GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Unidad de Formación

FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022

Volantes de inercia: principios de operación y aplicaciones

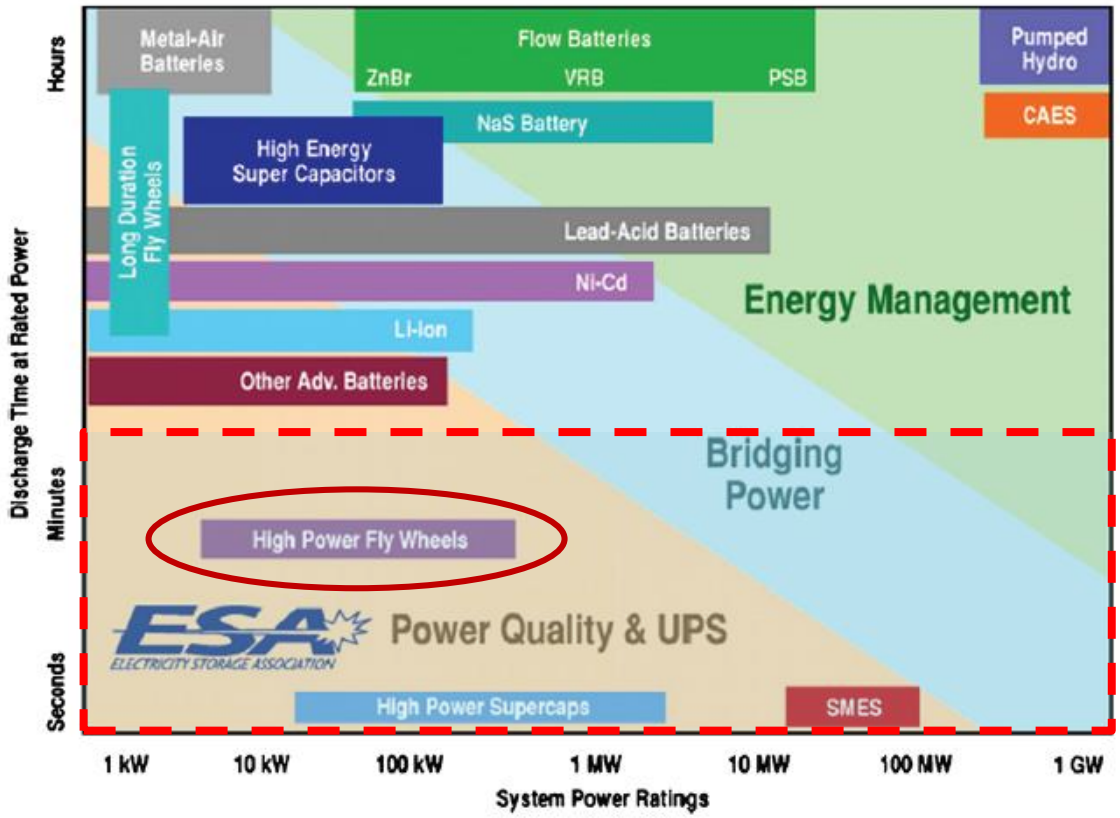
Jorge Torres

01 junio de 2022

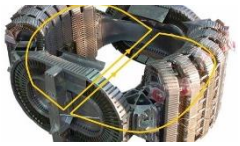
Contenido

1. Introducción: Localización y aplicaciones
2. Volantes de inercia: Características generales
3. Volantes de inercia: Operación y componentes
4. Volantes de Inercia: Formulación energía y potencia
5. Volantes de Inercia: Densidad de Energía Almacenada
6. Volantes de Inercia: Esfuerzos interiores
7. Volante de inercia: Diseño mecánico
8. Volante de inercia: Sistema de guiado
9. Volante de inercia: Máquina eléctrica
10. Volante de inercia: Sistema Electrónico, accionamiento
11. Volante de inercia: Fabricación y montaje
12. Fabricantes de volantes de inercia
13. Volantes de inercia: Aplicaciones

1. Introducción: Localización y aplicaciones



➢ **Sist. Almac. Rápidos:**

- SMES 
- Supercaps
- Flywheels

➢ **Características:**

- Tiempo de actuación corto
- Elevada velocidad de respuesta
- Elevado número de ciclos de carga y descarga sin degradación

Hay tecnologías más interesantes para energía y otras para potencia

2. Volantes de Inercia: Características generales

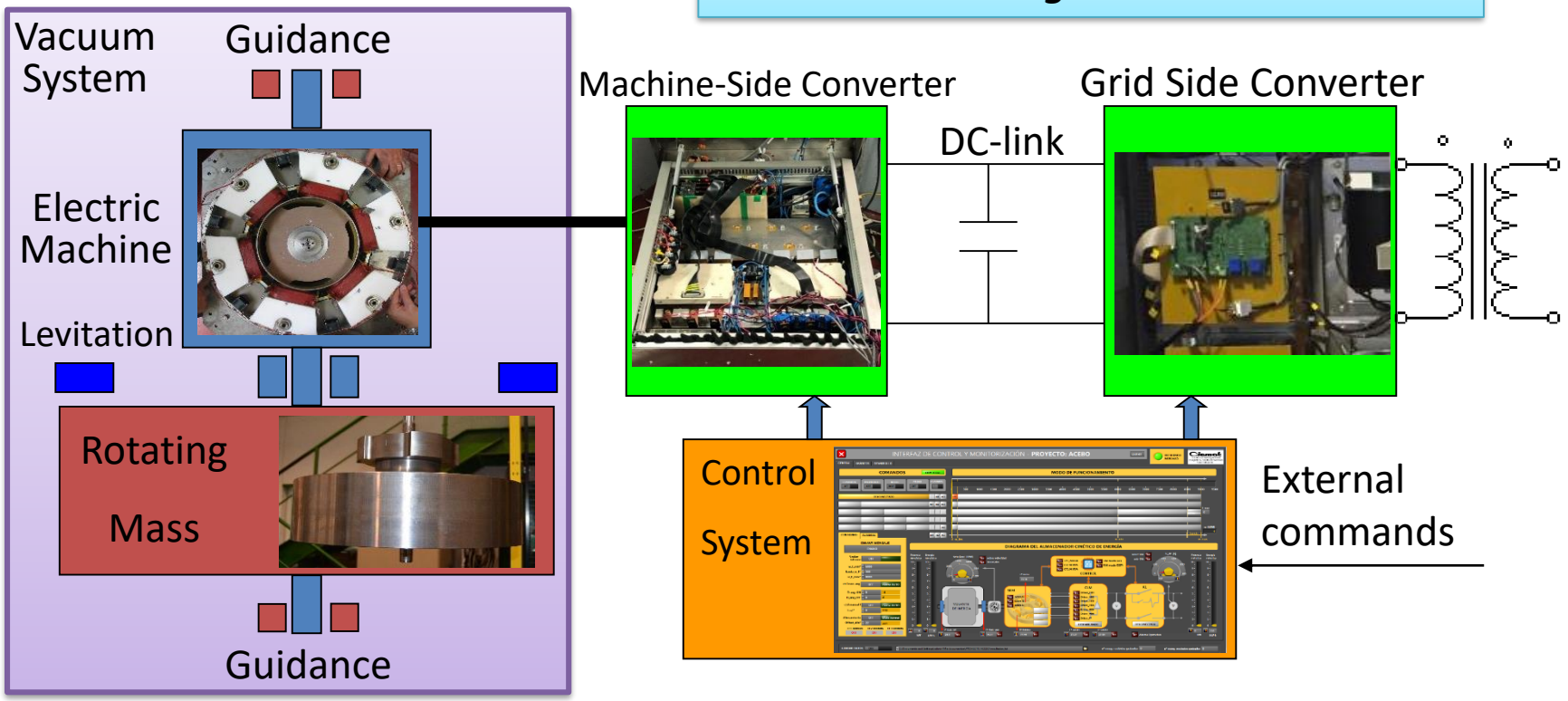
- **Capacidad de almacenamiento:** Baja en comparación con baterías
- **Tiempo del ciclo:** Segundos-pocos minutos
- **Potencia específica (kW/kg):** Alta (máquina eléctrica)
- **Densidad de energía (kWh/m³):** Baja
- **Tiempo de respuesta:** ms (sistema eléctrico)
- **Frecuencia de la carga/descarga:** Alta
- **Eficiencia del ciclado:** Alta eficiencia pero elevadas pérdidas autodescarga.
- **Autodescarga:** Elevada (tiempo de espera)
- **Vida útil (en ciclos y/o en años):** Ilimitada (mantenimiento)
- **Temperatura funcionamiento:** -20ºC hasta 70ºC
- **Degradación:** Muy Baja
- **Modularidad:** Configuración de conexión en paralelo
- **Reciclabilidad:** Muy elevada (no incluye materiales peligrosos, contaminantes)
- **Tipo de aplicaciones:** Preferiblemente estacionarias

3. Volantes de inercia: Operación y compontes

Un Sistema de almacenamiento cinético de energía (conocido como volante de inercia o *flywheel)* se basa en el intercambio entre energía cinética y eléctrica a través de una máquina eléctrica.

