

# VEHÍCULOS HÍBRIDOS & ELÉCTRICOS 2019



UNIDAD DIDÁCTICA 2:  
Componentes de los sistemas de propulsión

*Características de las baterías para  
vehículos eléctricos*

# Contenido

1. Introducción
2. Funcionamiento y características de una celda
3. Características eléctricas de celdas y baterías
4. Modelado de celdas y baterías
5. BMS y estrategias de recarga
6. Tipos de baterías
7. Supercondensadores

- Tensión en circuito abierto
- Tensión de celda
- Capacidad
- Estado de carga
- Estado de salud
- Eficiencia
- Potencia específica
- Energía específica

- Baterías de plomo-ácido
- Baterías basadas en el níquel
- Baterías basadas en el sodio
- Baterías basadas en el litio
- Baterías basadas en el metal-aire

- Sistemas de gestión de baterías - BMS
- Estrategias de recarga
- Estrategias de ecualización

# Introducción

## Tipos de VE's para los que se emplean baterías

### **Battery electric vehicle (BEV):**

- Funciona únicamente con la energía proporcionada por la batería
- Las baterías deben ser recargadas externamente
- El tamaño de la batería determina la autonomía del vehículo



### **Hybrid electric vehicles (HEV):**

- Funcionan con la energía almacenada en la batería o bien a partir de combustible que alimenta un MCI
- Las baterías no pueden ser recargadas desde la red, sino que se recargan a partir del combustible

# Introducción

## Tipos de VE's para los que se emplean baterías

### **Plug-in hybrid electric vehicles (PHEV):**

- Funcionan con la energía almacenada en la batería o bien a partir de combustible que alimenta un MCI
- Las baterías pueden ser recargadas desde la red, o bien se recargan a partir del MCI



### **Hybrid electric vehicles (HEV):**

- Funcionan con la energía almacenada en la batería o bien a partir de combustible que alimenta un MCI
- Las baterías no pueden ser recargadas desde la red, sino que se recargan a partir del combustible

**Fuel-cell electric vehicles (FCEV):** Se trata de vehículos híbridos cuyo combustible es el H<sub>2</sub>

# Introducción

## Requisitos para baterías de VH&E's: *metas USABC*

**U.S. Advanced Battery Consortium LLC**



USABC Low-Cost/Fast-Charge EV Goals

USABC Electrolyte Goals

USABC 48V HEV Goals

USABC Goals for Advanced High-Performance Batteries for Electric Vehicle (EV) Applications

USABC PHEV Battery Goals

USABC 12V Start-Stop Battery Goals

USABC High Power Low Energy-Energy Storage System (LEESS) Goals

USABC Lithium Battery Separator Goals

USABC Power Assist HEV Battery Goals

USABC Ultracapacitor Requirements

USABC Thermal Management System Goals

# Introducción

## Requisitos para baterías de VH&E's: *metas USABC*

U.S. Advanced Battery Consortium LLC



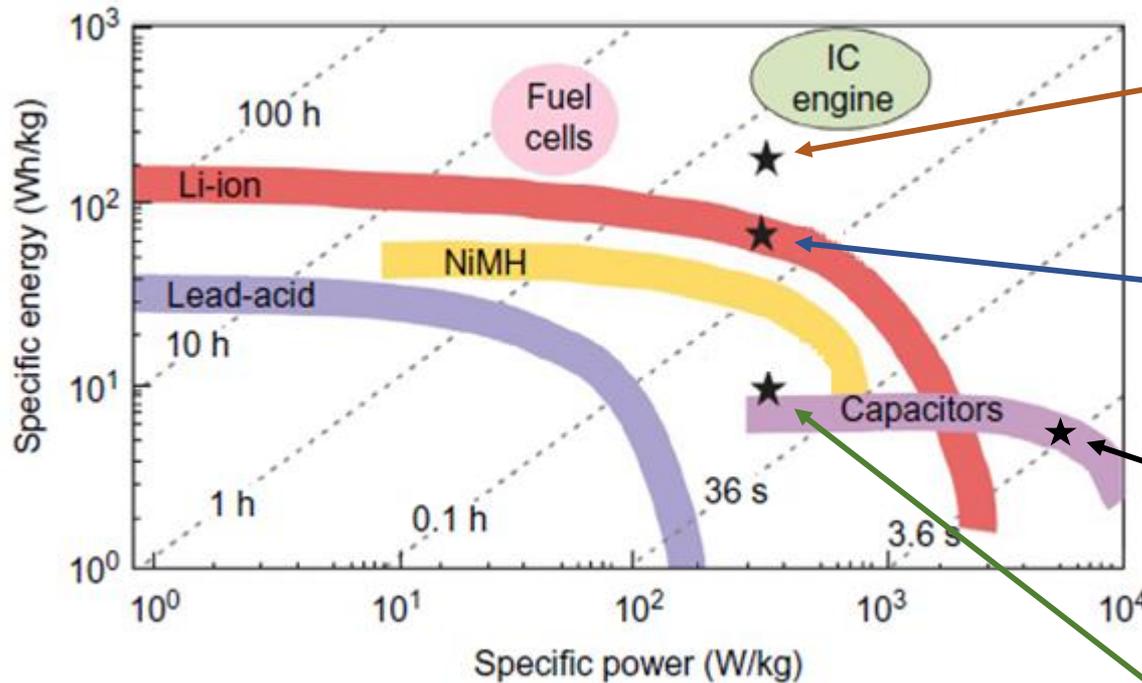
End of Life Characteristics at 30°C	Units	System Level	Cell Level
Peak Discharge Power Density, 30 s Pulse	W/L	1000	1500
Peak Specific Discharge Power , 30 s Pulse	W/kg	470	700
Peak Specific Regen Power , 10 s Pulse	W/kg	200	300
Useable Energy Density @ C/3 Discharge Rate	Wh/L	500	750
Useable Specific Energy @ C/3 Discharge Rate	Wh/kg	235	350
Useable Energy @ C/3 Discharge Rate	kWh	45	N/A
Calendar Life	Years	15	15
DST Cycle Life	Cycles	1000	1000
Cost @ 100K units	\$/kWh	125	100
Operating Environment	°C	-30 to +52	-30 to +52
Normal Recharge Time	Hours	< 7 Hours, J1772	< 7 Hours, J1772
High Rate Charge	Minutes	80% ΔSOC in 15 min	80% ΔSOC in 15 min
Maximum Operating Voltage	V	420	N/A
Minimum Operating Voltage	V	220	N/A
Peak Current, 30 s	A	400	400
Unassisted Operating at Low Temperature	%	> 70% Useable Energy @ C/3 Discharge rate at -20 °C	> 70% Useable Energy @ C/3 Discharge rate at -20 °C
Survival Temperature Range, 24 Hr	°C	-40 to+ 66	-40 to+ 66
Maximum Self-discharge	%/month	< 1	< 1

**USABC Goals for ADVANCED HIGH-PERFORMANCE BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE (EV) APPLICATIONS**

# Introducción

Requisitos para baterías de VH&E's: *Diagrama de Ragone*

Aumento en los requerimientos de autonomía



Metas para BEV

Metas para PHEV

Metas para HEBus

Metas para HEV / FCEV

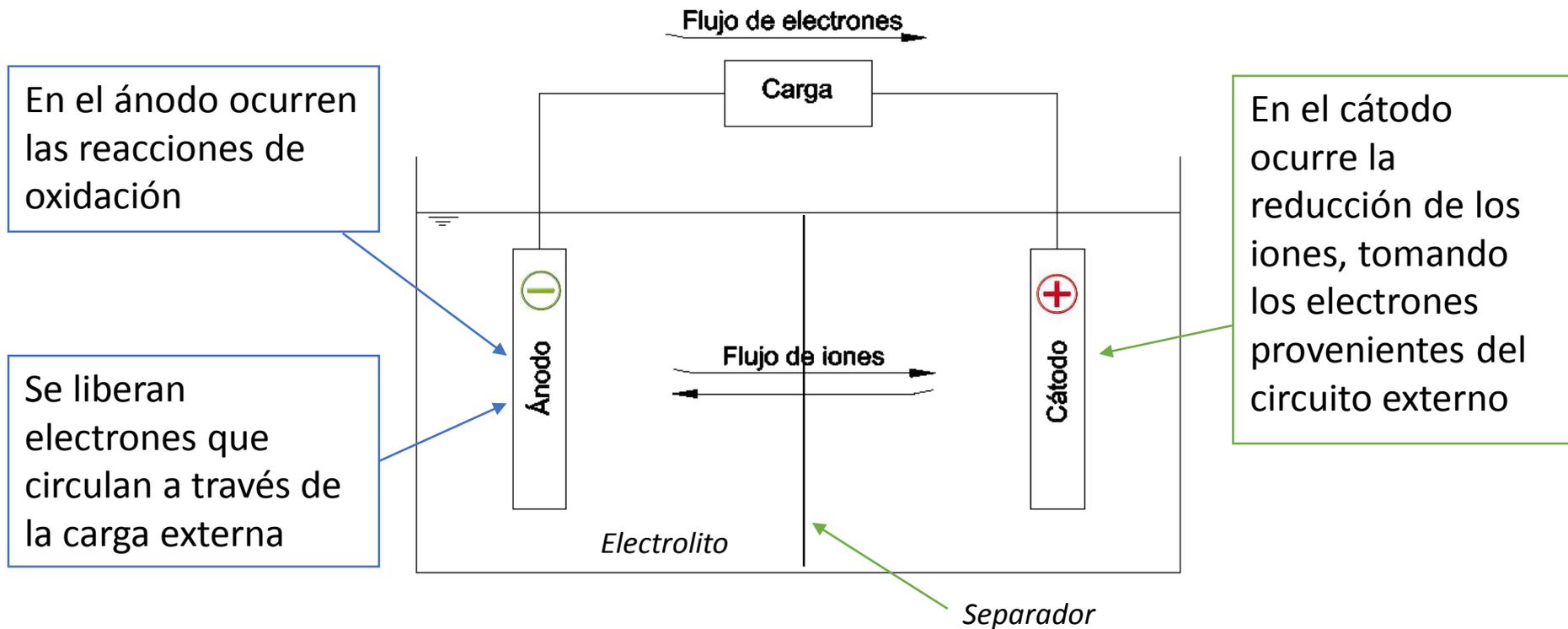
Aumento en los requerimientos de aceleración

# Fundamentos y características de celdas

# Fundamentos y características de celdas

## Construcción de una celda galvánica

Consta de dos metales diferentes (electrodos) inmersos en una solución salina del propio metal (electrolito), conectados por un puente salino o separados por una membrana porosa (separador)



La energía eléctrica se produce a partir de reacciones oxidación-reducción que tienen lugar espontáneamente durante la descarga.

# Fundamentos y características de celdas

## Potencial estándar de reducción

- Es la tendencia a adquirir electrones
- Se toma como referencia "cero" la reducción del  $H_2$

Par redox	$E^\circ$	Par redox	$E^\circ$
$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06	$2H_2SO_3 + 2H^+ + 4e \rightleftharpoons S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0.40
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2.87	$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$O_3 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	2.07	$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.36
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0.34
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.82	$Hg_2Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0.28
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.77	$IO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons I^- + 6OH^-$	0.26
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1.70	$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0.22
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1.69	$HgBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4Br^-$	0.21
$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	1.68	$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	0.15
$HClO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HClO + H_2O$	1.64	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.15
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2 + H_2O$	1.63	$S + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S$	0.14
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	1.61	$CuCl + e \rightleftharpoons Cu + Cl^-$	0.14
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59	$AgBr + e \rightleftharpoons Ag + Br^-$	0.10
$BrO_3^- + e \rightleftharpoons BrO_2^-$	1.52	$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	1.51	$CuBr + e \rightleftharpoons Cu + Br^-$	0.03
$PbO_2 + 2e \rightleftharpoons PbO + O^{2-}$	1.46	$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0.00
$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.36	$HgI_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4I^-$	-0.04
$Cr_2O_7^{2-} + 2e \rightleftharpoons Cr_2O_8^{2-}$	1.33	$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	-0.13
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23	$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0.13
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.23	$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	-0.14
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2 + 3H_2O$	1.20	$AgI + e \rightleftharpoons Ag + I^-$	-0.15
$ClO_4^- + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons ClO_3^- + H_2O$	1.19	$CuI + e \rightleftharpoons Cu + I^-$	-0.19
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.09	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	-0.25
$Br_2(liq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.07	$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.26
$Br_3^- + 2e \rightleftharpoons 3Br^-$	1.05	$PbCl_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Cl^-$	-0.27
$VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00	$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	-0.28
$AuCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Cl^-$	1.00	$PbBr_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Br^-$	-0.28
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0.96	$PbSO_4 + 2e \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	-0.36
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94	$PbI_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2I^-$	-0.37
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.92	$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	-0.40
$AuBr_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Br^-$	0.87	$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0.41
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI$	0.86	$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	-0.44
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0.85	$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4(aq)$	-0.49
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0.80	$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	-0.74
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	0.79	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	-0.76
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.77	$H_2O + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2 + OH^-$	-0.83
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Cl^-$	0.73	$Cr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cr$	-0.91
$Q + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2Q$	0.70	$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	-1.18
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.68	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	-1.66
$PtBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Br^-$	0.58	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.56	$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HAsO_2 + 2H_2O$	0.56	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.54	$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.54	$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	0.52	$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2.93
$4H_2SO_3 + 4H^+ + 6e \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 6H_2O$	0.51	$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3.05

Mayor  
tendencia a  
oxidarse

**Ejemplo: celda Cobre-Zinc**

**Cátodo:**  
 $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu (+0,34V)$

**Ánodo:**  
 $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- (-0,76V)$

**Tensión de celda:**  
 $(V_{\text{cátodo}} - V_{\text{ánodo}}) = 1,1V$

**Energía libre de Gibbs**  
 $\Delta G = - nF\Delta V_0$

- Si  $\Delta G < 0$  ( $\Delta V > 0$ ): la reacción es espontánea
- Si  $\Delta G > 0$  ( $\Delta V < 0$ ): la reacción no es espontánea

# Fundamentos y características de celdas

## Potencial estándar de reducción

El potencial estándar está determinado para condiciones dadas de temperatura y concentración (25°C/1M)

Para condiciones distintas de las estándar, el potencial de celda se ajusta siguiendo la ecuación de Nerst



$$E_{cel} = E_{cel}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

- $E_{cel}$  = potencial corregido del electrodo.
- $E_{cel}^{\circ}$  = potencial en condiciones estándar
- $R$  = constante de los gases en Joules sobre Kelvin por mol.
- $T$  = Temperatura absoluta
- $n$  = número de electrones liberados en el electrodo
- $F$  = constante de Faraday
- $a, b, c, d,$  = actividad de reactivos y productos
- $[A], [B], [C], [D]$  = concentraciones molares de reactivos y productos

Par redox	$E^{\circ}$
$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2.87
$O_3 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.82
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.77
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1.70
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1.69
$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	1.68
$HClO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HClO + H_2O$	1.64
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2 + H_2O$	1.63
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	1.61
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Br_2 + 3H_2O$	1.52
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$PbO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.46
$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.36
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.23
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2 + 3H_2O$	1.20
$ClO_4^- + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons ClO_3^- + H_2O$	1.19
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.09
$Br_2(liq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.07
$Br_3^- + 2e \rightleftharpoons 3Br^-$	1.05
$VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00
$AuCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Cl^-$	1.00
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0.96
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.92
$AuBr_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Br^-$	0.87
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI$	0.86
$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0.85
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0.80
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	0.79
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.77
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Cl^-$	0.73
$Q + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2Q$	0.70
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.68
$PtBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Br^-$	0.58
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.56
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HAsO_2 + 2H_2O$	0.56
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.54
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.54
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	0.52
$4H_2SO_3 + 4H^+ + 6e \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 6H_2O$	0.51

Par redox	$E^{\circ}$
$2H_2SO_3 + 2H^+ + 4e \rightleftharpoons S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0.40
$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.36
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0.34
$Hg_2Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0.28
$IO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons I^- + 6OH^-$	0.26
$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0.22
$HgBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4Br^-$	0.21
$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	0.15
$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.15
$S + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S$	0.14
$CuCl + e \rightleftharpoons Cu + Cl^-$	0.14
$AgBr + e \rightleftharpoons Ag + Br^-$	0.10
$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$CuBr + e \rightleftharpoons Cu + Br^-$	0.03
$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0.00
$HgI_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4I^-$	-0.04
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	-0.13
$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0.13
$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	-0.14
$AgI + e \rightleftharpoons Ag + I^-$	-0.15
$CuI + e \rightleftharpoons Cu + I^-$	-0.19
$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	-0.25
$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.26
$PbCl_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Cl^-$	-0.27
$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	-0.28
$PbBr_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Br^-$	-0.28
$PbSO_4 + 2e \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	-0.36
$PbI_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2I^-$	-0.37
$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	
$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	
$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4(aq)$	
$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	
$H_2O + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2 + OH^-$	
$Cr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cr$	
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	
$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	
$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	
$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	
$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	
$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2.93
$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3.05

# Características eléctricas de celdas y baterías

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Capacidad - Ah*

- Es la cantidad de carga que entrega una celda, medida en Coulombios (C) o en Ampe-hora (Ah)
- Habitualmente, los fabricantes informan la capacidad en Ampere-hora y no en Coulombios (1C=1A.seg)
- Se obtiene a partir de un ensayo de descarga a **corriente constante**
- Se debe informar la intensidad de descarga (a mayor intensidad, menor capacidad)

La capacidad teórica de una batería (en Ah) se obtiene a partir de la ley de Faraday:

- $m_R$  es la masa del electrodo limitante
- $n$  es el número de electrones producido por cada ion
- $M_m$  es la masa molar

$$Q_T = 0.278F \frac{m_R n}{M_m}$$

En la práctica, la capacidad real termina siendo menor que la teórica

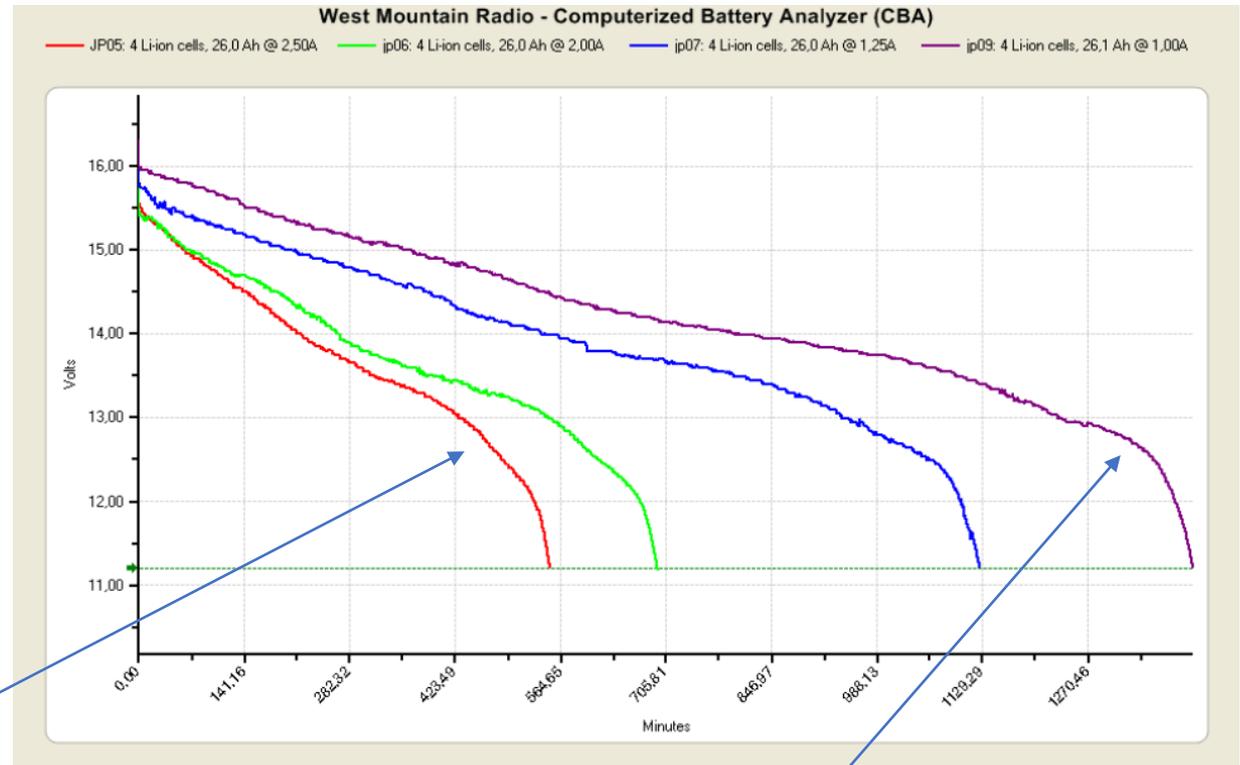
# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### Capacidad - Ah

$$C_p = \int_{t_0}^{t_c} i(t) dt$$

- Mayor intensidad de descarga
- Tensión de corte ocurre antes
- Menor capacidad (Ah) entregada



- Menor intensidad de descarga
- Tensión de corte ocurre luego
- Mayor capacidad (Ah) entregada

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

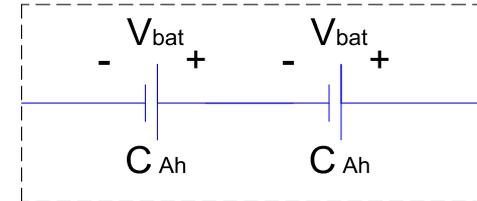
### Capacidad - Ah

Para una batería compuesta de celdas en **serie**, la capacidad total que puede entregar es igual a la menor capacidad de celda

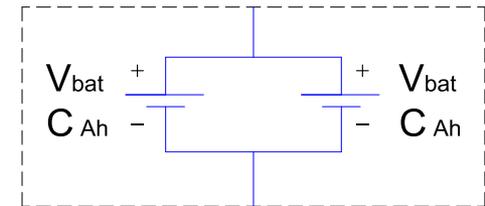
Para un módulo o una batería compuesta de celdas en **paralelo**, la capacidad total que puede entregar es igual a la suma de la capacidad de cada celda conectada en paralelo

Para un sistema ensamblado **serie-paralelo** como el de la figura, la capacidad del banco es el doble de la capacidad individual (debido al paralelo)

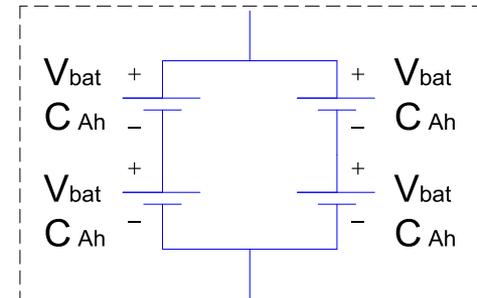
$$C_{Ah} / 2V_{bat}$$



$$2C_{Ah} / V_{bat}$$



$$2C_{Ah} / 2V_{bat}$$



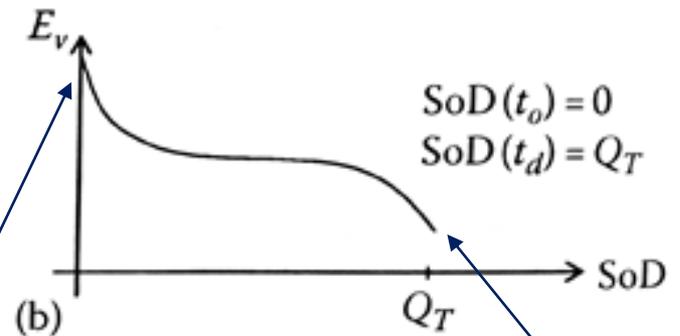
# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Tensión de Circuito Abierto / OCV – Open Circuit Voltage*

- Se trata del voltaje de la celda cuando no existe carga conectada en sus terminales
- Depende del SOC, Temperatura, historial carga/descarga, etc.

