Apuntes

Energy Storage

Tema 4: Volantes de inercia y supercondensadores

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Volantes de inercia **2**

2 Supercondensadores **3**

3 Diseño del rotor: materiales y límites **3**

4 Pérdidas y operación **4**

5 Supercondensadores en asociación y operación **4**

1 Volantes de inercia

Almacenan energía cinética de rotación. Tienen respuesta de milisegundos, muchos ciclos y rendimiento del 80–90 %, pero capacidad en segundos–minutos.

Fórmulas clave

$$E = \tfrac{1}{2} I\omega^2 \qquad I_{disco} = \tfrac{1}{2} m r^2 \qquad v_r = \omega r$$

$$E_m = \frac{E}{m} = K\, v_r^2 \quad (K = 0{,}25 \text{ cilindro macizo; } K = 0{,}5 \text{ anillo fino})$$

$$\sigma_{max} = \tfrac{1}{8}\rho\, v_r^2\,(3+\nu) \;\Rightarrow\; v_r^2 = \frac{8}{3+\nu}\frac{\sigma_{max}}{\rho} \;\Rightarrow\; E_m = K_s \frac{\sigma_{max}}{\rho}$$

- La tensión máxima de tracción está en el eje. La energía específica depende de σ_{max}/ρ, no sólo de la masa.
- **Rotor:** acero (isótropo, cilindro macizo) hasta $\approx 300\,\text{m/s}$ con acero de bajo carbono; aceros de alta resistencia por encima, pero con menor fatiga. Composites de fibra de carbono (cilindro hueco) para velocidades muy altas ($> 1000\,\text{m/s}$), más caros.
- **Rodamientos:** de bolas o de levitación magnética, a vacío para reducir fricción. Fijan la vida útil.
- **Motor/generador:** homopolar, síncrono o asíncrono. En vacío la refrigeración está limitada.
- **Aplicaciones:** regulación de frecuencia (p. ej. 20 MW en Stephentown, NY), sistemas aislados, frenado regenerativo en metro, KERS en F1.

Revisar

En los apuntes de la asignatura, $K_s = 0{,}606$ aparece con $K = 0{,}5$, pero $0{,}606 = 0{,}25 \cdot 8/3{,}3$. Aquí se usa $K = 0{,}25$ (cilindro macizo); con $K = 0{,}5$ resultaría $K_s = 1{,}21$.

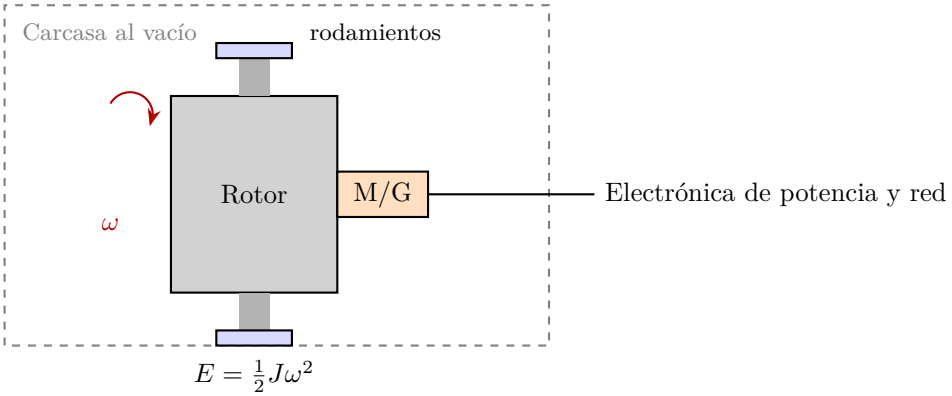


Figura 1. Volante de inercia. Un rotor gira en vacío sobre rodamientos magnéticos y un motor-generador (M/G) lo acelera para cargar y lo frena para descargar la energía cinética.

2 Supercondensadores

Almacenan carga en la doble capa eléctrica o por reacciones redox (pseudocapacitancia). Entre condensador y batería: potencia alta, respuesta de μs, muchos ciclos, energía baja.

Fórmulas clave

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{D} \qquad E = \tfrac{1}{2} C V^2 \qquad P_{max} = \frac{V^2}{4R_p}$$

$$E_u = \tfrac{1}{2} C (V_{max}^2 - V_{min}^2) \qquad V_{min} = \tfrac{1}{2} V_{max} \Rightarrow E_u = \tfrac{3}{4} E$$

- Mayor área A (electrodos porosos) y menor distancia D (doble capa de nm) elevan C mucho más que en un condensador convencional.
- Electrodos: carbono, óxidos metálicos, polímeros. Se busca conductividad, porosidad controlada, estabilidad química y térmica, bajo coste.
- Modelo: circuito equivalente con resistencias y capacidades (RC).

	Volante	Supercondensador	Batería ion-Li
Respuesta	ms	μs	ms
Eficiencia (%)	80–90	82–93	75–93
Escala de descarga	segundos–minutos	segundos	horas
Coste ($/kW)	2880	939	1876

3 Diseño del rotor: materiales y límites

La energía específica depende de σ_{max}/ρ y de la geometría (factor de forma K), no de la masa. Con coeficiente de seguridad S, se usa $\sigma_{adm} = \sigma_{max}/S$ (típicamente 2–3).

Geometría	$K = E/(m\, v_r^2)$	Observaciones
Cilindro/disco macizo	0,25	Acero, simplicidad
Anillo delgado	0,50	Máximo teórico en un rotor de pared fina
Esfera maciza	0,20	Sólo ilustrativo

Material (orientativo)	σ_{max} (MPa)	ρ (kg/m^3)	E_m máx. (Wh/kg)
Acero de bajo carbono	400	7800	8,6
Acero de alta resistencia	800	7800	17,3
Fibra de vidrio (compuesto)	1000	2000	84
Fibra de carbono (compuesto)	1600	1600	168

$E_m = K_s \sigma_{max}/\rho$ con $K_s = 0{,}606$, sin coeficiente de seguridad. Valores de materiales orientativos [REVISAR].

Con $S = 2$, la fibra de carbono da ≈ 84 Wh/kg y el acero de alta resistencia $\approx 8{,}6$ Wh/kg. Por eso los volantes de alta energía específica son de composite y los estacionarios baratos son de acero.

4 Pérdidas y operación

- **Rozamiento de rodamientos y aerodinámico:** el vacío (típicamente 10^{-3}–10^{-2} Pa en el recinto) reduce las pérdidas por aire. Los rodamientos magnéticos eliminan el contacto.
- **Pérdidas en el motor/generador y electrónica de potencia:** en espera, por histéresis y corrientes de Foucault. La autodescarga de un volante es del orden de 1 %–20 %/h según diseño, por lo que el volante es para ciclos de segundos a minutos, no para horas.
- **Rango de velocidad útil:** $E_u = \frac{1}{2} I(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$. Con $\omega_{min} = \omega_{max}/2$, $E_u = \frac{3}{4}E$.
- **Seguridad:** contención del rotor ante rotura (anillo de acero, foso). Un fallo libera la energía almacenada.

Fórmulas clave

$$E_u = \tfrac{1}{2} I(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \qquad P = \frac{dE}{dt} = I\,\omega\,\dot{\omega} \qquad \Delta t = \frac{E_u}{P_{med}}$$

5 Supercondensadores en asociación y operación

Fórmulas clave

Serie: $C_{tot} = \dfrac{C}{N},\ V_{tot} = N\,V,\ ESR_{tot} = N\,ESR$ Paralelo: $C_{tot} = NC,\ ESR_{tot} = \dfrac{ESR}{N}$

$$t_{desc} = \frac{C\,(V_1 - V_2)}{I}\ \text{(corriente constante)} \qquad Q_J = I^2\,ESR\,t_{desc}$$

- Se conectan en serie para alcanzar tensiones útiles (cada celda soporta 2,5–3 V); hace falta **equilibrado** de celdas para evitar sobretensión en la más débil.
- La eficiencia de un ciclo de carga/descarga a corriente constante es alta ($> 95\,\%$) porque las pérdidas son I^2R y la tensión varía en todo el rango.
- **Autodescarga** alta (varios % al día), por lo que no sirven para almacenamiento de horas. Vida: 10^5–10^6 ciclos.
- **Aplicaciones:** soporte de red a muy corto plazo, regulación de tensión, arranque de motores, regeneración (tranvías) y como complemento de baterías (*hybrid*: la batería aporta energía y el supercondensador cubre picos).