



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Unidad
de Formación



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



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

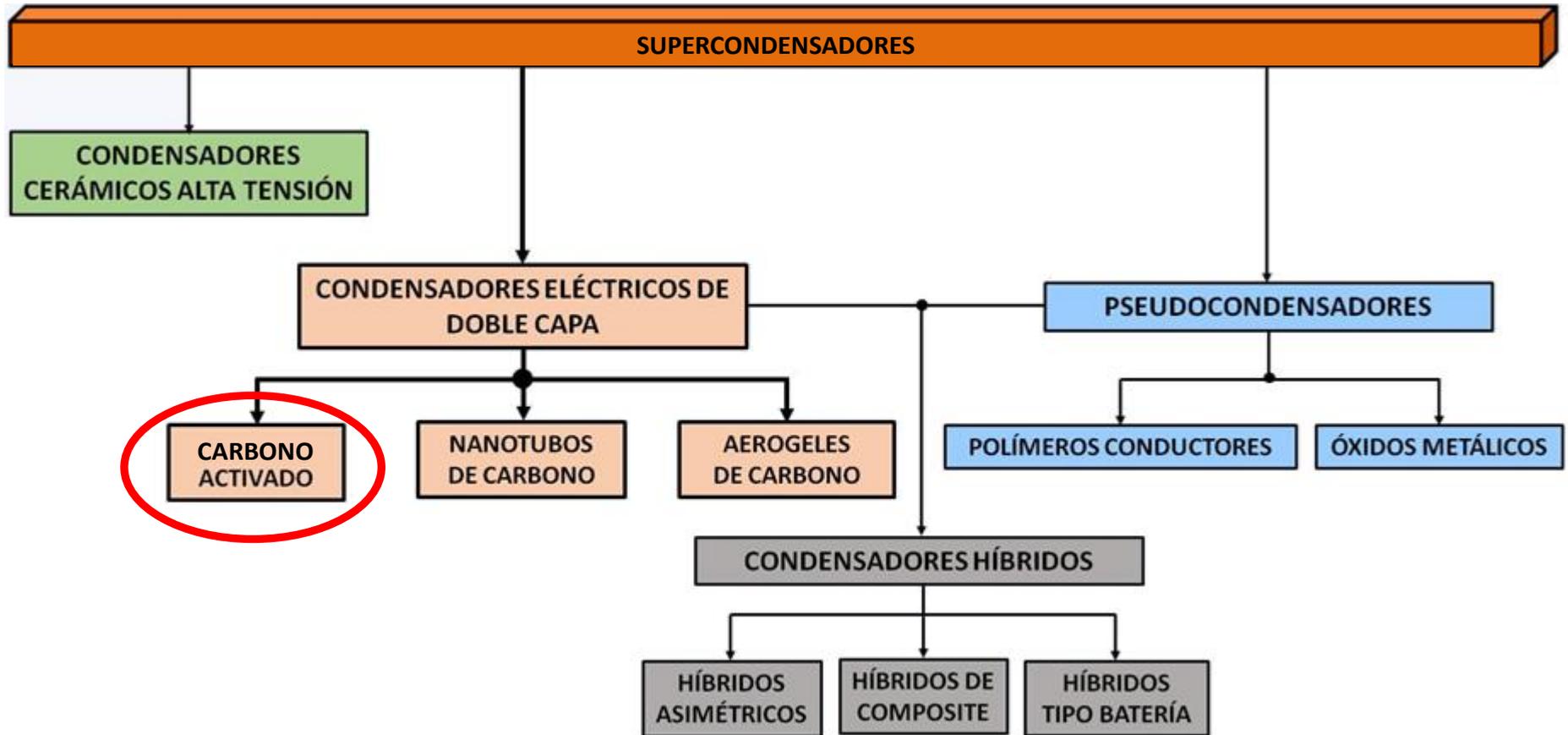
23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022