- OCV cae bruscamente cuando la celda o batería ha sido completamente descargada
- Salvo en algunos tipos particulares de baterías, el OCV no es un buen indicador de estado de carga de una batería



OCV para la  
batería 100%  
cargada

OCV para la  
batería 100%  
cargada

# Características eléctricas de celdas y baterías

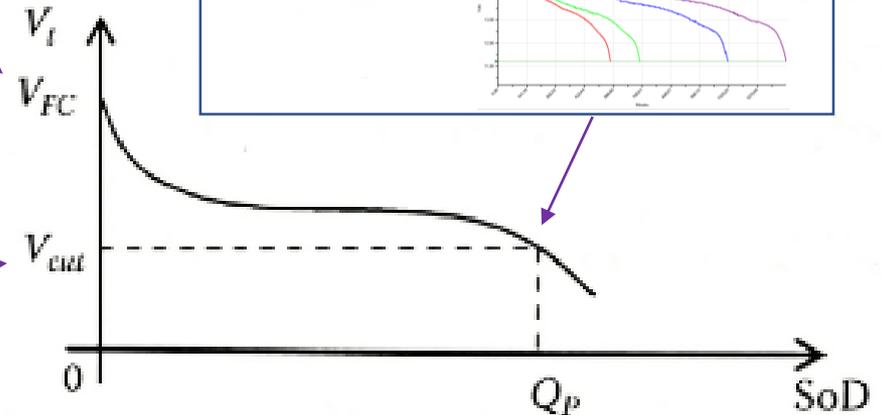
## Parámetros de una batería

### *Tensión de Celda*

Se trata del voltaje de la celda cuando hay carga eléctrica conectada en sus terminales (entregando potencia), o bien cuando se está cargando (consumiendo potencia)

Cuando la batería está completamente cargada, el voltaje en sus terminales es  $V_{FC}$

Cuando la batería está completamente descargada, la batería alcanza un valor de tensión el voltaje en sus terminales es  $V_{cut}$

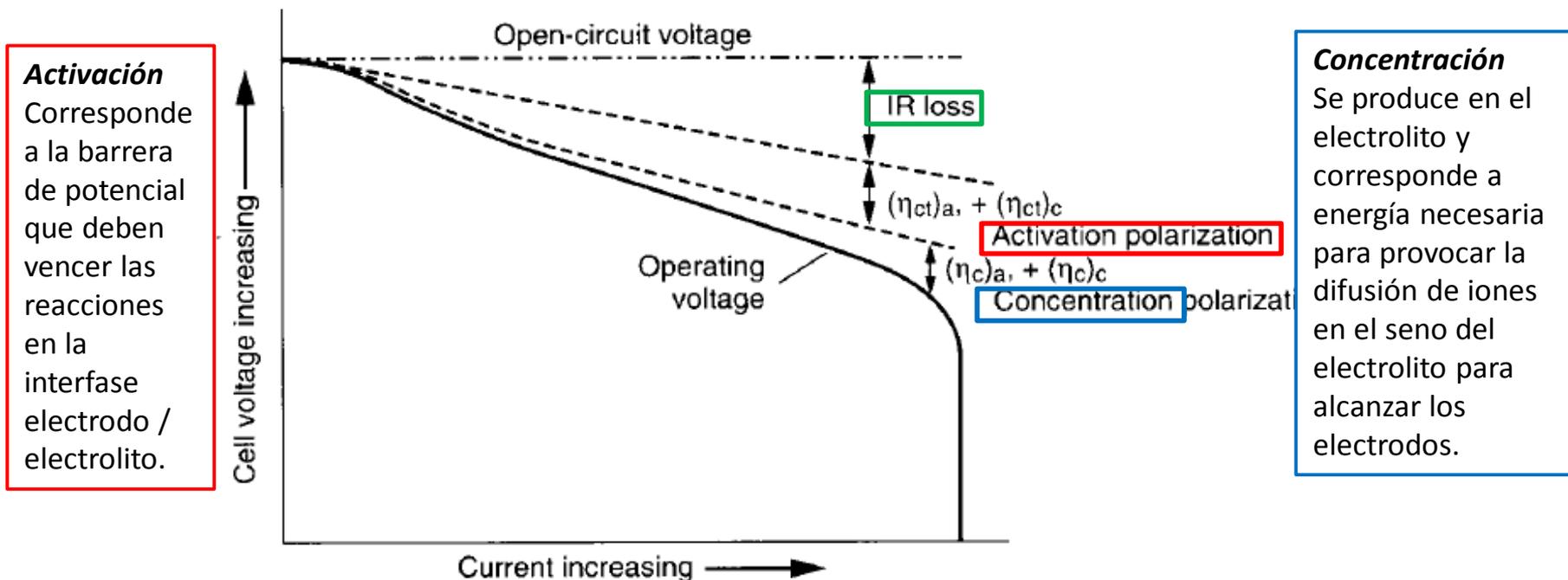


# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Tensión de Celda*

La tensión de operación cae conforme aumenta la corriente, debido a mecanismos de polarización por activación, concentración y caída Óhmica.



#### **Activación**

Corresponde a la barrera de potencial que deben vencer las reacciones en la interfase electrodo / electrolito.

#### **Concentración**

Se produce en el electrolito y corresponde a energía necesaria para provocar la difusión de iones en el seno del electrolito para alcanzar los electrodos.

**Polarización Óhmica:** se produce en el electrolito y corresponde a la reducción de potencial óhmico ocasionada por la resistencia del electrolito.

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Intensidad de descarga* - $C_{rate}$

Representa la intensidad de corriente de descarga en forma de fracción de la capacidad.

i.e. para una batería de capacidad  $C = 100 \text{ Ah}$ .

- $C/5$  representa una intensidad de descarga de  $100\text{Ah} / 5 = 20\text{A}$ .
- $2C$  representa una intensidad de descarga de  $100\text{Ah} / 0,5 = 200\text{A}$

Algunos fabricantes especifican la capacidad de la batería utilizando la siguiente nomenclatura para la velocidad de descarga:

Capacidad nominal

$$I = M * C_n$$

Corriente de descarga

Factor de  
descarga

Tiempo de descarga (hs)  
para capacidad nominal

**Ejemplo:**

Nominal Capacity,	1400	mAh	$0.5C_{5A}$
-------------------	------	-----	-------------

*Debe ser tenido en cuenta que esta notación contiene información redundante eventualmente contradictoria*

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Estado de Carga – SOC / State of Charge*

SOC representa la **capacidad disponible** en la batería en un instante de tiempo  $t$ , indicado en % de la capacidad total de una celda o batería.

Existen diferentes **mecanismos para determinar el SOC**, muchos de los cuales emplean mediciones de la tensión y corriente de cada celda.

Cantidad de carga **remanente** en la batería (Ah) en el instante de tiempo  $t$ .

$$SOC(t) = \frac{C(t)}{C_0}$$

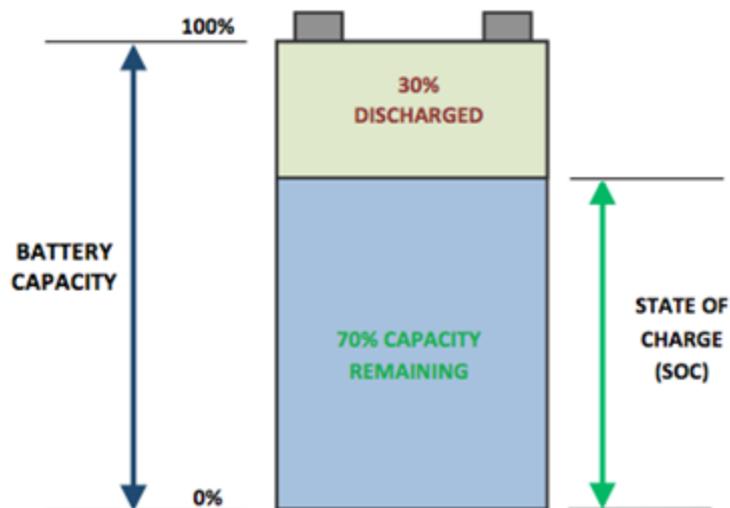
Cantidad de carga (Ah) de la batería completamente cargada.

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Estado de Carga – SOC / State of Charge*

El SOC de una celda o batería en un instante cualquiera, se obtiene **contabilizando la cantidad de carga** extraída durante el período de uso integrando la corriente en el tiempo, y se la compara con la capacidad inicial



Capacidad de la celda 100% cargada

Cantidad de carga extraída entre el instante inicial y el instante  $t$

$$SOC(t) = \frac{C_0 - \int_0^t i(t) dt}{C_0} \times 100$$

El SOC varía con:

- Voltaje
- C rate
- Autodescarga
- Temperatura
- Envejecimiento
- Degradación

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Estado de Carga – SOC / State of Charge*

Típicamente, el SOC puede ser obtenido por el **método basado en voltaje** o por el método basado en corriente (**Coulomb counting**)

#### ***El método basado en voltaje***

Puede ser **aplicado solamente** en aquellos tipos de baterías en los que exista una relación entre el **SOC** y la tensión de celda **V**.

La **relación** entre ambas variables (**V-SOC**) debe ser previamente **conocida** si se quiere emplear este método (no aplicable para baterías Li-ion)

#### ***El método basado en corriente***

implementa un loop abierto en el que se mide la corriente y se aplica la **integral** en el tiempo, obteniendo de este modo el **DOD** y calculando a partir de este el **SOC** ( $SOC + DOD = C$ )

Para ser **mejorado**, es habitual incorporar a este modelo una **medida de tensión**, que permite implementar un loop cerrado que mejora la precisión.

# Características eléctricas de celdas y baterías

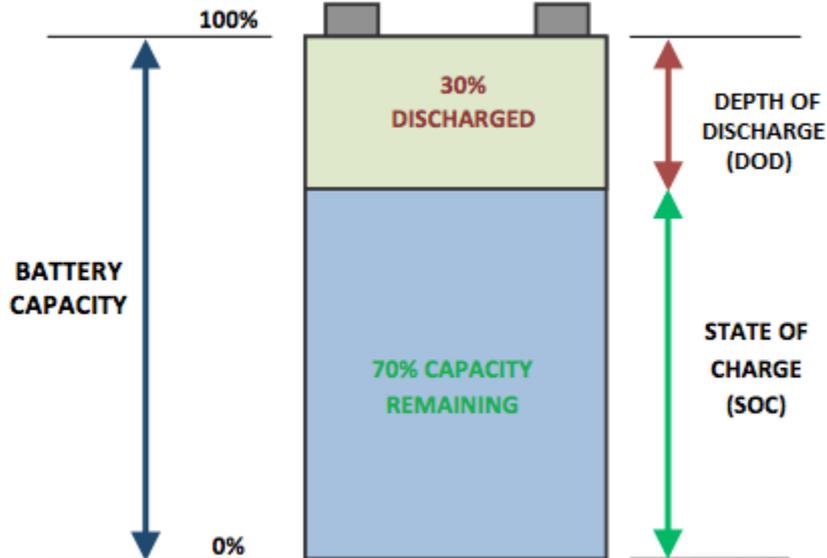
## Parámetros de una batería

### *Profundidad de Descarga – DOD / Depth of Discharge*

Es una medida de la cantidad de carga eléctrica (Ah) que es extraída de una celda o batería durante la descarga, a partir del estado inicial 100% cargado.

$$DOD(t) = \int_0^t i(t) dt = \Delta q$$

$$SOC(t) + DOD(t) = C_0$$



El SOC y el DOD de una batería sumados representan la cantidad total de carga disponible en la batería (Ah)

# Características eléctricas de celdas y baterías

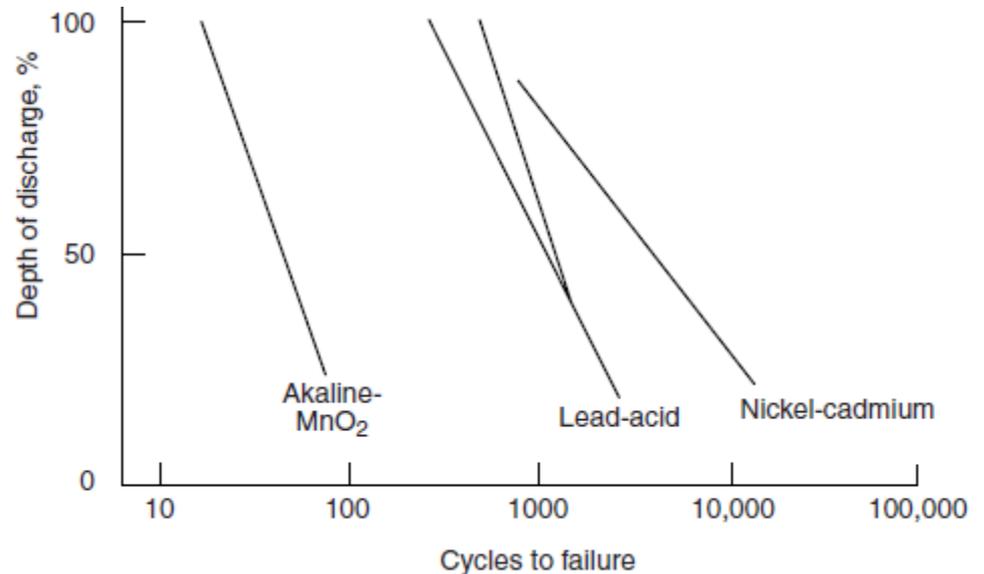
## Parámetros de una batería

### *Ciclabilidad o durabilidad (ciclos de vida)*

La durabilidad de la batería representa la **vida útil** de la misma en *función del número de ciclos de carga y descarga*.

Generalmente se expresa en **número de ciclos a cierta profundidad de descarga**.

Por ejemplo: **2000@80%DOD** significa que si se descarga la batería hasta un SOC=20% y se vuelve a cargar hasta el 100 %, la misma dura al menos 2000 ciclos.



La **vida de la batería se reduce con el DOD debido a** mayores niveles de estrés inducidos en los electrodos, expansión y contracción mecánica, problemas electroquímicos, etc.

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Estado de Salud – SOH / State of Health*

Es una medida de la **máxima cantidad de carga** eléctrica (Ah) que puede ser extraída de una batería en el **ciclo *i*-ésimo**, en comparación con la cantidad de carga máxima que entrega la batería en su estado original.

El detrimento del SOH está asociado a procesos de **degradación y envejecimiento**, sobre los que influyen varios factores:

- *Corriente de carga y descarga*
- *Temperatura de operación*
- *Sobrecarga y sobredescarga*
- *Condiciones de almacenamiento*

$$\text{SOH} = \frac{C_{\max}^i}{C_{\max}^0} \times 100$$

*Ah en el ciclo *i*-ésimo*

*Ah original*

**Batería nueva: SOH=100%**

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Eficiencia energética*

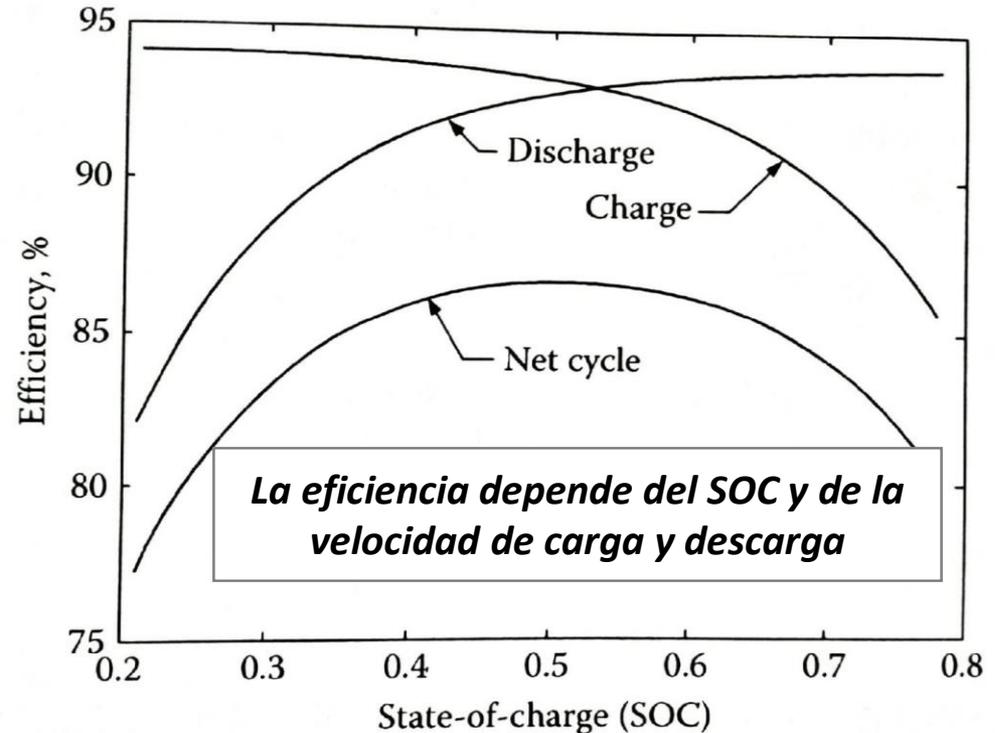
Las pérdidas energéticas aparecen en forma de pérdida de potencial, por lo que la eficiencia energética puede ser definida como el potencial de operación entre el potencial termodinámico

$$\eta_{descarga} = \frac{V_{desc}}{V_0}$$

$$\eta_{recarga} = \frac{V_0}{V_{carga}}$$

$V_0 =$  voltaje termodinámico

$$V_0 = -\Delta G/nF$$



i.e.: para el caso de la batería de plomo-ácido la mayor eficiencia se encuentra en el entorno de un SOC = 50%

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Eficiencia energética*

En un rango de operación en el que se producen cargas y descargas, la eficiencia puede ser medida de forma energética o Faradaica, del siguiente modo:

- **Eficiencia Faradaica:** es el cociente de carga eléctrica (Ah) en un rango determinado de operación
- **Eficiencia energética en un intervalo:** es el cociente de energía (Wh) en un rango determinado de operación
- **Eficiencia energética global:** es relación entre la energía entregada por la batería en una **descarga completa**, y la energía insumida para realizar una **carga completa**

$$\eta_F = \frac{Q_D}{Q_C} = \frac{I_D t_{op}|_D}{I_C t_{op}|_C}$$

$$\eta_\xi = \frac{\xi_D}{\xi_C} = \frac{I_D V_D t_{op}|_D}{I_C V_C t_{op}|_C}$$

$$\eta_G = \frac{I_D V_D t_D}{I_C V_C t_C}$$

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Energía Específica (Wh/kg)*

Es la cantidad de energía por unidad de masa que una celda o batería puede entregar bajo ciertas condiciones de descarga

Useable Specific Energy @ C/3 Discharge Rate	Wh/kg	235	350
--	-------	-----	-----

U.S. Advanced Battery Consortium LLC

Teóricamente se obtiene a partir de la energía libre de Gibbs y la masa molecular de las especies involucradas en la reacción.

$$E_{teo} = -\frac{\Delta G}{3.6 \sum M_i} = \frac{nFV_r}{3.6 \sum M_i} \text{ (Wh/kg)}$$

