



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Estudio de diseños de sistemas BMS (Battery
Manager System) para baterías de automoción de
tipo LiFePo. Propuesta de solución para una
batería de 96v/4Kwh de 128 celdas**

Autor:

Bueno Salamanca, Aarón

Tutor:

**Domínguez Vázquez, José Antonio
Tecnología electrónica**

Valladolid, Julio 2018.

Resumen

El presente trabajo fin de grado tiene por objetivo estudiar y analizar diferentes sistemas de gestión de baterías BMS (de sus siglas en inglés), así como la propuesta de solución para una batería de automoción de tipo LiFePo de 96v/4Kwh de 128 celdas. Dicha batería es usada para proveer de energía a una motocicleta de propulsión eléctrica y el fin de este trabajo es encontrar un sistema que prolongue la vida útil de dicha batería.

Palabras clave

Batería, equilibrado, celda, BMS, simulación.

Índice

Contenido

Introducción, objetivos	- 5 -
Desarrollo	- 7 -
Balance de celdas, tipos y funcionamiento.	- 16 -
Análisis y elección	- 35 -
Cálculo del tiempo de funcionamiento del BMS.....	- 41 -
Optimización del tiempo de funcionamiento del BMS	- 43 -
Simulaciones.....	- 51 -
Incidencia de la frecuencia de conmutación en el equilibrado.	- 69 -
Conclusiones.....	- 73 -
Bibliografía	- 75 -

Introducción, objetivos

Actualmente se está produciendo un cambio en la movilidad, tanto en cómo entiende la sociedad como debe ser la movilidad y en las nuevas formas en las que se produce. Las graves consecuencias del tráfico en las grandes ciudades, debido a la alta contaminación producida por los vehículos impulsados por motores de combustión, está provocando que se adopten medidas en contra de este tipo de vehículos y se impulsen nuevas formas de movernos por las ciudades. En esta nueva tendencia el vehículo eléctrico se espera que sea el gran protagonista de la próxima década, ya que se tiene la expectativa de que se adopte como opción mayoritaria.

El gran problema de los vehículos eléctricos es en como almacenar la energía. La mejor opción y la más usada es la de proveer al vehículo de una batería, capaz de almacenar en forma de energía química una gran cantidad de energía. Que sea la opción más usada no quiere decir que no tenga sus problemas, ya que las baterías son muy pesadas, no son capaces de igualar la energía que contienen los actuales combustibles, se degradan con el uso...

Las baterías son el elemento crucial para que el transporte eléctrico triunfe, por eso se estudia y se investigan formas de cuidar y aumentar la vida útil de la batería y aquí es donde entra en juego el BMS (sistema de gestión de la batería). El BMS es un sistema que se encarga de realizar diversas funciones que permiten prolongar la vida útil de la batería y dependiendo de cómo este implementado podrá realizar unas u otras funciones.

En nuestro caso vamos a estudiar la implementación de un BMS en una motocicleta eléctrica enriding MK2 que posee una batería de 96V/4kWh y tecnología LiFePo₄. Esta batería se ha estado usando sin poseer un sistema de control, por lo que con el paso del tiempo se han ido produciendo fallos. El mayor problema que se ha encontrado es el desequilibrio de las celdas ya que, aunque se presupone que nuevas todas las celdas son prácticamente iguales, con las diversas cargas y descargas se pueden producir desajustes llegando a producirse fallos catastróficos y perder alguna de las celdas, por eso nuestro proyecto se centrará en conseguir un buen equilibrado de todas las celdas.

Deberemos estudiar las propuestas tecnológicas que existen en la actualidad, investigar cual se adapta mejor a nuestras necesidades y realizar las modificaciones o mejoras que consideremos oportunas para presentar una propuesta tecnológica.

En nuestro estudio deberemos realizar diversas simulaciones de nuestros prototipos y una vez que se compruebe bajo simulación un sistema que

responda a nuestras necesidades y que sea razonablemente implementable, realizar la construcción de nuestro sistema y comprobar que realmente cumple su propósito.

Desarrollo

Sistemas de gestión de la batería: objetivos de su uso.

Un sistema de gestión de batería es un sistema electrónico que gestiona una batería recargable y protege la batería mediante el análisis de diferentes parámetros de la batería para realizar diferentes funciones.

Dependiente del uso final de la batería y de lo complejo que sea el sistema de gestión, el BMS incluirá diferentes funciones y características entre las que destacan:

- La protección de las celdas de la batería: el sistema de gestión de la batería tiene que encargarse de asegurar que las celdas trabajan dentro de los márgenes de seguridad de las mismas.
- Control de la carga: el sistema tiene que encargarse de que la batería se recargue en unas condiciones apropiadas.
- Gestión de la demanda: el sistema tiene que hacer trabajar a la batería en un régimen de descarga apropiado para la aplicación en la que se está usando y debe de evitar que la batería sobrepase sus límites de funcionamiento para prolongar su vida útil.
- Determinación del estado de carga: es una función a través de la cual, y mediante diferentes tablas o algoritmos, el sistema es capaz de reconocer en qué estado se encuentra la batería.
- Determinación del estado de salud: el sistema, a través del análisis de diferentes parámetros, debe ser capaz de saber si la batería o alguna celda se encuentra en buen estado o si por el contrario está dañada o ha perdido gran parte de su capacidad.
- Balance de las celdas: en una batería compuesta de varias celdas, es posible que no todas se encuentren en el mismo estado y esto afecta directamente al rendimiento y al deterioro de la batería. Es por esto que es muy importante que todas las celdas de la batería estén en un estado lo más parecido posible.
- Control de la temperatura: la temperatura es una variable determinante para el correcto funcionamiento de las baterías, por eso conocer la temperatura de las celdas y la temperatura ambiente es crucial para, en caso de que sobrepasen unos límites, aplicar las acciones necesarias para mantener a la batería en una temperatura adecuada para no afectar a su rendimiento ni su vida útil.

Estas son las funciones más básicas de los sistemas de gestión de baterías aunque en sistemas más complejos e inteligentes también podemos encontrar módulos que se encargan de recoger información histórica de diferentes parámetros de la batería, comprobar que las celdas de la batería pertenecen al tipo que se corresponde (por si se cambian celdas viejas por nuevas) o diferentes sistemas de comunicación con la batería para una mejor carga y descarga.

Posteriormente se describirán con más detalle algunos de estos apartados.

Batería usada: características.

En la actualidad existen multitud de tecnologías de almacenamiento de energía, cada una con sus características, ventajas e inconvenientes. Es importante conocer los diferentes tipos para adecuarlas al uso que se vaya a dar y los requisitos que se necesiten de energía.

En nuestro caso y aplicado a los sistemas de gestión de baterías debemos conocer las características de la batería que vamos a gestionar para adecuar nuestros parámetros a sus características y sus límites de uso, ya que dependiendo de la tecnología que estemos usando estaremos cuidando la batería o haciendo que este sufra mucho estrés u opere fuera de su rango permitido de valores.

En nuestro caso la tecnología de batería que estamos usando es del tipo LiFePo_4 .

Las baterías de LiFePo_4 son una evolución de las baterías de Ion de litio ya que sustituye al cobalto y el manganeso por el Fosfato de Hierro Litio en su uso para el cátodo de la batería. A pesar de tener una densidad energética algo menor que las de óxido de cobalto ofrecen una durabilidad mucho mayor, más potencia y un nivel de seguridad mayor.

Entre sus principales características se encuentran:

- Voltaje de celda:
 - Voltaje mínimo de descarga: 2.5V
 - Voltaje de trabajo: 3 ~3.3V (3.2V nominales)
 - Voltaje máximo de carga: 3.65V
- Densidad de energía en masa: 90-110Wh/Kg.
- Densidad de energía en volumen: ~220 Wh/dm³
- Tiempo de vida:

Ciclos: entre 2000 y 3000 con una profundidad de descarga del 100%.

Tiempo: entre 6 y 7 años con un uso normal, aunque puede llegar a superar los 10 años.

- Mantienen una tensión en su descarga muy constante de 3.2V.
- No explotan o se incendian con sobrecargas.
- No necesitan mantenimiento.
- Se pueden dejar durante largos periodos de tiempo a medio cargar ya que su tasa de autodescarga es muy baja, en buenas condiciones de almacenamiento no pierden capacidad tras un año sin uso.
- Tienen una alta temperatura de funcionamiento sin disminuir su rendimiento, unos 75 grados.

Funciones de los sistemas de gestión de baterías.

Control de temperatura de la batería.

El sistema que incorpore esta característica debe ser capaz de leer la temperatura de la batería para mantenerla en los límites normales de uso para evitar una reducción en su capacidad y en su vida útil. Normalmente una temperatura demasiado baja hace que la batería pierda capacidad de almacenamiento de energía y una temperatura demasiado elevada hace que en la batería aparezcan más procesos de autodescarga y pueda dañar las celdas disminuyendo su vida útil.

El sistema debe conocer en que rango de temperaturas debe trabajar la batería y poder poner cierto remedio a estos cambios de temperatura. Si la temperatura es demasiado baja, la batería se puede calentar mediante calentadores o resistencias y si es necesario bajar la temperatura se pueden incorporar sistemas de refrigeración, ya sea mediante aire a través de un ventilador, refrigeración líquida o incluso bajando su temperatura mediante un compresor funcionando como aire acondicionado.

Control de la carga

Los procesos de carga y descarga de la batería son muy importantes a la hora de mantener una batería en buenas condiciones. La batería debe ser cargada en unas condiciones de tensión e intensidad específicas para no dañarla, el sistema de gestión de batería debe asegurarse de

que se cargue en las condiciones adecuadas ya que una tensión o intensidad fuera de su rango de seguridad puede dañar irreparablemente a una batería.

La batería se recarga introduciendo energía desde otra fuente, típicamente la red eléctrica, por lo que el sistema debe asegurar que la tensión que llega a los bornes de la batería es la correcta por lo que tendrá circuitos electrónicos auxiliares que adecúen la tensión a la necesaria para la carga o se comunicará con una estación de recarga alejada de la batería.

A continuación se muestra la gráfica típica de un proceso de recarga en una batería de ion de litio.



Como vemos la recarga se compone de varias fases dependiendo del estado en el que se encuentre la batería. El sistema de gestión no solo debe ser capaz de cambiar la tensión para adecuarla a la tensión de bornes en la batería sino que además debe cambiarla en relación al estado de carga de la batería.

En los procesos de carga las baterías pueden aumentar mucho su temperatura por lo que se debe de tener cuidado al introducir energía en la batería, ya que aunque la batería soporte una entrada importante de energía en su interior no podremos introducir una intensidad muy alta si eso implica un aumento excesivo de su temperatura.