**SUPERCONDENSADORES: PRINCIPIOS BÁSICOS,
OPERACIÓN Y APLICACIONES**

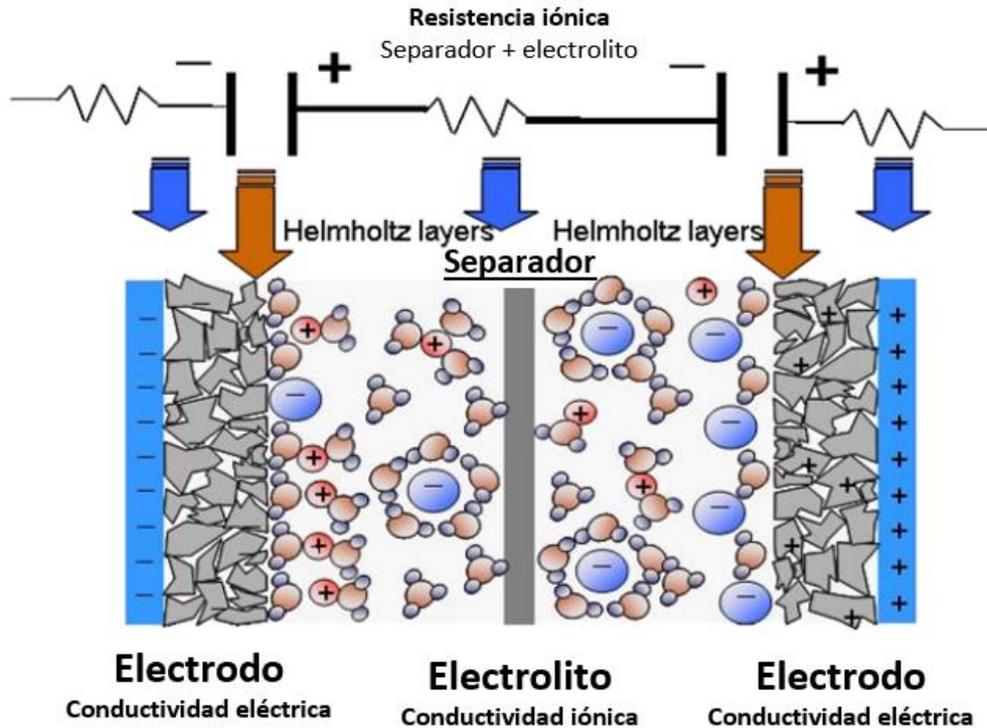
GUSTAVO NAVARRO

31 DE MAYO 2022

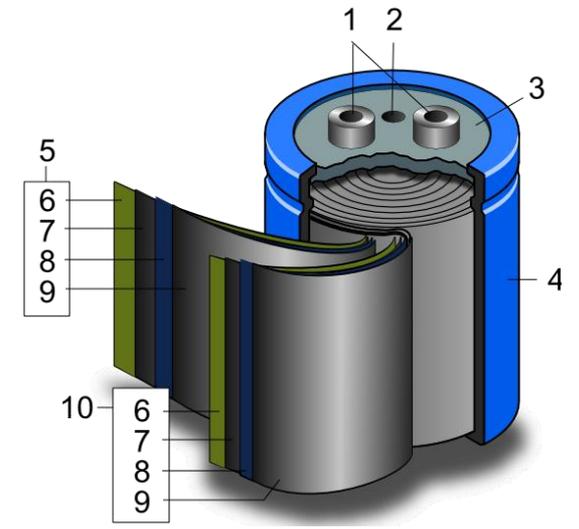
Clasificación de los Supercondensadores



Estructura interna de los supercondensadores doble capa



1. Terminales
2. Ventilación seguridad
3. Disco de sellado
4. Carcasa de Aluminio
5. Polo Positivo
6. Separador
7. Electrodo de carbono
8. Colector
9. Electrodo de Carbono
10. Polo negativo



$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$$

$A = 3000 \text{m}^2/\text{g} \Rightarrow 3.63 \cdot 10^5 \text{ m}^2$
 $d = 1 \text{nm}$

Características eléctricas de los supercondensadores

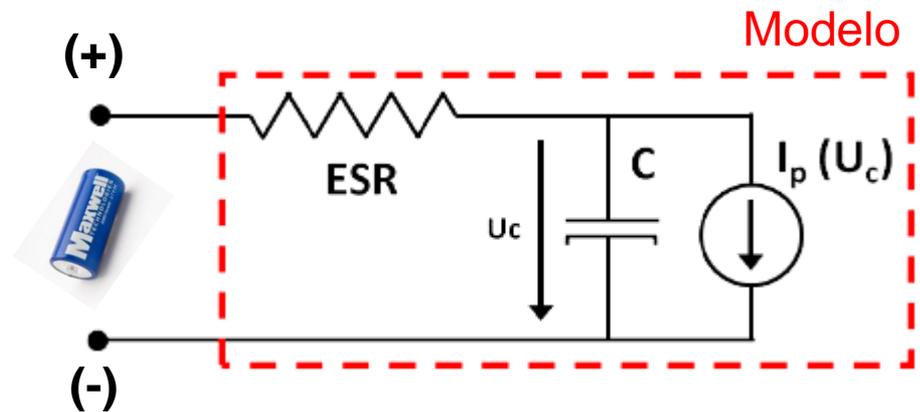
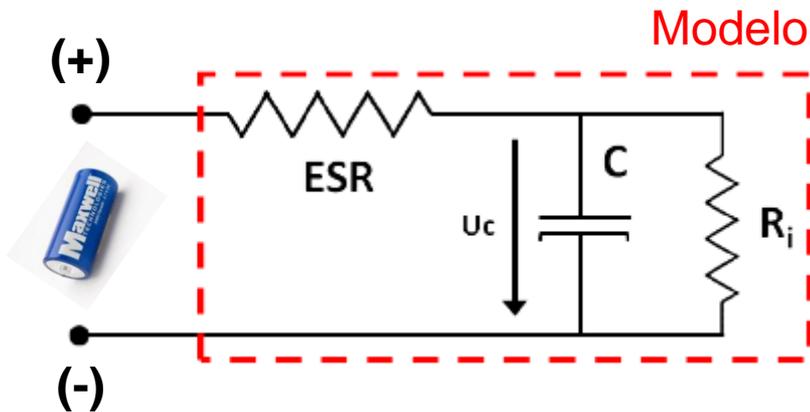
SUPERCONDENSADOR MODELO BCAP3400 (UCAP POWER)