Proporcional a la tensión de celda

Inversamente proporcional a la masa molecular de las especies

En la práctica, la energía específica resulta siendo mucho menor que la energía específica teórica.  
(i.e.: Plomo-ácido 170Wh/kg Vs. 45Wh/kg)

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

*Energía Específica (Wh/kg)*

Idealmente útiles para el cátodo por su bajo peso atómico y su tendencia a ceder electrones

Idealmente útiles para el ánodo por su bajo peso atómico y elevada electronegatividad

Para la selección de los materiales de los electrodos, además de la electronegatividad y masa atómica, debe ser tenido en cuenta:

- *Conductividad*
- *Estabilidad*
- *Compatibilidad con materiales de los colectores y electrolito*
- *Disponibilidad y costos*
- *Toxicidad e impacto ambiental*

PERIODO	GRUPO 1 IA	GRUPO 2 IIA	GRUPO 13 IIIA	GRUPO 14 IVA	GRUPO 15 VA	GRUPO 16 VIA	GRUPO 17 VIIA	GRUPO 18 VIIIA
1	1 1.0079 <b>H</b> HIDRÓGENO							2 4.0026 <b>He</b> HELIO
2	3 6.941 <b>Li</b> LITIO	4 9.0122 <b>Be</b> BERILIO						10 20.180 <b>Ne</b> NEÓN
3	11 22.990 <b>Na</b> SODIO	12 24.305 <b>Mg</b> MAGNESIO						18 39.948 <b>Ar</b> ARGÓN
4	19 39.098 <b>K</b> POTASIO	20 40.078 <b>Ca</b> CALCIO	31 69.723 <b>Al</b> ALUMINIO	32 72.64 <b>Si</b> SILICIO	33 74.922 <b>P</b> FÓSFORO	34 78.96 <b>S</b> AZUFRE	35 79.904 <b>Cl</b> CLORO	36 83.798 <b>Ar</b> ARGÓN
5	37 85.468 <b>Rb</b> RUBIDIO	38 87.62 <b>Sr</b> ESTRONCIO	49 121.76 <b>Sb</b> ANTIMONIO	50 127.60 <b>Te</b> TELURO	51 126.90 <b>I</b> YODO	54 131.29 <b>Xe</b> XENÓN		
6	55 132.91 <b>Cs</b> CESIO	56 137.33 <b>Ba</b> BARIO	83 208.98 <b>Bi</b> BISMUTO	84 (209) <b>Po</b> POLONIO	85 (210) <b>At</b> ASTATO	86 (222) <b>Rn</b> RADÓN		
7	87 (223) <b>Fr</b> FRANCIO	88 (226) <b>Ra</b> RADIO	Uup UNUNPENTIO	Lv LIVERMORIO	Uus UNUNSEPTIO	Uuo UNUNOCTIO		

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Energía Específica (Wh/kg)*

System	Specific Energy (Wh/kg)	Peak Power (V/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle Life	S
<i>Acidic Aqueous Solution</i>					
Lead/acid	35-50	150-400	>80	500-1000	
<i>Alkaline Aqueous Solution</i>					
Nickel/cadmium	50-60	80-150	75	800	
Nickel/iron	50-60	80-150	75	1500-2000	
Nickel/zinc	55-75	170-260	65	300	
Ni-MH	70-95	200-300	70	750-1200+	
Aluminum/air	200-300	160	<50	?	
Iron/air	80-120	90	60	500+	
Zinc/air	100-220	30-80	60	600+	
<i>Flow</i>					
Zinc/bromine	70-85	90-110	65-70	500-2000	
Vanadium redox	20-30	110	75-85	-	
<i>Molten Salt</i>					
Sodium/sulfur	150-240	230	80	800+	
Sodium/nickel chloride	90-120	130-160	80	1200+	
Lithium/iron sulfide (FeS)	100-130	150-250	80	1000+	
<i>Organic/Lithium</i>					
Li-I	80-130	200-300	>95	1000+	

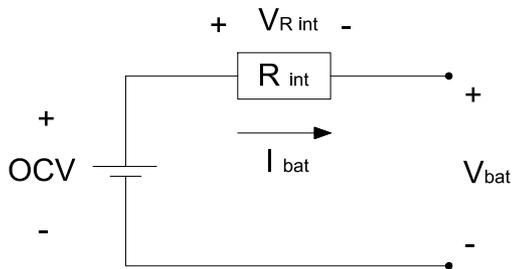
# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Potencia de la batería (W)*

La potencia instantánea se calcula como el producto de la tensión instantánea por la corriente instantánea.

$$P(t) = V_{bat} \cdot I$$

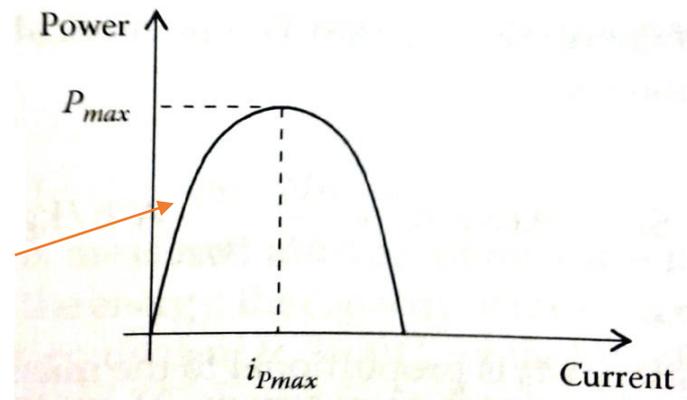


Teniendo en cuenta el circuito eléctrico equivalente del modelo básico:

$$V_{bat} = OCV - R_{int} * I_{bat}$$

$$P(t) = OCV \cdot I_{bat} - R_{int} \cdot I_{bat}^2$$

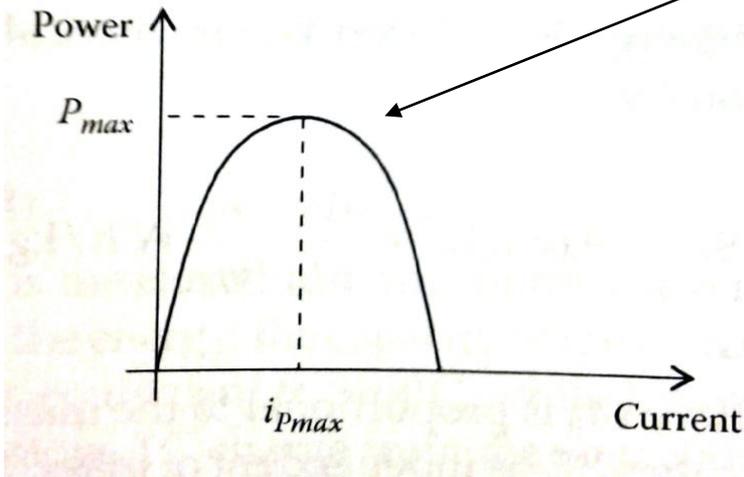
La curva de potencia es parabólica con la corriente



# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Potencia de la batería (W)*



Por el teorema de máxima transferencia de potencia para circuitos eléctricos, la potencia máxima se extrae cuando  $R_{ext} = R_{int}$ .

$$P_{max} = \frac{OCV^2}{4R_{int}}$$

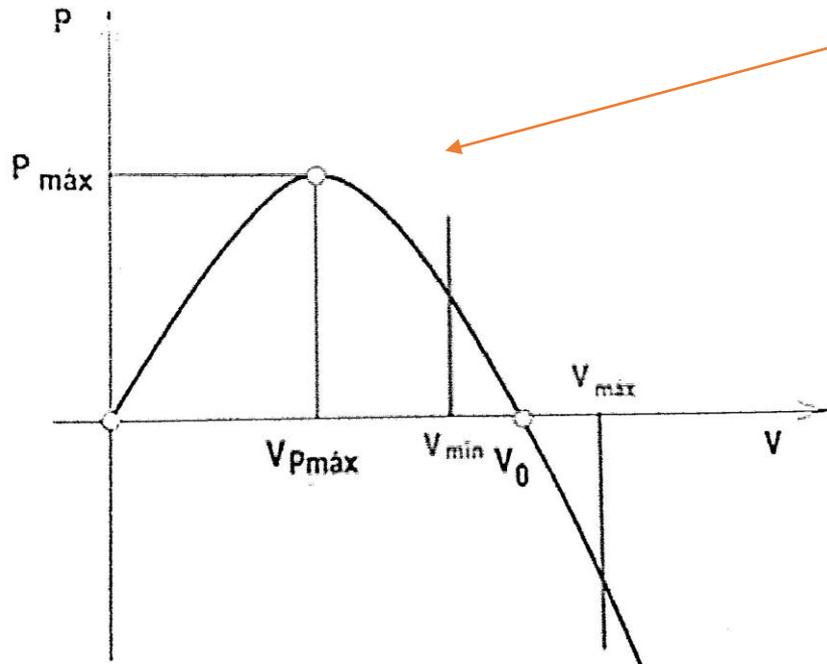
***Tanto OCV como  $R_{int}$  dependen del SOC, por lo que  $P_{max}$  depende también del SOC.***

La potencia máxima es extraída de la batería cuando se produce la máxima exigencia del motor, como en subidas y aceleraciones.

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Potencia de la batería (W)*



En función de la tensión, la potencia máxima de la batería  $P_{máx}$  tiene el máximo en  $OCV/2$ .

$$P(t) = \frac{V(t) \cdot OCV - V(t)^2}{R_{int}}$$

En la práctica, la tensión de funcionamiento está limitada a un valor mínimo  $V_{mín}$  durante la descarga, por lo que la potencia máxima ocurrirá para dicho valor de tensión.

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Potencia de la batería (W)*

La **potencia nominal** es la potencia que puede ser extraída de forma continua de la batería por períodos prolongados sin ocasionar daños, la cual no necesariamente coincide con  $P_{\max}$ .

La **potencia máxima** que puede entregar una batería **debe ser especificada** por el fabricante del vehículo eléctrico **indicando** las condiciones de **temperatura, SOC y tiempo** (segundos).

Max peak discharge power		> 85 kW 10 sec, 25°C, SOC 20 %
--------------------------	--	--------------------------------

Bajo ciertas **condiciones** se produce un **detrimento** de **potencia**, como por ejemplo condiciones extremas de temperatura.

Power derating		Max discharge and charge power can be reduced when the battery temperature is too high. (at 48°C 100% → at 60°C 0%)
----------------	--	---

# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

*Potencia Específica (W/kg)*

$$SP = \frac{P_{nominal}}{M}$$

Es el cociente entre la potencia nominal y la masa de la batería

*Potencia durante la recarga*

Durante la recarga, existen restricciones de potencia para evitar daños en la batería. La potencia pico en recarga suele ser menor que la potencia pico admisible en descarga.

Max peak charge power	35 kW max Following BMS limitations
-----------------------	--

Peak Discharge Power Density, 30 s Pulse	W/L	1000
Peak Specific Discharge Power , 30 s Pulse	W/kg	470
Peak Specific Regen Power , 10 s Pulse	W/kg	200

Asimismo, las **condiciones de temperatura durante la recarga** también deben cumplir con ciertas restricciones (***T mínima y T máxima***).

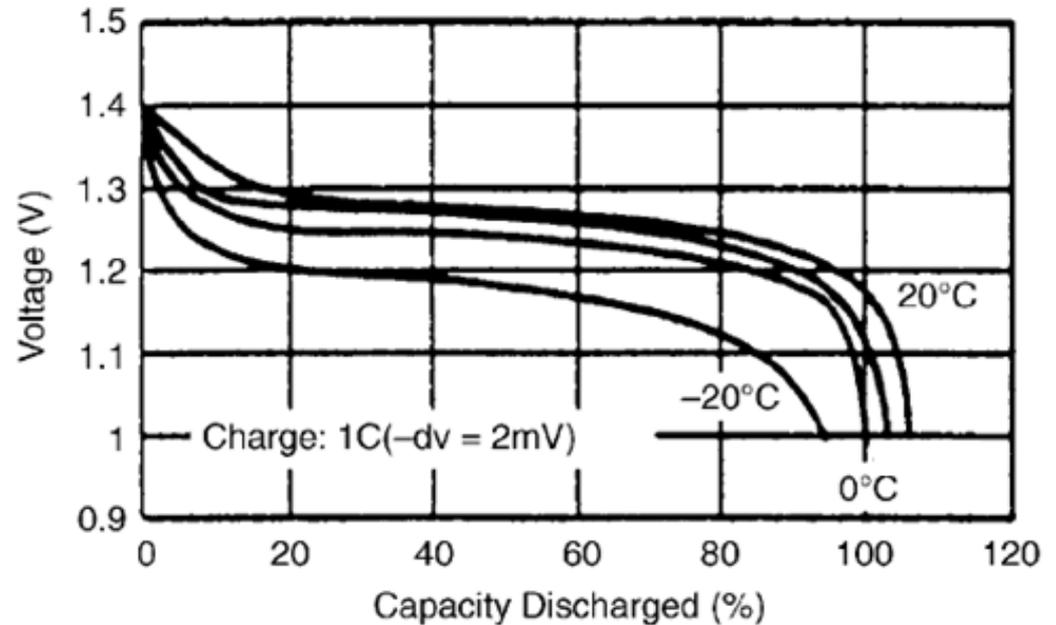
# Características eléctricas de celdas y baterías

## Parámetros de una batería

### *Efecto de la temperatura*

El voltaje durante la descarga depende de la temperatura: a **mayores  $T \rightarrow$  mayor tensión** de operación.

***Dada una tensión de corte especificada por el fabricante, la cantidad de carga entregada por la batería será menor a menor temperatura.***



### **Ejemplo:**

Usable Energy	22 kWh (25°C, BOL)
Energy at low temperature	19 kWh at 0°C 11,5 kWh at -20°C

# Modelado de celdas y baterías

# Modelado de celdas y baterías

El modelado es útil para llevar a cabo el diseño y la evaluación del desempeño de las celdas y baterías.

Asimismo, sirve para realizar simulaciones de sistemas eléctricos que incorporan baterías, como son los VH&E.

Existe dos tipos de modelado:

- 1. Modelado mediante circuitos eléctricos**
- 2. Modelado empírico**

- Utilizados para la determinación de la capacidad de almacenamiento.
- Permiten determinar la autonomía de un VE bajo ciertas condiciones.

- Utilizado para comprender el funcionamiento de celdas y baterías.
- Utilizado para simular el funcionamiento de VH&E, y el funcionamiento de baterías conectadas a las red eléctrica y V2G.

# Modelado de celdas y baterías

## *Modelo resistivo*

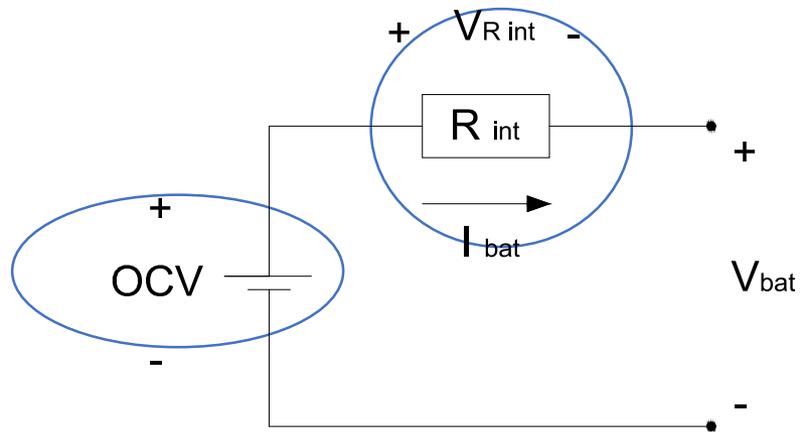
Describen el comportamiento de las celdas o baterías mediante un circuito elemental de una resistencia en serie con una fuente ideal.

- $V_{\text{bat}}$  es el valor de tensión en bornes de la batería
- OCV es el valor de tensión a circuito abierto (sin carga externa conectada)
- $R_{\text{int}}$  representa la resistencia interna de la batería

Tanto OCV como  $R_{\text{int}}$  son variables:

- $OCV = f(SOC)$
- $R_{\text{int}} = f(SOC; T)$

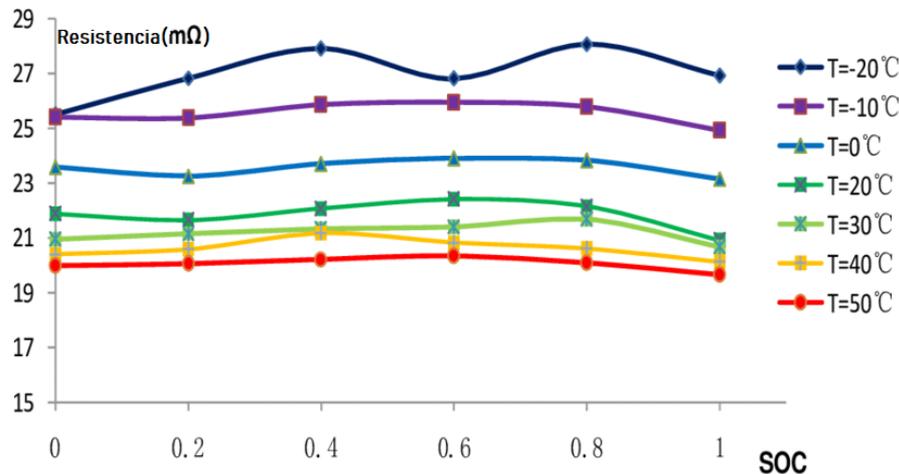
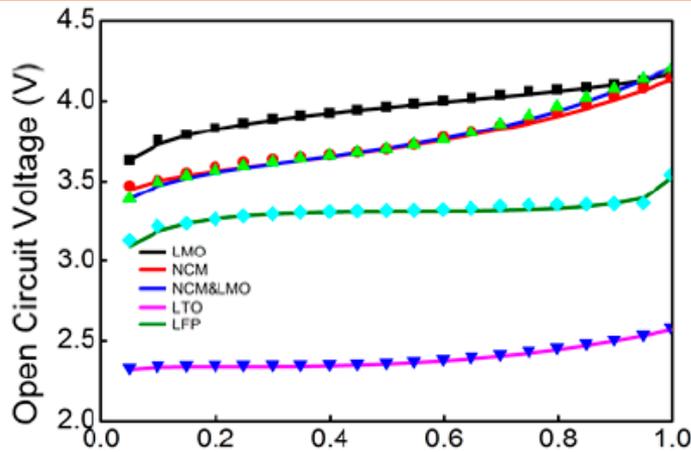
La dependencia de OCV y  $R_{\text{int}}$  con el SOC y la T son determinados mediante ensayos de laboratorio



# Modelado de celdas y baterías

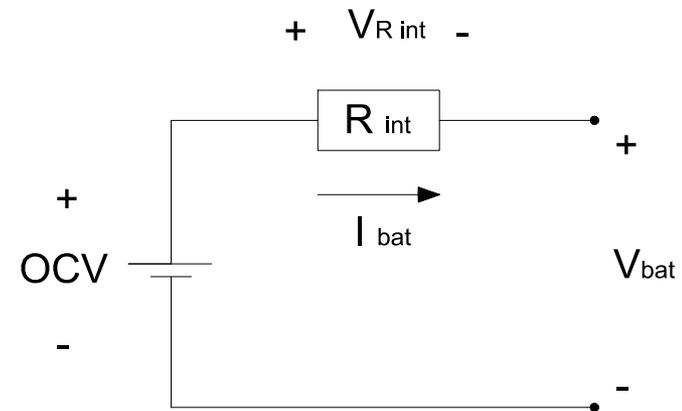
## Modelo resistivo

Describen el comportamiento de las celdas o baterías mediante un circuito elemental de una resistencia en serie con una fuente ideal.



$$OCV = f(SOC)$$

$$R_{int} = f(SOC; T)$$

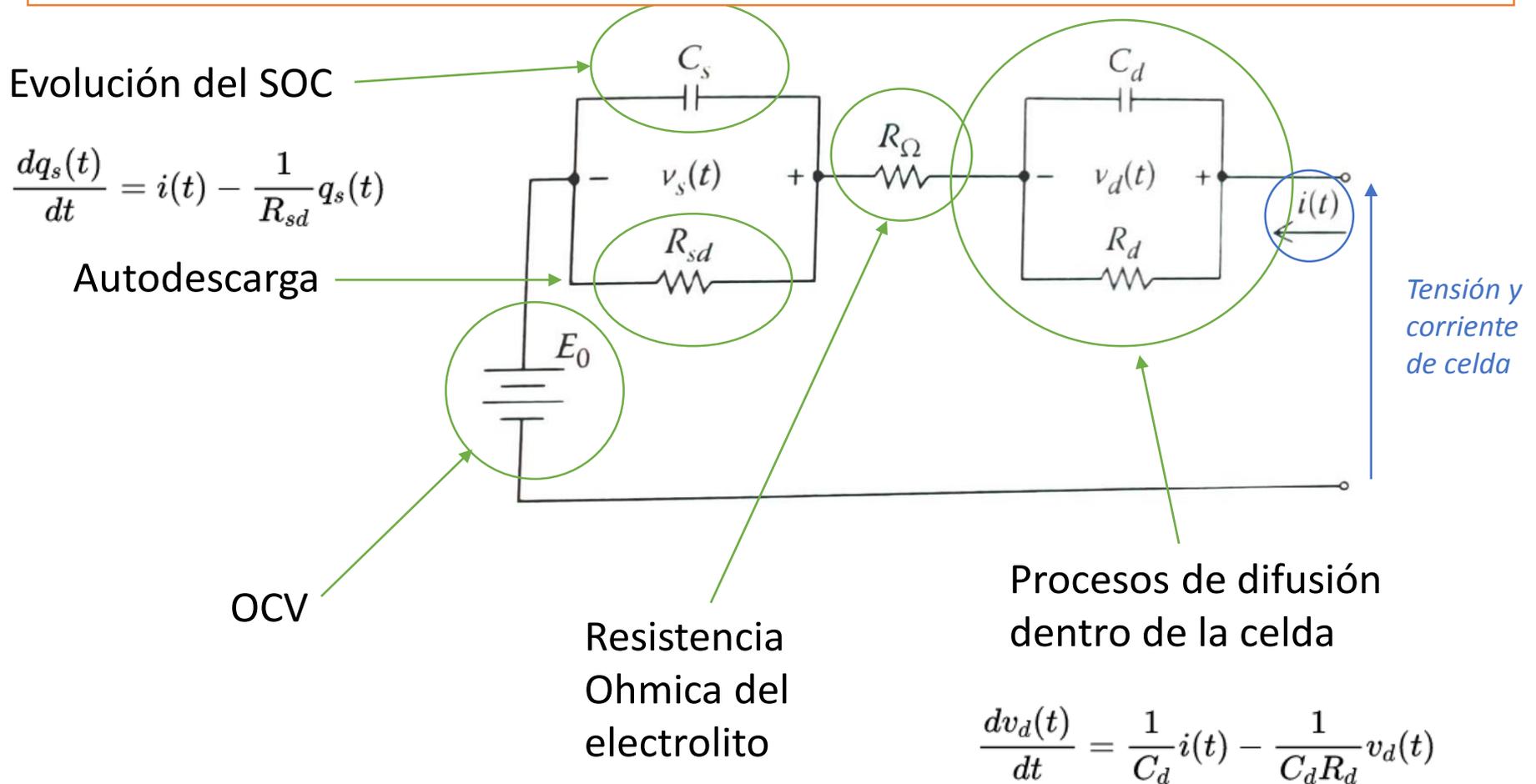


$$V_{bat} = OCV - R_{int} \cdot I_{bat}$$

# Modelado de celdas y baterías

## Modelos fundamentales

Describen el comportamiento de las celdas o baterías mediante circuitos eléctricos que son ajustados por resultados experimentales.