En la actualidad se han implementado sistemas de recargas rápidas en las baterías que permiten introducir una gran cantidad de energía si existe una necesidad de usarla en un margen corto de tiempo. Aunque la batería soporte estos tipos de carga, una recarga en estas condiciones siempre deteriorara más la batería, limitando su vida útil. Algunos fabricantes incorporan en sus sistemas un contador para saber

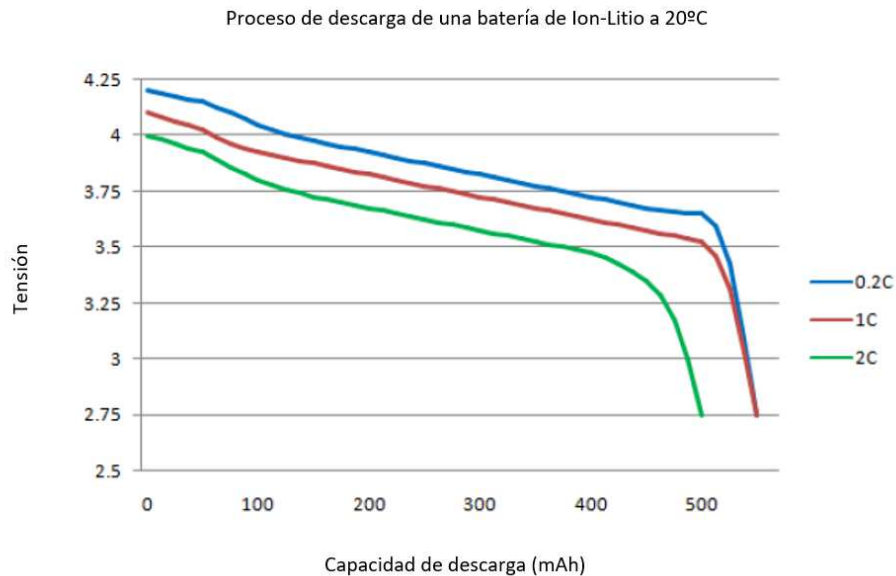
las veces que se ha realizado una recarga de alta potencia para limitar el número de veces que se puede realizar este tipo de recargas con el fin de aumentar la vida útil de las baterías.

Gestión de la descarga

Este apartado se relaciona directamente con el propósito para el cual se va a usar la batería, es decir, la carga que se le va a conectar.

Si bien en este aspecto un diseño del sistema completo en relación a su uso final es fundamental para determinar los procesos de descarga de la batería, el sistema de gestión debe de ser capaz de mantener a la batería en una zona de trabajo adecuada ante cualquier imprevisto en la demanda de energía. La batería es capaz de suministrar corriente en función de la demanda de energía que se requiera y la carga a la que está conectada. Las baterías tienen una capacidad de descarga nominal expresada en Amperios/hora y que especifica los amperios de continuo que puede dar esa batería para agotarse en una hora y se denomina como "C". Esta característica hace prever el tiempo de funcionamiento de una batería en función de su corriente de descarga, ya que si descargamos la batería a 2C durará media hora y si descargamos a 0.5C durará 2 horas, teóricamente, ya que las pruebas reales dicen que cuanto más rápido descargues menos durará la batería y cuanto más lento más durará. Además el fabricante expresa una corriente máxima a la que se puede descargar dicha batería y que no se debe sobrepasar. Es aquí donde el sistema de gestión debe entrar en caso de que se detecte que la batería está descargándose a un nivel excesivamente grande, ya que se pueden producir desperfectos irreparables.

Además hay que tener en cuenta la tecnología de la batería, ya que no es posible aprovechar el 100% de la capacidad de la batería y la descarga se debe interrumpir antes de que la batería se agote del todo. Este nivel mínimo al que una batería puede llegar en su zona de descarga depende de la tecnología de la batería, así que el sistema de gestión debe saber cuál es el umbral de descarga que no debe sobrepasar, ya que en muchas ocasiones si se descarga la batería por debajo de este límite se producen daños irreparables y la celdas es irrecuperable.



En la imagen anterior podemos ver un proceso de descarga típico de una batería de ion de litio (a una determinada temperatura) con diferentes intensidades de descarga. Podemos observar como cuanto mayor es la demanda de energía en la descarga la capacidad de la batería disminuye.

Determinación del estado de la carga.

El estado de la carga es un parámetro muy importante en las baterías y sirve para analizar y controlar los procesos de carga y descarga. El estado de la carga o por sus siglas en inglés SOC (state of charge), se define como la relación entre la capacidad de la batería y su capacidad nominal.

La determinación del estado de la carga es compleja y los métodos que existen suelen dar más una aproximación que el valor real, sobretodo porque la medición se hace en circunstancias muy variadas y con la batería en funcionamiento. También se tiene en cuenta que la capacidad de la batería disminuye con el paso del tiempo por lo que un valor del 100% en los primeros días de uso de la batería no es lo mismo que un 100% después de unos años de uso de la misma. Calcular este valor suele precisar de medidas como la tensión, la corriente, la temperatura,...

La medida directa del estado de la carga se basa en la hipótesis de una corriente de descarga constante, aunque es un método inviable ya que la descarga es variable y, además, se debería conocer el estado de la carga sin descargar la batería.

La medida de la tensión de los bornes de la batería suele ser un método relativamente fácil para determinar el estado de la carga, aunque es un método no muy fiable ya que la tensión varía en los procesos de carga y descarga de una forma no lineal y se puede ver afectado por la temperatura o los diferentes ciclos de carga-descarga. Normalmente se utiliza como método complementario a otras mediciones para determinar el estado de la batería.

En ciertas baterías, como las de plomo-ácido, se puede medir este parámetro mediante la densidad del electrolito, aunque también puede haber errores debido a que es una medida que puede cambiar con la temperatura o se puede haber producido una estratificación del electrolito.

Existen unas pruebas de descarga que se realizan en condiciones controladas que consisten en cargar y descargar la batería. Sin embargo este método es solo aplicable en laboratorios y por lo tanto no es de mucho interés en dispositivos a nivel de usuario ya que no se controlan las condiciones y se tendría que detener la operación de la batería en lo que se realiza esta operación.

En ciertas baterías el estado de la carga se puede relacionar con la impedancia interna de la batería, ya que con los ciclos de carga y descarga los componentes internos de una celda cambian y esto implica una variación de la impedancia interna. Estas pruebas se realizan de dos formas diferentes, ya sean métodos activos o pasivos.

La estimación basada en la intensidad es un método que consiste en integrar la intensidad que carga y descarga las baterías y como resultado daría la carga en el interior de la batería. Es calificado como el mejor método para conocer el SOC debido a que es una medida directa. Es un método relativamente fácil de implementar y preciso aunque presenta algún inconveniente como que es necesario conocer el estado inicial de la batería y que el error de estimación aumenta con el tiempo debido al envejecimiento de la batería.

Estado de salud.

El estado de salud, también denominado SOH (State of Health), es un parámetro el cual se valora el estado de la batería en relación a como se encontraba esa batería nueva, es decir, es un indicador del estado de su vida útil en el que se encuentra. El estado de salud no puede determinar directamente con la medición de ciertos parámetros, sino

que se hace una estimación en función de ciertas mediciones o características de la batería que puedan cambiar a lo largo de los ciclos, como pueden ser impedancias internas, la capacidad o incluyendo el número total de ciclos de carga y descarga que ha sufrido la batería. En muchas ocasiones se suele recurrir a tablas donde se puede comparar los parámetros con la estimación del estado de salud de las celdas o batería.

Balance de las celdas.

El balanceo, equilibrio o ecualización de las celdas es un proceso que el sistema de gestión de la batería lleva a cabo para que todas las celdas de una batería estén en el mismo estado de carga.

Las celdas no son exactamente iguales, ya que pueden sufrir variaciones en el proceso de fabricación, en el almacenamiento o simplemente por pequeñas diferencias de temperatura lo que provoca que no todas se carguen y descarguen a la vez lo que conlleva a una reducción de la capacidad de la batería (debido a que no se usa la totalidad de ciertas celdas) y que se acrecienta con el paso del tiempo. Este sistema también protege a las celdas, ya que si una celda está cargada completamente y otras todavía no, se detectará que la batería todavía no está cargada completamente y se seguirán cargando celdas que ya no necesiten ser cargadas lo que repercutirá en su salud, deteriorándola y provocando un anticipado cambio de la celda o la batería afectada.

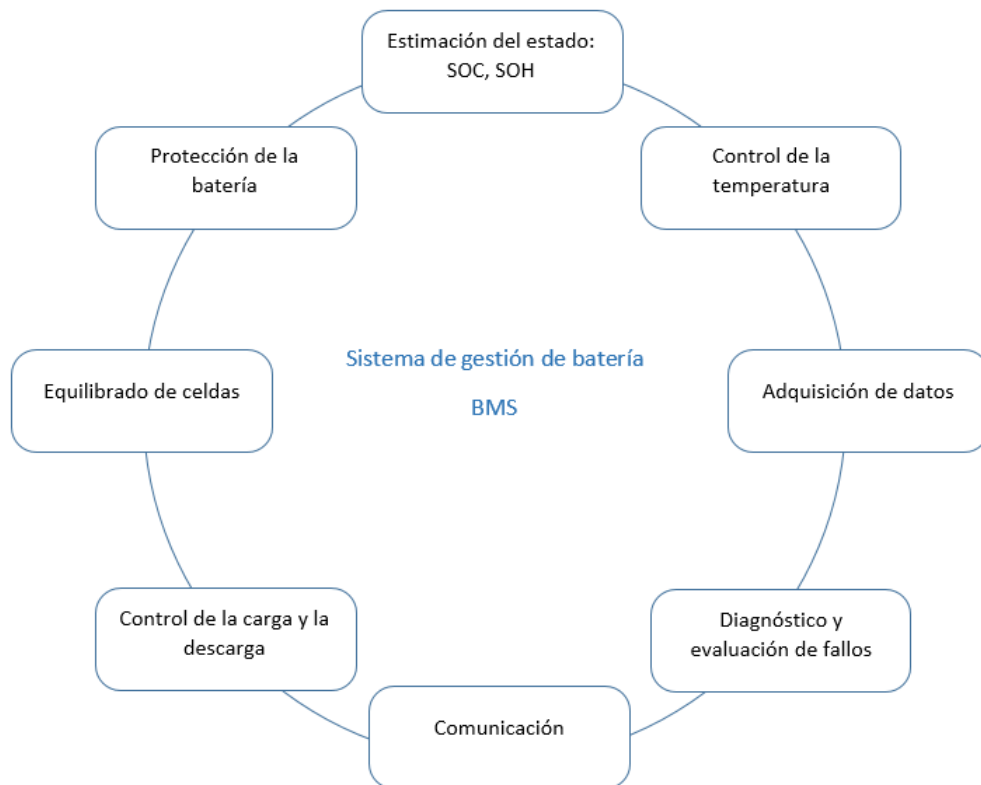
Esta diferencia es la que se debe resolver mediante la incorporación de diferentes circuitos que permitan el correcto balanceo de las celdas y que son gestionados por el sistema de gestión de la batería.

Los métodos para el equilibrio de las celdas se dividen en dos grupos:

- Métodos pasivos: se basan en la disipación de energía de la celda más cargada para igualarla con las menos cargadas.
- Métodos activos: permiten intercambiar energía entre diferentes celdas para que se trasvase energía de las más cargadas a las menos cargadas.

Para nosotros este es el punto más importante, ya que este proyecto está destinado a dar una solución a una batería, ya existente, de una motocicleta eléctrica en el que se han detectado problemas en ciertas celdas de la batería y se quiere evitar que se repitan.

En resumen, las funciones de un sistema de gestión de la batería son las siguientes:



En este esquema se han incluido funciones adicionales que no son tan básicas aunque si se pueden incluir, como son la comunicación y la toma y análisis de datos.

Balance de celdas, tipos y funcionamiento.