CAPACIDAD	3400F
TENSIÓN NOMINAL	3V
TENSIÓN MÁXIMA	3.15V
RESISTENCIA EN SERIE EQUIVALENTE (ESR)	240 $\mu\Omega$
ENERGÍA ($E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \cdot \frac{1}{3600}$)	4.25Wh
CORRIENTE MÁXIMA	1900A
MÁXIMA CORRIENTE CONTINUA ($\Delta T=15^{\circ}\text{C}$)	140A _{rms}
MÁXIMA CORRIENTE CONTINUA ($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	225A _{rms}
RANGO DE TEMPERATURA EN OPERACIÓN	-40°C - +65°C
CORRIENTE DE PÉRDIDAS	12mA



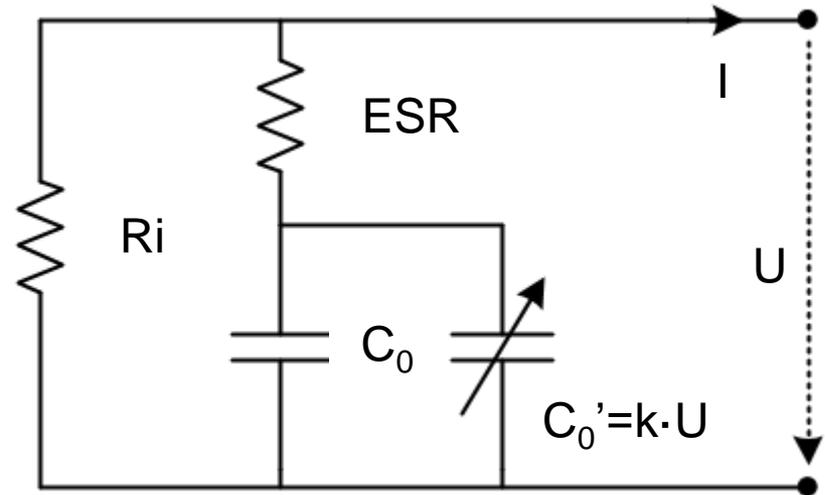
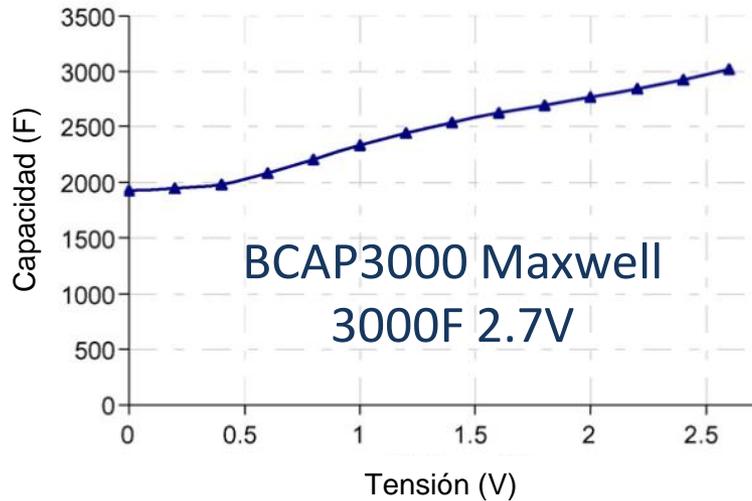
Principales parámetros eléctricos de supercondensadores

- Capacidad (C): Determina, junto con la tensión, la energía del sistema de almacenamiento.
- Resistencia en serie equivalente (ESR): Determina la caída de tensión y la pérdidas en el supercondensador en función de la corriente
- Autodescarga o Corriente de pérdidas (I_p): Determina la pérdida de energía del supercondensador cuando no está en operación. Se suele modelar con una resistencia en paralelo (R_i) o fuente de corriente (I_p)



Modelado de supercondensadores en función tensión

➤ Dependencia de la capacidad con la tensión (V)