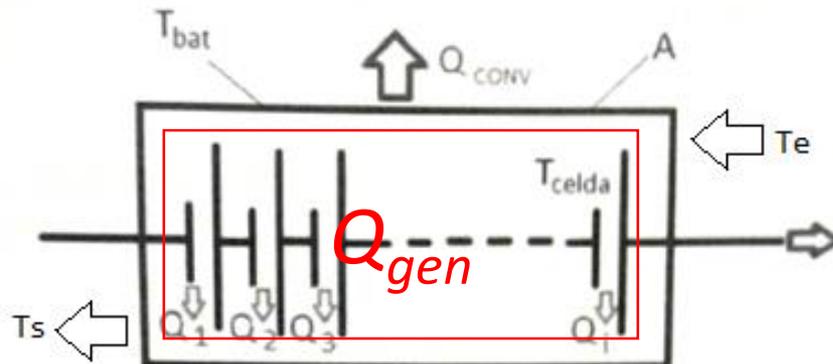


# Modelado de celdas y baterías

## *Modelado de la transferencia de calor*

El calor generado por la batería es resultado de la suma de generación de calor por las siguientes causas:

- $Q_{\text{Joule}}$  = efecto Joule por la resistencia interna de la batería
- $Q_{\text{polar}}$  = resistencias de polarización
- $Q_{\text{elec}}$  = calor generado por las reacciones electroquímicas



$$Q_{\text{Joule}} = R \cdot I^2$$

$$Q_{\text{polar}} = I \cdot \delta$$

$$Q_{\text{elect}} = \frac{I \cdot T_{celda} \cdot \Delta s}{n \cdot F}$$

$$Q_{gen} = Q_{conv} + Q_{Joule} + Q_{polar}$$

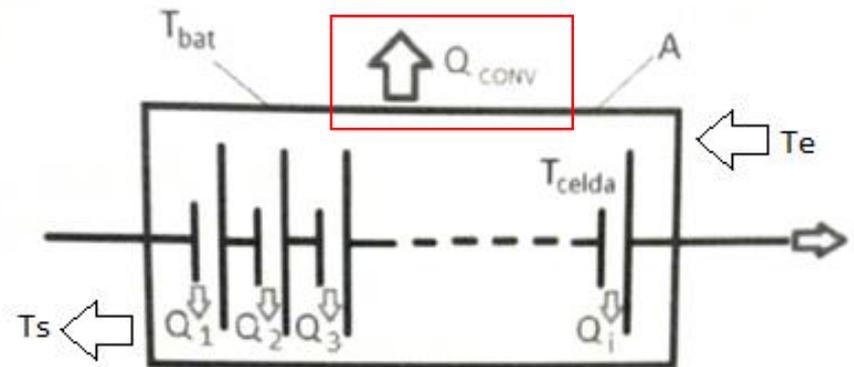
# Modelado de celdas y baterías

## Modelado de la transferencia de calor

El calor extraído por **convección** ( $Q_{conv}$ ) depende del **área efectiva** ( $A$ ), del **coeficiente de convección** ( $h$ ), y de la **diferencia de temperatura** ( $T_{bat} - T_{ext}$ ).

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{bat} - T_{ext})$$

Para un pack de baterías con  $i$  celdas, el **refrigerante** utilizado para el enfriamiento debe extraer todo el calor generado internamente  $Q_{gen}$ , menos el calor extraído por convección  $Q_{conv}$ .



$$\dot{m}_{refrig} = \frac{\Delta Q}{C_{p.refrig} (T_s - T_e)}$$

$$\Delta Q = Q_{gen} - Q_{conv}$$

# BMS y sistemas de ecualización

# BMS y sistemas de ecualización

## *Battery Management System – BMS*

Un BMS es un circuito integrado que emplea una serie de algoritmos que evitan que se produzcan daños en banco de baterías y procura la mejoría de su vida útil.

Como entrada para la ejecución de los algoritmos, emplea mediciones de temperatura, tensión y corriente en cada celda, o bien en agrupaciones de celdas.

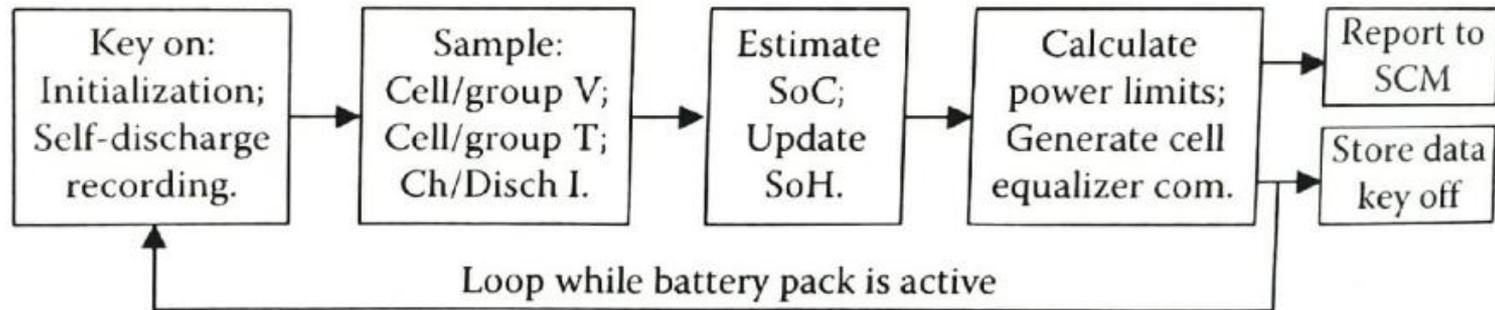
Las funciones esenciales del BMS son:

- Protección contra sobrecarga
  - Protección contra sobredescarga
  - Protección contra la sobretensión
  - Protección contra cortocircuitos
  - Protección contra exceso de temperatura
  - Función de balanceo de celdas
  - Función comunicación con el software del vehículo o herramientas de diagnóstico
- Cálculo del SOC
  - Cálculo de la potencia máxima de descarga
  - Cálculo de la potencia máxima de carga
  - Estimación del SOH (estado de salud)

# BMS y sistemas de ecualización

## *Battery Management System – BMS*

A modo de ejemplo, la secuencia seguida por el BMS de un HEV es:



Los **límites de potencia** se calculan a partir del SOC y tensión en celdas, para proteger la batería.

Los BMS que tienen ecualizador generan **señales de comando** basadas en las mediciones, y luego el circuito actúa realizando el balanceo de carga en cada celda.

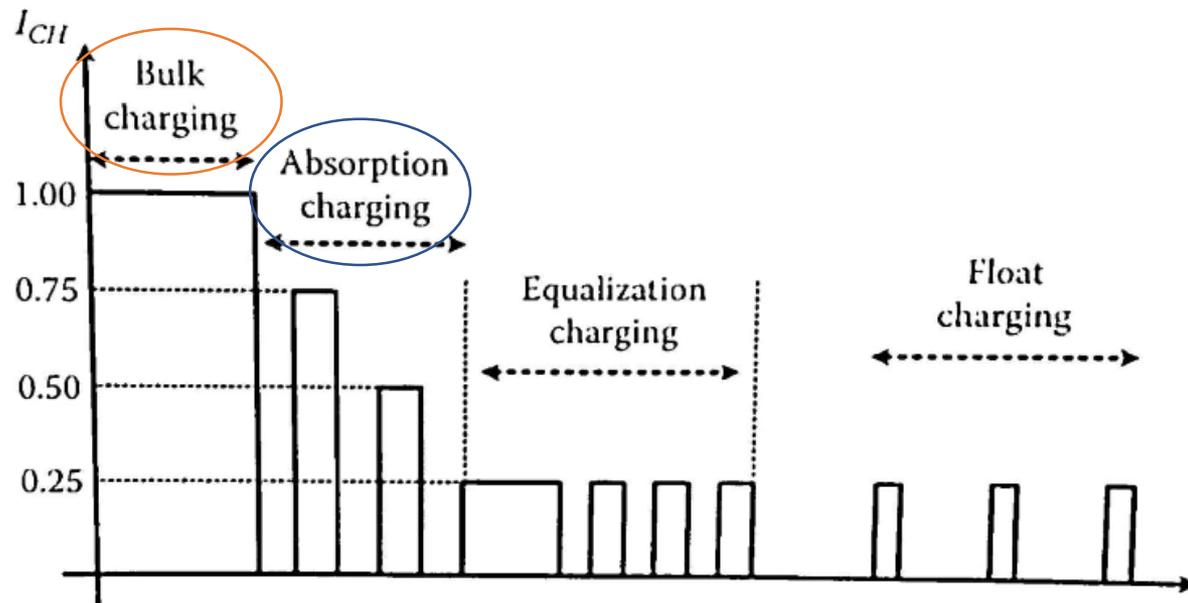
Los límites son reportados al controlador central (SCM) para delimitar las condiciones de conducción.

El BMS incorpora una función de *data logger* donde se guarda el historial de ciertas variables para realizar la estimación del SOH, diagnósticos y análisis de fallas.

# BMS y sistemas de ecualización

## *Estrategias de recarga*

Las estrategias de recarga son diseñadas y parametrizadas en función de la química de las baterías con el fin de evitar daños y maximizar la vida útil.



En la fase de **llenado (bulk)**, la batería es recargada a rápida velocidad a corriente constante (**CC**).

La fase de **absorción** comienza cuando del SOC alcanza cierto valor, usualmente en el entorno de 80%.

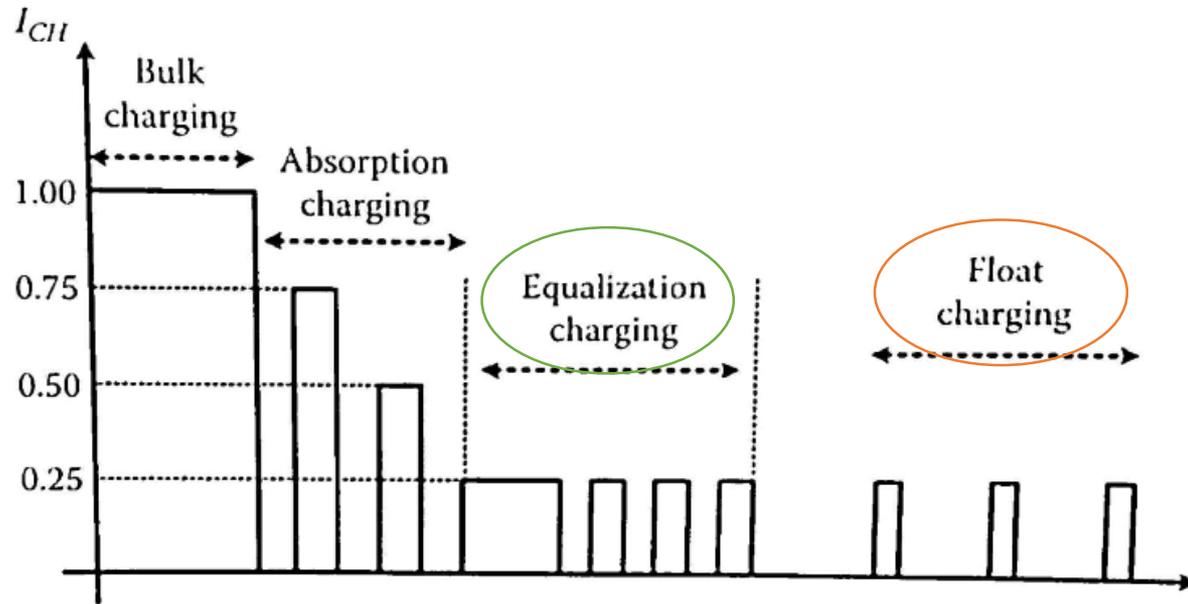
En esta fase la corriente de carga descende progresivamente para evitar daños.

Para algunos tipos de baterías, la estrategia aplicada en esta etapa implica el mantenimiento de una tensión constante (**CV**).

# BMS y sistemas de ecualización

## *Estrategias de recarga*

Las estrategias de recarga son diseñadas y parametrizadas en función de la química de las baterías con el fin de evitar daños y maximizar la vida útil.



La fase de **ecualización** es implementada para completar la recarga y realizar el balanceo de carga de las celdas

La fase de **flotación** es implementada para compensar la autodescarga, una vez que la batería está cargada 100%

Una tensión constante es aplicada a un valor levemente menor al valor límite de tensión superior de la batería (**trickle charging**).

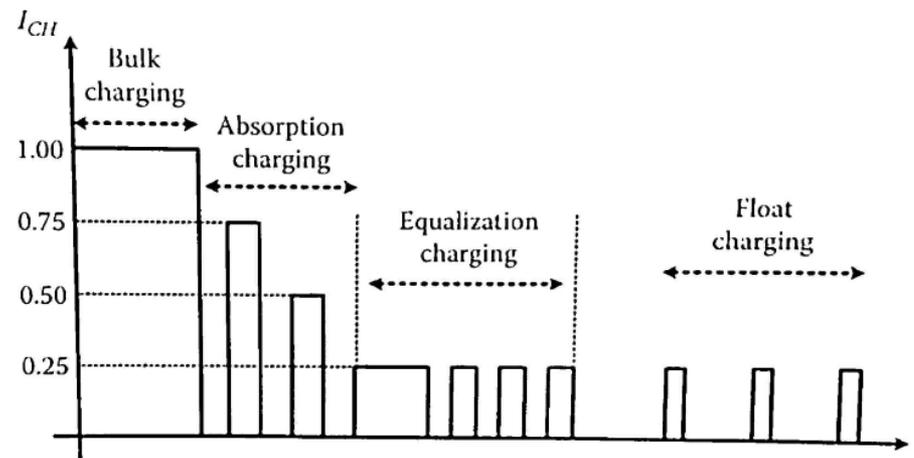
# BMS y sistemas de ecualización

## *Estrategias de recarga*

Las estrategias de recarga pueden aplicar corriente constante (**CC**), tensión constante (**CV**), o una **combinación** de ambas.

La **corriente de carga** puede ser aplicada en forma de pulsos mediante el control por **modulación de ancho de pulso (PWM)**, como se muestra en la figura.

Con **esta estrategia**, es posible **evitar** ciertas **reacciones** químicas en la batería que pueden ocasionar **degradación** o falla.

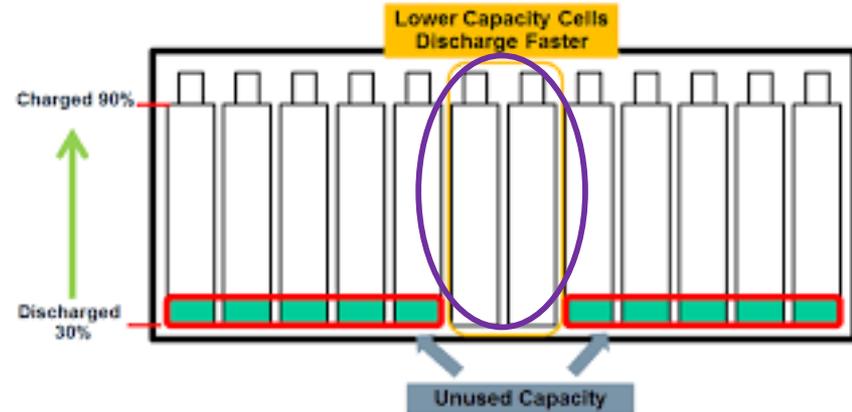


La implementación de estrategias de recarga adecuadas, permiten compensar desbalances en las celdas que pueden haberse producido durante la operación de la batería.

# BMS y sistemas de ecualización

## *Balanceo de celdas*

Con el fin de preservar la vida de las celdas de un banco de baterías, ciertas **estrategias de balanceo** son implementadas durante los procesos de carga y descarga



Esencialmente, se trata de **uniformizar** los parámetros de **tensión, temperatura y corriente** de todas las celdas del banco, **evitando** que se produzcan **desvíos** de los límites mínimo y máximo establecidos

La **estrategia más simple** establece la **interrupción** de la carga de una celda cuando el **límite** de tensión **individual** especificado **es alcanzado**. Entretanto, las **restantes celdas continúan** con el proceso de carga.

**Durante la descarga**, una **estrategia simple** establece la **interrupción** de la descarga de las celdas más débiles cuando estas **alcanzan la tensión mínima** admisible.

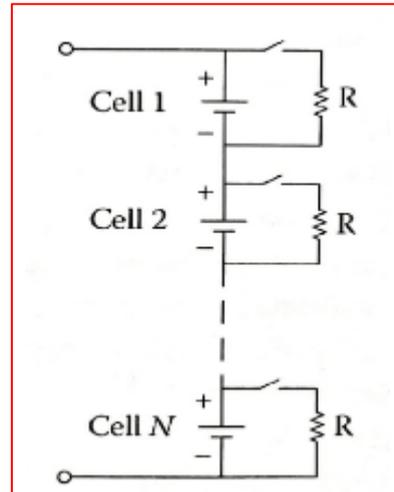
# BMS y sistemas de ecualización

## *Balaneo de celdas*

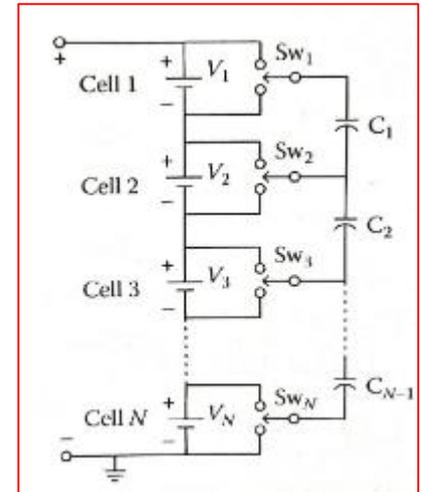
**Si una estrategia simple de balanceo no está adecuadamente implementada puede limitar la capacidad del banco de batería dado que la cantidad de carga queda determinada por las celdas más débiles.**

Para **mitigar este efecto**, estrategias de balanceo más complejas son implementadas, durante las cuales las celdas más débiles son **by-passeadas** con el fin de extraer **de las restantes** celdas **el 100%** de su capacidad disponible.

Algunos de los circuitos de balanceo son resistivos, disipando energía en algunos casos para evitar el desbalance (**método pasivo o disipativo**), mientras que otros implementan convertidores DC/DC o capacitores para transferir carga de una celda a otra (**método activo de balanceo**).