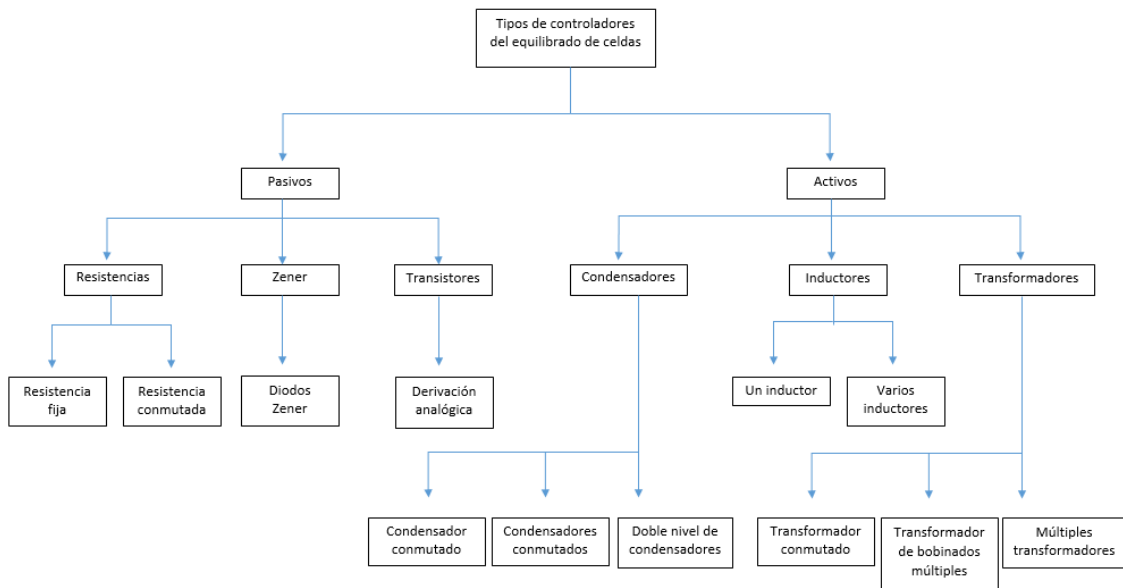
El balanceo de celdas es una función que incorporan los sistemas de gestión de la batería y es la más interesante para nuestro proyecto, por eso vamos a exponer con más detalle los principales métodos de equilibrado de celdas que existen en la actualidad.

Estado del arte.

Los sistemas de equilibrado de celdas en una batería se dividen en dos tipos, pasivos o activos, dependiendo si para el equilibrado consumen la energía de las celdas más cargadas o la reutilizan para cederla a las menos cargadas.

Dentro de cada uno de los dos tipos existe una subclasificación dependiendo de cómo realicen ese equilibrio. En los métodos pasivos, todos se consideran los llamados métodos de celda a calor, ya que transforman la energía en calor. En los métodos activos encontramos varios tipos dependiendo de cómo se reparta la energía sobrante de las celdas, si a otras celdas o un conjunto de ellas o si por el contrario de un conjunto de celdas llega a una sola celda, etc. La clasificación principal se basa en la tecnología y elementos que utilizan para realizar todo el equilibrado.

En el siguiente esquema se puede ver de una forma más clara las diferentes categorías y diferentes procedimientos para realizar el equilibrado.



Métodos pasivos.

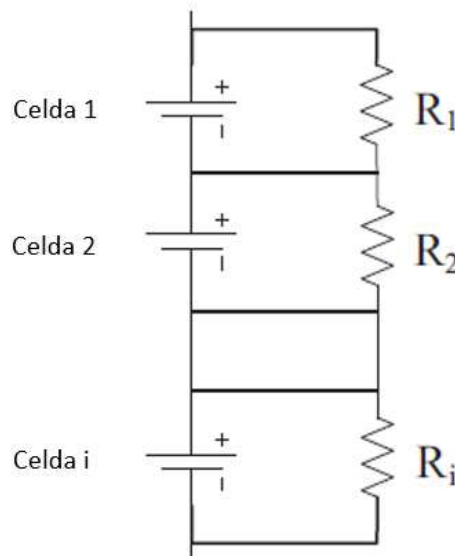
Los métodos pasivos son métodos que se basan en la disipación de energía, son más simples en cuanto a control e implementación y más baratos, por lo que son métodos bastante extendidos en la actualidad. Sus principales desventajas son la pérdida de la energía disipada y la posibilidad de tener altas corrientes durante el periodo de disipación, lo que implica tener componentes capaces de soportar esas corrientes y tener que lidiar con el calor resultante de esas elevadas corrientes.

Los métodos pasivos se suelen utilizar en baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio y níquel-metal hidruro de baja potencia para controlar la sobrecarga de las celdas y protegerlas contra daños.

Entre los métodos pasivos se encuentran:

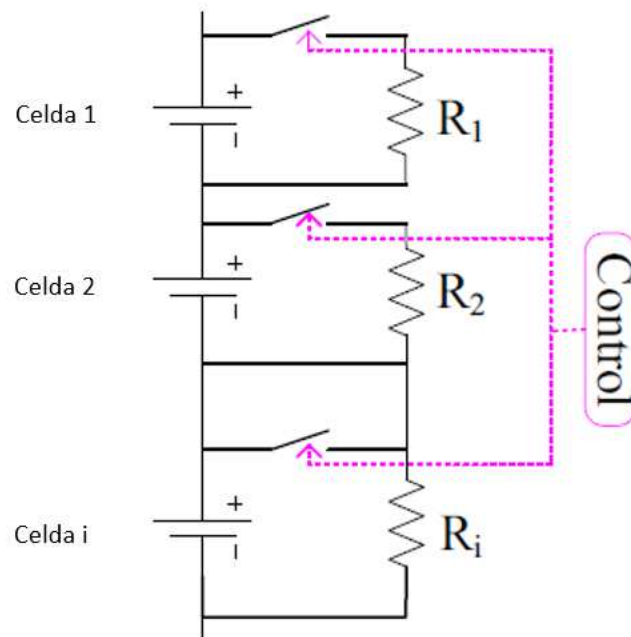
Resistencia fija.

Este método desvía continuamente corriente de las celdas a una resistencia fija colocada en paralelo con ellas. Esta resistencia limita la tensión de la celda aunque la pérdida de energía por la resistencia es constante. Es el método más simple y barato que existe en la actualidad pero debido a la continua pérdida de energía, hace que su uso este cesando.



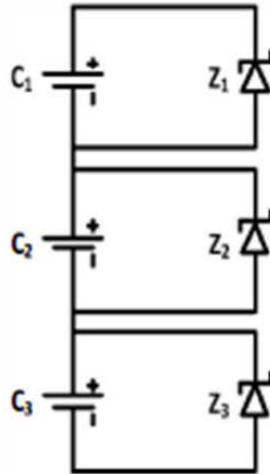
Resistencia conmutada.

Se basa en la resistencia fija solo que ahora no se disipa energía de forma continuada ya que existe un interruptor controlado que conecta la resistencia a la celda solo para liberar a esta de la sobrecarga. Es un método más complejo que el anterior, ya que lleva un controlador para abrir y cerrar los interruptores, aunque sigue siendo un método fácil y económico de implementar.



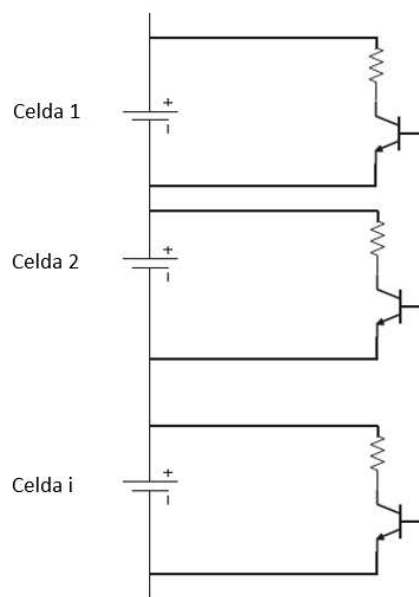
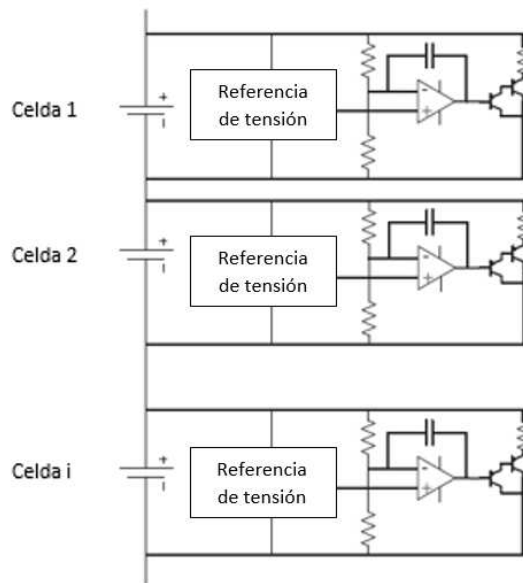
Diodos zener.

Para evitar la pérdida de energía en las resistencias se cambió estas por diodos zener que protegen a las celdas de la sobrecarga, pero debido a las grandes corrientes que deben soportar durante la carga y el equilibrado, hace que tengan que ser componentes sobredimensionados y costosos.



Derivación analógica.

Es el método más efectivo entre los métodos pasivos debido a que se sustituye la resistencia por un transistor. El transistor está controlado por una referencia de tensión. Este circuito controla la tensión de celda constantemente hasta que otras celdas alcanzan la tensión media. El transistor se hace operar en la zona lineal y debido al poder de disipación de los transistores estos circuitos se aplican en el equilibrado de celdas de baterías de baja potencia. Este circuito es más complejo que los anteriores y ya necesita controladores con capacidad analógica.



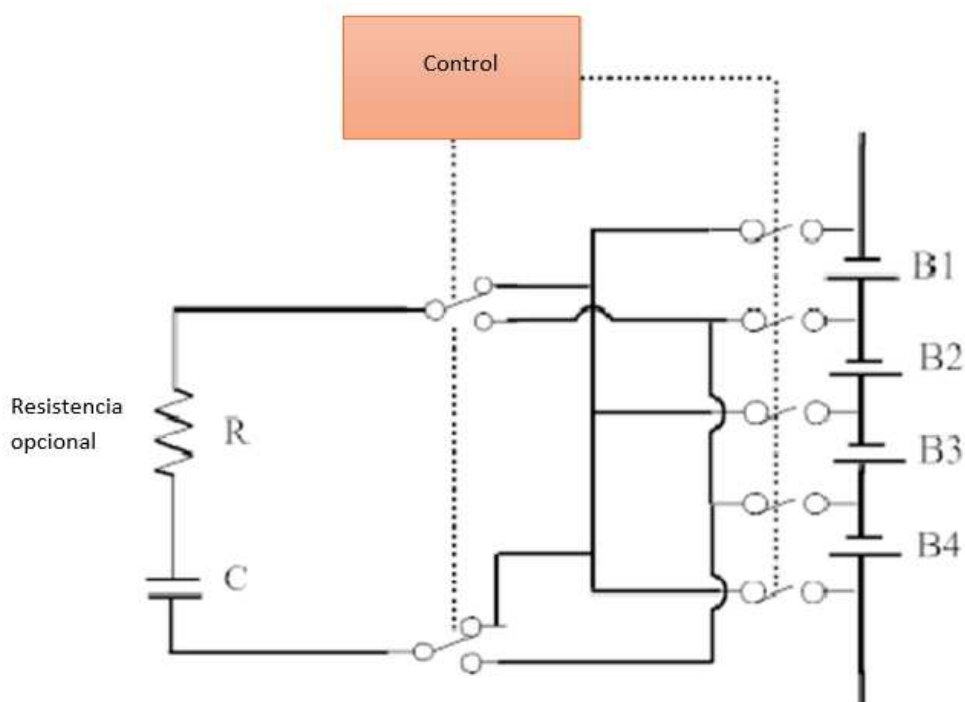
Métodos activos.