$$C(U) = C_0 + k \cdot U$$

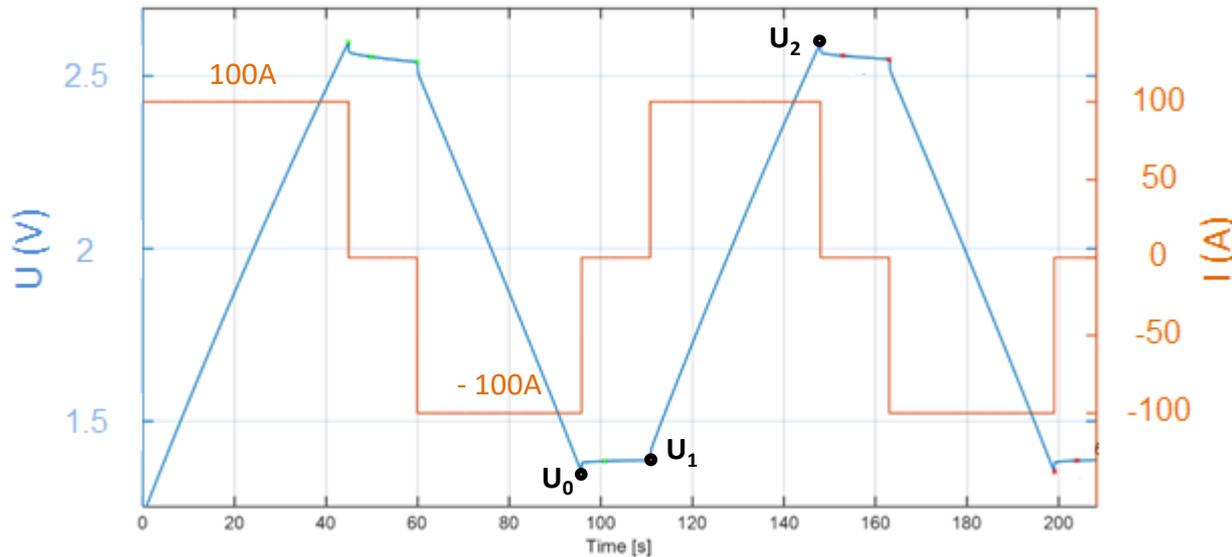
$$C_0 = 1857F$$

$$k = 473 F/V$$

$$E_{ALMAC.} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(U_{MAX}^2 - \left(\frac{U_{MAX}}{2} \right)^2 \right) = 0.25 \cdot E_{MAX}$$