Motor -> Energía eléctrica a cinética

Generador -> Energía cinética a eléctrica



4. Volantes de Inercia: Formulación energía y potencia (I)

Son sistemas en los que la energía E, se almacena en forma cinética en un volante de momento de inercia J (parámetro geométrico) que gira a velocidad ω (variable de estado). El proceso está regido por una ecuación básica:

- **Energía Cinética de un volante de inercia o flywheel:** $\boldsymbol{E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot w^2}$

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot w^2 \rightarrow E \approx \sigma V \begin{cases} e_V = \frac{E}{V} \sim \sigma \\ e_M = \frac{E}{V} \sim \frac{\sigma}{\rho} \end{cases}$$

Energía Específica almacenada por unidad de volumen

Energía Específica almacenada por unidad de masa

- **Energía eléctrica en la carga:**

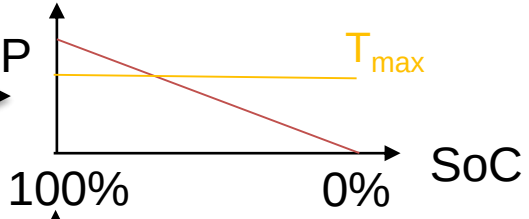
$$\boldsymbol{E_{carga} = \eta_{ciclo} \cdot \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{max}{}^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{k}\right)^2\right]} \qquad k = \frac{w_{max}}{w_{min}}$$

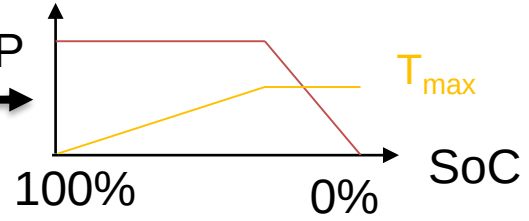
Es habitual utilizar de $^1/_{\sqrt{2}}$ hasta $^1/_2$ de la velocidad nominal. Esto es desde $^1/_2$ hasta $^3/_4$ de la energía

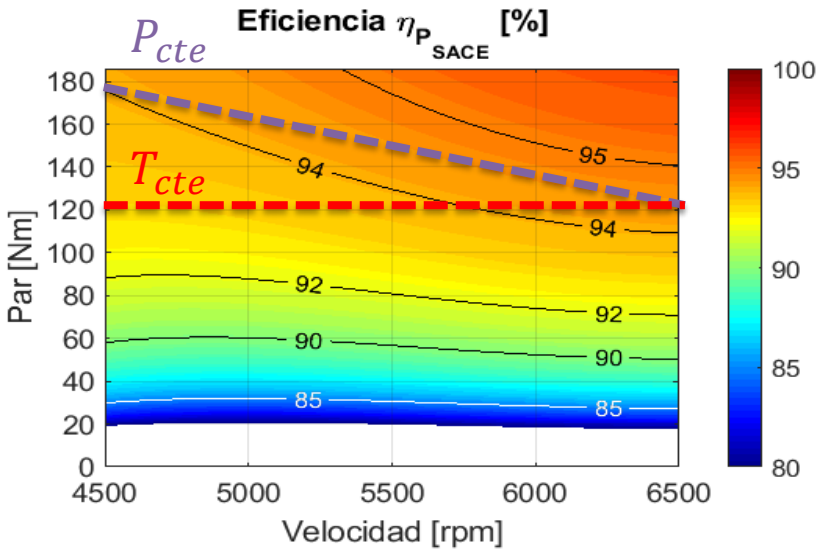
4. Volantes de Inercia: Formulación energía y potencia (II)

La potencia está relacionada con la potencia de la máquina eléctrica.

$$P = T \cdot w$$

- Par constante ($T = cte$) → 

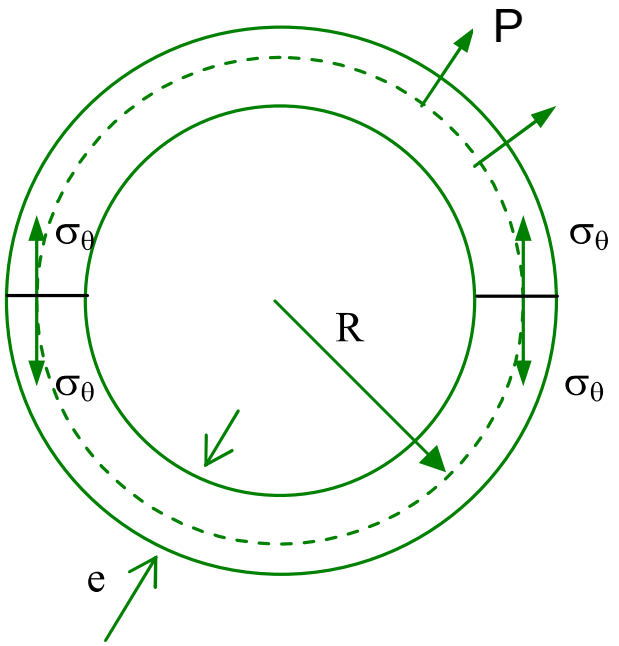
- Potencia constante ($P = cte$) → 



** Debido a que la potencia del sistema depende de la máquina eléctrica y la energía de la masa de inercia, existe un desacoplo entre ambos parámetros.*

$$\eta_{P_{SACE}} = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + P_{SACE}}$$

5. Volantes de inercia: Densidad de Energía Almacenada



PRESION CENTRIFUGA SOBRE EL CILINDRO

$P = \rho e R \omega^2$ siendo ρ la densidad del material

ESFUERZOS ACIMUTALES EN EL CILINDRO

$$\sigma_\theta = \frac{RP}{e} = \rho R^2 \omega^2$$

ENERGIA CINETICA ALMACENADA EN EL CILINDRO

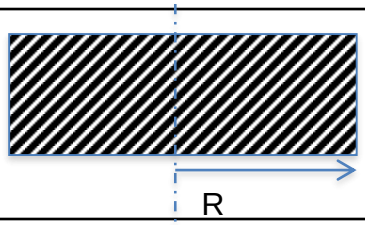
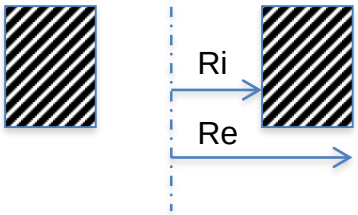
$$E = \frac{1}{2} \cdot J\omega^2 = \frac{1}{2} \cdot MR^2\omega^2 = \frac{1}{2} \cdot V\sigma_\theta$$

DENSIDAD DE ENERGIA ALMACENADA

$$e_M = \frac{E}{M} = \frac{1}{2} R^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{\rho} \right)$$

La densidad de energía que se puede almacenar en un volante en forma de anillo delgado, se expresa fácilmente en función de la tensión de trabajo del material. Este concepto se puede generalizar para formas mas complejas.

6. Volantes de Inercia: Esfuerzos interiores

TIPO DE VOLANTE	Esfuerzo Acimutal Máximo	@ r	Esfuerzo Radial Máximo	@ r
	$\frac{(3+\nu)}{8}\cdot[\rho\omega^2R^2]$	0	$\frac{(3+\nu)}{8}\cdot[\rho\omega^2R^2]$	0
	$\frac{(3+\nu)}{4}\cdot\left[1+\left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2\frac{(1-\nu)}{(3+\nu)}\right]\cdot[\rho\omega^2R^2]$	R_i	$\frac{(3+\nu)}{8}\cdot\left[1+\left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2-2\left(\frac{R_i}{R_e}\right)\right]\cdot[\rho\omega^2R^2]$	$\sqrt{R_iR_e}$

Existen dos geometrías clásicas para la confección de un volante de inercia: El cilindro y el anillo de pared gruesa. Es muy interesante analizar los esfuerzos tanto acimutales como radiales que aparecen en ambos al girar y se puede ver que la sola presencia de un agujero central en un cilindro, duplica automáticamente los esfuerzos acimutales que aparecen en el interior del volante.