Condensador conmutado.

Este circuito de balanceo posee un condensador y una serie de interruptores que se encargan de ir conectando en paralelo el condensador las distintas celdas de la batería en un proceso cíclico. La diferencia de tensión entre la celda y el condensador hace que el condensador entregue carga o absorba de la celda por lo que las más cargadas, en el tiempo de ciclo en el que se conectan al condensador, cederán parte de su energía y las menos cargadas absorberán, por lo que a medida que pasen los ciclos sus potenciales se irán igualando.

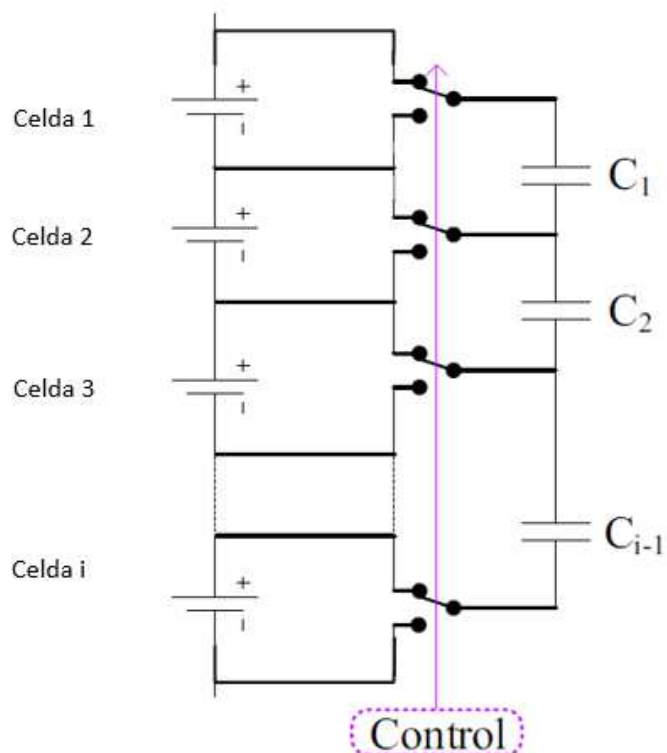
Es un proceso algo lento, sobre todo si las celdas con diferentes tensiones se encuentran bastante alejadas en la serie. Esto se puede mejorar añadiendo medidores de tensión que especifiquen a que celdas se debe conectar el condensador aunque esto supone un control más complejo.

Las intensidades por el condensador pueden llegar a ser grandes, por lo que también se pueden limitar incorporando una resistencia en serie con la desventaja de que se perderá algo de energía en el proceso.



Condensadores conmutados.

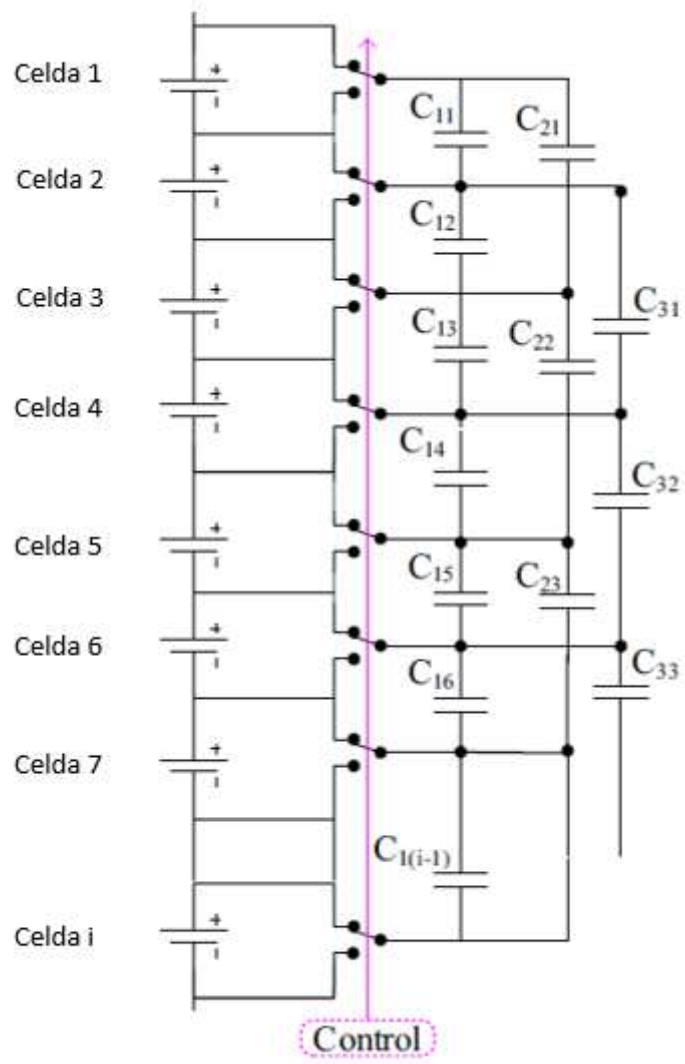
Está basado en el mismo principio que el modelo anterior, con la diferencia de que ahora tenemos una serie de condensadores (1 menos del número total de celda) y cada condensador se conecta entre dos celdas adyacentes para transferir la energía de una a otra. La conmutación la realizar todos los condensadores a la vez a través de unos interruptores con tres posiciones ya que tienen que conectar el condensador a una celda superior y otra inferior además de poseer un estado "0" por el que tienen que pasar cada vez que conmutan para no crear cortocircuitos.

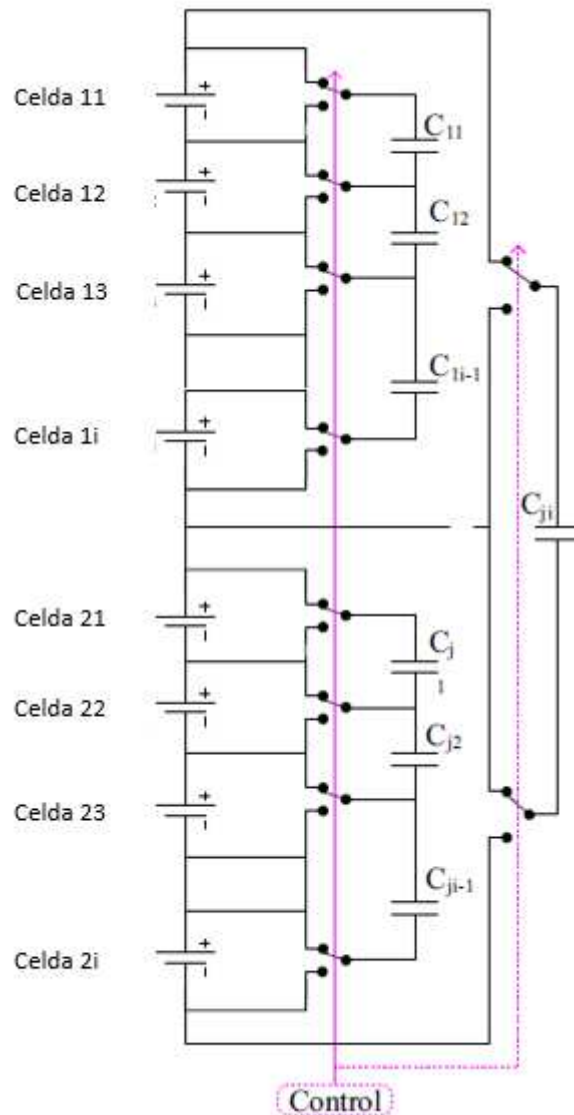


Doble nivel de condensadores.

Este método añade una nueva cadena de condensadores a la cadena principal en un nivel superior con el fin de conectar celdas que antes no eran adyacentes para reducir el tiempo de equilibrado.

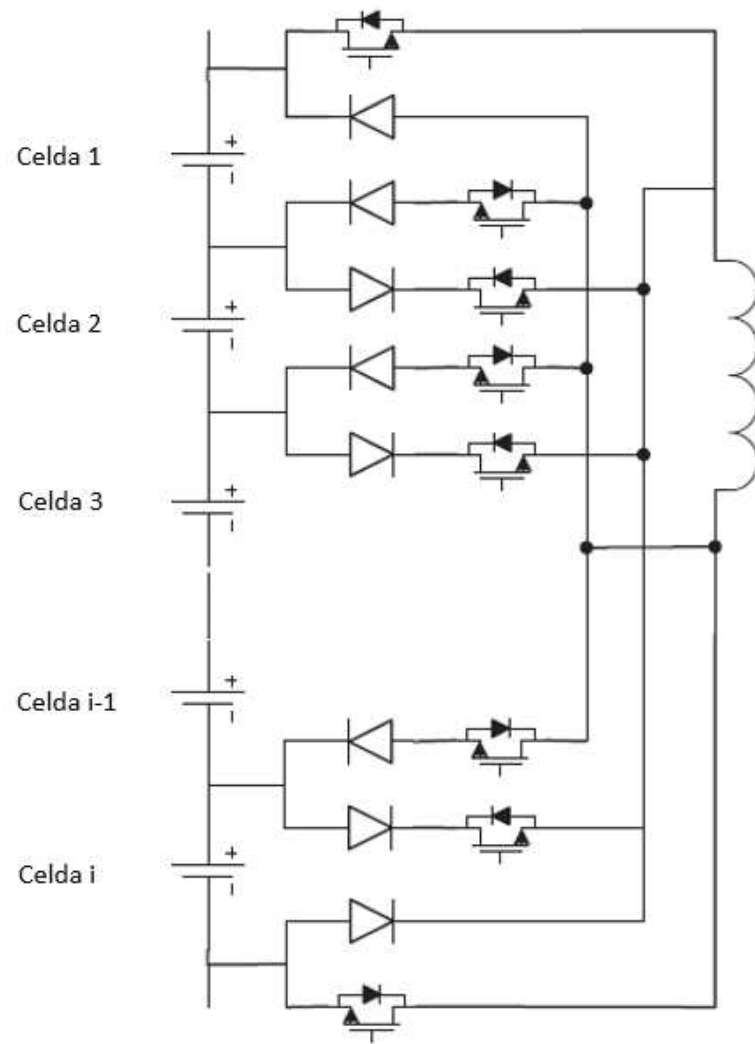
También se puede dividir la batería en módulos que son equilibrados por la segunda cadena y dentro de cada módulo existe la cadena principal que equilibra celda a celda la tensión.