Modelado de supercondensadores en función tensión

➤ Variación de la tensión en operación

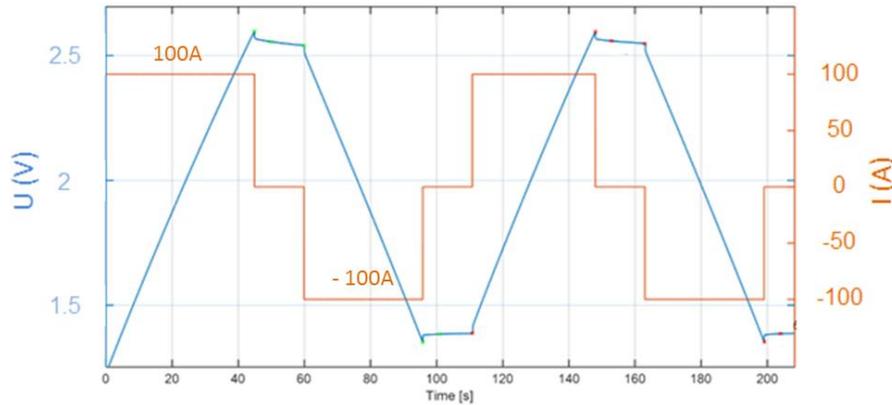


$$ESR = \frac{U_1 - U_0}{I}$$

$$C = \frac{I \cdot (t_2 - t_1)}{U_2 - U_1}$$

Modelado de supercondensadores en función tensión

➤ Variación de la tensión en operación



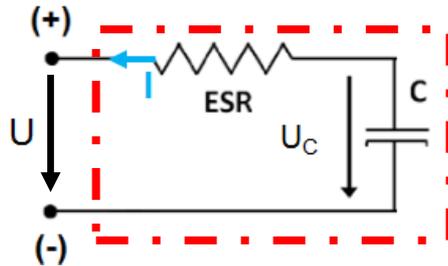
$$ESR = \frac{U_1 - U_0}{I}$$

$$C = \frac{I \cdot (t_2 - t_1)}{U_2 - U_1}$$

Proceso de Descarga de un supercondensador

$$U = U_c - I \cdot ESR$$

$$E_{PERD} = I^2 \cdot ESR \cdot t$$

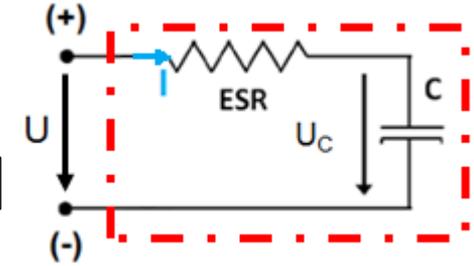


Round trip efficiency 90%

Proceso de Carga de un supercondensador

$$U = U_c + I \cdot ESR$$

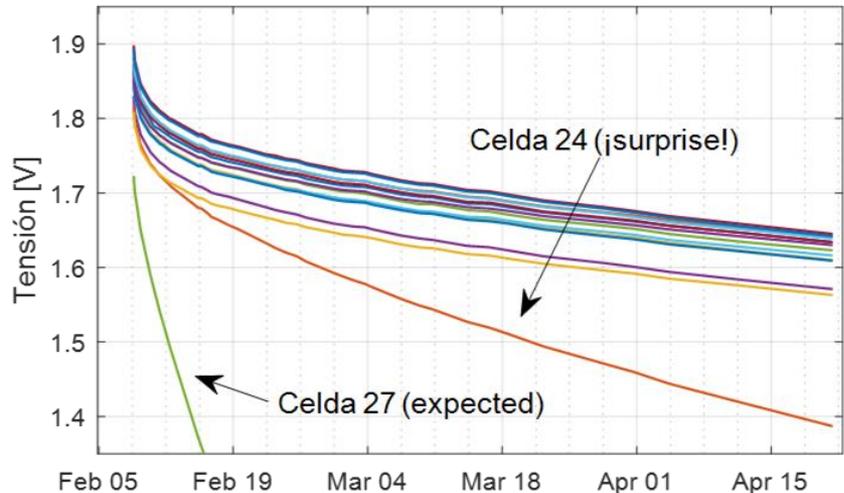
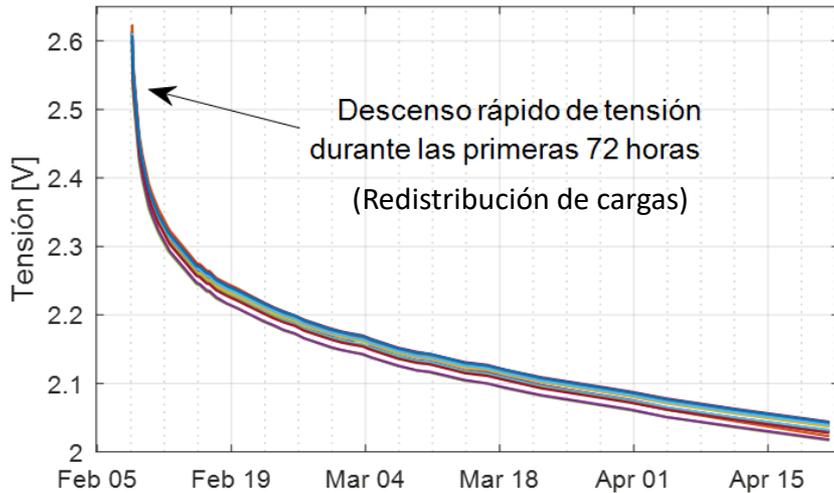
$$E_{PERD} = I^2 \cdot ESR \cdot t$$



↑ I → ↑ P_{PERD} → ↓ η

Modelado de supercondensadores en función tensión

➤ Autodescarga



$$\text{Autodescarga (V)} = V_{72h} - V_{INI}$$

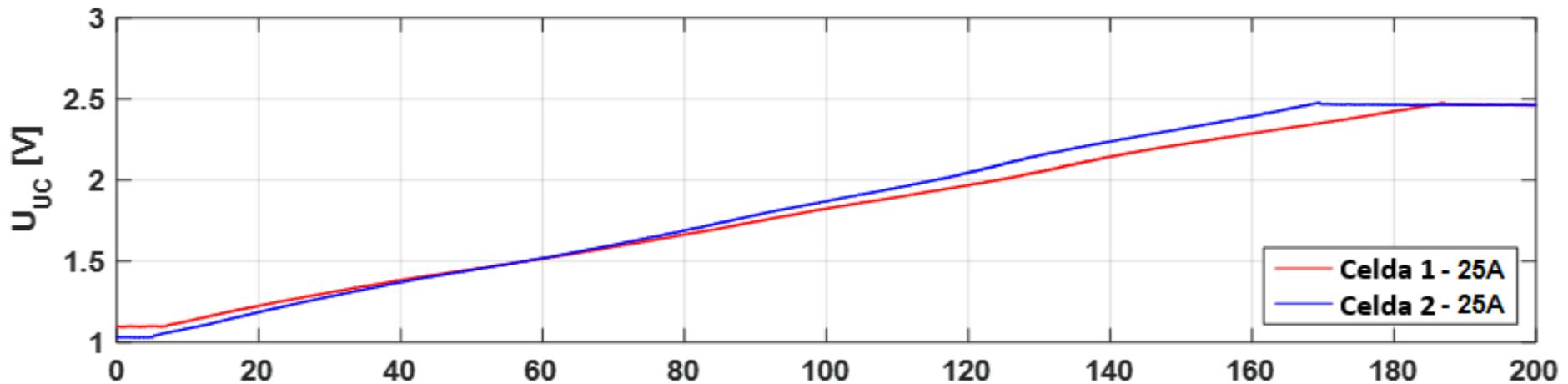
$$\text{Autodescarga (\%)} = 100 \cdot \left(\frac{V_{INI} - V_{72h}}{V_{INI}} \right)$$

A mayor tensión inicial mayor es la autodescarga en (%)

6-7%
($V_{INI}=2.65V$)

Envejecimiento en los supercondensadores

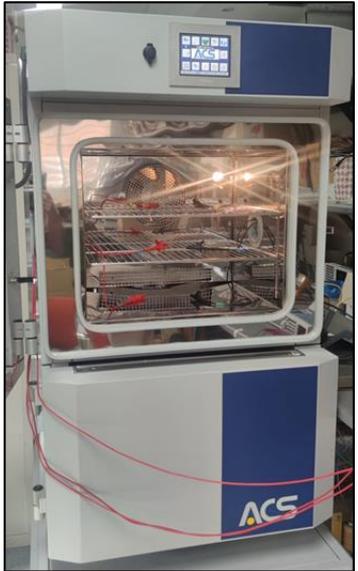
- Las causas de envejecimiento son la temperatura y la tensión
- Pérdida de Capacidad y aumento de ESR
- Fin de la vida útil de un supercondensador $\uparrow 100\%$ ESR y $\downarrow 20\%$ C
- Rango de T^a en operación: $-40^{\circ}\text{C} - +65^{\circ}\text{C}$