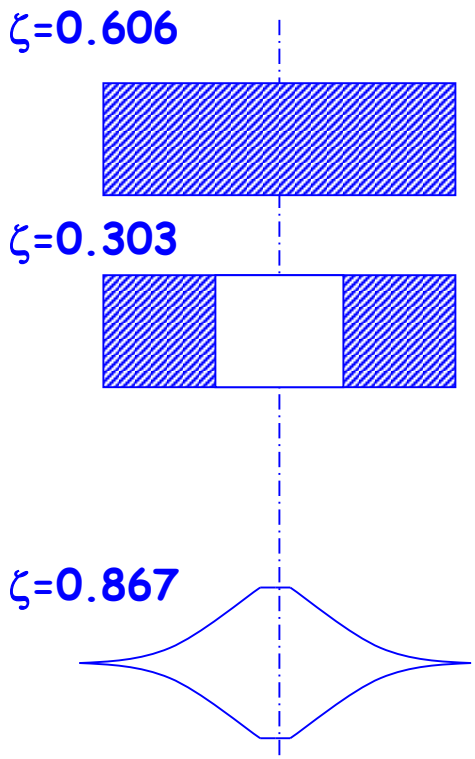
7. Volante de inercia: Diseño mecánico (I)

El volante es el elemento donde se almacena la energía.
La máxima energía almacenable está dada por:

$$E_{max} = \xi \cdot \sigma_{yield} \cdot V \rightarrow \begin{cases} \xi\text{: factor geométrico y de seguridad} \\ \sigma_{yield}\text{: límite elástico del material} \\ V\text{: volumen} \end{cases}$$

Densidad de energía: $e_M = \xi \cdot \frac{\sigma_{yield}}{\rho}$; $e_V = \xi \cdot \sigma_{yield}$

MATERIAL	σ_{yield} (MPa)	ρ(Kg/m^3)	e_m (kJ/Kg)	e_v (kJ/m^3)
STEEL (AISI 4340)	1800	7800	140	1.092.000
ALLOY (AlMnMg)	600	2700	135	364.500
TITANIUM(TiAl62r5)	1200	4500	162	729.000
GLASS FIBRE (60%)	1600	2000	485	970.000
CARBON FIBRE (60%)	2400	1500	970	1.455.000



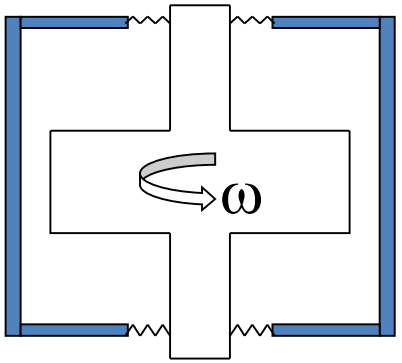
$$\uparrow E \leftrightarrow \uparrow \sigma_{yield} \text{ o } \uparrow \omega \rightarrow \begin{cases} Volantes\ lentos\ (Mat.denso\ y\ \omega < 10.000\ rpm) \\ Volantes\ rápidos\ (Mat.ligero\ y\ \omega > 15.000\ rpm) \end{cases}$$

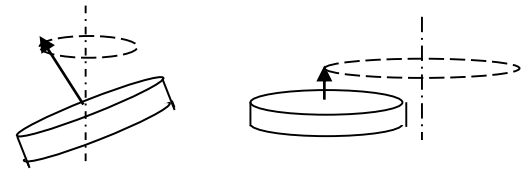
7. Volante de inercia: Diseño mecánico (II)

Uno de los principales problemas asociados al giro del volante son las resonancias.

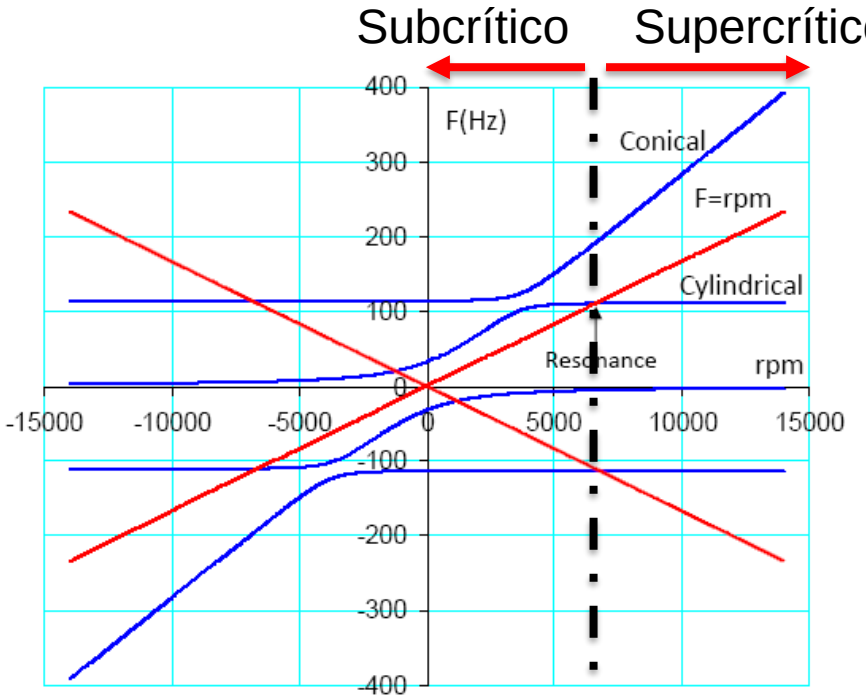
Los volantes tienen dos modos típicos de oscilación dependientes de la velocidad de giro: **Cónico** y el **Cilíndrico**.

La resonancia se produce cuando la velocidad de giro coincide con la frecuencia del modo.





MODO CONICO MODO CILINDRICO



Existen dos formas de operación:

- El régimen **Subcrítico**, en el que siempre se trabaja a una velocidad inferior a la que se produce resonancia.
- El régimen **Supercrítico** en el que la resonancia se produce a una velocidad inferior a la de la zona de trabajo y se pasa por ella rápidamente, solo en el arranque.

8. Volante de inercia: Sistema de guiado

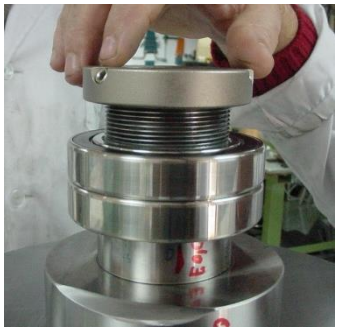
- **Misión**: mantener el eje de giro del volante

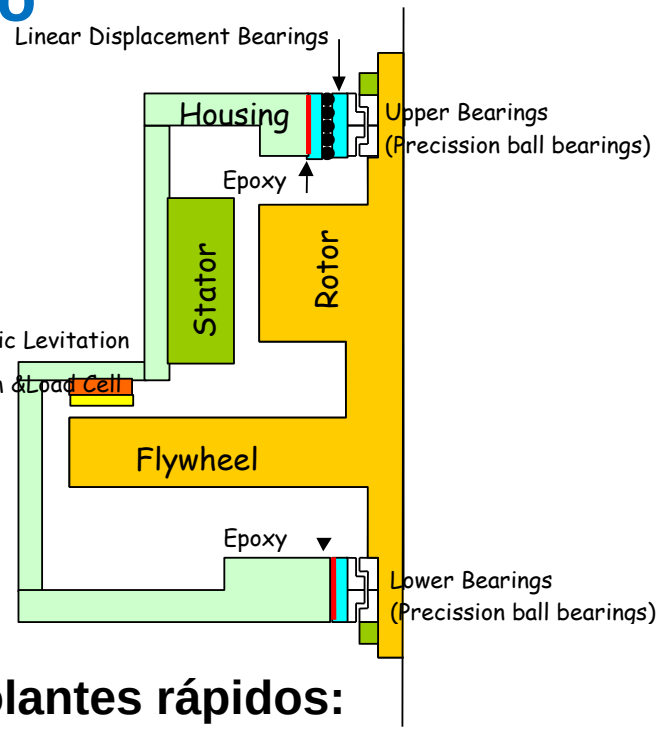
- **Problemas:**
- Altas revoluciones de giro
- Elevado peso de la masa giratoria

Esfuerzos y desgastes inadmisibles para los rodamientos convencionales.

