcionada con equipos de almacenamiento cinético.

Sin embargo, si tenemos en cuenta la vida útil de la instalación, la eficiencia del sistema global y las operaciones de mantenimiento a largo plazo, los sistemas basados en almacenamiento cinético tienen una ligera ventaja respecto a la tecnología híbrida en cuanto a la inversión total a realizar, aunque en los primeros la inversión inicial es mayor.

A continuación se muestra un estudio económico de una instalación para tres tecnologías de almacenamiento:

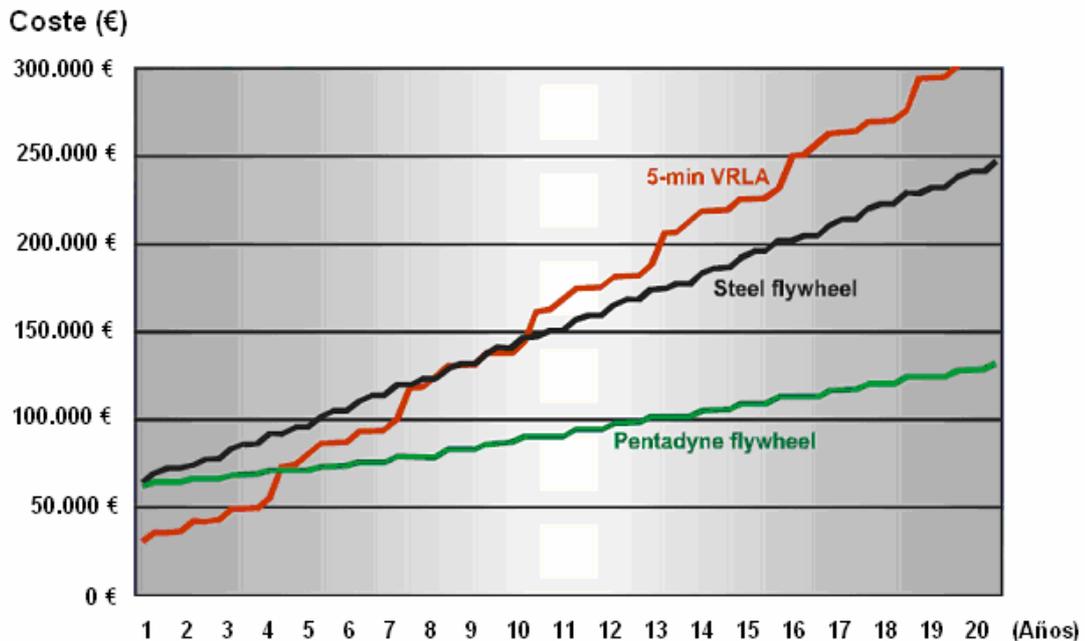


Figura 2.8. Comparación del dinero gastado en función del ciclo de vida de la instalación [19]

En este estudio del ciclo de vida de los almacenadores cinéticos se comparan los volantes de inercia de última generación, con los volantes de inercia de aceros (los más antiguos) con las baterías de ácido-plomo con válvula reguladora (VRLA). Los resultados del estudio demuestran que una instalación de almacenadores cinéticos de última generación es más económica que una de baterías si se contempla el ciclo de vida de los almacenadores cinéticos, y no sólo la inversión inicial. En estos resultados se tuvo en cuenta la inversión inicial a realizar, los costes de operación, de mantenimiento y de recambio.

### 6.3. Integración de sistemas de almacenamiento en edificios

Otro factor a tener en cuenta es la integración de estos sistemas a la aplicación a la que se destina. En este caso, hay que tener en cuenta la cercanía con las personas,

	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN</b>
	<b>Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ</b>
	<b>Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ</b>

y por tanto, los peligros que pueden ocasionar estos sistemas y la seguridad que prestan. También se tienen que tener en cuenta las condiciones ambientales en las que se van a encontrar estos sistemas.

Además, hay que tener en cuenta la escalabilidad de estos sistemas y lo que puede conllevar su uso generalizado en los edificios.

	Baterías de Plomo-Ácido	Volantes de Inercia	Super-condensadores
Tiempo de vida	3 - 5 años	> 20 años	> 20 años
Rango de temperatura	Limitado	Menos limitado	Menos limitado
Impacto medioambiental	Moderado	Leve	Leve
Peligros	Emisión de gases explosivos, fugas de ácido	Peligro de explosión	Necesidad de estar en recintos protegidos

Tabla 2.3. Tabla comparativa de los almacenadores contemplados

Por tanto, teniendo en cuenta la Tabla 2.3 se puede observar como las baterías tienen rangos de temperaturas más limitados. En cuanto a una posible generalización de su uso, cualquier alternativa que haga uso de baterías de plomo-ácido resultan inadecuadas ya que tienen un impacto ambiental moderado, por lo que teniendo en cuenta los objetivos de mejora medioambiental de estas aplicaciones en los edificios no parece ser la solución más adecuada.

Hay que tener en cuenta también la cercanía con las personas, por lo que hay que garantizar la seguridad de estos sistemas, por lo que resulta inadecuado el uso de

baterías ya que tienen un riesgo de explosión no despreciable y que tendrían consecuencias fatales. Por ello, se están desarrollando sistemas de baterías de plomo-ácido más seguros que garantizan un sellado que limita los riesgos de estos sistemas. Sin embargo, para estas aplicaciones se hace necesaria una tecnología más fiable y que no necesite de una frecuencia de mantenimiento alta, por lo que la tecnología basada en volantes de inercia es la más adecuada, ya que además tienen una gran eficiencia y un coste de almacenamiento pequeño. Además es tolerante a un más amplio rango de temperatura, requiere un mantenimiento mínimo, etc.



*Gráfica 2.1. La hinchazón y la separación de las celdas originan derrames de ácido y emisiones de gases inflamables [19].*



Gráfica 2.2. Explosión debida a una fugas de gases en una batería que reventó el tejado de un centro de datos en Sacramento [19].

#### 6.4. Conclusiones

---

Tras el análisis tecnológico, económico y el estudio de integración realizado, se puede obtener como conclusión, que la solución más óptima para el almacenamiento de energía en la edificación es el uso de sistemas de almacenamiento cinético basados en volantes de inercia.