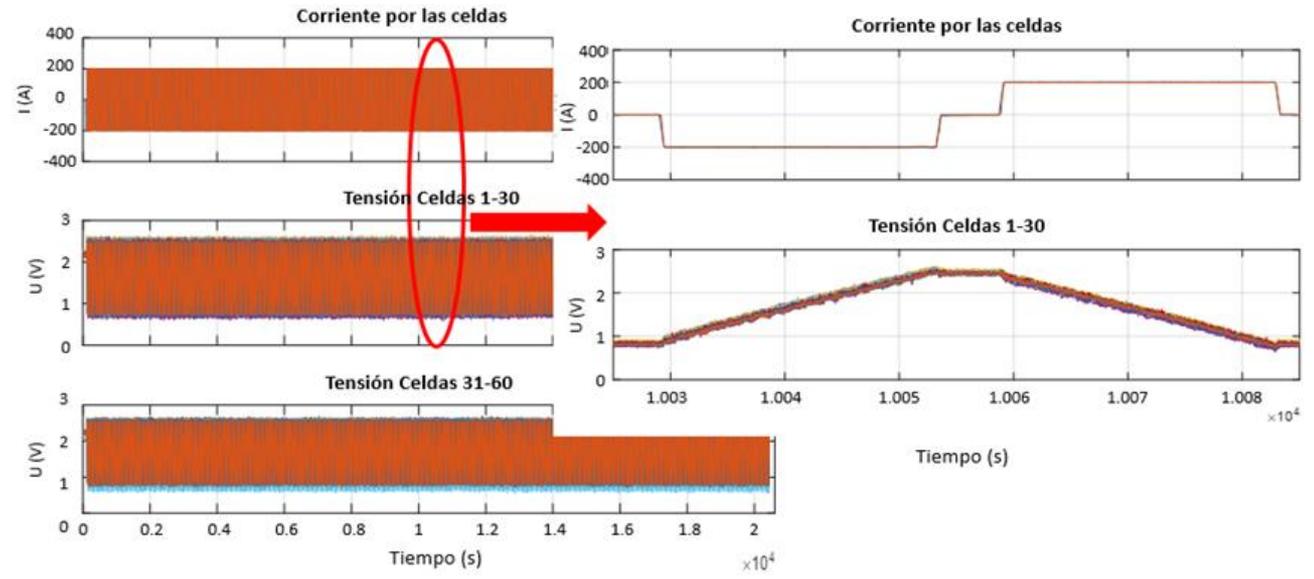
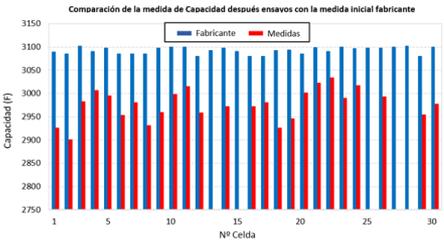
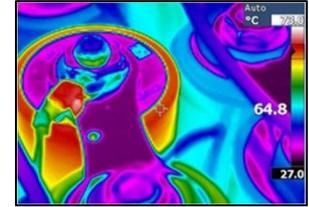
- **Necesidad de un modelo de envejecimiento y de un sistema de refrigeración adecuado y de protección a sobretensiones**

Envejecimiento en los supercondensadores

- Ensayos y modelado de envejecimiento de supercondensadores (calendar y cycling ageing)

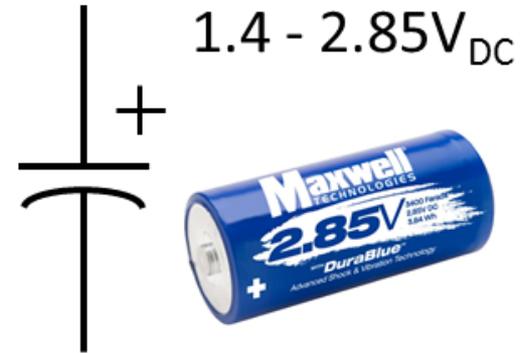
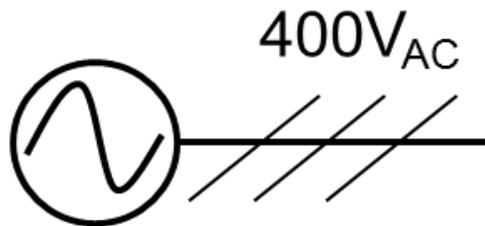


	T = 60 °C	T = 40 °C	T = 20 °C	T = 0 °C
V = 2,7 V	SC 1	SC 4	SC 7	SC 10
V = 2 V	SC 2	SC 5	SC 8	SC 11
V = 1,35 V	SC 3	SC 6	SC 9	SC 12