Sistemas de guiado para volantes de inercia:

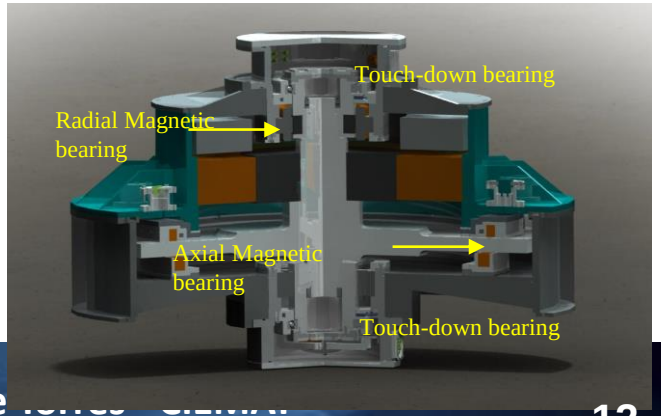
- **Volantes lentos:** Rodamientos cerámicos de bolas y sistema de levitación híbrido (imanes permanentes e electroimanes).





- **Volantes rápidos:**

Cojinetes electromagnéticos

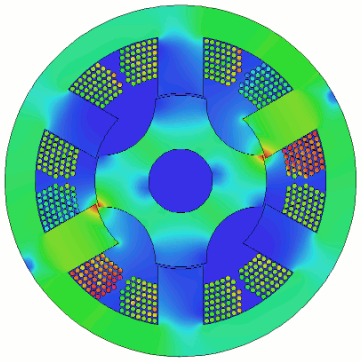


9. Volante de inercia: Máquina eléctrica

- **Misión:** Accionar el volante
- **Modos de funcionamiento:** Dependiendo del sentido del flujo de potencia:
  - **Motor:** Se acelera el volante generando un par positivo → Almacena energía.
  - **Generador:** Se frena el volante generando un par negativo → Se recupera la energía.
- **Requisitos** para su uso en un volante de inercia:
  - Mínimas pérdidas en el rotor
  - Aptitud para altas revoluciones
  - Elevado rendimiento

→ *Máquinas sin devanados en el rotor*

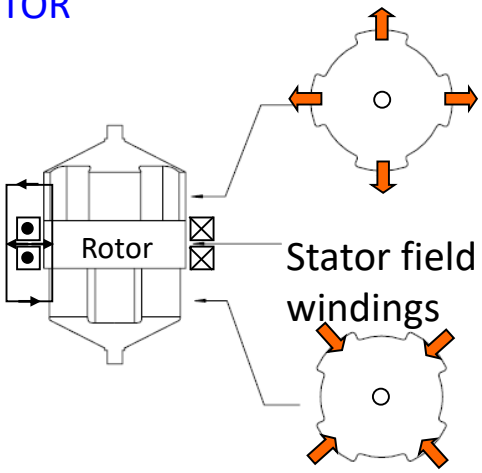
MAQUINA SIN EXCITACIÓN EN EL ROTOR



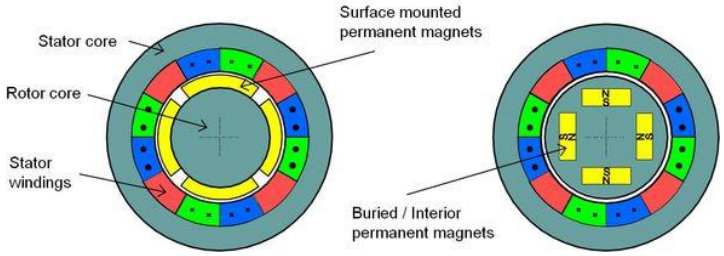
Máquina de Reluctancia

(Síncrona o Conmutada)

MAQUINAS SINCRONAS CON EXCITACIÓN EN EL ROTOR



Máquina Homopolar



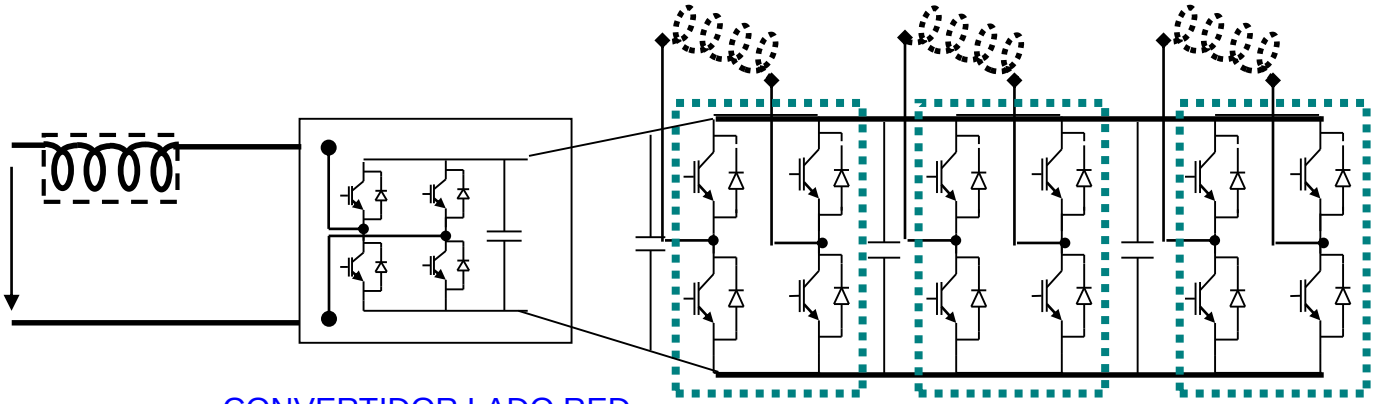
Máquina de Imanes Permanentes

(Diferentes configuraciones del rotor)

10. Volante de inercia: Sistema Electrónico, accionamiento (I)

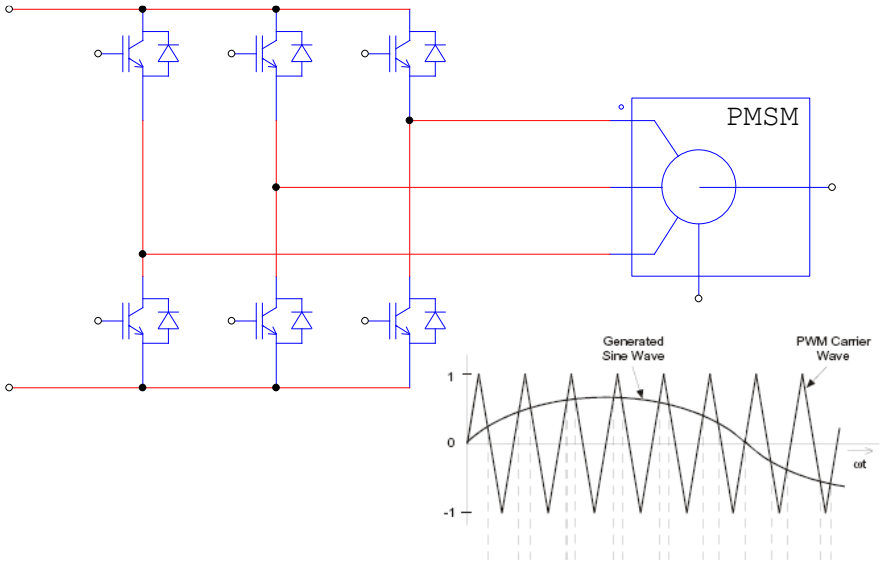
- **Misión:** Enlace de potencia entre la máquina eléctrica y la carga o red a la cual se conecta el volante de inercia. Este dispositivo se denomina **Convertidor Lado Máquina.**
- **Características:**
  - Adapta la tensión que hay disponible a la entrada (Carga: continua, Red: alterna trifásica) a la forma de tensión requerida por la máquina (trifásica de tensión y frecuencia variable u otras formas).
  - Su configuración va unida al tipo Máquina utilizada en el volante de inercia.

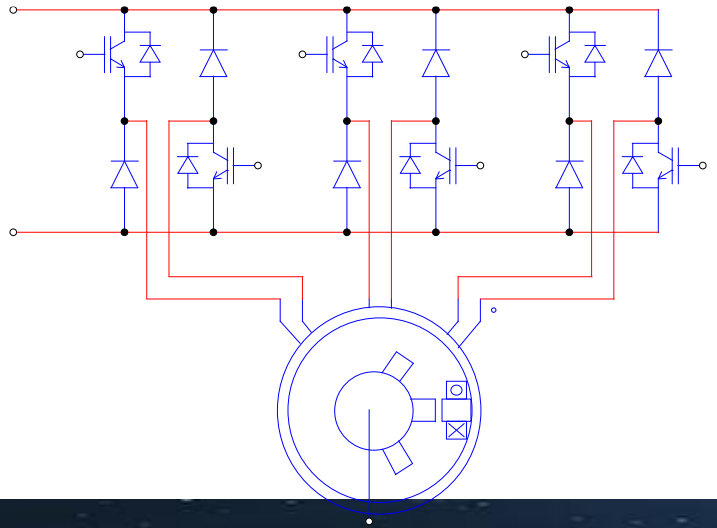
Si la Red de conexión es de alterna, se suele disponer de otro convertidor que transfiere la potencia entre el convertidor lado máquina y la red. Se denomina Convertidor Lado Red.



10. Volante de inercia: Sistema Electrónico, accionamiento (II)

La configuración del Convertidor Lado Máquina de un volante de inercia va intrínsecamente ligada a la Máquina Eléctrica elegida. Para Máquinas Síncronas, se usan convertidores trifásicos con modulación por ancho de pulsos, para regular la corriente que produce el par en la máquina.





En máquinas de Reluctancia Conmutadas, se usan convertidores polifásicos (tantas fases como tenga la máquina), que conmutan entre valores positivos, negativos o nulos de tensión cada fase (una al tiempo) para imponer la corriente que produce el par en la máquina.

11. Volante de inercia: Fabricación y montaje

1. Fabricación de masa de inercia (Equilibrado)

2. Sistema de guiado y levitación

3. Sistema de vacío (Problemas rotodinámicos)

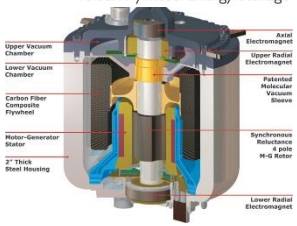
4. Ajuste Rotor-Masa de inercia

5. Montaje del volante

6. Modo de operación

12. Fabricantes de volantes de inercia (I)

POWERTHRU Clean Flywheel Energy Storage



190 kW, 0.63 kWh
(USA)

Beacon POWER

100 kW, 50 kWh
(USA)

ADAPTIVE Balancing Power

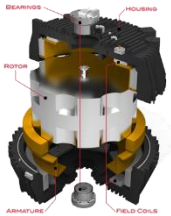
700 kW, 12 kWh
(Germany)

Gyrotricity DURABLE ENERGY STORAGE

25 kW, 0.069 kWh
(UK)

KineticTraction Systems

700 kW, 12 kWh
(Germany)

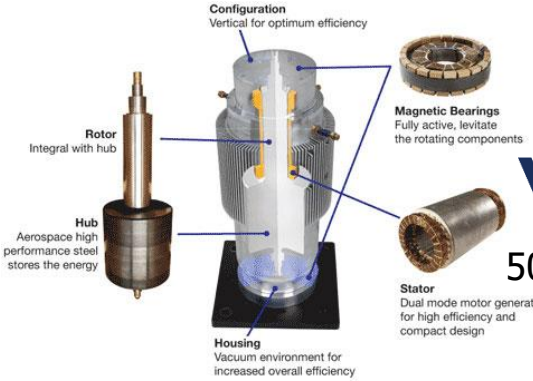


ACTIVE POWER

250 kW
0.9 kWh
(USA)

PILLER Power Systems

1600 kW
4 kWh
(Germany)



VYCON

500 kW, 0.83 kWh
(USA)

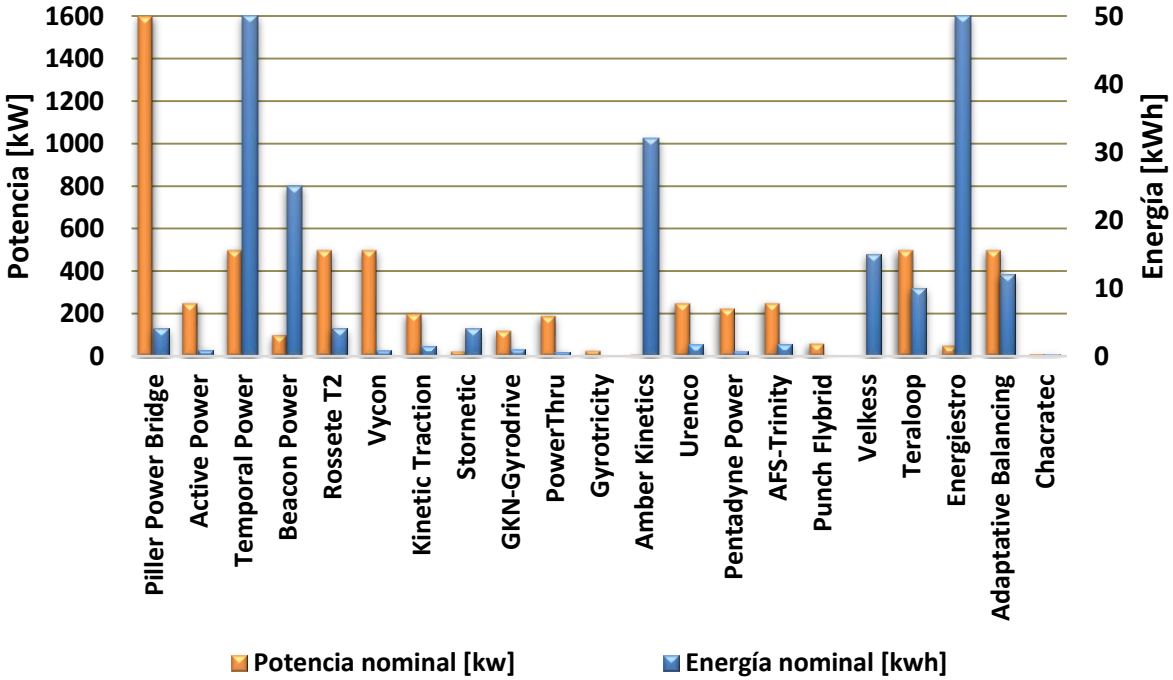
STORNETIC The Energy Storage Company

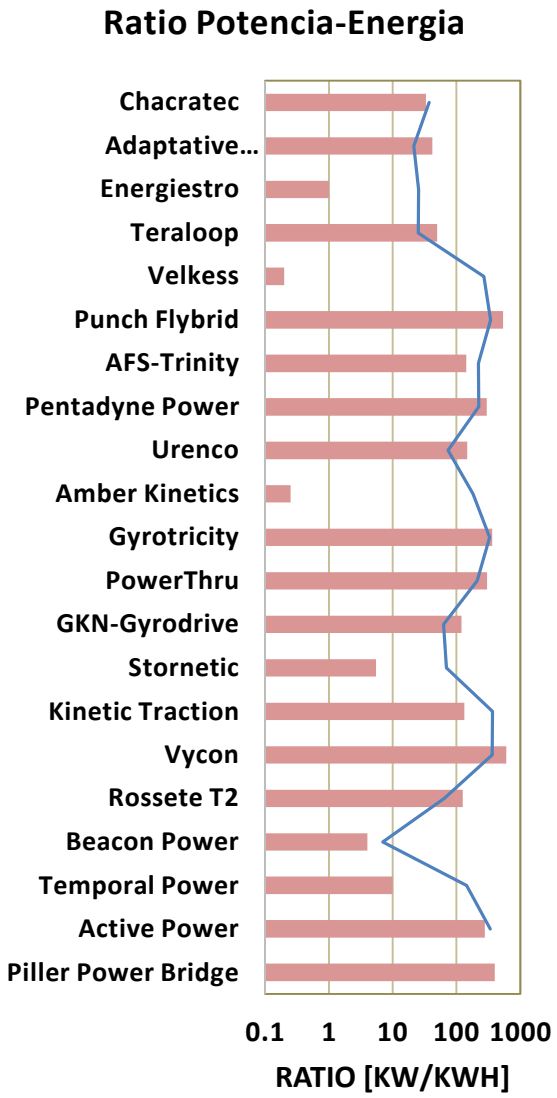
80 kW, 3.6 kWh
(Germany)

12. Fabricantes de volantes de inercia (II)

A la vista de los productos que ofrecen los fabricantes, no hay un acuerdo entre la potencia y la energía.

$$Ratio\left(\frac{kW}{kWh}\right) \in [10, 200]$$

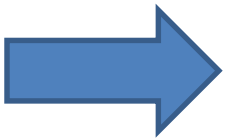


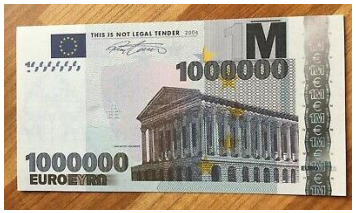


12. Fabricantes de volantes de inercia (III)

A la vista de los productos que ofrecen los fabricantes, no hay un coste único en €/kW o en €/kWh.