*método pasivo o disipativo*



*método activo no disipativo*

# Baterías traccionarias

# Baterías traccionarias

## *Batería plomo-ácido*

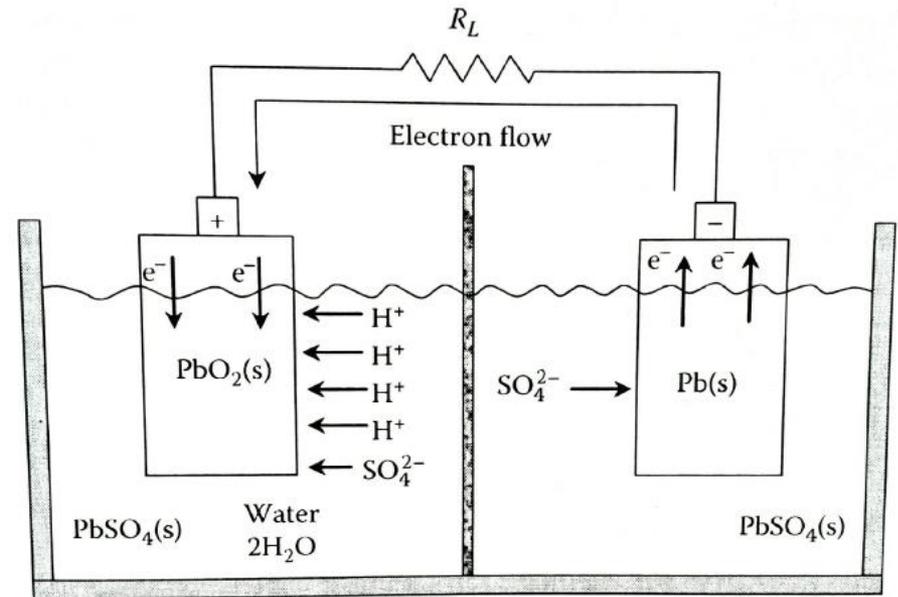
La primer batería de plomo-ácido data de 1859 y su uso se extiende hasta hoy, por lo que se considera una tecnología madura.

### *Se caracterizan por:*

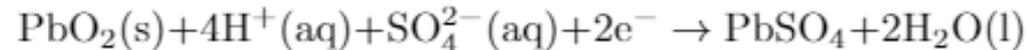
- Bajo costo
- Disponibilidad de materia prima para su construcción
- Fácil de fabricar
- Son reciclables

### *Como contrapartida:*

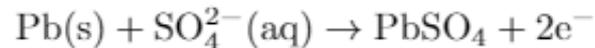
- Tienen baja vida útil
- Su energía específica es muy baja



### *Reacción catódica:*



### *Reacción anódica:*



En muchos casos, la batería plomo-ácido sigue siendo la primer opción para suministrar energía a los sistemas auxiliares

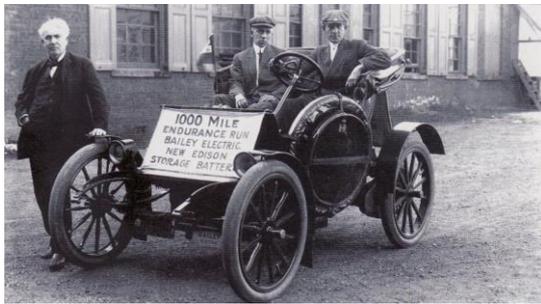
# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

Las baterías basadas en Níquel son consideradas una tecnología madura. Su uso en VE's data de fines de siglo XIX a partir de los trabajos de Thomas Edison.

En VH&E's, se usan baterías basadas en Níquel desde la década de 1990.

En 1997 el Toyota Prius (HEV) utilizó baterías Ni-MH y en 1999 también lo hizo el Chevrolet EV1 GEN II (BEV)



Bailey Victoria Pahton – 1908  
Batería Ni-Fe  
(Edison Storage Battery)



Chevrolet EV1 Gen II – 1999  
Batería Ni-MH



Toyota Prius Gen I – 1997  
Batería Ni-MH

# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

Existen 4 tipos principales de baterías basadas en Níquel:

- Níquel – Hierro
- Níquel – Cadmio
- Níquel – Zinc
- Níquel – Metal Hidruro

### *Baterías Níquel – Hierro*

- Son muy robustas y tolerantes al abuso, (sobrecarga, descarga profunda y cortocircuito)
- Alta durabilidad (>10.000 ciclos)
- Debido a su baja densidad energética (~40 Wh/kg), energía específica (~ 30 Wh/L), eficiencia (~ 70%) y alto costo, no son aptas para VH&E.

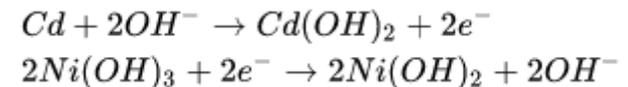


# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

### Baterías Níquel – Cadmio

- Tienen buena vida útil (~2000 ciclos)
- Soportan descargas rápidas
- Buen desempeño a bajas temperatura
- Algunos valores característicos son:
  - energía específica ~ 60Wh/kg
  - densidad energética ~ 150Wh/L
  - potencia específica hasta ~ 150Wh/kg
- Ha sido utilizado hasta la década de 1990 en dispositivos portátiles principalmente
- Su principal obstáculo es la toxicidad y poder contaminante del Cadmio
- En Europa, su uso está prohibido en dispositivos portátiles, y a nivel industrial el fabricante es responsable por todo el ciclo de vida de estas baterías (*Battery Directive 2013/56/EU*).



# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

### Baterías Níquel – Zinc

- Son una tecnología madura con más de 100 años de evolución
- Son utilizadas principalmente en herramientas y dispositivos portátiles. También en bicicletas eléctricas.
- Tienen las siguientes ventajas:
  - Tecnología madura
  - Componentes abundantes en la naturaleza
  - Son relativamente económicas
  - Bajo impacto ambiental
  - Admiten recarga rápida
- Como contrapartida, su energía específica y densidad energética no son suficiente para su uso en VH&E ( $\sim 60$  Wh/kg y  $\sim 120$  Wh/L respectivamente). Asimismo, su ciclo de vida no es aun suficiente para este tipo de requerimientos ( $\sim 500$  ciclos @100%DOD)



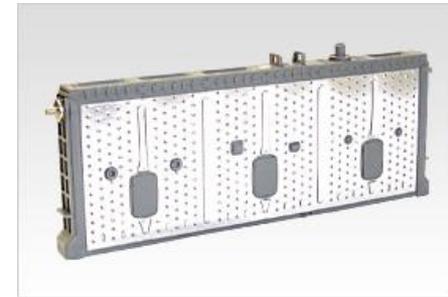
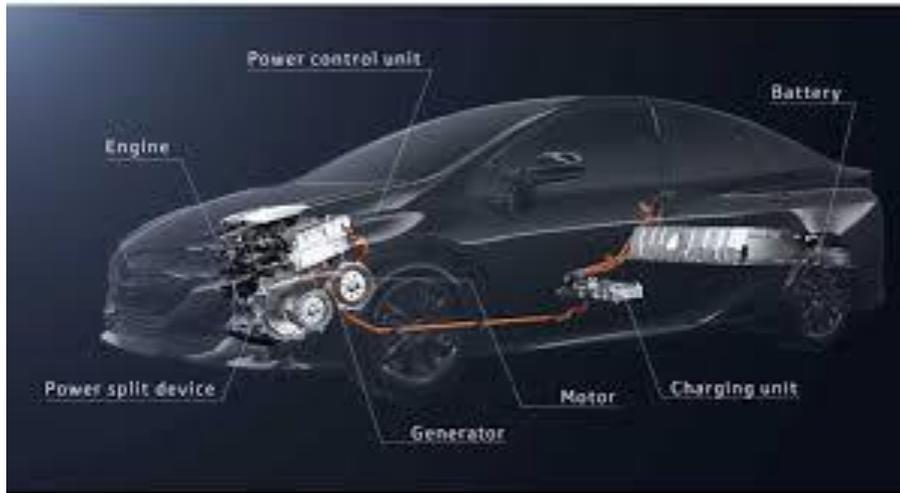
# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

### Baterías Ni-MH

Las baterías Ni-MH han tomado relevancia, imponiéndose como una de las más usadas en HEV como el Toyota Prius, Honda Civic Hybrid, y otros.

- Toyota implementó el uso de baterías Ni-MH en 1997 en su modelo Prius.

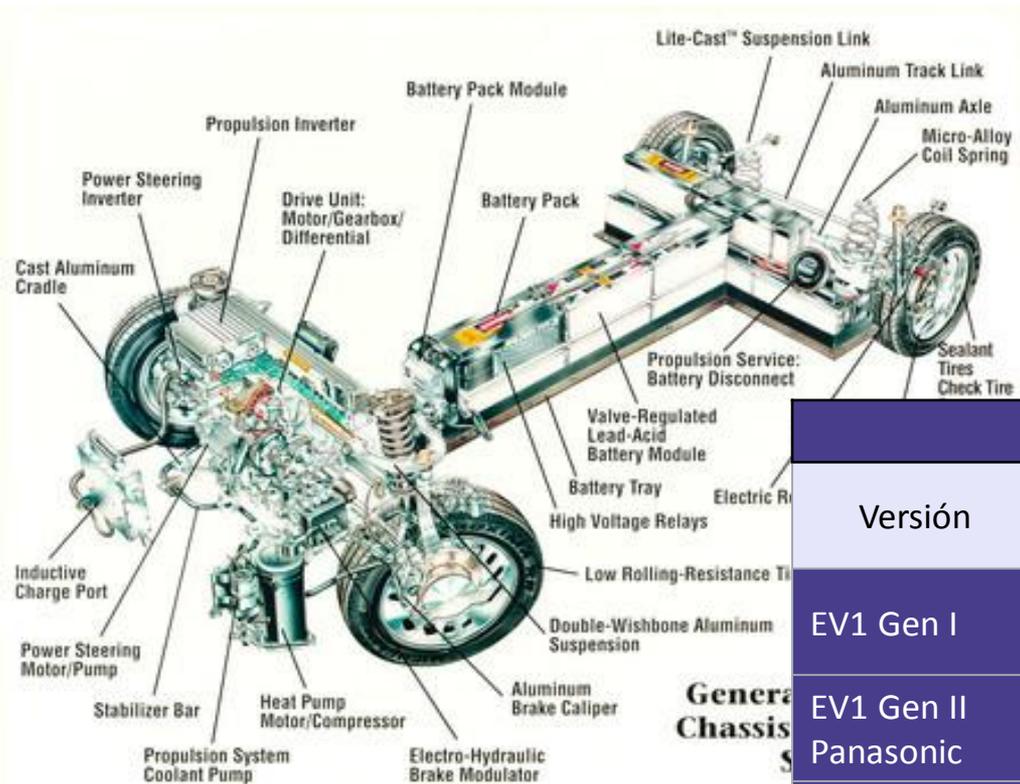


# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Níquel*

### Baterías Ni-MH

- En 1999 también lo hizo Chevrolet en su modelo EV1 GEN II (antes había utilizado baterías Plomo-ácido).



GM EV1				
Versión	Tipo batería	Capacidad (kWh)	Autonomía	Peso (kg)
EV1 Gen I	Ácido y plomo	16,5	113 km	594
EV1 Gen II Panasonic	Ácido y plomo	18,7	161 km	---
EV1 Gen II Ovonic	NiMH	26,4	257 km	481

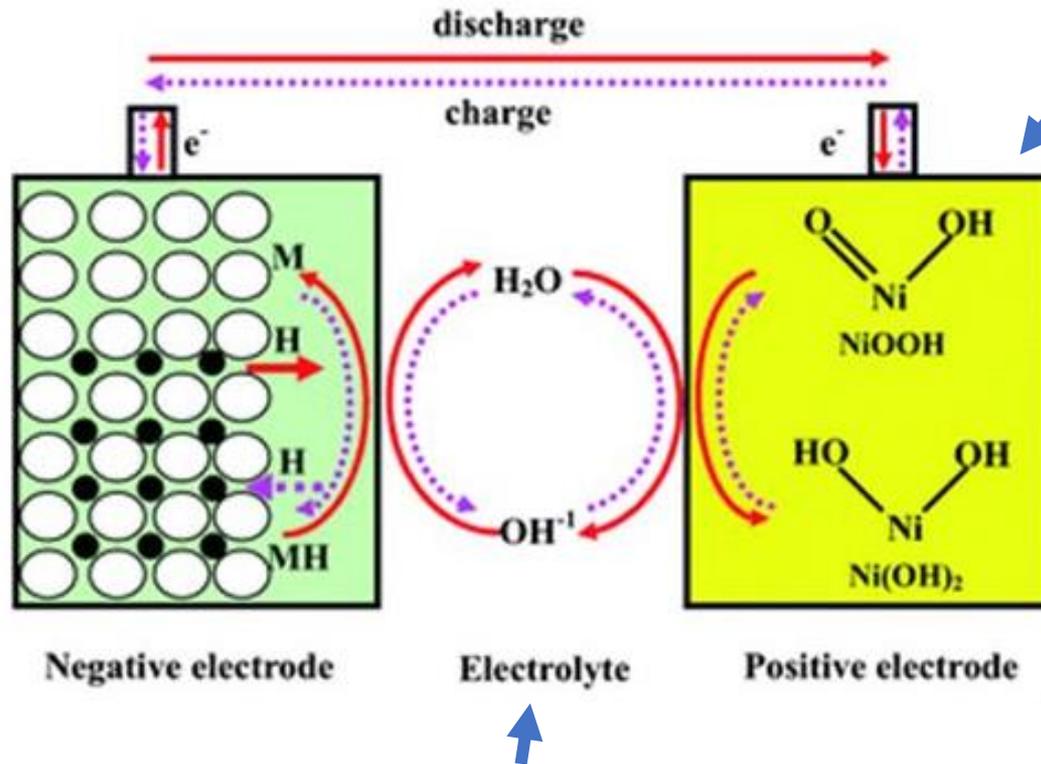
# Baterías traccionarias

## *Baterías Níquel-MH*

- Electrodo negativo: metal hidrurado donde se almacena el hidrógeno
  - (cargado: MH / descargado: M)

- Electrodo positivo: compuesto de níquel oxihidróxido (NiOOH)
  - (cargado: NiOOH / descargado: Ni(OH)<sub>2</sub>)

El material activo en el electrodo negativo es el hidruro metálico (MH), el cual absorbe y desorbe el hidrógeno.

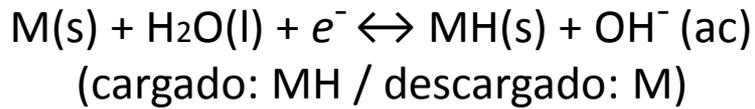


- Electrolito: KOH con un separador hecho típicamente de tela no tejida de polietileno (PE) / polipropileno (PP)

# Baterías traccionarias

## Baterías Níquel-MH

### Electrodo negativo

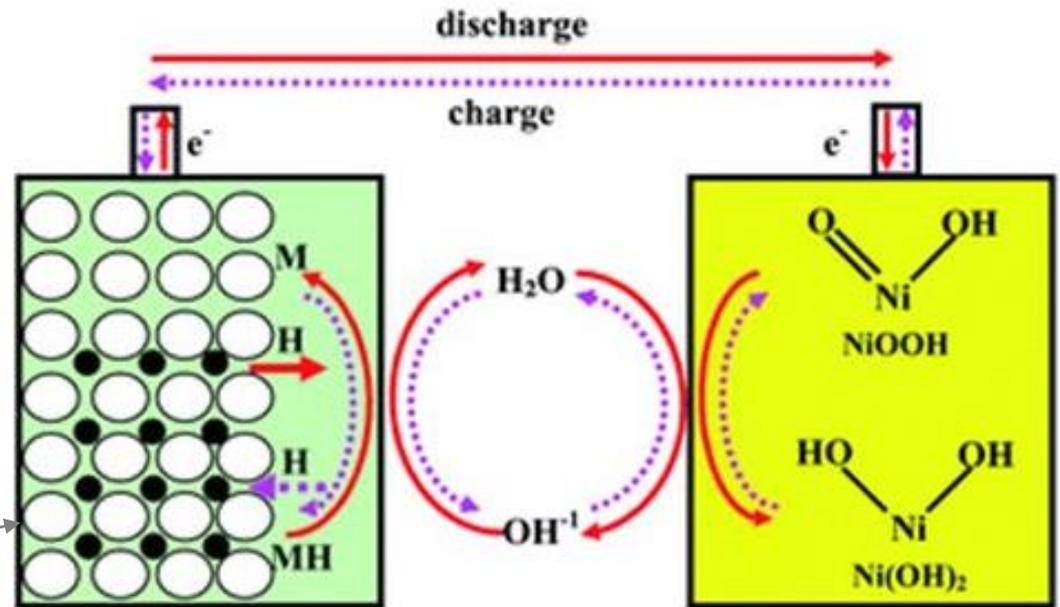


“→” proceso de carga

“←” proceso de descarga

El metal M en el electrodo negativo es un compuesto intermetálico AB<sub>2</sub> o AB<sub>5</sub>.

### Reacciones electroquímicas durante la carga y descarga



(cargado: NiOOH / descargado: Ni(OH)<sub>2</sub>)



### Electrodo positivo

# Baterías traccionarias

## *Baterías Níquel-MH*

### **Ventajas**

- Tamaños de celda flexibles de 0,3 a 250Ah.
- Operación segura a voltajes elevados (200-320 V)
- Energía y potencia volumétrica adecuada para VH&E
- Fácil de armar en serie y paralelo.
- Tolerante a la sobrecarga y sobredescarga.
- Libre de mantenimiento.
- Circuitos de carga y control electrónico simples y económicos.
- Materiales ecológicamente aceptables y reciclables hasta un 97%.
- Son seguras

### **Desventajas**

- Alto costo (300-600 USD/kW/h)
- Tienen efecto memoria
- Son exotérmicas durante la descarga
- Tienen baja eficiencia (~70%)
- Producción de gas durante sobrecarga o sobredescarga
- Atodescarga 5-20% al mes

### **Algunos de sus valores característicos son:**

Energía específica	40-100 Wh/kg
Potencia específica	~1000 W/kg
Tensión de celda	1.2 V
Eficiencia	~70%
Número de ciclos	~2.500@80%DOD

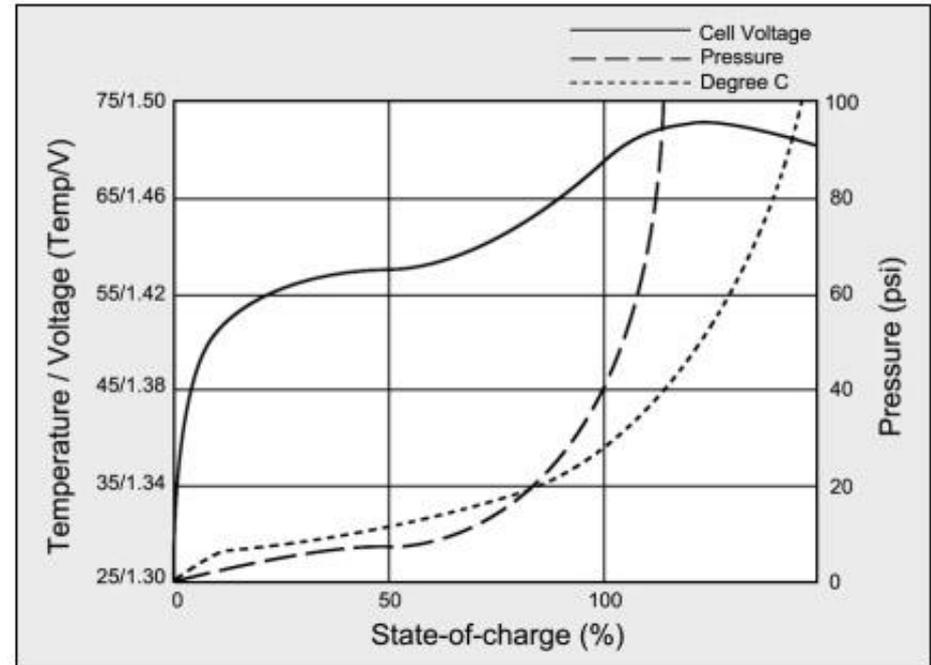
# Baterías traccionarias

## *Baterías Níquel-MH*

### Algoritmos de carga

Las baterías Ni-MH pueden **aceptar altos ratios** de carga **hasta** alcanzar un **SOC = 80%**. A partir del 80%, la velocidad de carga debe ser reducida.

En la práctica, esto equivale a una **etapa a corriente constante elevada (HCC)** hasta alcanzar un límite de tensión (el cual se asocia a un SOC). En ese punto, la **corriente desciende** y la **tensión aumenta más lentamente** hasta alcanzar un nuevo límite.