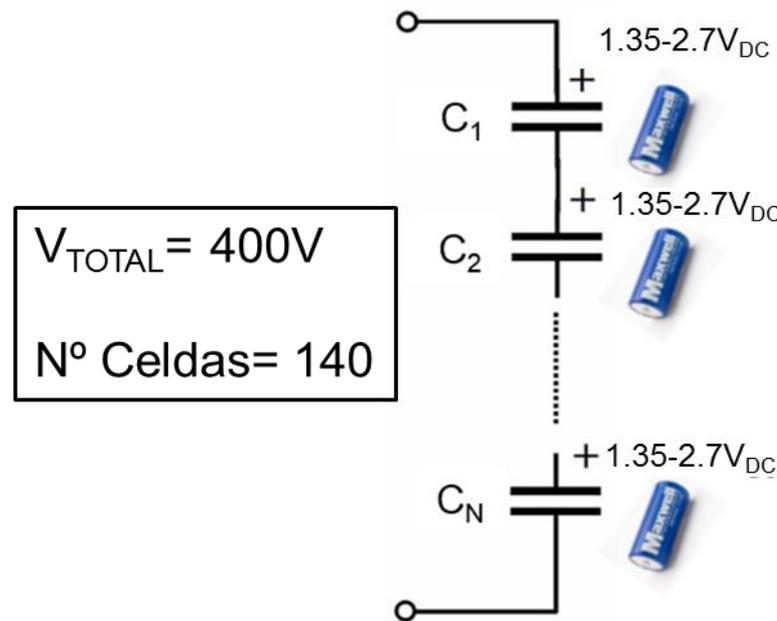
Serialización de celdas de supercondensadores

- Necesidad de un equipo para adaptar tensiones y controlar la potencia
- Necesidad de conexión serie celdas en aplicaciones de alta potencia



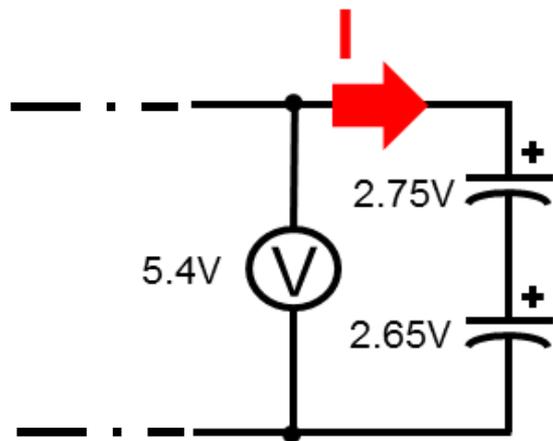
Serialización de celdas de supercondensadores

- Necesidad de un equipo para adaptar tensiones y controlar la potencia
- Necesidad de conexión serie celdas en aplicaciones alta potencia
- **Necesidad de equilibrar el reparto de tensión**
- **Desequilibrios por tolerancias de fabricación ($\pm C$) y desigual envejecimiento**



Serialización de celdas de supercondensadores

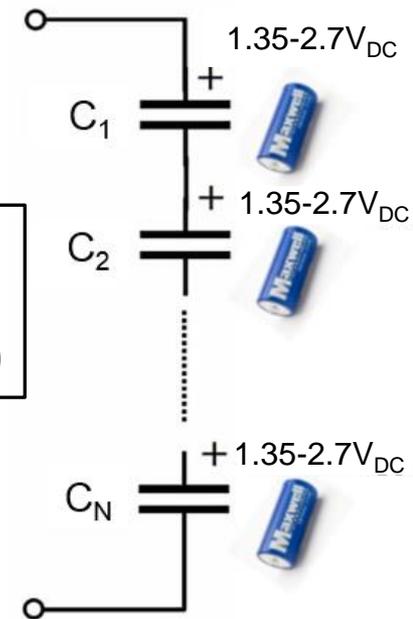
- Necesidad de un equipo para adaptar tensiones y controlar la potencia
- Necesidad de conexión serie celdas en aplicaciones alta potencia
- Necesidad de equilibrar el reparto de tensión
- Desequilibrios por tolerancias de fabricación (=C) y desigual envejecimiento
- **Sistema de equilibrado**