- Tipo de instalación
- Tipo de tecnología empleada
- Tamaño de la planta





@MW **1.5-6M€/MWh (2016)**

1-3.9M€/MWh (2030)

Bat. Li-ion

Supercaps.

1-1.5M€/MW 0.2-1.5M€/MWh (2016) 0.5M€/MW 10-15M€/MWh (2016)

77-574k€/MWh (2030) 0.2M€/MW (2030)

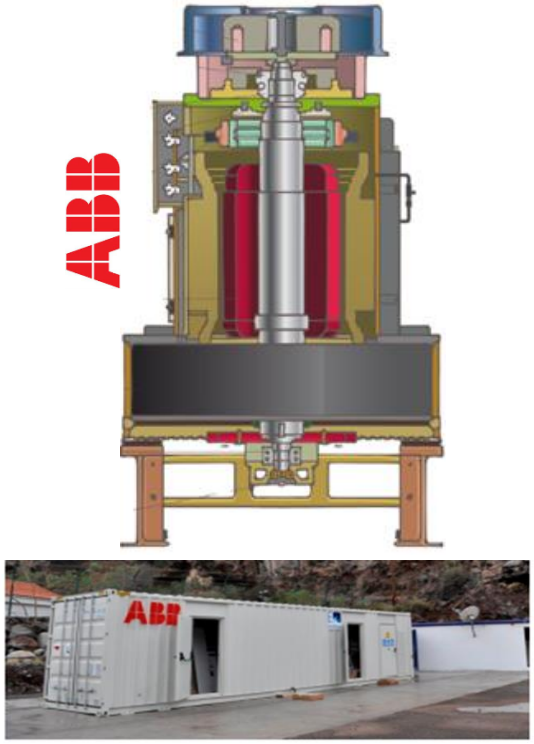
13. Volantes de inercia: Aplicaciones (I)

TRANSPORTE	TRENES PESADOS	Urenco (N. York) Piller (Hanover), CEDEX(ADIF), Unv. Texas
	TRENES LIGEROS	Urenco (Lyon)
	TROLEBUSES, TRANVIAS	CCM (Holanda), AFS Trinity (USA), Magnet-Motor (Alemania)
	AUTOMOVILES	AFS Trinity (USA)
POTENCIA	EST. FRECUENCIA	Beacon (DOE)
	RENOVABLES	Urenco (Fuji), CEDEX
UPS	Bancos, Procesos Críticos, Aeropuertos, Hospitales, Instalaciones Militares	Urenco , Pentadyne, Active Power, Piller, Liebert

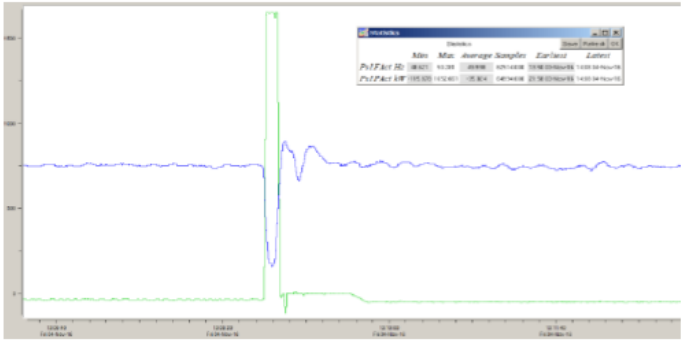
13. Volantes de inercia: Aplicaciones (II)

Regulación de frecuencia en la isla de Lanzarote y La Gomera

- Mejorar la seguridad y estabilidad de la red.
- Reducir las variaciones de frecuencia y tensión en la red.
- Minimizar el desequilibrio entre consumo y generación de potencia.



Potencia	1.6 MW
Energía	0.005 MWh

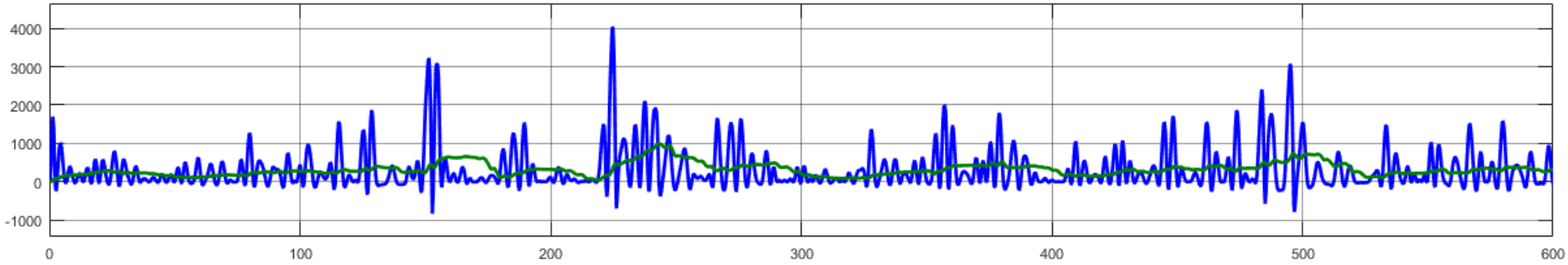


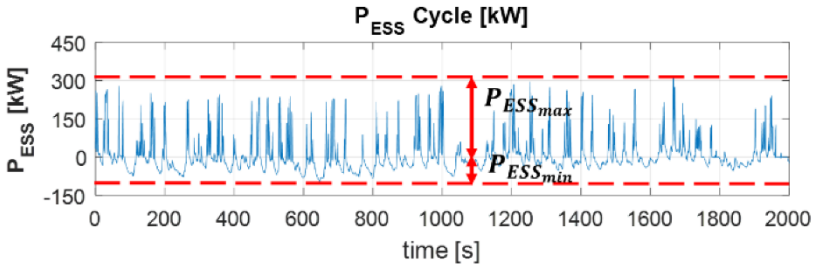
Fuente: REE

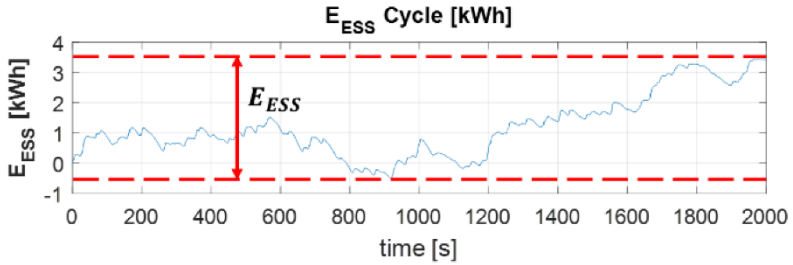
13. Volantes de inercia: Aplicaciones (III)

Compensación de oscilaciones de potencia debidas a generación a partir de energías renovables

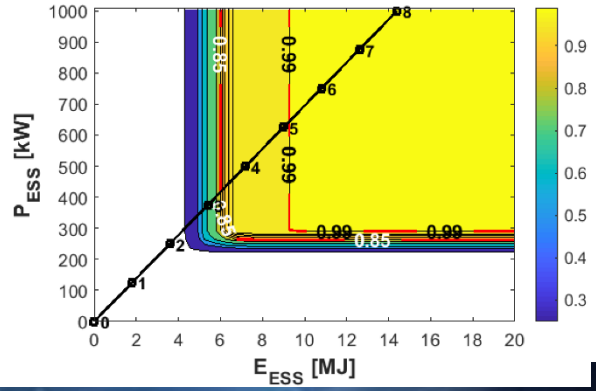
- Partiendo del perfil de potencia necesaria para almacenamiento, se calcula:



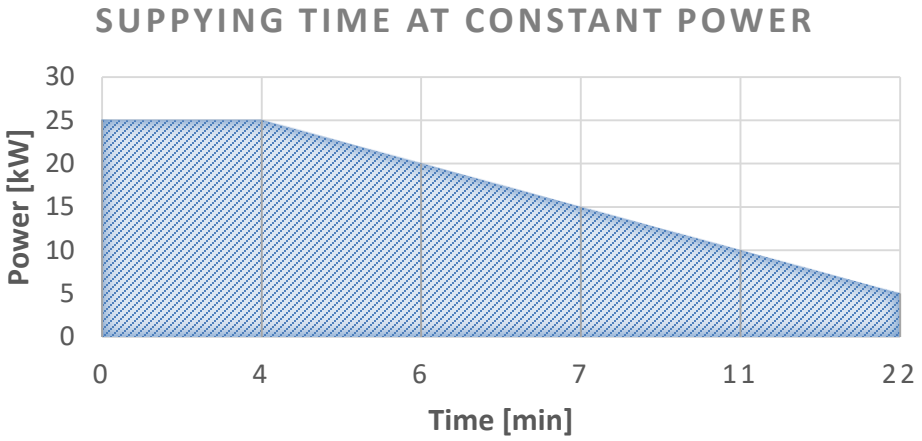


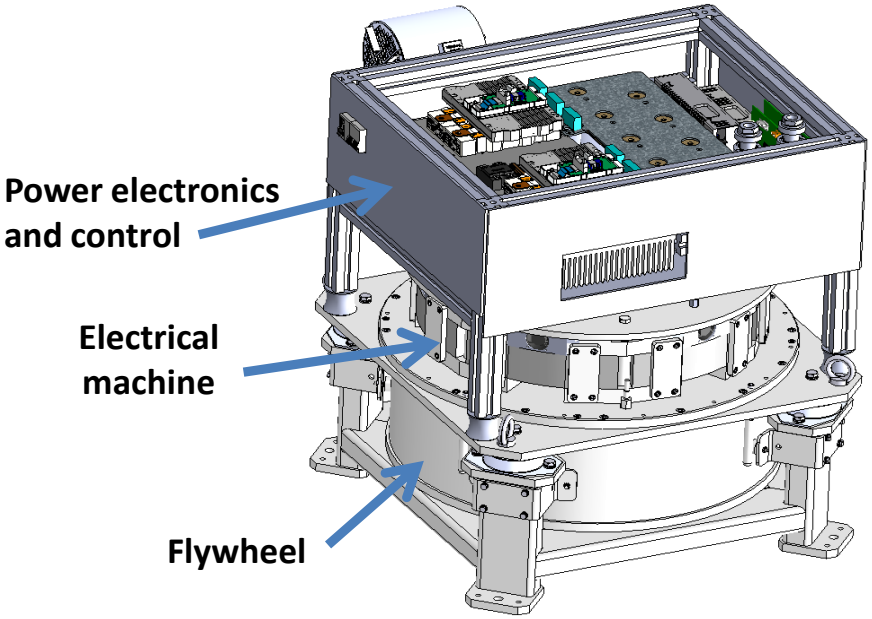


- *Potencia: máximo valor instantáneo*
- *Energía: resultado de una integral completa*

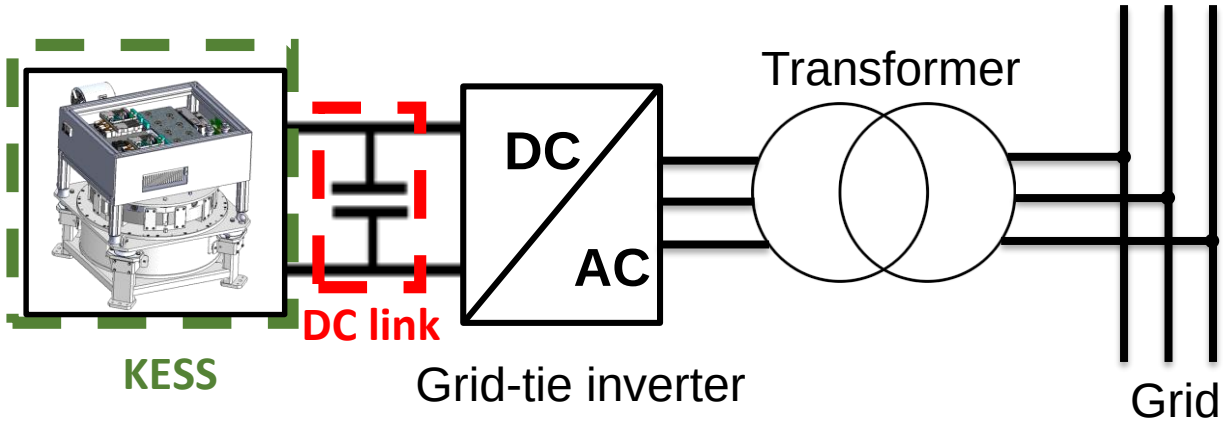


Ejemplo de aplicación de la tecnología de volantes de inercia: ACEBO

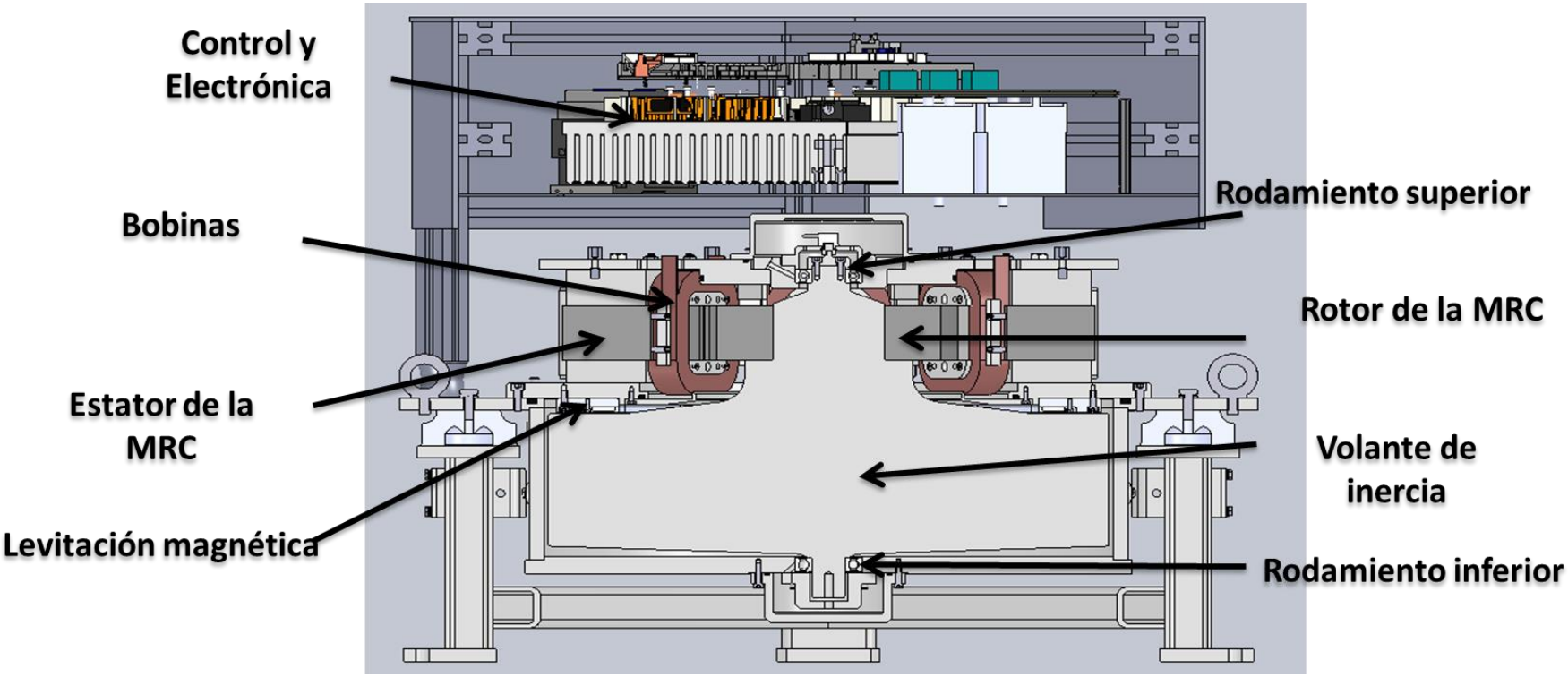




Overall Energy	2,7 kWh
Maximum Power	25 kW
Nominal Voltage	750 V
Maximum RPM	12,000