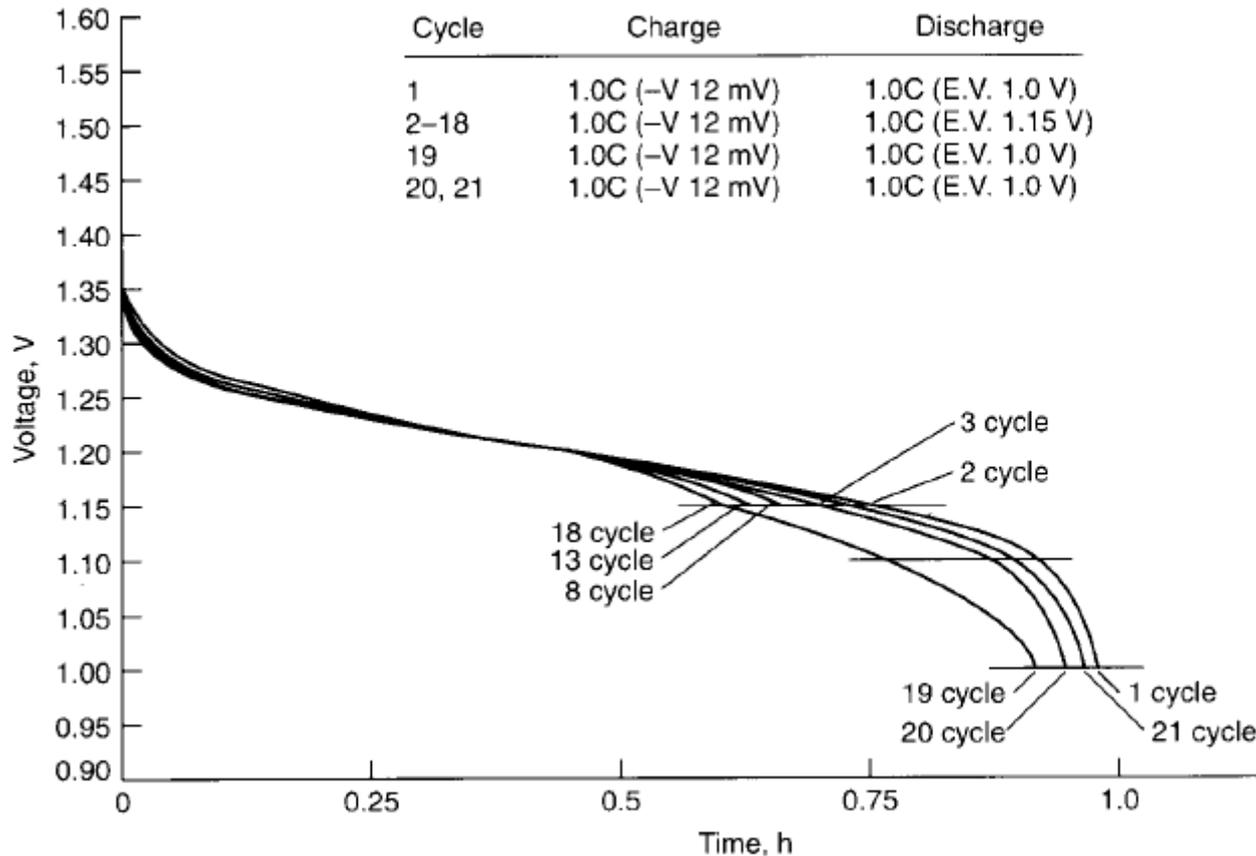


Los **niveles de tensión en la segunda etapa de recarga, son variables**, basados en la temperatura y corriente de celda.

# Baterías traccionarias

## Baterías Níquel-MH

### Efecto memoria:



**Caída de voltaje y pérdida de *capacidad* como resultado del funcionamiento de la celda en un *rango* de carga y descarga **no apropiado**.**

*Ocurre cuando una celda o batería Ni-MH "corta" su proceso de descarga a una tensión muy elevada para su rango óptimo de funcionamiento.*

# Baterías traccionarias

## *Baterías Níquel-MH*

### **Efecto memoria:**

- Si bien el efecto memoria es **comprobable a nivel de laboratorio** y visible en algunas aplicaciones, generalmente se trata de depresiones en tensión y pérdidas de capacidad que **el usuario habitualmente no experimentará**, por tratarse apenas de una pequeña fracción respecto a los valores originales.
- Un **error común en el diagnóstico** puede ser **atribuir al “efecto memoria”** un mal desempeño de una celda, cuando la **causa real de la falla puede ser otra** (problemas durante la recarga -como la sobrecarga- o problemas de humedad o temperaturas extremas).
- En general, los **efectos producidos por el “efecto memoria” pueden ser corregidos** si se cicla adecuadamente la celda, usualmente alcanzando profundidades de descarga mayores que favorezcan la recuperación.

# Baterías traccionarias

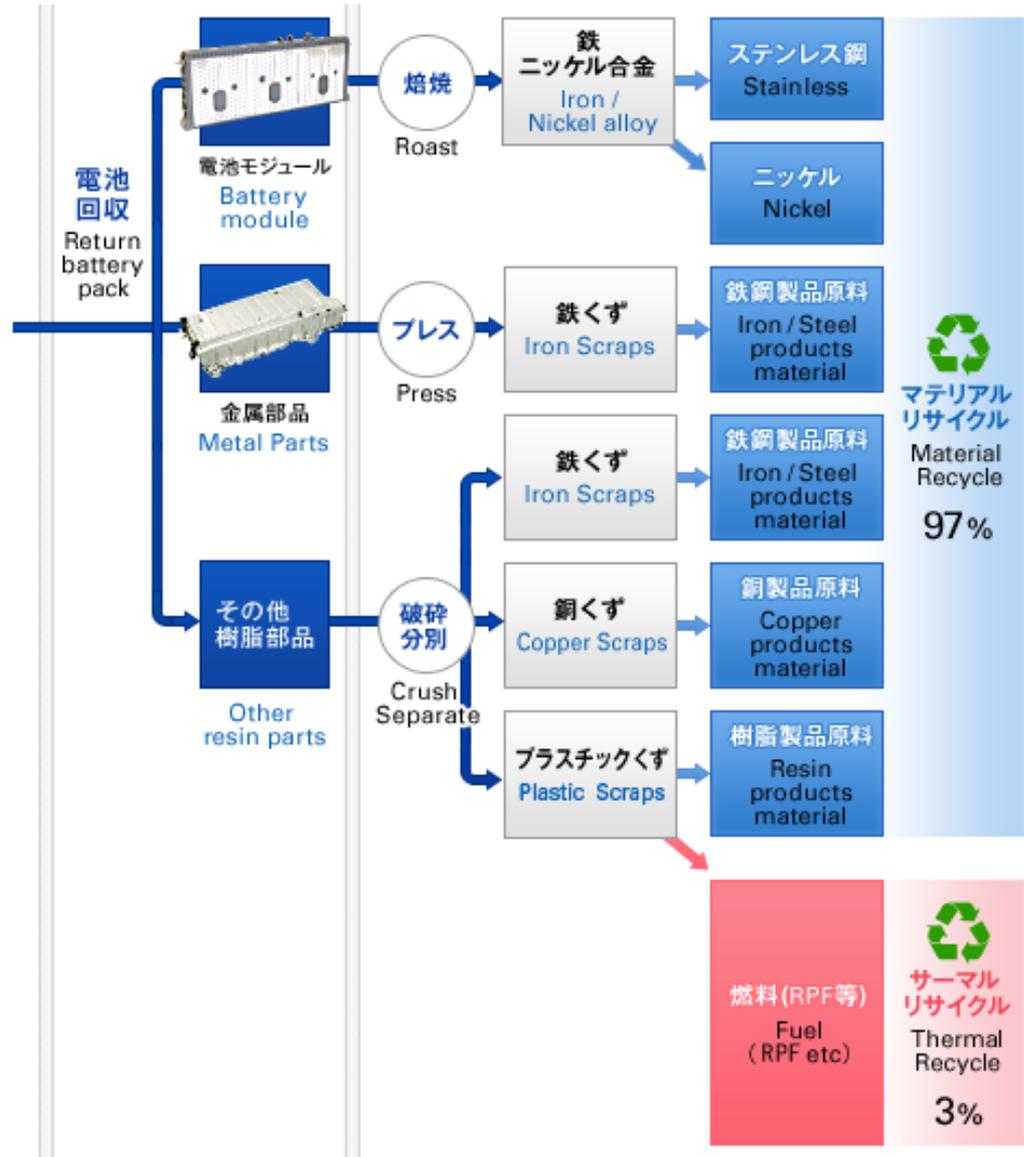
## Baterías Níquel-MH

### Reciclaje

El 97% de estas baterías se recupera, mientras que el 3% se convierte en combustible RPF (Refuse derived paper and plastics densified Fuel)



電池の取外し・回収  
Dismount battery pack



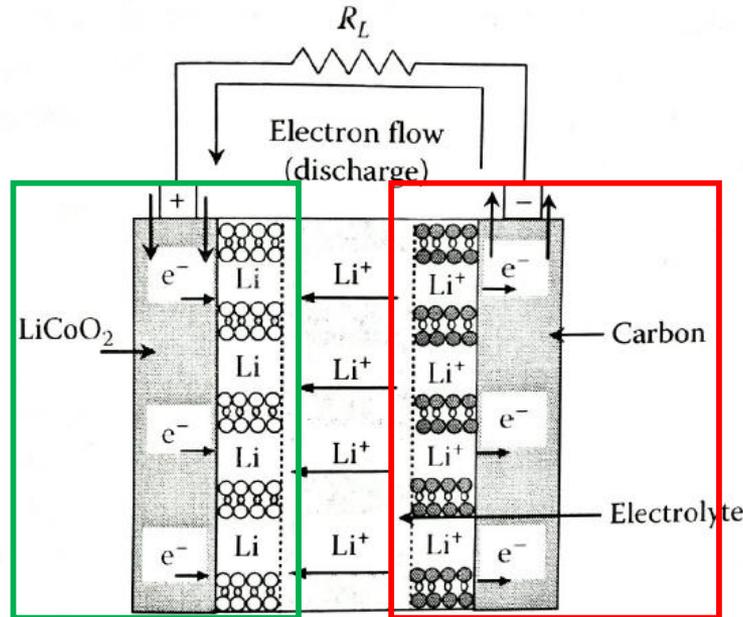
# Baterías traccionarias

## Batería Li-ion

El Litio tiene muy **alto potencial electroquímico** de reducción en relación al  $H_2$  (3.045V) y muy **baja masa atómica**, lo que lo ha hecho muy atractivo para uso en baterías.

Es **muy inestable** y reacciona con facilidad en presencia de **agua o humedad**, lo que ha representado un desafío importante para su utilización.

En la década de 1970 se encontró que el litio podía ser **intercalado en una red cristalina** de óxido de Niquel o de Cobalto para ser usado como material del cátodo.



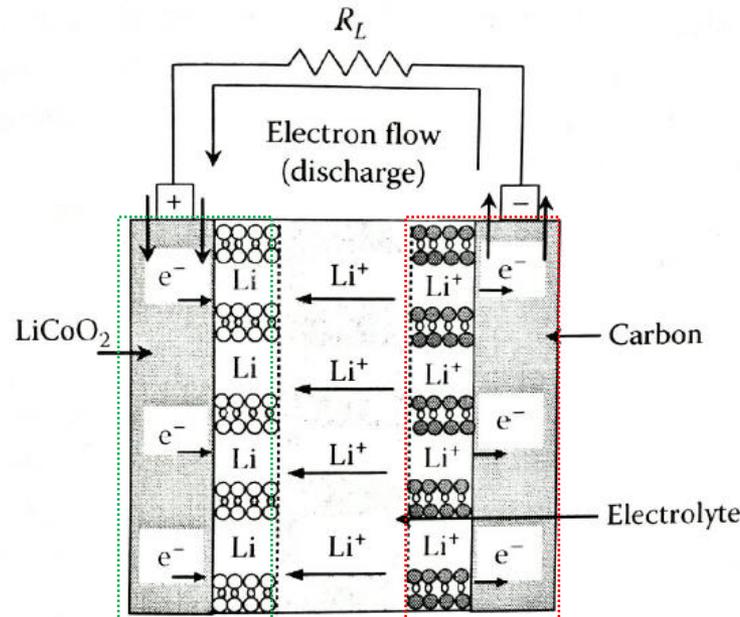
El litio metálico (inestable) como material para el ánodo fue sustituido por **Carbono con intercalación de iones de litio**, en el cual los iones de litio se intercalan.

Desde entonces, los óxidos de metales de transición han sido utilizados ampliamente como material de electrodos.

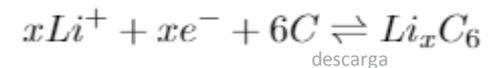
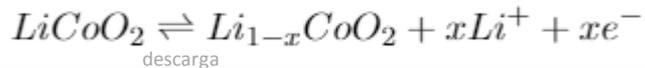
# Baterías traccionarias

## Batería Li-ion

En el electrodo positivo los iones  $\text{Li}^+$  son incorporados **alojándose** en el material compuesto **durante la descarga.**



En el electrodo negativo, los **iones de litio son liberados** durante la descarga, moviéndose a través del electrolito hacia el electrodo positivo.



Algunos valores típicos de la celda Li-ion:

Energía específica	90-160 Wh/kg
Potencia específica	200-350 W/kg
Tensión de celda	3.6 V
Eficiencia	>90%
Número de ciclos	>1000@80%DOD

# Baterías traccionarias

## *Batería Li-ion*

### ***Ventajas***

- Alta energía específica
- Elevada tensión de celda
- Elevada eficiencia
- Elevada vida útil (ciclos)
- Componentes reciclables
- Buen desempeño a alta temperatura
- Baja autodescarga

### ***Desventajas***

- Muy sensible a sobretensión
- Muy sensible a sobredescarga
- Existe riesgo de ignición como consecuencia del daño en celdas
- La recarga a baja temperatura puede ocasionar degradación de las celdas

Con el fin de exaltar las ventajas y minimizar las desventajas, han sido desarrollados distintos ***materiales empleados tanto en el ánodo como en el cátodo*** que han permitido mejoras sustantivas en varios aspectos.

Los materiales desarrollados para ser utilizados principalmente en el cátodo adquieren su ***denominación en función de los materiales que los componen***.

# Baterías traccionarias

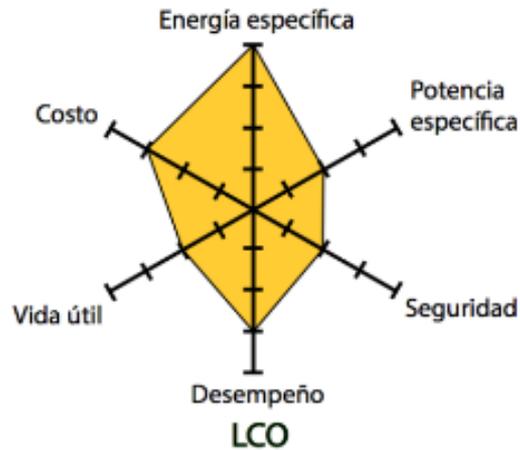
## Batería Li-ion

### Compuestos empleados en los electrodos

### Ventajas y desventajas de la utilización de distintos compuestos

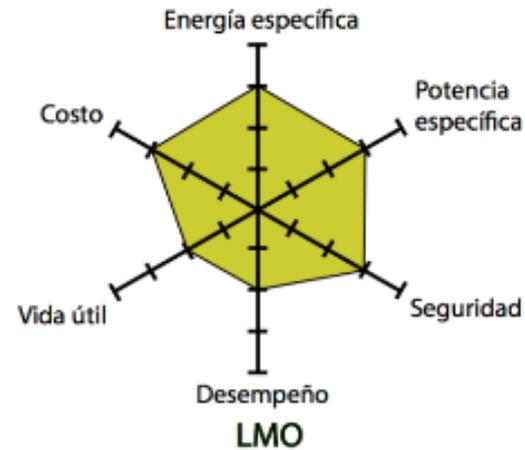
#### LCO

Compuesta por un ánodo de grafito ( $C_6$ ) y cátodo de  $LiCoO_2$



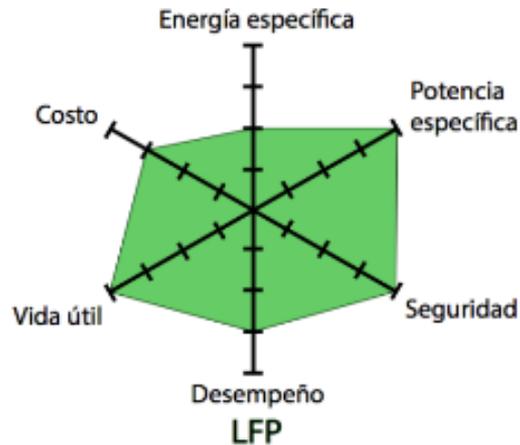
#### LMO

Compuesta por un ánodo de grafito ( $C_6$ ) y cátodo de  $LiMnO_2$



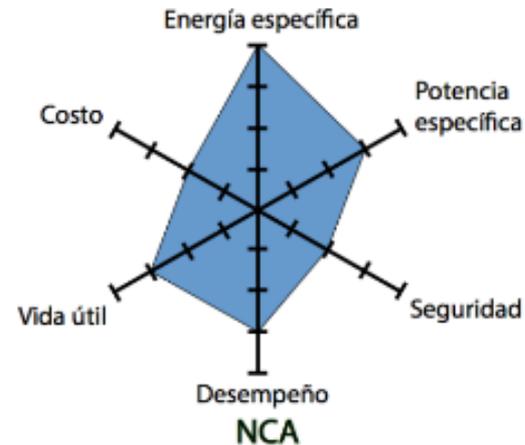
#### LFP

Compuesta por un ánodo de grafito ( $C_6$ ) y cátodo de  $LiFePO_4$



#### NCA

Compuesta por un ánodo de grafito ( $C_6$ ) y cátodo de  $LiNiCoAlO_2$

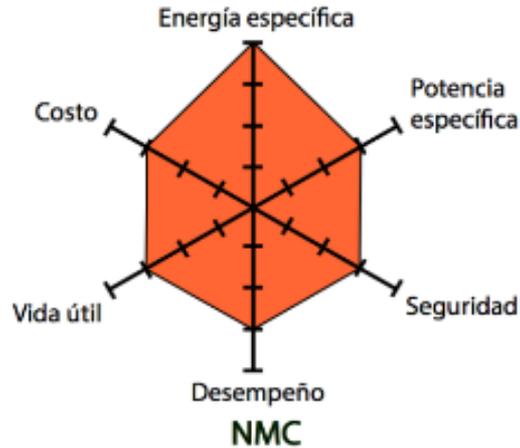


# Baterías traccionarias

## Batería Li-ion

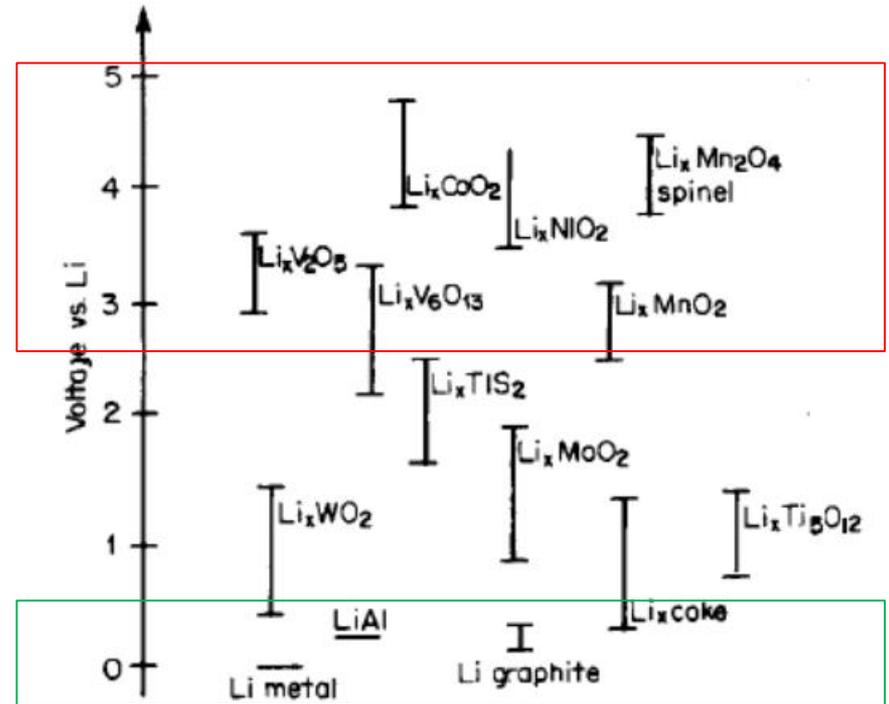
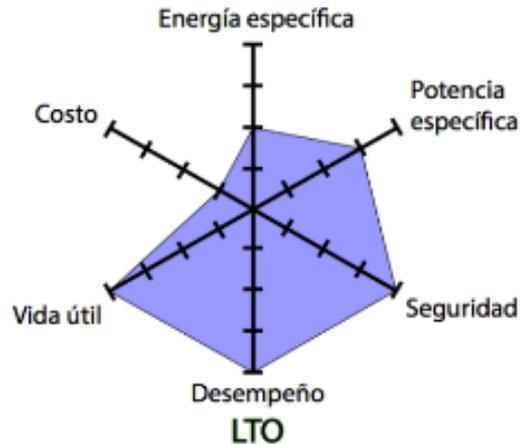
### NMC

Compuesta por un ánodo de grafito ( $C_6$ ) y cátodo de  $LiNiMnCoO_2$



### LTO

Compuesta por un **ánodo**  $LiTi_5O_{12}$  y cátodo de algún otro óxido de metal de transición



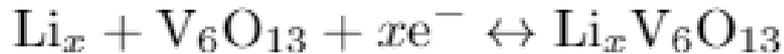
Típicamente, materiales como carbono litiado ( $Li_xC_6$ ) o LTO han sido empleados como materiales para el electrodo negativo mientras que los restantes óxidos metálicos como el NMC son utilizados en el electrodo positivo

# Baterías traccionarias

## *Batería Li-Polímero*

La celda Li-P ha evolucionado a partir del desarrollo de electrolitos de estado sólido, como **resultado de investigaciones** sobre **conducción iónica en polímeros**.

**Reacción global** (→descarga):



### **Ventajas:**

- Tienen **energía específica** y **potencia específica muy alta**.
- El electrolito polímero **tolera temperaturas más elevadas** que otros electrolitos (>60°).
- Las **formas planas** de las celdas permiten ajustar la disposición para optimizar el espacio en el VH o VE.
- Es más **segura** en caso de accidente.
- Muy **baja autodescarga** (0,5% por mes)

Estas baterías son consideradas de estado sólido ya que **sus electrolitos son polímeros sólidos**.

El **electrodo positivo** más promisorio es el **Óxido de Vanadio (V<sub>6</sub>O<sub>13</sub>)**, el cual intercala hasta 8 iones de Litio por cada molécula.

### **Desventaja:**

- **Desempeño** relativamente **pobre a bajas temperaturas** debido a mala conductividad iónica.

# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Sodio*

### *Batería Sodio-Sulfuro (NaS)*

De forma similar al Litio, el sodio tiene un **potencial de reducción estándar elevado** (2.71V) y **baja masa atómica** (23.0), lo que lo convierte en un elemento atractivo para construcción de baterías.

#### **Principales limitaciones:**

- **Temperatura** de operación  $\sim 300^{\circ}\text{C}$  (requeriría control de temperatura y aislación térmica).
- Tienen problemas cuando alcanzan la **carga completa**, desarrollando resistencias internas elevadas.
- Las **reacciones internas son exotérmicas** y el riesgo de inflamación o explosión es muy elevado, lo cual ha sido mitigado implementando diseños eficientes.

El Sodio es **abundante** en la corteza terrestre y su **costo** de adquisición es **reducido**.

*El Sulfuro (apto para electrodo positivo) también existe en la naturaleza de forma **abundante y económica**.*

Los **electrolitos acuosos no son aptos** para este tipo de celdas ya que reaccionan con el Sodio. En su lugar se ha utilizado Beta-alumina ( $\text{NaAlO}_2$ ).

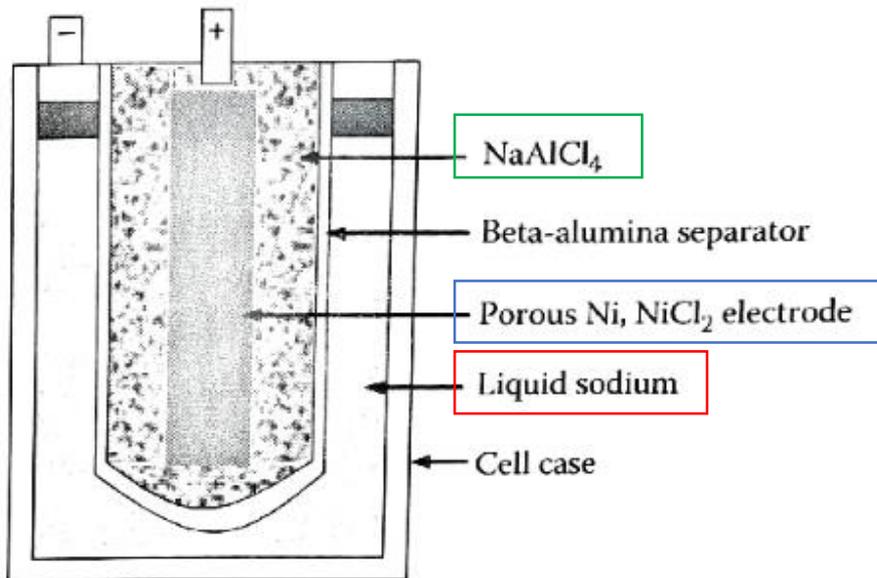
**Debido a estas limitaciones, y al desarrollo en su lugar de la batería SMC, la batería NaS se ha discontinuado**

# Baterías traccionarias

## *Baterías basadas en Sodio*

### *Batería Sodio-Metal-Cloruro (ZEBRA)*

Se trata de una derivación de la batería Sodio-Sulfuro en la que se han mejorado los inconvenientes por sobrecarga



Una segunda capa de electrolito (NaAlCl<sub>4</sub>) es introducida para mejorar el contacto iónico con el electrodo positivo

El electrodo positivo está compuesto de Cloruro de Níquel (NiCl<sub>2</sub>)

El electrodo negativo es de sodio líquido, al igual que en la celda NaS

La principal limitación para su uso es la **temperatura** de operación **elevada** (~300°C), lo que requeriría control de temperatura y aislación térmica

# Baterías traccionarias

## *Baterías Metal-Aire*

Representan un área de investigación y desarrollo completamente diferente ya que los procesos **no son reversibles** y **no pueden ser recargadas** invirtiendo el sentido de la corriente.

Los materiales de los electrodos y electrolito son considerados en consecuencia una especie de **“combustible”**.

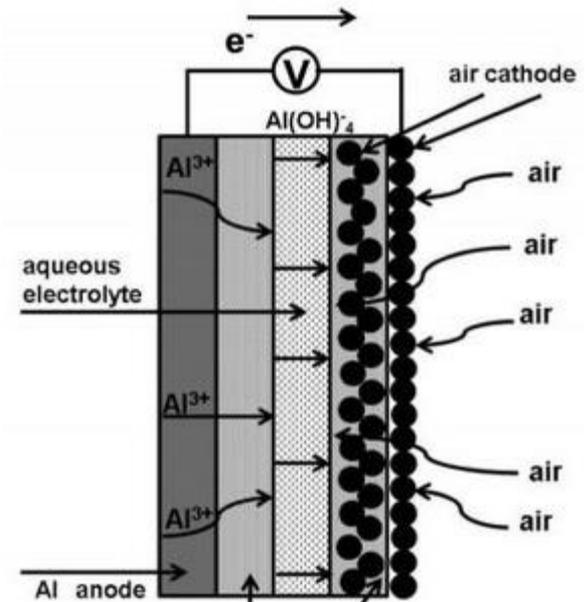
El **electrolito** también debe ser **reemplazado** con cierta frecuencia.

## *Baterías Aluminio-Aire*

En la celda Al-O<sub>2</sub> el **electrodo negativo** está formado por **metal Aluminio** que ve reducido su espesor conforme la celda se descarga.

El **electrodo positivo** está compuesto de una **mallá metálica porosa** sobre la cual es depositada una capa de carbón activado y PTFE que permiten el **ingreso de O<sub>2</sub>**.

El **electrolito es una solución alcalina**, usualmente KOH, que debe ser reemplazada dada la contaminación con hidróxido de Aluminio Al(OH)<sup>-</sup>.



**La baja potencia específica torna inviable el uso de baterías Al-O<sub>2</sub> en movilidad eléctrica (20kW/2tons)**

# Baterías traccionarias

## *Baterías Zinc-Aire*

Es similar a la batería Aluminio-Aire pero tiene **mejor** desempeño en varios aspectos, entre ellos la **potencia específica**, lo que la convertiría en una batería apta para movilidad eléctrica.

### *Características celda Zn-O<sub>2</sub>*

Specific energy	230 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	270 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	105 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	1.2 V

### *Características celda Al-O<sub>2</sub>*

Specific energy	225 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	195 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	10 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	1.4 V

La estructura es similar a Al-O<sub>2</sub>, con **Zinc sólido como ánodo consumible**, una solución alcalina como electrolito, y un electrodo positivo de material poroso.

*Como principales inconvenientes prácticos se tiene:*

- La necesidad de **reemplazar** el **ánodo** consumible para realizar una “recarga”.
- La necesidad de **reemplazar** el **electrolito** para realizar una “recarga”.

*Como principales atractivo:*

- Ser reciclables.
- Tener muy alta energía específica.

## Baterías traccionarias

### *Resumen de propiedades de baterías para VH&E*

Battery Type	Specific Energy (W h/kg)	Specific Power (W/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle Life
Lead-acid	35–50	150–400	80	500–1000
Nickel-cadmium	30–50	100–150	75	1000–2000
Nickel-metal hydride	60–80	200–400	70	1000
Aluminum-air	200–300	100	<50	Not available
Zinc-air	100–220	30–80	60	500
Sodium-sulfur	150–240	230	85	1000
Sodium-nickel-chloride	90–120	130–160	80	1000
Li-polymer	150–200	350	Not available	1000
Li-ion	90–160	200–350	>90	>1000

235

470

No

1000

USABC Goals for ADVANCED HIGH-PERFORMANCE  
BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE (EV) APPLICATIONS

# Supercondensadores

# Supercondensadores

¿Qué deben cumplir los SC para movilidad eléctrica?

U.S. Advanced Battery Consortium LLC

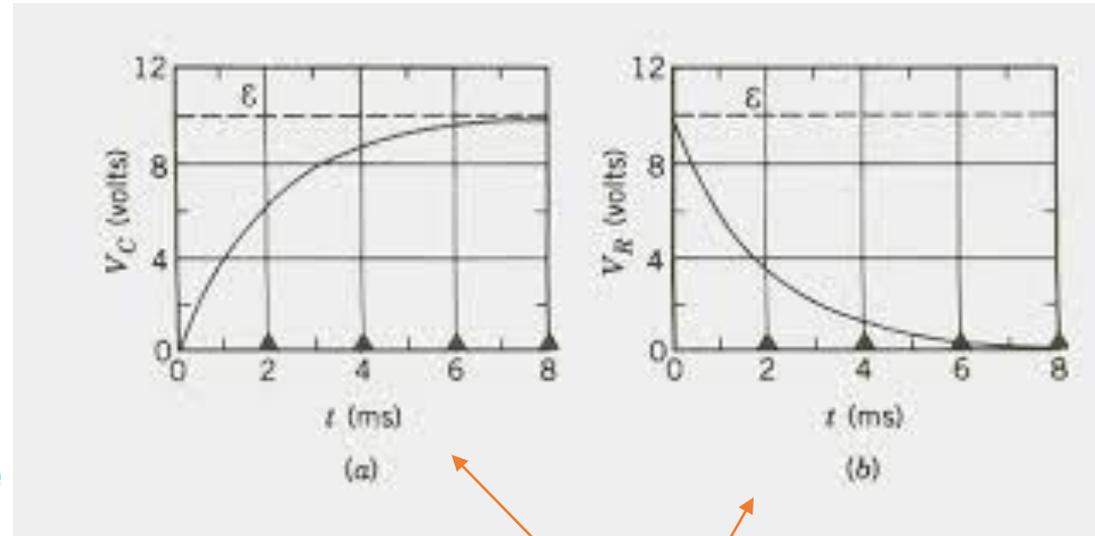
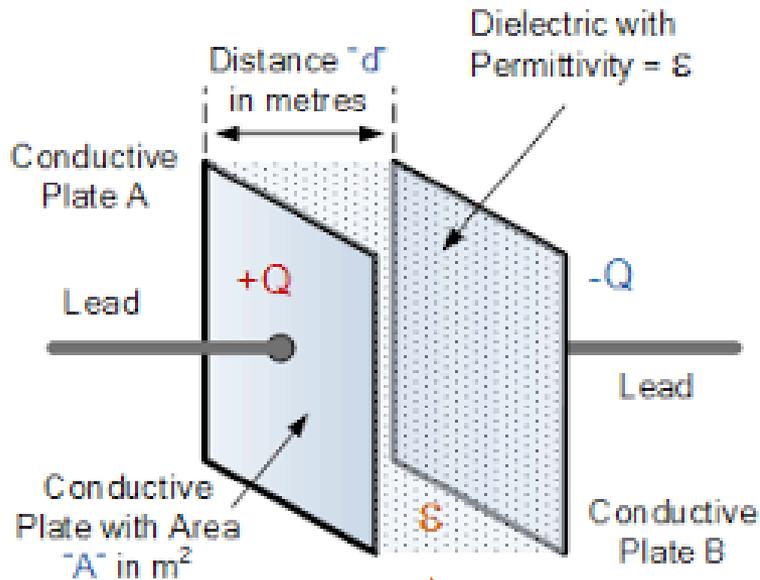


System Attributes	12V Start-Stop (TSS)		42V Start-Stop (FSS)		42V Transient Power Assist (TPA)	
Discharge Pulse	4.2 kW	2s	6 kW	2s	13 kW	2s
Regenerative Pulse	N/A		N/A		8 kW	2s
Cold Cranking Pulse @ -30°C	4.2 kW	7 V Min.	8 kW	21 V Min.	8 kW	21 V Min.
Available Energy (CP @1kW)	15 Wh		30 Wh		60 Wh	
Recharge Rate (kW)	0.4 kW		2.4 kW		2.6 kW	
Cycle Life / Equiv. Road Miles	750k / 150,000 miles		750k / 150,000 miles		750k / 150,000 miles	
Cycle Life and Efficiency Load Profile	UC10		UC10		UC10	
Calendar Life (Yrs)						
Energy Efficiency on UC10 Load Profile (%)						
Self Discharge (72hr from Max. V)						
Maximum Operating Voltage (Vdc)						
Minimum Operating Voltage (Vdc)						
Operating Temperature Range (°C)						
Survival Temperature Range (°C)						
Maximum System Weight (kg)						
Maximum System Volume (Liters)						
Selling Price (\$/system @ 100k/yr)						

**Densidad energética: 3 Wh/kg**  
**Densidad de potencia: 650 W/kg**  
**Temperatura de operación: -30 a +52°C**  
**Ciclos de vida: 750,000 cycles**

# Supercondensadores

## Condensadores

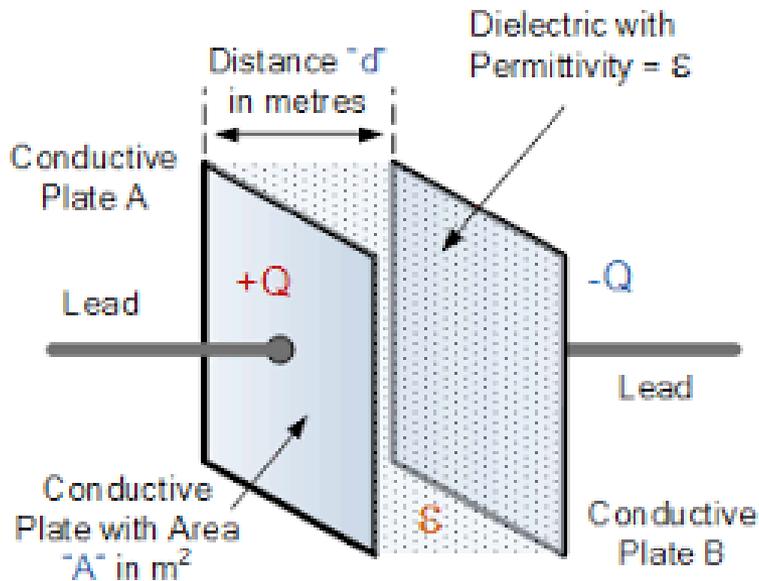


Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electroestáticas, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico.

Pueden 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.

# Supercondensadores

## Capacidad eléctrica



- Se define como la cantidad de carga almacenada [Culombios], por unidad de tensión en sus terminales [Voltios].
- Su unidad es el Faradio.

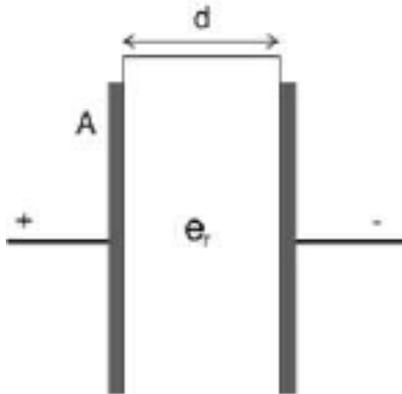
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

- La capacidad eléctrica depende proporcionalmente de la constante dieléctrica y del área efectiva, e inversamente de la distancia entre placas.

# Supercondensadores

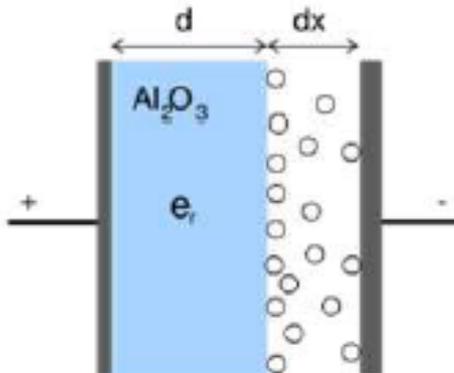
## Tipos de condensadores

### Electrostático



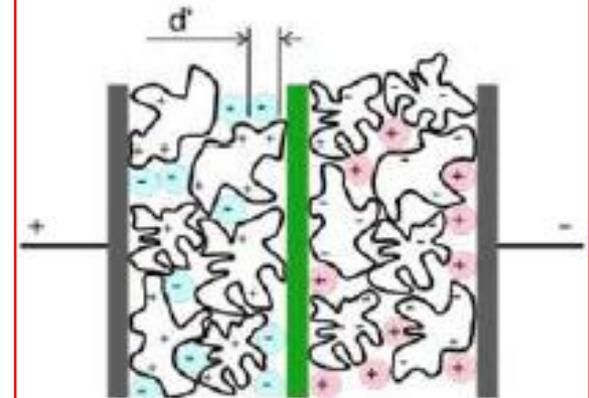
Su capacidad eléctrica es de picofaradios a nanofaradios ( $10^{-12}$  a  $10^{-9}$  Faradios)

### Electrolítico



Su capacidad eléctrica es de nanofaradios a milifaradios ( $10^{-9}$  a  $10^{-6}$  Faradios)