$$V_{\text{límite/celda}} = 2.7V$$

$$V_{\text{TOTAL}} = 400V$$

$$N^{\circ} \text{ Celdas} = 140$$

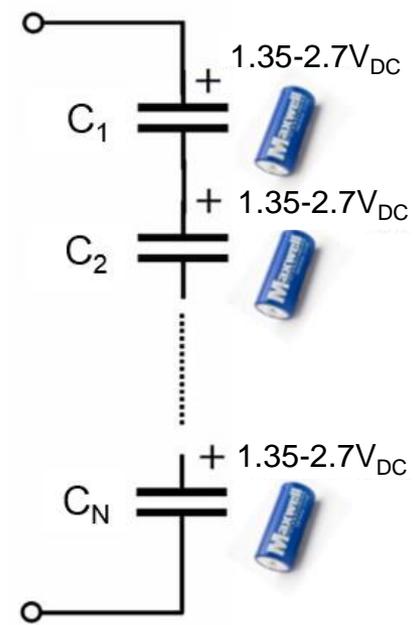
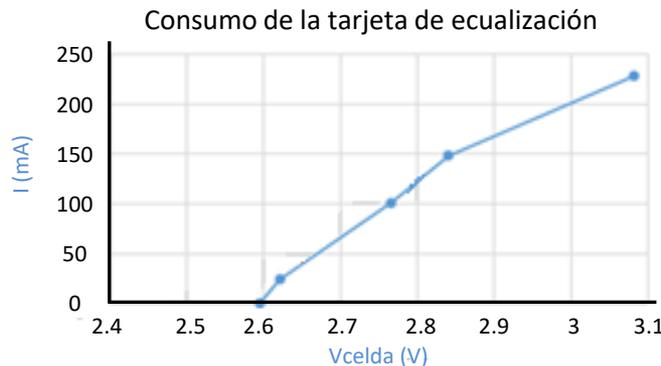
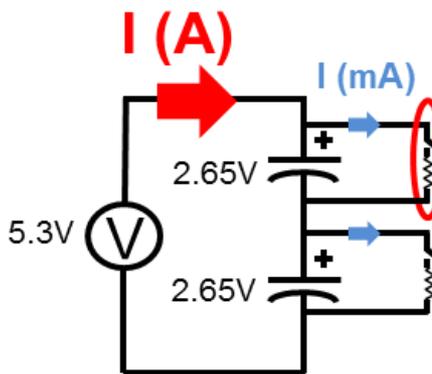


Serialización de celdas de supercondensadores

- Necesidad de un equipo para adaptar tensiones y controlar la potencia
- Necesidad de conexión serie celdas en aplicaciones alta potencia
- Necesidad de equilibrar el reparto de tensión
- Desequilibrios por tolerancias de fabricación (=C) y desigual envejecimiento
- **Sistema de equilibrado suministrado por fabricante**



$V_{TOTAL} = 400V$
Nº Celdas = 140



Tipos de encapsulado de supercondensadores



Tipos de encapsulado de supercondensadores



P_{MAX}	I_{MAX}	P_{NOM}	I_{NOM}	V_{NOM}	ηP_{NOM}	$\eta P_{MÁX}$	$N^{\circ}_{cell_serie}$	CAP.
1500kW	5000A	380kW	1250A	612V	93.1%	74.3%	216	14.8F

Fabricantes de supercondensadores

MAXWELL



- EDLC
- TENSIÓN: 3.0V
- CAPACIDAD: 3400F
- ESR: 0.22mΩ



IOXUS



- EDLC
- TENSIÓN: 2.85V
- CAPACIDAD: 3150F
- ESR: 0.21mΩ



LS MTRON



- EDLC
- TENSIÓN: 3V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.23mΩ



SKELETON



- EDLC
- TENSIÓN: 2.85V
- CAPACIDAD: 3200F
- ESR: 0.09mΩ



Fabricantes de supercondensadores

EATON



- EDLC
- TENSIÓN: 2.85V
- CAPACIDAD: 3400F
- ESR: 0.23mΩ



KAMCAP



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.5mΩ



YUNASKO



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.14mΩ



VINA TECH



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.28mΩ



Fabricantes de supercondensadores

TECATE GRUOP



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.26mΩ



PLANANNO



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 4500F
- ESR: -



GREEN TECH



- EDLC
- TENSIÓN: 2.7V
- CAPACIDAD: 3000F
- ESR: 0.24mΩ



Aplicaciones de los supercondensadores (I)

➤ En general en aplicaciones donde se requieran picos de potencia muy elevados durante poco tiempo ($t < 10s$) y ciclos repetitivos

➤ Automoción

- Arranque y parada de motores
- Backup de potencia para sistemas autónomos
- Frenado regenerativo
- Procesos de calentamiento del catalizador
- Sistemas de ayuda a la aceleración
- Sistemas de carga rápida y ultrarrápida

➤ Aplicaciones de red

- Suavizar la potencia entregada a la red en renovables (estabilidad la red y calidad de potencia)
- Suavizar las fluctuaciones de la potencia entregada por los grupos diésel
- Alimentación para los sistemas hidráulicos empleados en la orientación pala en aerogeneradores

Aplicaciones de los supercondensadores (II)

➤ Aplicaciones industriales

- Frenado regenerativo para grúas en puertos y suavizado de la potencia de consumo
- Recuperación de energía en grandes elevadores
- Carga rápida para transpaletas elevadoras
- Apoyo al equipo de control de cargas en barcos antes condiciones de mar adversas
- SAI para calidad de red en equipos médicos de resonancia magnética
- Reducción del término de potencia contratada en procesos que requieren \uparrow potencia (ej. prensas)

➤ Transporte

- Mejora de eficiencia en tranvías sin catenaria con sistema de almacenamiento embarcado
- Frenado regenerativo
- Suavizado de potencia en el arranque de motores diésel
- Carga rápida de vehículos pesados y sistema complementario de potencia
- Autobuses eléctricos puros con puntos de recarga intermedios en la ruta
- Sistema de alimentación para sistema aceleración trenes ultrarrápidos (hyperloop)