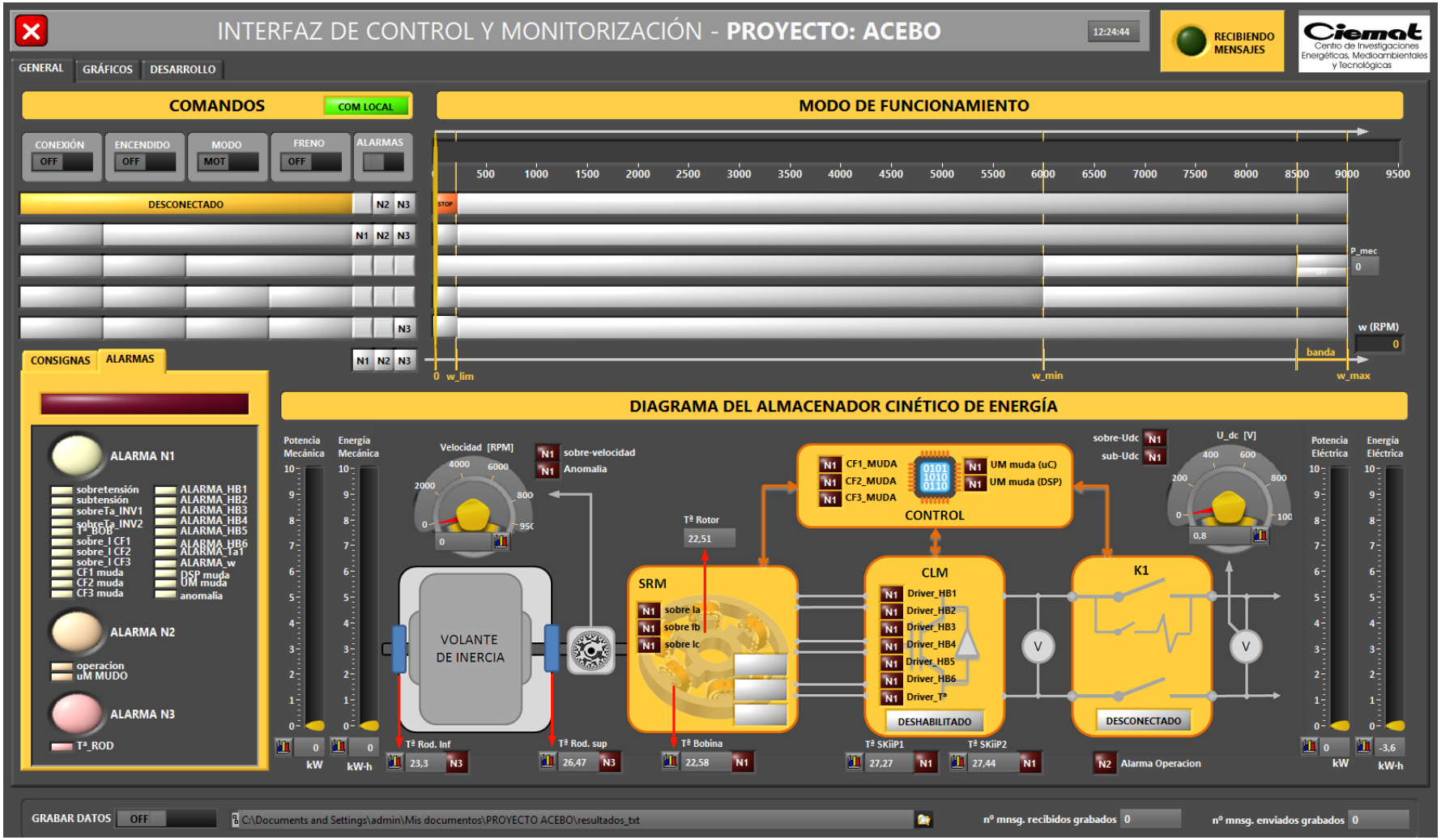


Ejemplo de aplicación de la tecnología de volantes de inercia: ACEBO



La figura muestra un KES desarrollado por CIEMAT, basado en Volante de Acero de alta resistencia y Máquina de Reluctancia Conmutada, con todas sus partes principales.

Ejemplo de interfaz de control de volantes de inercia: ACEBO

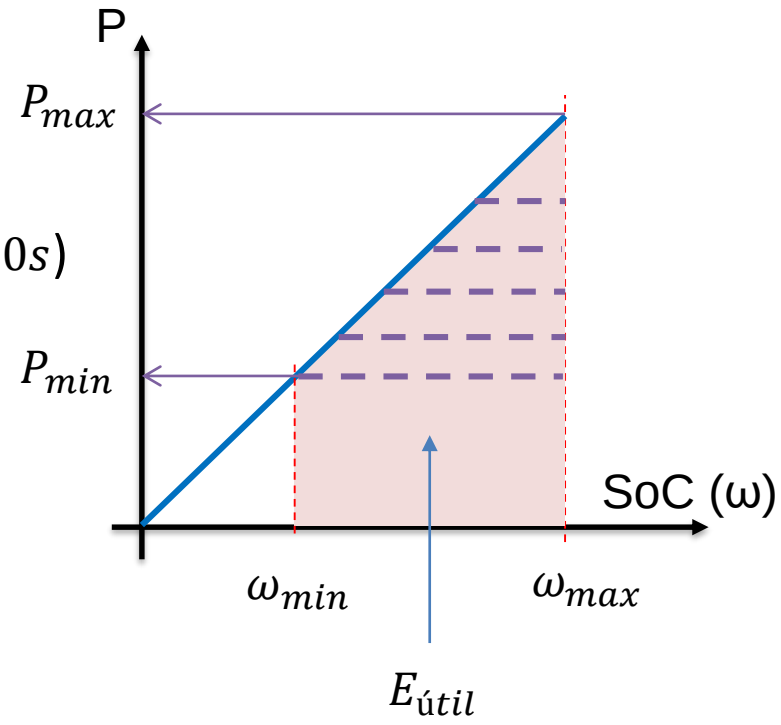


Ejemplo de dimensionado de un volante de inercia

Se quiere diseñar un sistema de almacenamiento cinético (volante de inercia) que cumpla con los requisitos de la siguiente aplicación: 400V de tensión de red, una potencia de 80kW y un tiempo de actuación de 180s. Determinar la características de diseño del volante:

1. *Datos*
   - *Potencia ($P = 80kW$)*
   - *Tiempo de actuación mínimo ($t_{min} = 180s$)*
   - *Tensión de conexión ($U = 400V$)*

2. *Consideraciones de diseño*
   - *Tecnología elegida (máquina y volante)*
   - *$\omega_{max} = 20.000\ rpm$*
   - *Forma geométrica del volante*
   - *Topología del convertidor*
   - *Sistema de guiado y levitación*

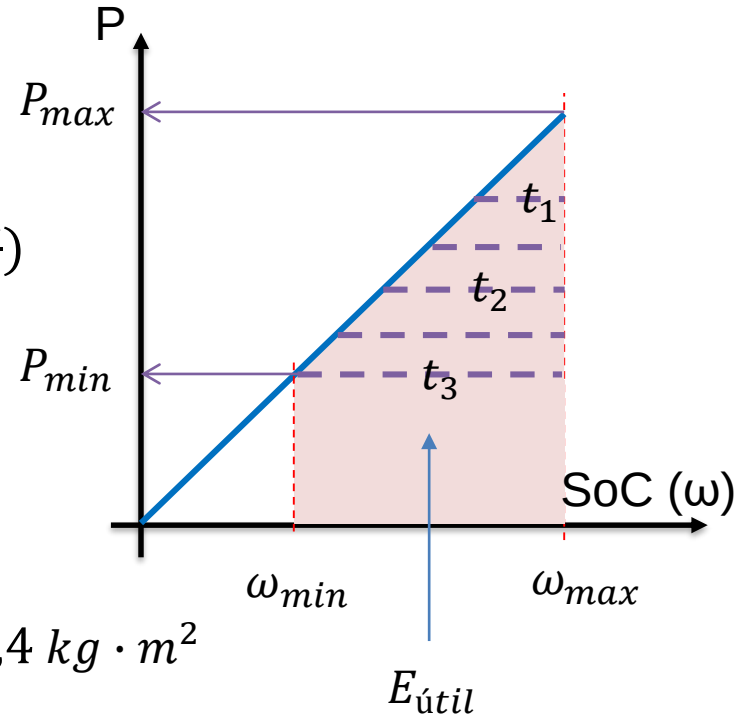


Ejemplo de dimensionado de un volante de inercia

Se quiere diseñar un sistema de almacenamiento cinético (volante de inercia) que cumpla con los requisitos de la siguiente aplicación: 370V de tensión de red, una potencia de 80kW y un tiempo de actuación de 180s. Determinar la características de diseño del volante:

3. Cálculos de parámetros

- $\omega_{min} = {}^{\omega_{max}}/_{\sqrt{2}} = 14.142\ rpm\ (1480\,\frac{rad}{s})$
- $E = P \cdot t = 80 \cdot 180/3600 = 4kWh$
- $T_{max} = \frac{P}{\omega_{min}} = \frac{80{,}000}{1480} = 54{,}05Nm$
- $J = \frac{2E}{\omega_{max}^2 - \omega_{mín}^2} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{2 \cdot 4000 * 3600}{2093^2 - 1480^2} \cdot \frac{1}{0{,}8} = 16{,}4\ kg \cdot m^2$



Gracias por su atención

Jorge Torres Miranda

jorge.torres@externos.ciemat.es