### Electroquímico

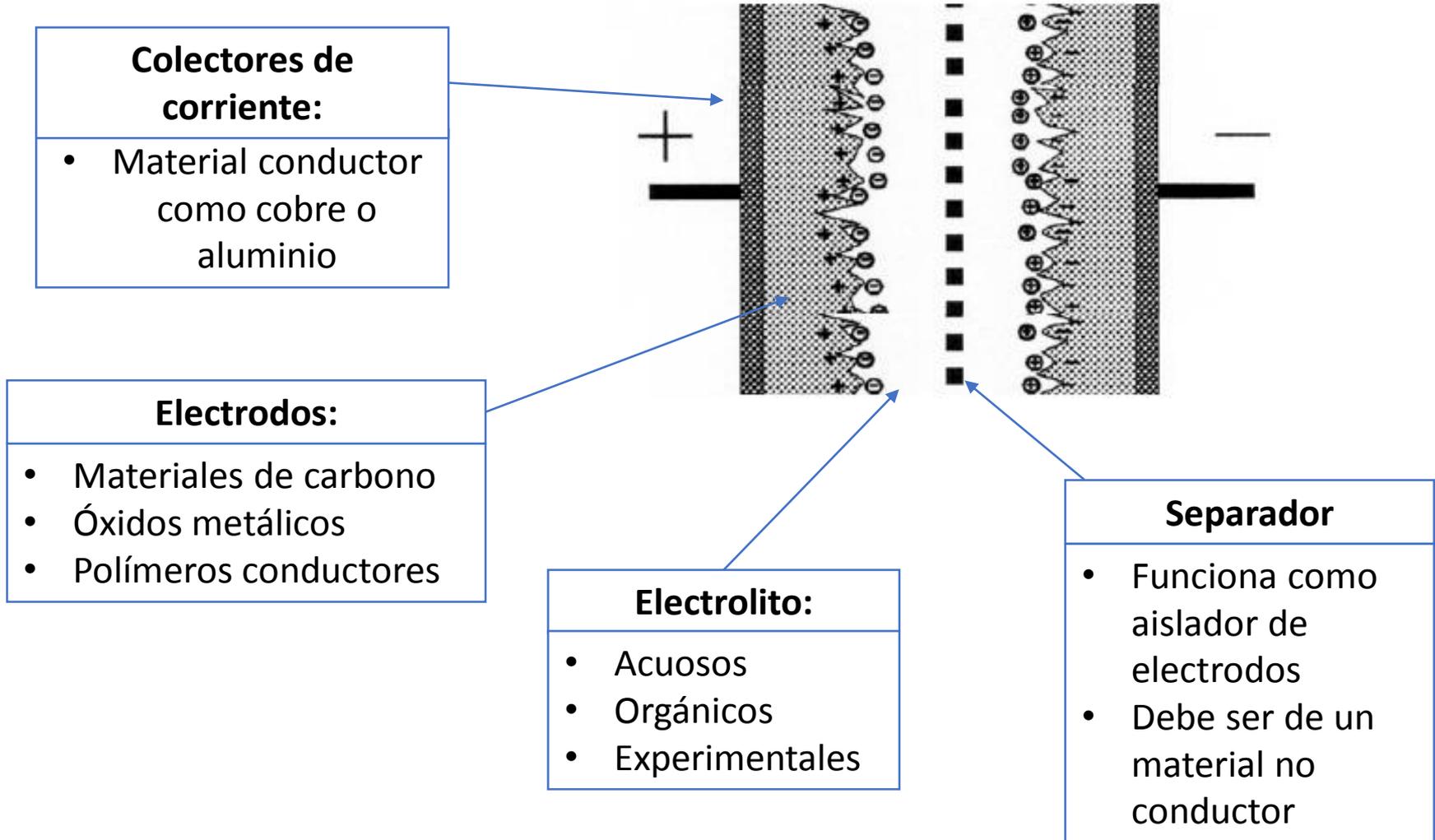


Su capacidad eléctrica es de Faradios, **pudiendo llegar a miles de Faradios**

***Estos son los SUPERCONDENSADORES O ULTRACAPACITORES***

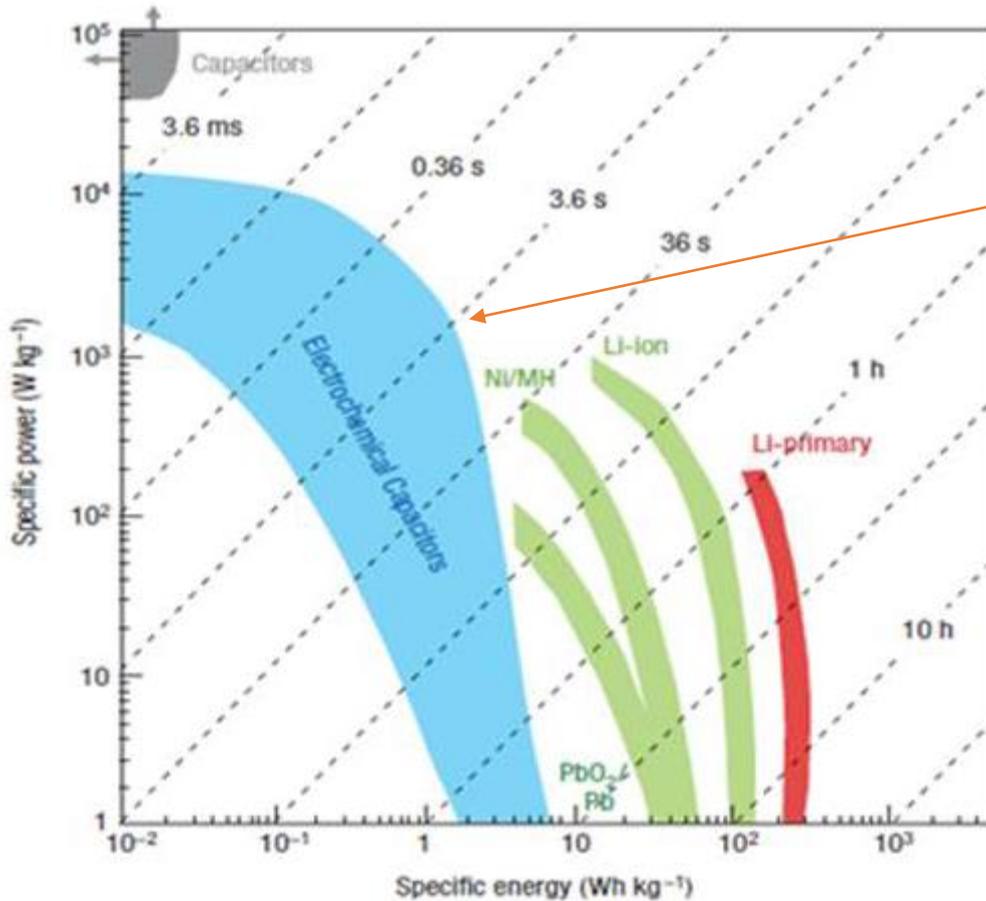
# Supercondensadores

## Esquema básico de un supercondensador



# Supercondensadores

## Plot de Ragone y energía almacenada



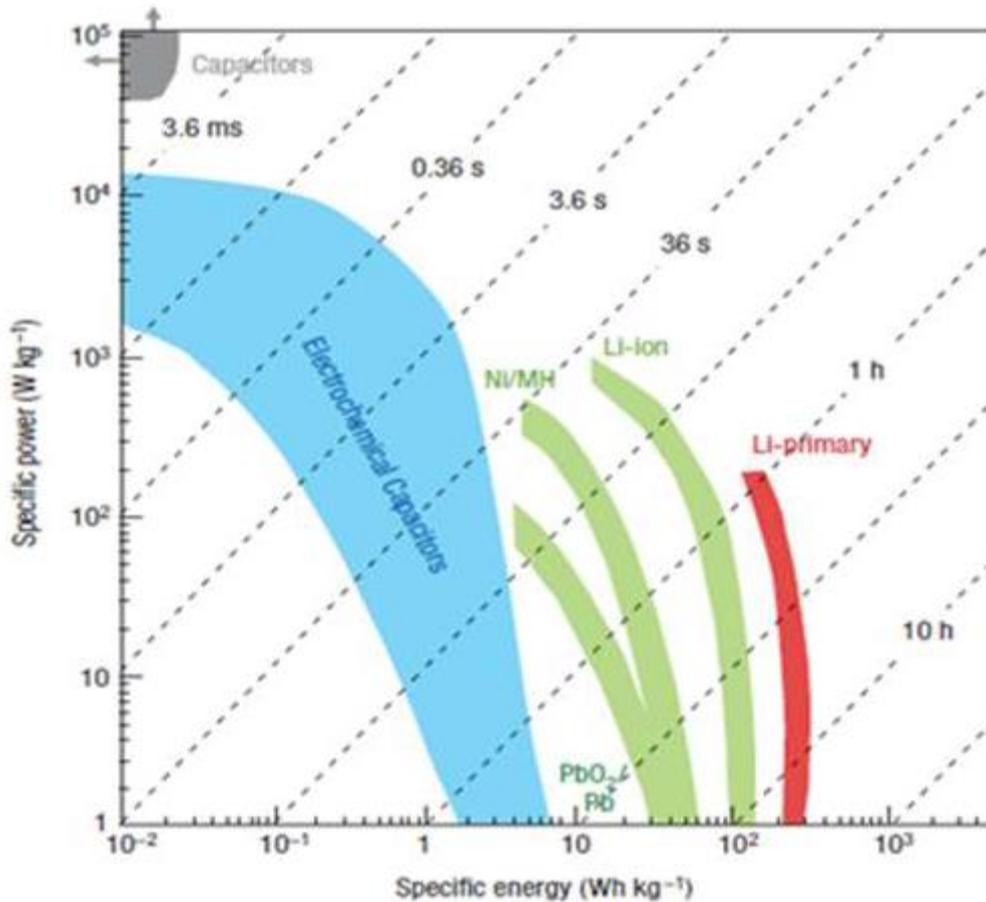
Los supercondensadores se caracterizan por su elevada potencia específica pero como contrapartida tienen baja energía específica

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

La energía almacenada [Joules] es proporcional a la capacidad eléctrica y al cuadrado del voltaje de operación

# Supercondensadores

## Plot de Ragone y energía almacenada



La capacidad eléctrica está determinada por el material del electrodo y la geometría del SC.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

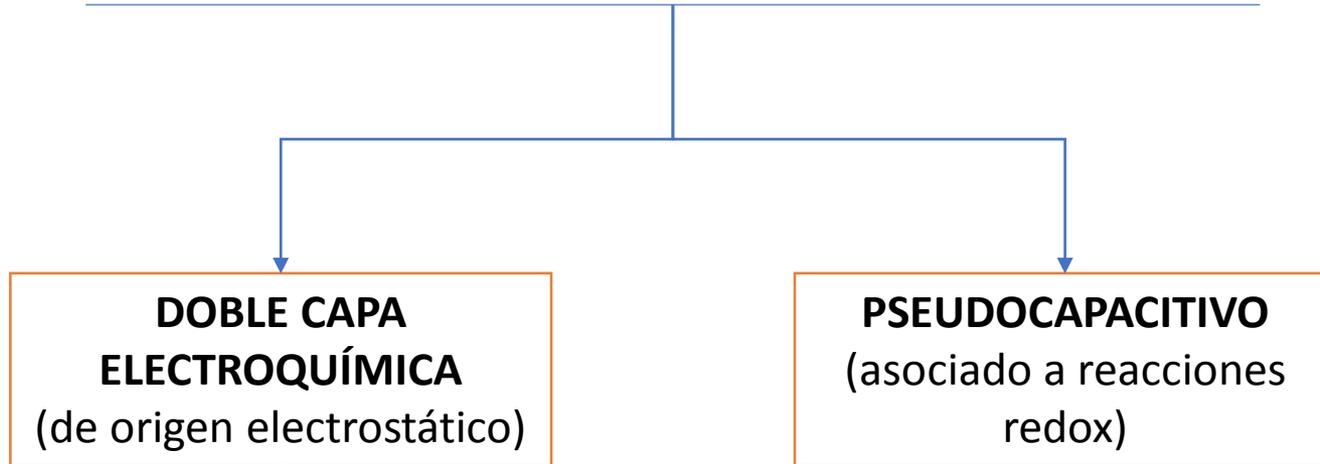
$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

La tensión de funcionamiento está determinada por el electrolito utilizado

***El aumento en la energía específica almacenada (Wh/kg) representa el principal desafío en supercondensadores***

# Supercondensadores

## Mecanismos de almacenamiento de energía



Almacenamiento de cargas por mecanismo electrostático.

$$C_{DL} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

$C_{DL}$  = Capacidad eléctrica [Faradios]

$\epsilon_r$  = Constante dieléctrica del medio

$\epsilon_0$  = Permisividad del vacío

A = Área superficial del electrodo

d = Distancia de separación entre cargas

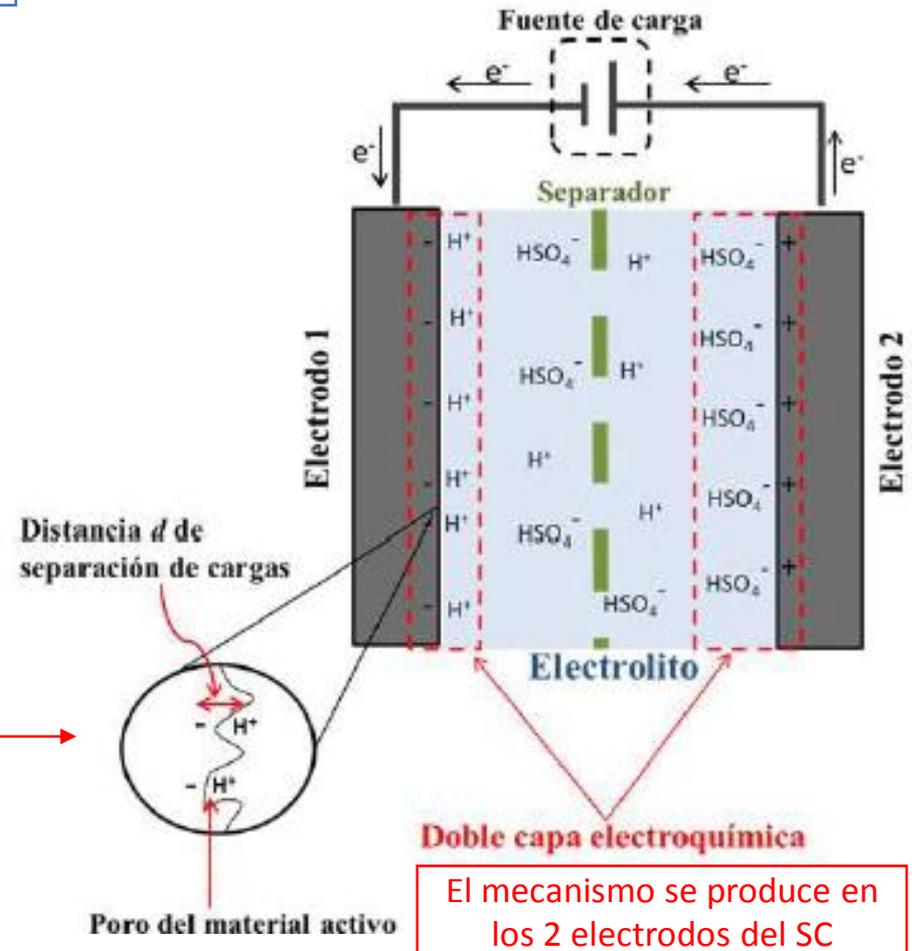
# Supercondensadores

## Mecanismos de almacenamiento de energía

**DOBLE CAPA  
ELECTROQUÍMICA**  
(de origen electrostático)

Almacenamiento de cargas  
por mecanismo electrostático.

$$C_{DL} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$



# Supercondensadores

## Mecanismos de almacenamiento de energía



**DOBLE CAPA  
ELECTROQUÍMICA**  
(de origen electrostático)

**PSEUDOCAPACITIVO**  
(asociado a reacciones  
redox)

- Transferencia electroquímica de carga debida a reacciones reversibles óxido-reducción, en una porción de la superficie del electrodo.



- A diferencia del mecanismo de doble capa, este mecanismo **no es** de origen electrostático.
- Los materiales de electrodos que participan en este tipo de mecanismo son en general los óxidos de metales (RuO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, etc.).

# Supercondensadores

## Materiales de los electrodos

Los más utilizados son:

- Materiales carbonosos
- Óxidos metálicos
- Poliméricos

Se busca que cumplan:

- Buena estabilidad electroquímica
- Adecuarse a diferentes formatos
- Ser fácilmente procesables
- Relativamente económicos

Para lo que se requiere:

- Elevada superficie específica
- Buena distribución de tamaño de poro y química superficial
- Conductividad eléctrica alta

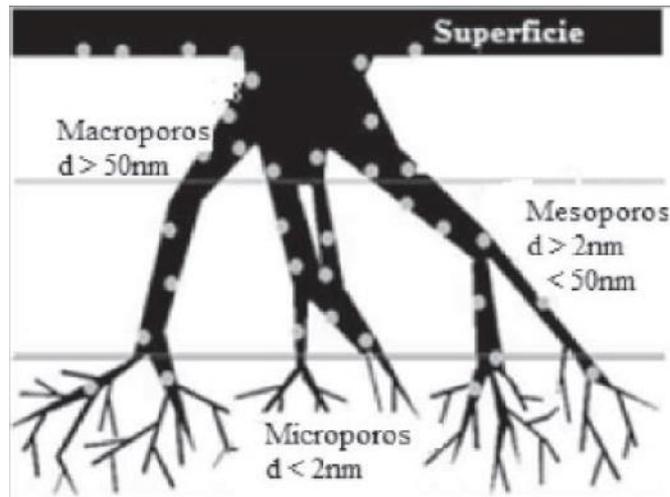
# Supercondensadores

## Materiales de los electrodos

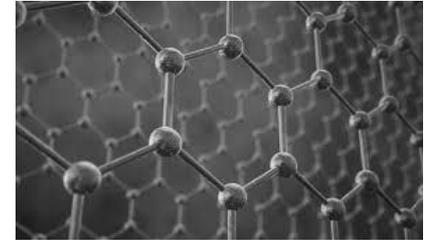
- **Materiales carbonosos**

- Tienen elevada área superficial específica (SSA) debido a su alta porosidad.
- La porosidad se genera mediante tratamientos químicos o físicos (mecanismos de activación del material)

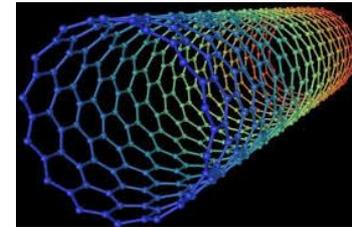
La porosidad del material es clave en el desempeño eléctrico (conductividad) y electroquímico (capacidad) del SC.



*Grafeno*



*Nanotubos de carbono (CNT)*



*Polvos*

*Telas e hilos de carbono*



*Algunos grupos funcionales de los carbones pueden participar en reacciones reversibles del tipo redox, lo que se asocia al mecanismo de pseudocapacitancia.*

# Supercondensadores

## Materiales de los electrodos

- **Óxidos metálicos**

- ***Favorecen*** la acumulación asociada al ***mecanismo pseudocapacitivo*** (reacciones redox).
- Son fácilmente procesables.
- Son materiales en general ***costosos*** (mucho más que los carbones).

- RuO<sub>2</sub>
- MnO<sub>2</sub>.xH<sub>2</sub>O
- Óxidos de hierro
- MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>
- Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>
- IrO<sub>2</sub>
- V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Metales de transición en su mayoría.

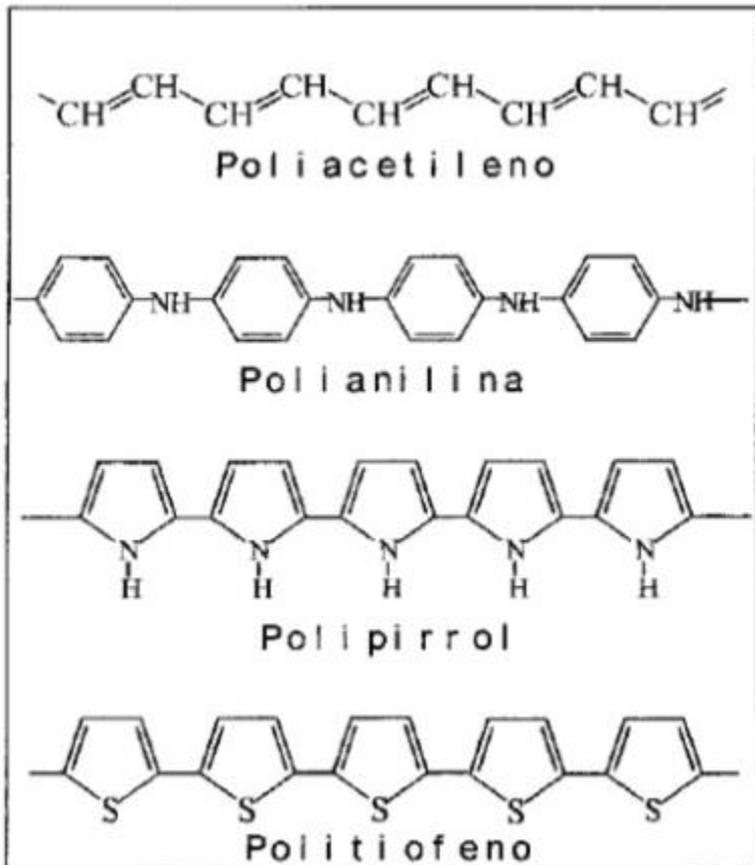
ACTUALMENTE SE ESTÁ INVESTIGANDO EL COMPORTAMIENTO DEL DEPÓSITO DE OXIDOS DE METALES DE TRANSICIÓN SOBRE MATERIALES DE CARBONO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE SC.

- El óxido-M permite aumentar considerablemente la densidad energética del material.
- La capacidad eléctrica específica del óxido depositado es mayor a la del mismo óxido metálico sin depositar.

# Supercondensadores

## Materiales de los electrodos

- **Polímeros conductores**



Son cadenas poliméricas que favorecen la acumulación de energía principalmente por mecanismo pseudocapacitivo.

- Son fácilmente procesables.
- Los materiales son relativamente económicos (más que los óxidos metálicos).

Presentan el principal inconveniente en la degradación con los sucesivos ciclos de carga y descarga.

# Supercondensadores

## Materiales de los electrodos

### Comparativa:

	Carbones	Óxidos metálicos	Polímeros conductores
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	>1000	100	100 - 200
Conductividad eléctrica (S/cm)	> 0.1	>10 S/cm	100
Capacidad específica (F/g)	100 - 300	hasta 1300	hasta 400

***La combinación de diferentes materiales es una estrategia en desarrollo a nivel científico y tecnológico, buscando aprovechar los beneficios de cada tipo de material.***

# Supercondensadores

## Materiales del electrolito

### *Actualmente en uso:*

#### **Acuosos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; KOH; $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )**

- $\approx 1.2 \text{ V}$
- Corrosión del colector de corriente
- Alta conductividad iónica
- Bajo costo y fácil manipulación

#### **Orgánicos ( $\text{Et}_4\text{NBF}_4/\text{AN}$ ; $\text{LiBF}_4/\text{EC}$ )**

- $> 2.0 \text{ V}$
- No se corroen los colectores
- Baja conductividad iónica
- Alto costo y manipulación complicada

### *Experimentales:*

#### **Líquidos iónicos**

- $> 4.0 \text{ V}$
- Baja conductividad iónica a temperatura ambiente
- Alto costo y síntesis complicada

#### **"Water in salt electrolyte"**

- $> 3.0 \text{ V}$
- Permite el uso de Al como colector de corriente
- Alto costo

# Supercondensadores

Ejemplo de aplicación en Montevideo:

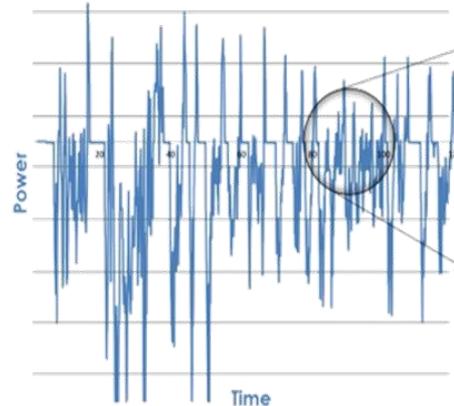
## Yutong ReCtrl

Overall length*width*height (mm)	12000*2550*3145
Wheelbase (mm)	6100
Turning radius (m)	≤12
Engine	ISDe245 31
Rated power ( kw/rpm)	180
Rated torque ( Nm/rpm)	925
Displacement (L)	6.7
Emission	Euro III
Hybrid form	XCVT system self-developed by Yutong
Whole vehicle controller	Yutong whole vehicle controller
Energy storage system	15-cluster super capacitor
Drive motor system	AC permanent magnet synchronous drive motor
High voltage generator	AC permanent magnet synchronous drive generator
Front axle	ZF RL85A, 8.5T, disc brake
Rear axle	ZF AV133T, 13T, disc brake
Brake system	Dual circuit pneumatic service brake, full disc brake, energy storage spring parking brake, WABCO EBS
Steering system	ZF integral power steering gear, adjustable steering wheel
Tire	Michelin 295/80R22.5
Suspension system	F2R4 6-bellow air suspension, front & rear anti-roll bar, double adjustable hydraulic shock absorber, ECAS lifting system
Air conditioner (A/C)	None, optional: A/C with cooling capacity 38000Kcal / h, BOCK compressor
Fuel tank (L)	200L
Seat number	39



# *Laboratorio de ensayos de baterías*

***Próximamente  
en Facultad de  
Ingeniería***



## ***Aplicaciones principales:***

Pruebas de ciclo de vida

Simulaciones del ciclo de manejo de vehículos eléctricos (EV)

Prueba de caracterización de potencia de pulso híbrido - HPPC

Prueba de esfuerzo dinámico - DST

Procedimiento de prueba de vehículos ligeros armonizados a nivel mundial – WLTP

Pruebas de amperaje de arranque

I + D de paquetes de baterías para vehículos eléctricos y aplicaciones de almacenamiento en red

Validar el sistema interno de gestión de baterías a través de CANBus.

# Bibliografía consultada:

