



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

EJERCICIOS PRÁCTICOS (I)

PROFESOR
Dr. Marcos Lafoz Pastor

EJERCICIO 1.

Considerando una batería de litio que ofrece servicios de ajuste a la red eléctrica formada por tres ramas en paralelo con 200 celdas cada rama, siendo las siguientes características de cada celda: $U_{\text{celda}} = 3.6\text{V}$; $C = 40\text{ Ah}$; Tasa de descarga máxima continua = $2.5C$; $R_{\text{int}} = 0.01\text{ Ohmios}$, ¿cuál es la potencia máxima útil en kW que puede dar el conjunto?: Si se puede descargar hasta el 20% del SoC, ¿Cuál es la energía aprovechable teórica en kWh?

EJERCICIO 2.

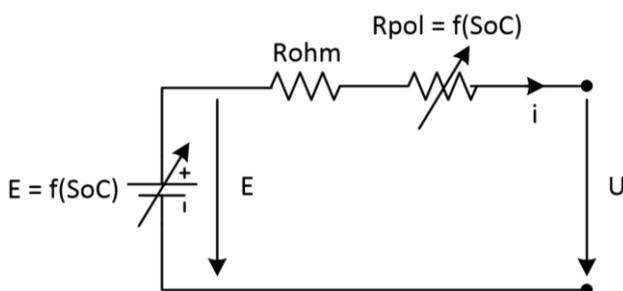
Como sabes, la ley de Peukert es una expresión que fue desarrollada para baterías de plomo para representar la no linealidad de la capacidad con la tasa de descarga, aunque se puede utilizar en otro tipo de baterías, entre otras las de litio. En el caso de una batería de litio, de la cual se conoce que su coeficiente de Peukert es 1.04 y que tras realizar un ensayo descargándola a 50A se puede utilizar durante 2 horas, ¿Cuál es la capacidad que, según la ley de Peukert, presentaría la batería si se quiere utilizar con una corriente de descarga de 150A?

EJERCICIO 3.

Es conocido que una celda de litio se puede representar mediante el siguiente circuito eléctrico equivalente. ¿Cuántas celdas en serie del tipo señalado en la tabla harían falta para que se pudieran utilizar en un vehículo eléctrico que requiere una tensión de continua mínima de 331V cuando está dando una corriente de 130A?

Es necesario saber para la resolución del problema que el estado de carga (SoC) mínimo permitido por el BMS del vehículo es de un 25%.

En el cual:

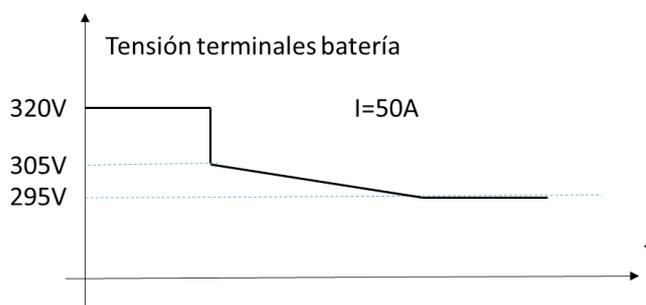


Celda de Litio:
100Ah (a 0.05C y 20°C)
$E_{\text{celda}} = 4.0 - K \cdot \frac{100}{\text{SoC}(\%)}$, siendo $K = 0.2$
$R_{ohm_{\text{celda}}} = 1.5\text{ m}\Omega$
$R_{pol_{\text{celda}}}(\text{m}\Omega) = 2.5 - \frac{25}{1000} \cdot \text{SoC}(\%)$

NOTA: Los datos del circuito equivalente están dados por celda.

EJERCICIO 4.

Una determinada batería que se pone a descargar con 50A, partiendo de una situación de circuito abierto y cargada con tensión nominal, tiene una respuesta en la tensión en bornes que viene dada por el siguiente perfil. Si está compuesta por dos ramas en paralelo de 100 celdas cada una, determinar la tensión nominal de cada celda y las resistencias óhmica y de polarización de cada celda. ¿Cuál es el rendimiento del sistema en estas condiciones de operación?.



NOTA: La evolución de la tensión debida a la resistencia de polarización se ha aproximado mediante una recta, aunque debería ser una variación exponencial.

EJERCICIO 5

A partir de las expresiones de pérdida de capacidad de una batería de Li, donde la pérdida de capacidad por ciclado y por calendario de una batería de Li, así como la variación de resistencia interna, viene dada por las expresiones:

$$Q_{cal} = f \cdot e^{g \cdot SoC} \cdot e^{h/T} \cdot t^z$$

$$Q_{cyc} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c) \cdot e^{(d \cdot T + e) \cdot C_{rate}} \cdot Ah$$

$$\Delta R_{int} = a \cdot e^{b \cdot T} \cdot c \cdot e^{d \cdot SoC} \cdot t^g$$

$$[T] = [K]; [t] = [días]; [C_{rate}] = [-]; [Ah] = [Ah]; [Q_{cal}] = [Q_{cyc}] = [%]$$

donde los parámetros para esta determinada batería son los siguientes:

$$a = 2.0916 \cdot 10^{-8}; b = -1.2179 \cdot 10^{-5}; c = 0.0018; d = -1.7082 \cdot 10^{-6}; e = 0.0556$$

$$f = 5.9808 \cdot 10^6; g = 0.6898; h = -6.4647 \cdot 10^3; z = 0.5$$

Considerando una batería de 48.2 kWh de 340V de tensión nominal, si se somete a un ciclo diario de descargas y se recarga por la noche, de manera que la tasa promedio de descarga sea 1C y una tasa promedio de recarga de 0.5C, y su temperatura media sea de 40°C

1. ¿Cuántos días y años se podrá utilizar antes de que pierda un 20% de su capacidad?
2. ¿Qué variación en la resistencia interna de la batería en ese orden de tiempo? ¿es significativa?
3. ¿Qué ocurriría si en ese tiempo y que resulta como resultado del apartado anterior la temperatura se consigue mantener con una media de 30°C?

EJERCICIO 6

Se quieren utilizar celdas de Li para montar la batería de un vehículo eléctrico con un motor de tensión máxima 225V. Las celdas a utilizar tienen una resistencia interna de 1,5 miliohmios cada una y una tensión mínima de utilización de 2,85V, a partir de la cual el BMS no permitiría su utilización.

Considerando la situación más restrictiva de operación,

a) Calcular cuántas celdas habría que colocar en el vehículo y en qué disposición para permitir que la batería pudiera dar una potencia máxima, en todo momento de 70 kW. Da la respuesta sin considerar y considerando la resistencia interna de las celdas, comentando si hubiera alguna diferencia entre estos dos casos.

b) ¿Qué corriente máxima (de nuevo en la condición más desfavorable) están suministrando las celdas cuando el vehículo desarrolla una potencia de 70kW?

c) Suponiendo que se eligen unas celdas para que el vehículo de esta potencia nominal cuando trabajan a 1.65C, ¿Cuál sería la capacidad de las celdas seleccionadas?

d) Teniendo en cuenta que la tasa de descarga a la que se mantiene la energía de las baterías es 0.5C, aplicando la expresión de Peukert con un coeficiente de 1.04, cuánto tiempo tardaría la batería del vehículo en descargarse desde un 100% hasta un 50% si trabaja de forma continua con una intensidad de 80A? ¿Cuál es la energía que es aprovechable en la batería en estas condiciones?

e) Se conecta el vehículo eléctrico a la red trifásica de 400V mediante un cargador reversible. Las baterías del vehículo están completamente cargadas, suponiendo una profundidad de descarga del 80% y un rendimiento entre la batería y el punto de conexión a la red del 90%. Si se descarga con una corriente hacia la red de 64A, ¿qué potencia se puede volcar a la red y durante cuánto tiempo?

f) Se utiliza un sistema adicional de baterías domésticas para recargar las baterías del vehículo eléctrico. Se sabe que estas nuevas baterías son capaces de dar 40kW durante 1.4 horas. ¿Cuál es la energía disponible si están totalmente cargadas?. Si tienen una profundidad de descarga máxima del 70%, ¿cuál sería la energía nominal de las baterías?. Si la tensión de las baterías es 500V, ¿para qué corriente habría que diseñar la instalación de suministro?.

NOTA: No dar sólo el resultado, es necesario explicar el desarrollo que se ha seguido para llegar al mismo. Utilizar el equivalente eléctrico de la batería.

SOLUCIÓN 1

$I_{\max_celda} = 2.5C = 2.5 \cdot 40 = 100A$. Cada una de las tres ramas en paralelo contribuye con 100A, en total serían 300A. La tensión de cada celda en esas condiciones de corriente, debido a la caída de tensión sería: $U_{celda} = 3.6 - 0.01 \times 100 = 2.6V$. Considerando las 200 celdas de cada rama, $200 \cdot 2.6 = 520V$

La potencia sería la tensión de 520V por la corriente total, 300A, $=156kW$. Energía disponible total $= 3.6V \cdot 40Ah \cdot 200 \cdot 3 = 86.40kWh$. Considerando que sólo se puede descargar hasta el 20% del SoC, se aprovecha por tanto el 80%, que es 69.12kWh

SOLUCIÓN 2

La capacidad es 100Ah y se conoce que el punto de trabajo se da con un $T=2h$, por tanto, si el valor al que se quiere evaluar es $i=150A$, aplicando la fórmula

$$t = 2 \cdot \left(\frac{100}{150 \cdot 2} \right)^{1.04} = 0.638h$$

La capacidad es por tanto $150A \times 0.638 = 95.7Ah$

SOLUCIÓN 3

La situación más restrictiva para el diseño es aquella en que el BMS indica el mínimo estado de carga, porque es en la que la tensión está más baja. Esto es el $SoC=25\%$

En esas condiciones, $E_{celda} = 4 - 0.2 \cdot 100 / 25 = 3.2V$. Por otro lado la resistencia $R_{pol} = 2.5 - 25 \cdot 25 / 1000 = 1.875m\Omega$, que sumados a los 1.5m Ω de la óhmica nos da 3.375m Ω .

Como la tensión que hay que cumplir es 331 $\rightarrow N_{celdas} = 331 / (3.2 - 130A \cdot 3.375 / 1000) = 119.87$

Así pues elegimos 120 celdas.

SOLUCIÓN 4

Hay 100 celdas en serie. Como se parte de la tensión nominal en circuito abierto, los 320V suponen que haya 3.2V por celda. Como la corriente que sale de la batería son 50A y hay dos ramas en paralelo, la corriente en cada celda es 25A. Hay un salto de 15V debidos a la resistencia óhmica. Esto supone que: $15V = 100 \cdot 25 \cdot R_{ohm}$, de donde se obtiene 6 m Ω mios. Por otro lado, el otro salto debido a la resistencia de polarización es 10V, de donde se obtiene de la misma forma 4 m Ω mios. En total son 10m Ω mios.

El rendimiento lo calculo como $= (320 \times 50 - 200 \times 0.01 \times 25^2) / (320 \times 50) = 92,18\%$

SOLUCIÓN 5

Hay que recordar que la temperatura en las expresiones es en $^{\circ}K$, con lo que es $313^{\circ}K$.

Considerando que la cantidad de Ah es la misma para carga que para recarga,

$$Ah = Ah_{descarga} + Ah_{carga} = 2 \cdot Ah_{descarga} = \\ = D \text{ días} \cdot \text{Energía [Wh}_{ciclo}] \cdot 1 \text{ ciclos al día carga} \div \text{Tensión [V}_{pack}]$$

Conocido el resto de valores, lo único que es desconocido en la ecuación es el valor de D. Se puede considerar que el cálculo se hace sólo con el envejecimiento por ciclado, ya que es el importante, ya que el de almacenamiento estacionario sin usar las baterías es mucho más pequeño. Suponiendo entonces que el valor de $Q=20$, se despeja el número de días y resultan 1825, que se corresponden con 5 años.

El envejecimiento por calendar para estos valores resulta 0,55%, muy inferior.

Por otro lado, la resistencia interna aumentaría en 10 EXP-9, totalmente despreciables.

En los 5 años, si se hacen los cálculos con una temperatura de $30^{\circ}C$, los resultados de pérdida de capacidad serían del 16%. Por tanto, es muy importante mantener el nivel de temperatura en el entorno de trabajo de las baterías para alargar su vida útil.

SOLUCIÓN 6

a) Por un lado, considerando la tensión máxima del motor, 225V, y teniendo en cuenta el 1.7, factor necesario para que el inversor funcione correctamente, la tensión mínima de baterías sería de:

$$U_{\min} = 225 \times 1.7 = 382.5 \text{V}$$

Por otro lado, hay que considerar el circuito equivalente de las N celdas en serie, para llegar a la tensión mínima.

En una primera aproximación, sin considerar la resistencia interna, se podría dar un valor aproximado de celdas, simplemente obteniendo:

$$U_{\min} = N \cdot E_{\text{celda}_0}$$

$$N = U_{\min} / E_{\text{celda}_0} = 382.5 / 2.85 = 134.5 \text{ celdas (135 celdas)}$$

Considerando la R_{int} , la situación más desfavorable es:

$$U_{\min} = N \cdot E_{\text{celda}_0} - N \cdot R_{\text{int}} \cdot I_{\max}$$

Teniendo en cuenta que la $I_{\max} = P / U_{\min}$, la expresión queda:

$$U_{\min}^2 = N \cdot E_{\text{celda}_0} \cdot U_{\min} - N \cdot R_{\text{int}} \cdot P$$

De aquí se puede despejar el valor de N como:

Se elegirían 149 celdas en serie.

El hecho de considerar la resistencia interna nos ha hecho tener que utilizar 14 celdas más.

b) La corriente es $I = P / U = 70000 / (149 \cdot 2.85) = 164.8 \text{A}$

c) Si 164.8A representan 1.65C, la capacidad será $164.8 / 1.65 = 100 \text{Ah}$.

d) $C = 100 \text{Ah}$. Descargar hasta un 50% supone una energía de 50Ah. Sabiendo que la tasa de descarga con la que se mantiene la relación de energía es 0.5C, el tiempo $T = 1 / 0.5 = 2 \text{h}$.

Calculando en la expresión de Peukert con este valor y con $C = 50 \text{Ah}$, que es la energía a la que queremos hacer referencia:

La energía aprovechable es: $\text{Energía} = 80 \text{A} \cdot 0.51 \text{h} = 40.8 \text{Ah}$

e) Para estimar la energía de las baterías del vehículo, se consideran los 100Ah con una tensión de, por ejemplo 385V (esta tensión podría cambiar un poco, también está bien). Resulta: $100 \text{Ah} \cdot 385 \text{V} = 38.5 \text{kWh}$

La potencia trifásica a 64A y 400V sería: , potencia entregada a red.

El tiempo que se puede entregar, estando disponible el 80% de la energía y con un rendimiento del 90% será: $t = \text{Energía} \times 0.8 / (\text{potencia} / 0.9) = 0.62 \text{ horas}$

f) Si se tiene un conjunto de baterías que es capaz de dar una potencia constante de 40kW durante 1.4h. Si la DoD es del 70%, la energía nominal de las baterías en kWh es de:

$$\text{Energía disponible} = 40 \times 1.4 = 56 \text{kWh}$$

$$\text{Energía nominal} = \text{Energía disponible} / 0.70 = 56 / 0.7 = 80 \text{kWh}$$

Si la tensión nominal de las baterías es 500V, la corriente máxima de las baterías de suministro, para recargar el vehículo sería: $I = P / V = 40,000 \text{W} / 500 = 80 \text{A}$.

EJERCICIO 7

Se dispone de un sistema de almacenamiento que contiene 10 módulos de ultracondensadores formado por 60 celdas cada uno que tienen las características por celda que aparecen en la tabla adjunta. Los módulos están dispuestos en dos ramas en paralelo de 5 módulos cada una en serie. Si para una aplicación se quiere obtener una energía de 1.2 kWh por ciclo de descarga partiendo de la tensión máxima de las celdas, ¿hasta qué tensión se deberían descargar las celdas? ¿Cuál sería la potencia útil (descontando las pérdidas) que entregaría el sistema en ese punto de trabajo en el que se ha terminado de dar la energía requerida por la aplicación?.



<i>C</i>	<i>Tensión</i>	<i>ESR</i>	<i>I max</i>	<i>Peso</i>	<i>Volumen</i>
3200 F	2.85 V	0.09 mΩ	100 A	0.533 Kg	0.390 l

SOLUCIÓN

A partir de los 3200F, la tensión nominal 2.85V por celda, considerando 60 celdas/módulo y 10 módulos, se hace aplica la expresión de la energía, teniendo en cuenta como incógnita la tensión final de descarga según la expresión siguiente. Para una energía de 1.2kWh resulta una tensión mínima de 1.9V por celda. Se puede hacer con la energía total, considerando todas las celdas o se puede reducir las condiciones de energía a las que tendría cada celda, dividiendo 1.2kWh por 60·10 celdas. Se hará de esta segunda forma.

$$E_{celda} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U^2 - U_{final}^2)$$

$$U_{final} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 - E} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot 3200 \cdot 2.8^2\right) - 1.2 \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot \frac{1}{60 \cdot 10}} = 1.9V/celda$$

La tensión nominal del módulo será $U_{mod}=60 \times 2.85 = 171V$. Como hay 5 módulos en serie, la tensión total es: 855V. Teniendo en cuenta la situación de descarga del punto anterior, en que cada celda llega a 1.9V, a nivel del sistema completo, la tensión es: $1.9 \cdot 60 \cdot 5 = 570V$. La corriente máxima será la de dos ramas en paralelo de celdas en serie, por lo tanto serán 200A. La potencia teórica máxima será, por tanto: $570 \cdot 200 = 114kW$.

Habrá que considerar las pérdidas, iguales a $R \cdot I^2$. Además, las pérdidas en todas las celdas, considerando que todas están sometidas a las mismas condiciones.

$$P_{pérdidas} = 10 \cdot 60 \cdot 0.09 \cdot 10^{-3} \cdot 100^2 = 540W.$$

Como se ve, hay una reducción muy pequeña de potencia 113,46kW, con lo que el sistema es muy eficiente.

EJERCICIO 8

La empresa ONE propone un sistema innovador de batería que consiste en un sistema híbrido de 20.3 kWh que integra dos tipos de batería. La primera, llamada Aries, es una batería de litio-hierro-fosfato (LFP), más segura y que está destinada sobre todo a dar potencia. La segunda batería, denominada Gemini, sirve para extender la autonomía en términos de energía y se va a utilizar muchas menos ocasiones, aunque hay que dimensionar el sistema de forma conjunta.

El sistema se quiere conectar a una red trifásica con tensión nominal de 220V, se quiere que aporte una potencia máxima de 41.7kW y, como se ha dicho antes, el sistema combinado tiene una energía de 20.3 kWh. Se conocen además las características de las celdas de cada tipo, son las que se muestran en la tabla siguiente:

	Tensión nominal	Capacidad	Máxima corriente
Aries	3,2V	12Ah	4C
Gemini	3,6V	36Ah	1.5C

- ¿Qué número de celdas de uno y otro tipo elegirías?
- ¿Cómo dispondrías las celdas de los dos tipos de batería en relación a la electrónica de potencia con la que iría conectada a la red?

NOTA: Los datos del problema no se corresponden con un sistema real existente.

SOLUCIÓN 8

Lo primero es calcular la potencia máxima y la energía de cada tipo de celda. La potencia máxima se calculará a partir de la tasa máxima de descarga en cada caso, multiplicada por el valor de capacidad correspondiente, y ello por la tensión nominal. La energía es el valor de capacidad por la tensión, para tenerlo en Wh.

Potencia máxima Aries: $3.2V \times 4 \times 12 = 153.6 \text{ W}$

Potencia máxima Gemini: $3.6V \times 1.5 \times 36 = 194.4 \text{ W}$

Energía Aries: $3.2V \times 12 = 38.4 \text{ Wh}$

Energía Gemini: $3.6 \times 36 = 129.6 \text{ Wh}$

Si se usan sólo las celdas de Aries: hacen falta muchísimas celdas para cubrir las necesidades en energía que es la variable más crítica: $= 20.3 \text{ kWh}/38.4\text{Wh}_{\text{celda}} = 528.7 \text{ celdas}$.

Si se usan sólo las celdas de Gemini: hacen falta muchas menos celdas $= 20.3\text{kWh}/129.6\text{Wh}_{\text{celda}} = 156.7 \text{ celdas}$. Se podría utilizar esta solución pero resultaría en un envejecimiento prematuro ya que estas celdas se han diseñado para una autonomía extendida, es decir sólo para usarse pocas veces.

Resolviendo el sistema de ecuaciones que resulta de plantear la potencia y la energía totales con contribución de los dos tipos de celda resulta,

$N_{\text{aries}}=117 \text{ celdas}$

$N_{\text{gemini}}=122 \text{ celdas}$

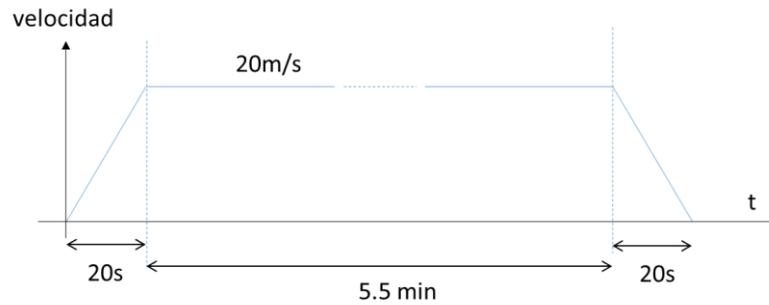
La distribución de las mismas habría que hacerla en función de la tensión que tenemos que cubrir. Un tipo de celda, la que más se utilice, se pondría directamente en la etapa de continua del inversor y la otra a través de un convertidor DC/DC para independizar la operación de las mismas.

Para analizar cuál es más conveniente en depende qué lugar, lo primero es saber cuál debe ser la tensión de la etapa de continua para que el inversor funcione correctamente. Para ello, si la tensión trifásica es 220V, $220 \times 1.73 = 374V$

Cada rama de celdas de Aries tendría entonces: $374/3.2=117 \text{ celdas}$, con lo que haría falta poner $1170/117=10$ ramas de celdas en paralelo. Estas las colocaríamos en la etapa de continua. Por otro lado, y a través de un DC/DC, las 1220 celdas de Gemini pueden ir asociadas para La asociación de las mismas sería, por ejemplo en forma de otras 10 ramas en paralelo de 122 celdas cada una, teniendo una tensión de 439V que iría conectada a la etapa de continua mediante un DC/DC reductor.

EJERCICIO 9

Se quiere diseñar el subsistema de baterías para un vehículo eléctrico destinado al reparto de mercancías en un aeropuerto. El vehículo realiza un perfil de funcionamiento constante 75 veces al día, realizándose la recarga de las baterías al final de cada día. Se conoce el perfil de funcionamiento de velocidad frente al tiempo que se muestra en la figura. Además, se sabe que además de la potencia requerida para la aceleración se debe usar energía para compensar el rozamiento, el cual depende de la velocidad a lo largo de todo el recorrido de la siguiente manera: $P_{roz} \text{ (W)} = 150 \cdot \text{velocidad (m/s)}$. La masa del vehículo se considera constante e igual a 1000Kg.



NOTA: A partir del perfil de velocidades se puede sacar la aceleración, de ahí con la masa la fuerza y de ahí la potencia. Considerar valores medios en los tramos de velocidad variable. Tener en cuenta que en el frenado la energía se devuelve a las baterías y por tanto contabiliza en sentido contrario. Añadir a la energía correspondiente al rozamiento que siempre es consumida.

- 1) Considerando este perfil resulta un balance de energía diario de 21,25 kWh. Realiza los cálculos pertinentes para comprobar que este es el valor de energía diario necesario. NOTA: Puedes optar por seguir adelante y tener en cuenta este resultado para el resto del problema.
- 2) ¿Cuál es la potencia máxima que requiere el sistema y para la cuál habría que diseñar las baterías?

Para este sistema se dispone celdas de litio LFeP con la siguiente información: $V_{nom} = 3.75V$; $C = 69.69Ah$; $R_{int} = 1 \text{ m}\Omega$; el fabricante da curvas de operación a 0.3C, a 0.5C y a 1C.

- 3) Sin considerar las pérdidas en la resistencia interna de las baterías, ¿Cuántas celdas serían necesarias para cubrir las necesidades del sistema?. Utiliza las restricciones de energía y potencia para determinarlo.
- 4) Considerando las pérdidas en la resistencia interna, ¿cómo se ve modificado el resultado anterior, haciéndolo para la variable más restrictiva?.
- 5) Si el motor que se va a utilizar para la tracción presenta una fuerza electromotriz de 190V entre fases a la máxima velocidad, ¿cómo dispondrías las celdas en la batería? ¿sería suficiente el número de celdas del apartado 3 para garantizar el correcto funcionamiento del sistema completo, considerando la situación más desfavorable del ciclo de trabajo?
- 6) Cuánto tardarían en recargarse completamente las baterías al final del día, suponiendo que se parte de un $SoC = 20\%$, si se dispone de un cargador de 5kW que tiene un rendimiento del 85%.

SOLUCIÓN 9

<i>Tramo de aceleración</i>		Energía	
Tiempo	20 segundos	0,06388889	kWh
Velocidad	72 km/h		
	20 m/s		
aceleración	1 m/s ²		
<i>Tiempo veloc. Constante</i>			
Tiempo	5,5 minutos	0,275	kWh
Velocidad	72 km/h		
<i>Tiempo frenado</i>			
Tiempo	20		
		-	
Velocidad	72 km/h	0,05555556	kWh
viajes/día=	75	0,28333333	kWh/viaje
			21,25 kWh

Con respecto a la potencia de rozamiento, a la velocidad de 20m/s (72km/h), la máxima potencia es $=150 \cdot 20 = 3000W$.

2. Con respecto a la potencia máxima, es la resultante en el punto de máxima velocidad durante el proceso de aceleración, con una aceleración de $1m/s^2$, una masa de $1000Kg$, con una velocidad máxima de $20m/s$, $P_{max} = 1000 \cdot 1 \cdot 20 = 20kW$. La potencia total máxima es $23kW$.

3. Teniendo en cuenta las consideraciones de las celdas, primero hacemos un dimensionado por energía. Sin considerar la R_{int} :

La energía de cada celda es $C \cdot V_{nom} = 69.69Ah \cdot 3.75 = 261.3636Wh$

$21,25kWh / 261.3636Wh = 81.3$ celdas, elegiríamos 82 celdas.

Por otro lado, considerando las necesidades de corriente, teniendo en cuenta que la máxima potencia es la que da $1C$, es decir $69.69A$ resultan un número de celdas, considerando todas en serie, de:

$N \text{ celdas} = 23000W / (69.69A \cdot 3.75) = 88$ celdas.

Por tanto, elijo 88 celdas porque es más restrictivo.

4. Considerando las pérdidas en la resistencia interna, hago el dimensionado por potencia, que hemos visto que es el más restrictivo:

La potencia la doy con la potencia máxima ($1C = 69.69A$) y la tensión que es la resta de la tensión interna de la celda menos la caída interna en la situación de máxima corriente)

$N \text{ celdas} = 230000 / (69.69 \cdot (3.75 - 0.001 \cdot 69.69)) = 89.66$ celdas -> Elijo 90 celdas.

5. Colocando las 88 celdas en serie tendría $88 \cdot 3.75V = 330V$. Considerando la caída de tensión en la situación más restrictiva que es con el máximo de potencia, a $69.69A$, $U = 330 - 88 \cdot 0.001 \cdot 69.69 = 320.866V$

Teniendo en cuenta una relación de 1.7 con la tensión del motor, sale $190V$, con lo que sería posible usar ese motor.

6. Como estamos al 20%, sólo hay que cargar el 80% de $21.25kWh$, es decir $17 kWh$. A un rendimiento del 85%, resulta un $t = 17 / (5 \cdot 0.85) = 4$ horas.