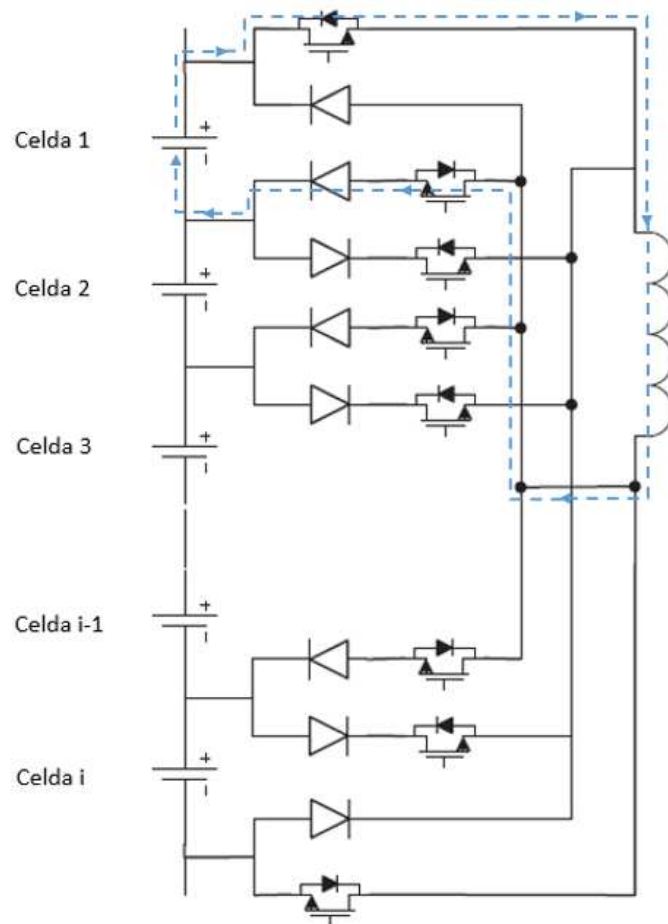


Un inductor.

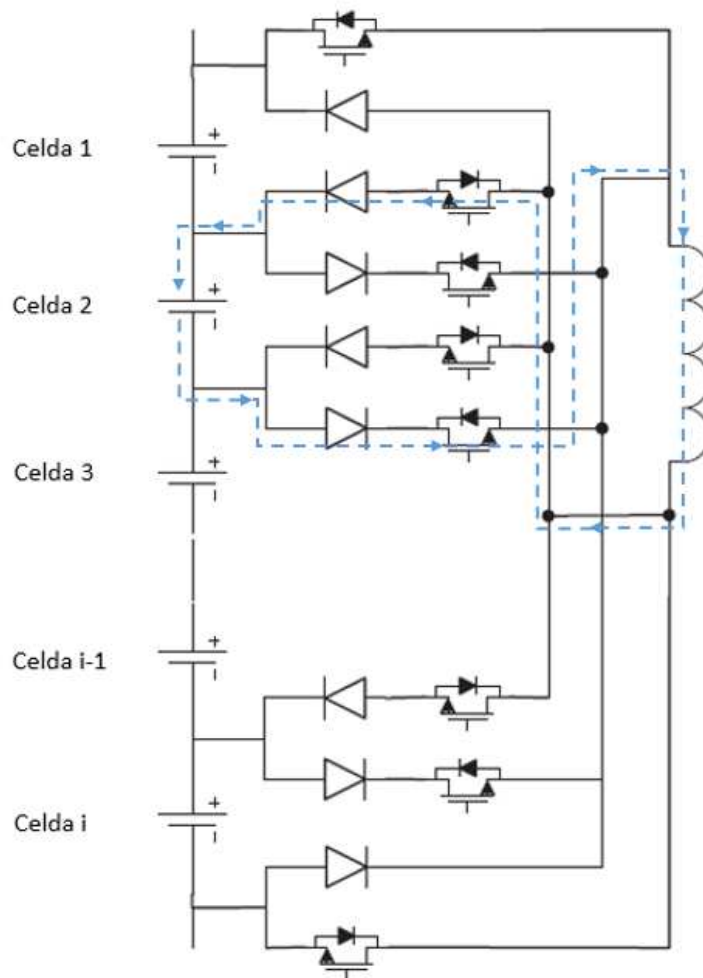
Este es un método que se asemeja al método de un condensador, pero que posee una inductancia como elemento elegido para transferir energía. En este caso los interruptores que conectan la inductancia a las diferentes celdas deben de ser unidireccionales, a excepción de los de los extremos, porque como es sabido, la corriente en una inductancia no puede cambiar bruscamente por lo que debemos conectar cada lado de la inductancia en la posición adecuada. Esto hace que el control sea bastante más complejo aunque el equilibrado con este método sea bastante rápido.



Si, por ejemplo, necesitamos pasar energía de la primera a la segunda celda, el funcionamiento y las corrientes por el circuito es el siguiente:



En primer lugar, cargo la bobina con la energía de la primera celda creando un circuito en el que conecto la primera celda a la bobina.

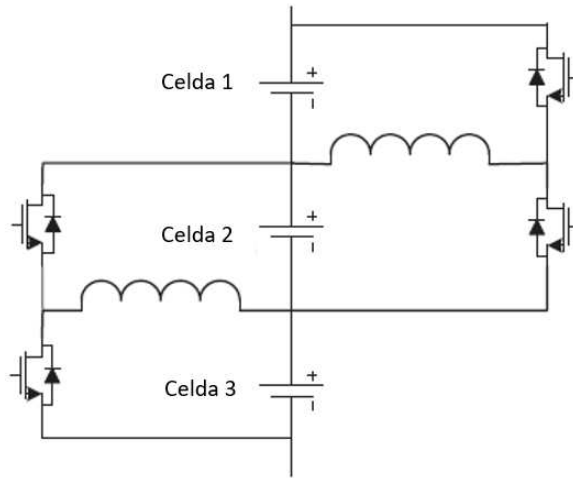


Una vez que la bobina está cargada puedo utilizar esa energía para cargar otra celda, en este caso la segunda. Para ello debo de introducir la corriente de la bobina en la celda, de modo que la cargue y manteniendo siempre el sentido que tenía en la bobina. Una vez que la bobina se ha descargado puedo repetir el proceso con otras celdas.

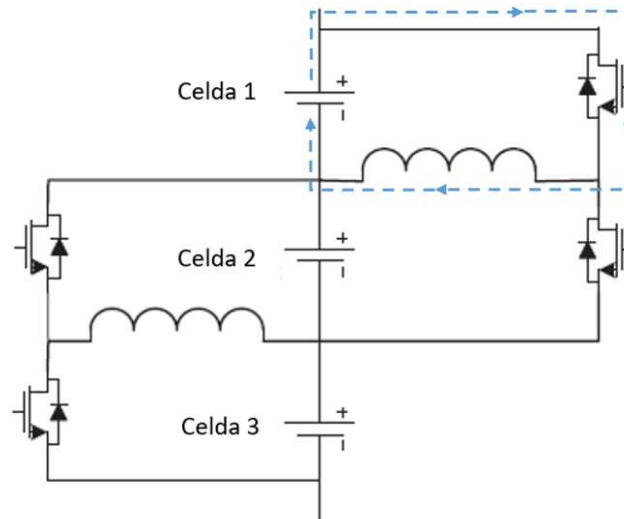
Varias inductancias.

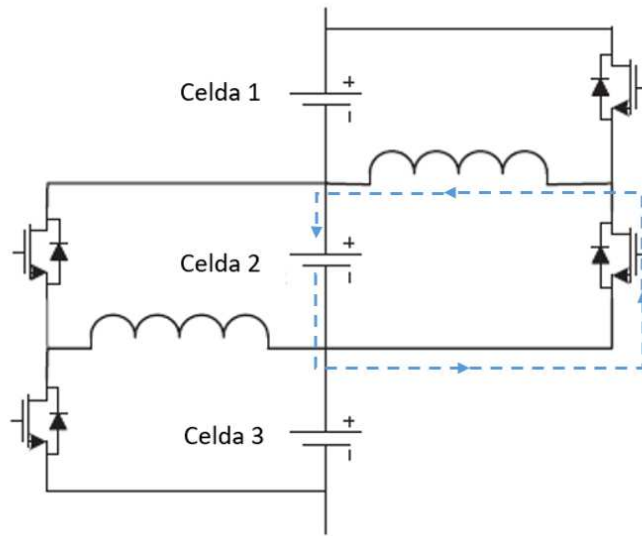
El método de transferencia de energía es similar al caso anterior con la diferencia de que ahora un inductor solo transfiere carga entre dos celdas adyacentes. Es, por lo tanto, un método que utiliza más inductancias que el

método anterior aunque un menor número de interruptores, facilitando un poco el control.



En este caso vemos como, si queremos pasar energía de la primera a la segunda celda, debemos activar y desactivar los interruptores que conectan la bobina que une esas dos celdas de la siguiente forma:

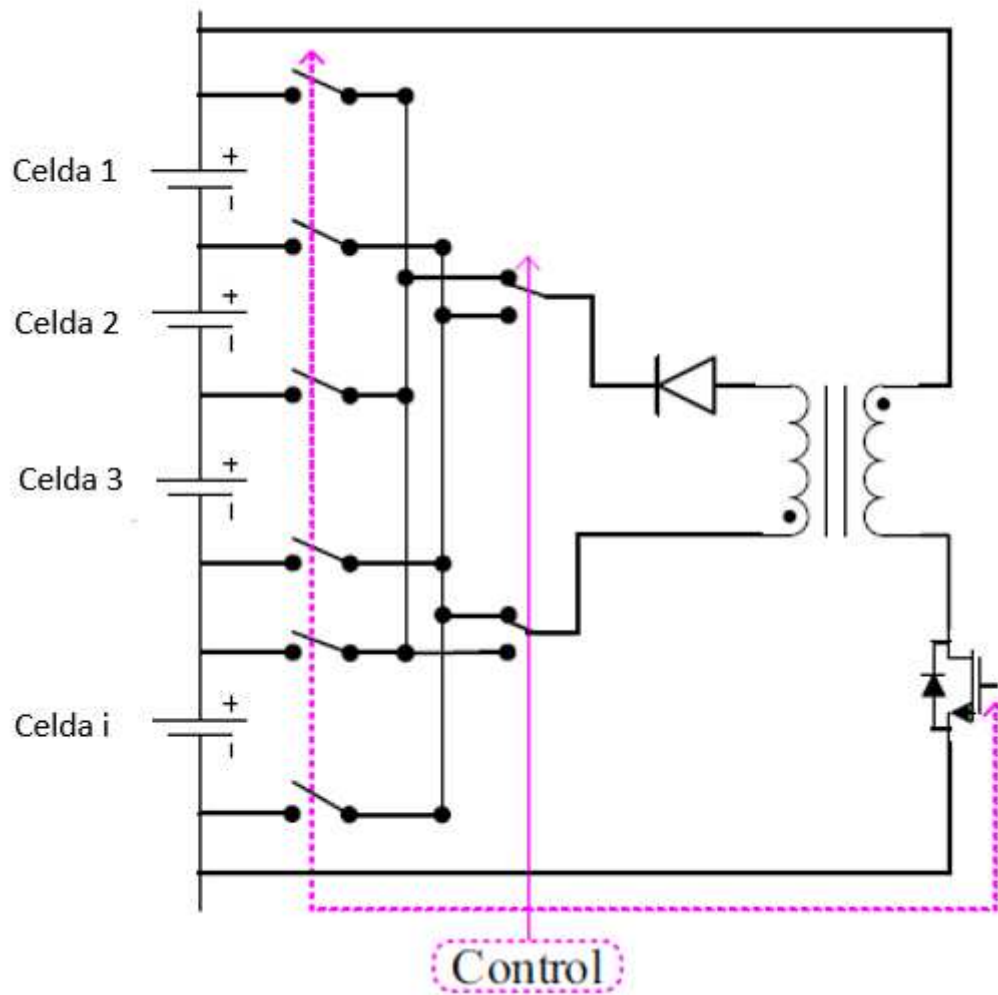




Transformador conmutado.

Este es un tipo de circuito en el que se utiliza un transformador para transferir carga entre las celdas. Este circuito puede intercambiar energía de las celdas al paquete o del paquete a las celdas, ya que se puede controlar como se carga el transformador.

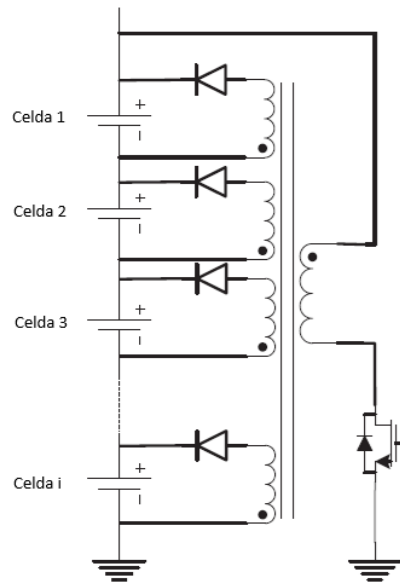
Se requiere tener un control preciso y continuo de cuáles son las celdas más cargadas y la menos descargada, siendo esto el gran inconveniente de este tipo de sistemas.



Transformador de bobinados múltiples.

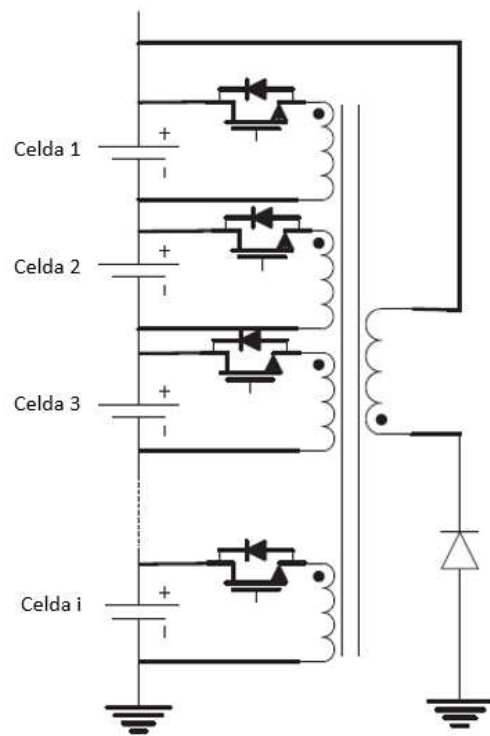
En este caso tenemos un transformador que posee un bobinado por cada celda de la batería. Este tipo de circuito nos permite tanto la transferencia de una celda al paquete o del paquete a una celda.

Si detectamos que una celda está con un nivel de carga superior al resto, conectamos esa celda a su bobinado del transformador para que se descargue por el para, a continuación, descargar el transformador en toda la batería.



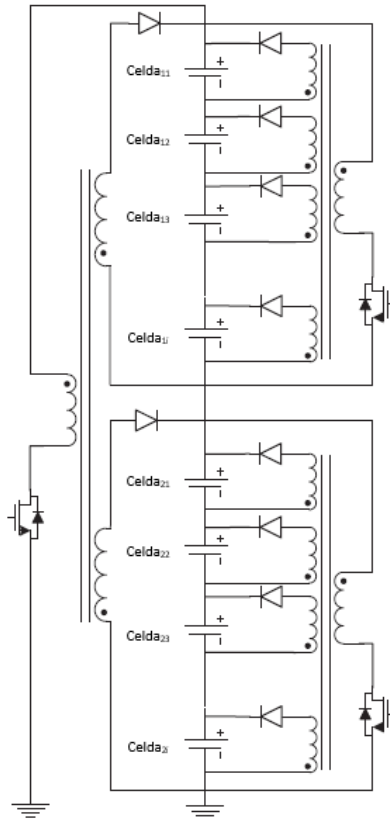
Estructura tipo flyback. Con esta configuración podemos inyectar energía en las celdas menos cargadas desde el paquete de batería

Si por el contrario vemos que una celda tiene una carga por debajo del resto, debemos cargar el transformador con todo el paquete de baterías para luego conectar la celda a su bobinado del transformador para que pueda recibir la energía almacenada.

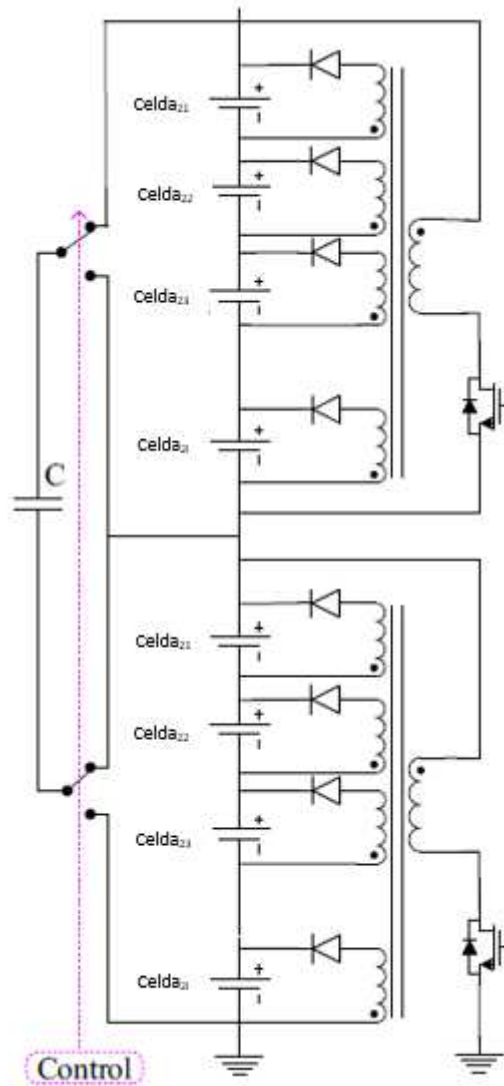


Estructura tipo forward. Con esta configuración podemos traspasar energía de las celdas más cargadas hacia el paquete de batería

Al igual que con otros métodos, los transformadores se pueden agrupar en bloques para que realicen el equilibrado por grupos de celdas, tal y como se muestra a continuación:



También puede haber una variación de este modelo en el cual se combina con el equilibrado de celdas a través de condensadores para dar un modelo híbrido:



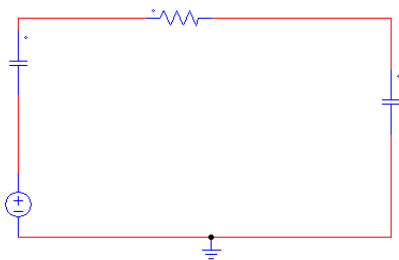
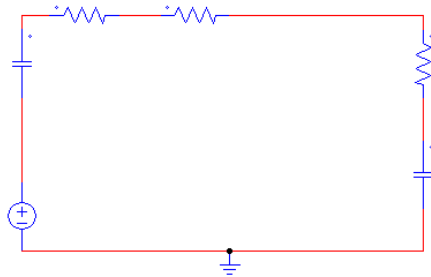
Una vez vistos los métodos existentes en la actualidad de equilibrado de celdas, debemos elegir el método que vamos a implementar en nuestro proyecto. Para ello debemos valorar todos los aspectos de las diferentes opciones, ya que cada uno tiene sus pros y sus contras y elegir el que mejor se adapte a nuestros requerimientos.

Análisis y elección

Después de analizar los diferentes aspectos de cada tipo de ecualización nos decantamos por realizar un equilibrado con condensadores, ya que es un método activo con una pérdida de potencia muy baja, su implementación es de una complejidad adecuada para nuestros recursos tanto en su realización como en su control, además de tener un tamaño adecuado para nuestras necesidades con un coste relativamente contenido. Existen métodos que el equilibrado lo realizan más rápidamente, pero el tiempo no es un factor determinante en nuestro caso.

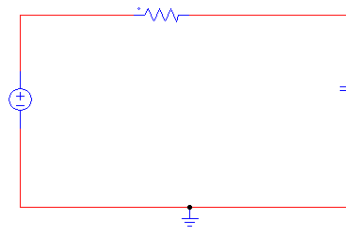
Dentro de todos los métodos que utilizan condensadores, el de los condensadores conmutados es el que llevaremos a la práctica, entre otras razones porque el equilibrado se realiza en un tiempo que no es excesivamente elevado, teniendo un coste y un tamaño pequeño.

El circuito básico de nuestra celda con el condensador de equilibrado es este:



Si agrupamos las resistencias tendremos este circuito

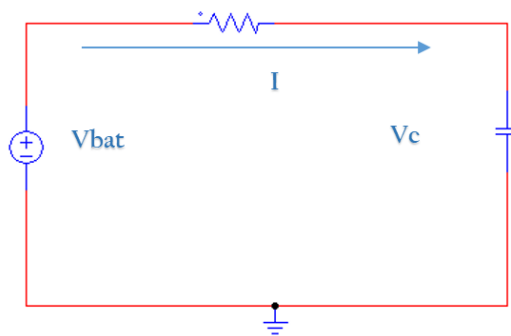
Como el condensador que forma parte de la batería es mucho mayor que el condensador de equilibrado podemos simplificar



Ecuaciones

Ahora analizaremos las diferentes situaciones que se dan en los ciclos de equilibrado.

- 1- El condensador de equilibrado tiene menos tensión que la celda.



$$V_c < V_{bat}$$

$$V_{bat} = V_c(t) + I(t) * \Sigma R$$

$$V_{bat} = V_c(t) + C * \frac{dV_c}{dt} * R$$

$$V_{bat} - V_c(t) = R * C * \frac{dV_c}{dt}$$

$$\int \frac{1}{V_{bat} - V_c(t)} dV_c = \int \frac{1}{RC} dt$$

$$-\ln(V_{bat} - V_c) + k = \frac{t}{RC}$$

$$\ln(V_{bat} - V_c) = k - \frac{t}{RC}$$

$$V_{bat} - V_c = e^{k + \frac{-t}{RC}}$$

$$V_c = V_{bat} - e^{k + \frac{-t}{RC}}$$

En $t=0$ la tensión del condensador será su tensión inicial (V_1):

$$V_1 = V_{bat} - e^{k + \frac{0}{RC}}$$

$$e^k = V_{bat} - V_1$$

$$V = V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

En el caso en el que el condensador se encuentre descargado tenemos la ecuación general de carga de un circuito RC:

$$V = V_{bat}(1 - e^{\frac{-t}{RC}})$$

A partir de esta ecuación podemos averiguar el tiempo que tarda el condensador en llegar a un determinado porcentaje de carga X%.

La tensión V que queremos que tenga el condensador será un porcentaje de la diferencia entre las dos tensiones a las que se encuentra así que:

$$V = V_1 + X(V_{bat} - V_1)$$

$$V_1 + X(V_{bat} - V_1) = V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$V_1 - V_{bat} + X(V_{bat} - V_1) = -(V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$(1 - X)(V_1 - V_{bat}) = -(V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{-t}{RC} = \ln\left(\frac{(1 - X)(V_1 - V_{bat})}{V_1 - V_{bat}}\right)$$

$$t = RC * \ln\left(\frac{1}{(1 - X)}\right)$$

A partir de la ecuación de la tensión en el condensador podemos saber la intensidad del circuito.

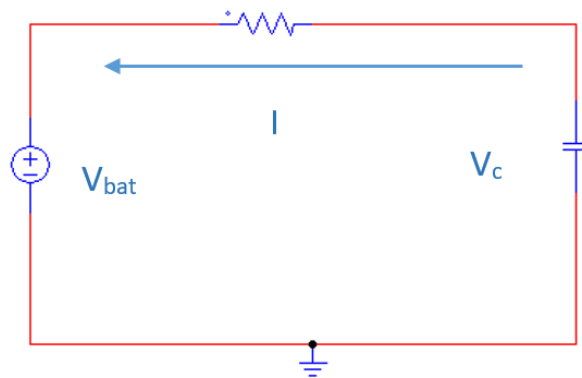
$$V_c = V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q}{C} = V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$q = C * \left(V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{C}{RC} * (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

2- El condensador de equilibrado tiene más tensión que la celda.



$$V_c > V_{bat}$$

$$V_{bat} + I(t) * \Sigma R = V_c(t)$$

$$V_{bat} + RC \frac{-dV}{dt} = V_c(t)$$

$$\frac{-1}{V_c - V_{bat}} dV_c = \frac{1}{RC} dt$$

$$\int \frac{-1}{V_c - V_{bat}} dV_c = \int \frac{1}{RC} dt$$

$$-\ln(V_c - V_{bat}) + k = \frac{t}{RC}$$

$$V_c - V_{bat} = e^{k + \frac{-t}{RC}}$$

$$V_c = e^{k + \frac{-t}{RC}} + V_{bat}$$

En $t=0$ la tensión del condensador será su tensión inicial (V_2):

$$V_2 = e^k + V_{bat}$$

$$e^k = V_2 - V_{bat}$$

$$V_c = V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

Si el condensador se descargara sobre una resistencia o algún otro elemento pasivo y no tuviera una fuente de tensión en serie, la ecuación resultante, es la ecuación general de descarga de un condensador.

$$V_c = V_2 e^{\frac{-t}{RC}}$$

En descarga también podemos ver el tiempo que tarda un condensador en llegar a un cierto punto de descarga del siguiente modo:

La tensión en el condensador es la siguiente:

$$V_c = V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

La tensión V que queremos que tenga el condensador será un porcentaje de la diferencia entre las dos tensiones a las que se encuentra así que:

$$V_c = V_2 - X(V_2 - V_{bat})$$

$$V_2 - X(V_2 - V_{bat}) = V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$V_2 - V_{bat} - X(V_2 - V_{bat}) = (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$(1 - X)(V_2 - V_{bat}) = (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{(1 - X)(V_2 - V_{bat})}{V_2 - V_{bat}} = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$1 - X = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\ln(1 - X) = \frac{-t}{RC}$$

$$t = RC \ln\left(\frac{1}{1 - X}\right)$$

Como vemos, la expresión es la misma que tenemos en carga.

Partiendo de la ecuación de la tensión hallada podemos operar para averiguar la ecuación de la intensidad:

$$V_c = V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q}{C} = V_{bat} + (V_1 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$q = C * \left(V_{bat} + (V_1 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -\frac{C}{RC} * (V_1 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

Cálculo del tiempo de funcionamiento del BMS.

Es importante conocer el tiempo que debe funcionar el sistema para que las celdas tengan una tensión similar.

La energía que es capaz de almacenar un condensador viene dada por la expresión: $\frac{1}{2}CV^2$, la diferencia de tensión entre las celdas de la batería viene dada por la diferencia de tensión que encontramos en el condensador equivalente que corresponde a nuestra celda y suponemos que la tensión es constante en la transferencia de energía, ya que $C_{BMS} \ll C_{bat}$.

La energía que tendremos que pasar de una celda a otra de la batería será:

$$\text{Diferencia de energía} = \frac{1}{2}C_{bat}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{bat}V_2^2$$

Esta energía la pasaremos a través de un condensador de capacidad menor a la de la batería y moviéndose entre las tensiones de la batería, por lo que deberá realizar varios ciclos para mover toda la energía.

En el condensador de equilibrado tendremos:

$$\text{Diferencia de energía} = n \cdot \left(\frac{1}{2}C_{eq}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{eq}V_2^2 \right)$$

Si igualamos las dos expresiones sabremos el número de ciclos necesarios para que el condensador de equilibrado mueva toda la energía necesaria:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}C_{bat}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{bat}V_2^2 &= n \cdot \left(\frac{1}{2}C_{eq}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{eq}V_2^2 \right) \\ n &= \frac{\frac{1}{2}C_{bat}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{bat}V_2^2}{\frac{1}{2}C_{eq}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{eq}V_2^2} = \frac{C_{bat}}{C_{eq}} \end{aligned}$$

Con la ecuación de la tensión del condensador, hemos sacado una relación del tiempo que tarda en llegar a un determinado porcentaje de carga:

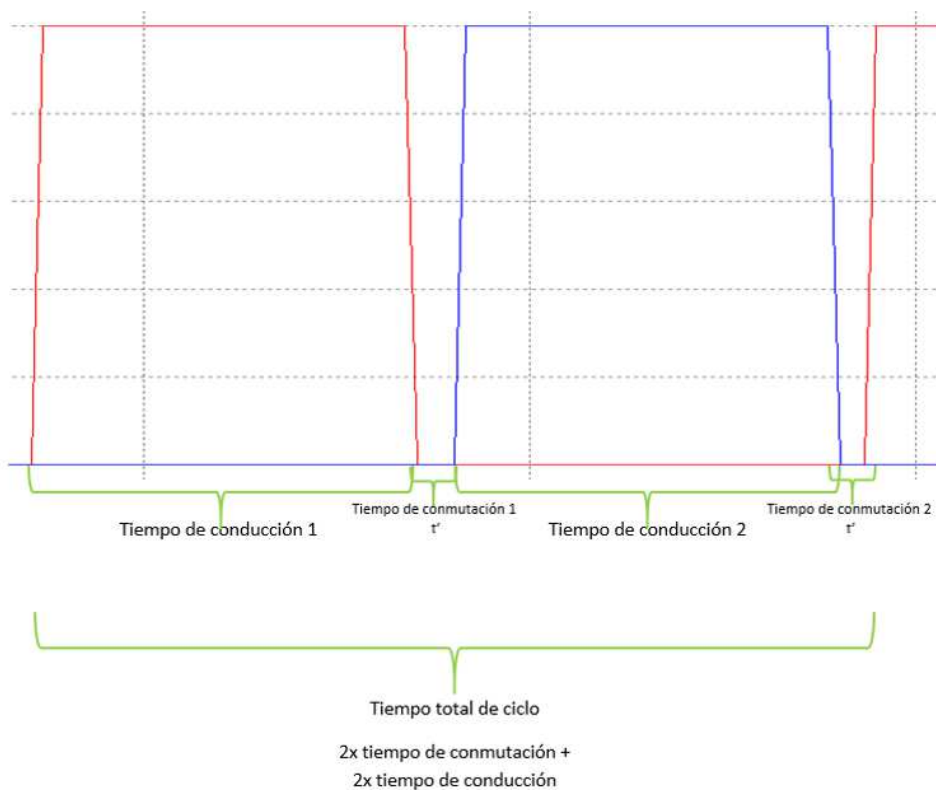
$$t = RC * \ln\left(\frac{1}{(1-X)}\right)$$

Si consideramos que el condensador está cargado cuando se encuentra al 95% de la tensión, tenemos que el tiempo es:

$$t = RC * \ln\left(\frac{1}{1 - 0.95}\right) \approx 3RC$$

El tiempo total del ciclo deberá ser $2 \cdot 3RC + 2 \cdot t'$, ya que en cada ciclo el condensador deberá cargarse y descargarse y tendrá que haber un tiempo (t') en el que se realiza la conmutación y el condensador no carga ni descarga. . Así pues el tiempo se define como $(6 \cdot R \cdot C_{BMS} + 2 \cdot t') \cdot \frac{C_{bat}}{C_{BMS}}$. Si el tiempo t' es mucho menor que el tiempo de ciclo, sería despreciable quedándonos aproximadamente:

$$\frac{6 \cdot R \cdot C_{BMS} \cdot C_{bat}}{C_{BMS}} = 6 \cdot R \cdot C_{bat}$$



Como vemos el tiempo es independiente del condensador que utilicemos para nuestro BMS, ya que un condensador más grande, nos permitirá transferir más energía en cada ciclo pero los ciclos serán mucho más grandes.

Optimización del tiempo de funcionamiento del BMS

Optimización en función de la potencia

El condensador tiene una tensión y una corriente que varía con el tiempo. Si sabemos cuándo se produce la potencia instantánea máxima es un punto de interés ya que sabremos cuando estamos transfiriendo al condensador más energía por unidad de tiempo y es posiblemente un punto óptimo.

Primero hacemos los cálculos con un condensador completamente descargado:

Sabemos que cuando un condensador está cargando:

$$V = V_{bat}(1 - e^{\frac{-t}{RC}})$$

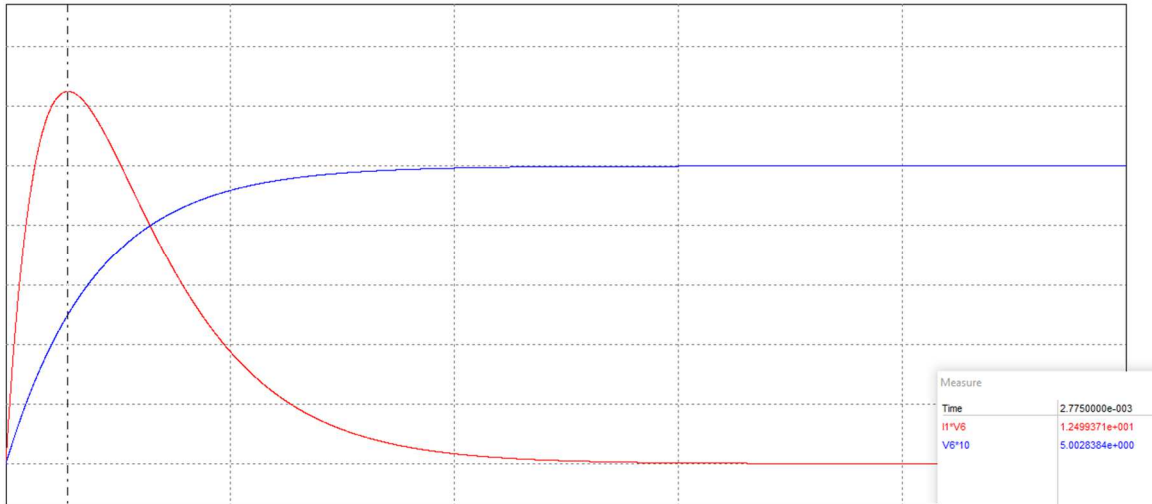
$$I = \frac{V_i}{R} e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$P = V \cdot I$$

Si hacemos la derivada de la potencia y lo igualamos a 0 hallamos el punto máximo de potencia que se da en:

$$\frac{dP}{dt} = 0 \Rightarrow t = RC \cdot \frac{\log(2)}{\log(e)}$$

Este valor se da justo cuando se alcanza la mitad de la tensión final del condensador:



Para realizar un estudio completo realizamos los cálculos de la tensión e intensidad del condensador en cualquier situación y a partir de sus ecuaciones comprobamos la potencia máxima.

Para optimizar el sistema vamos a tratar de hacer que el circuito funcione en una zona donde la potencia con la que se trabaja sea máxima, reduciendo de este modo los tiempos de equilibrado.

Para ver donde la potencia alcanza su valor máximo realizaremos los cálculos en la situación de carga del condensador de equilibrado, ya que en la descarga es imposible optimizar el funcionamiento debido a que el condensador posee una tensión elevada en el inicio.

Descarga:

$$V = V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$I = -\frac{(V_2 - V_{bat})}{R}e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$P = V * I = \left(V_{bat} + (V_2 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}} \right) * \left(-\frac{(V_2 - V_{bat})}{R}e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

$$P = -V_{bat} * \frac{(V_2 - V_{bat})}{R}e^{\frac{-t}{RC}} - \frac{(V_2 - V_{bat})^2}{R}e^{\frac{-2t}{RC}}$$

$$\frac{dP}{dt} = V_{bat} * \frac{\Delta V}{R^2 C}e^{\frac{-t}{RC}} + 2 * \frac{\Delta V^2}{R^2 C}e^{\frac{-2t}{RC}}$$

$$2 * \frac{\Delta V^2}{R^2 C} e^{\frac{-2t}{RC}} = -V_{bat} * \frac{\Delta V}{R^2 C} e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$2 * \Delta V * e^{\frac{-2t}{RC}} = -V_{bat} * e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$2 * \Delta V * e^{\frac{-t}{RC}} = -V_{bat}$$

$$e^{\frac{-t}{RC}} = \frac{-V_{bat}}{2 * \Delta V}$$

$$-\frac{t}{RC} = \text{Ln}\left(\frac{-V_{bat}}{2 * \Delta V}\right)$$

Al llegar a este punto vemos como tenemos un logaritmo negativo irresoluble. Esto se debe, como hemos aclarado antes, a que en la descarga en $t=0$ la potencia es máxima ya que la tensión y la intensidad son máximas en ese punto.

Pasamos a comprobar el proceso de carga.

Carga:

Las ecuaciones de tensión e intensidad son:

$$V = V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} e^{\frac{-t}{RC}}$$

De este modo la potencia será:

$$P = V * I = (V_{bat} - (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}}) * \left(\frac{V_{bat} - V_1}{R} e^{\frac{-t}{RC}}\right)$$

$$P = V_{bat} * \frac{V_{bat} - V_1}{R} e^{\frac{-t}{RC}} - \frac{(V_{bat} - V_1)^2}{R} e^{\frac{-2t}{RC}}$$

Para hallar el punto donde es máxima la potencia, y por lo tanto la transferencia de energía, debemos derivar e igualar a cero la ecuación:

$$\frac{dP}{dt} = -V_{bat} * \frac{V_{bat} - V_1}{R^2 C} e^{\frac{-t}{RC}} + 2 * \frac{(V_{bat} - V_1)^2}{R^2 C} e^{\frac{-2t}{RC}} = 0$$

Para averiguar el tiempo necesario hasta alcanzar el punto máximo despejamos t:

$$2 * \frac{\Delta V^2}{R^2 C} e^{-\frac{2t}{RC}} = V_{bat} * \frac{\Delta V}{R^2 C} e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$2 * \Delta V e^{-\frac{2t}{RC}} = V_{bat} e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$e^{\frac{t}{RC}} = \frac{2 * \Delta V}{V_{bat}}$$

$$t = RC * \ln \frac{2 * \Delta V}{V_{bat}}$$

Como observamos nos queda en función de RC, constante en nuestro circuito, y de la tensión de la celda y la diferencia que existe entre esta y la del condensador de equilibrado. Para que sea un tiempo valido la diferencia de tensión debe ser como mínimo la mitad del valor de la tensión de celda. Esto hace que nos sea inviable la optimización, ya que las diferencias de tensión en nuestro caso no serán muy grandes.

Cuando tenemos cierta tensión en el condensador la potencia máxima se da en el instante $0+\Delta t$, ya que tenemos la intensidad máxima y una tensión de un valor lo suficientemente elevado. Lógicamente a medida que la tensión inicial del condensador es mayor y la diferencia entre la tensión inicial y la tensión final es menor la potencia máxima se va desplazando hacia tiempos inferiores.

La optimización del movimiento de energía por parte del BMS no es posible de este modo, ya que la potencia máxima se da en los primeros instantes de conmutación y a partir de ahí va descendiendo.

Se podría programar para que el periodo de funcionamiento sea los más corto posible pero haciendo que los tiempos muertos entre conmutaciones sean lo más despreciables posibles.

Optimización en función de la intensidad

Otro modo de intentar optimizar el tiempo de funcionamiento del BMS es haciendo que la intensidad que circule por nuestro circuito no supere un determinado valor:

En este método no tratamos de encontrar un punto óptimo del tiempo de funcionamiento del sistema sino que optimizamos los componentes en función de la intensidad que queremos en nuestro circuito.

En carga la intensidad es:

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

La intensidad máxima se da en $t=0$, por lo que la intensidad máxima será:

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R}$$

La intensidad es función de la diferencia de tensión entre el condensador de equilibrado y la celda de la batería. La intensidad máxima por nuestro circuito se daría en el primer ciclo cuando el condensador está descargado y la tensión de la batería puede llegar a estar en torno a 3.5V. Esto solo se daría durante los instantes iniciales, pero si nos centramos en la zona de funcionamiento más estacionaria, la diferencia de tensión sería como máximo la diferencia de tensión entre dos celdas adyacentes, que en el peor de los casos podría ser de 1V.

La resistencia de nuestro circuito será la suma de la resistencia interna del condensador y la resistencia que ofrezca el interruptor. Estas resistencias suelen ser muy pequeñas por lo que si necesitamos limitar más la corriente deberemos incorporar resistencias adicionales. Si incluimos resistencias adicionales perderemos parte de la energía de la batería durante el equilibrado.

En el caso de la descarga la intensidad es:

$$I = -\frac{V_1 - V_{bat}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

Como en el caso anterior la intensidad máxima se da en $t=0$:

$$I = -\frac{V_1 - V_{bat}}{R}$$

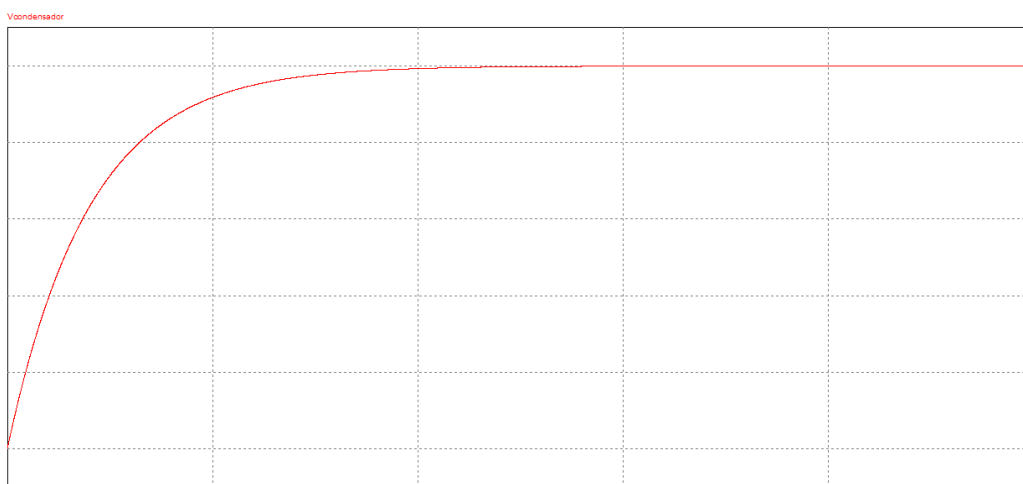
En el caso de la descarga, el condensador de equilibrado siempre se descarga sobre una celda de la batería con una cierta tensión así que la diferencia de tensiones máxima será la diferencia entre dos celdas adyacentes, por lo que tenemos el mismo caso que en el estacionario de la carga.

Para dimensionar la intensidad máxima de nuestro circuito tenemos como elementos críticos los condensadores de equilibrado y los conmutadores de control. Estos elementos serán más caros y grandes cuanto más intensidad puedan soportar, así que, deberemos elegirlos acorde a nuestros intereses y una vez que los tengamos incluir la resistencia para limitar la corriente, si es que es necesario.

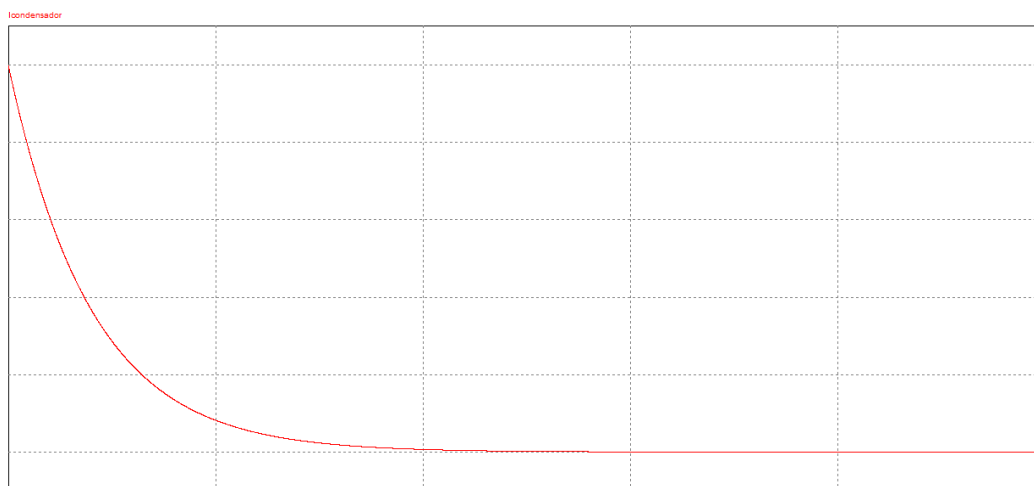
Optimización del tiempo de carga del condensador en la zona lineal de la intensidad de carga.

Para intentar reducir el tiempo de equilibrado, hacemos trabajar al sistema de una forma en la que los condensadores de equilibrado no se carguen por completo.

Los valores que adquieren la tensión y la intensidad de un condensador en los procesos de carga y descarga tienen la siguiente forma:



Variación de la tensión en un condensador en un proceso de carga



Variación de la intensidad en un condensador en un proceso de carga

Como se aprecia en las gráficas, en los primeros instantes, el condensador se carga más rápidamente, es decir, la energía que almacena por unidad de tiempo es mayor. Esto se puede ver en la pendiente de la gráfica de la tensión del condensador.

Si hacemos trabajar al condensador en una zona en la que la intensidad que circula por el sea elevada y conmutamos cuando la intensidad no ha descendido mucho, la intensidad media que circula por el condensador será mayor que si esperamos a que se cargue completamente.

Sabemos que la potencia es máxima en los primeros instantes del ciclo, por lo que nos es imposible realizar una optimización. Para poder tener un tiempo específico de conmutación en nuestro sistema vamos a ver cuál es la zona inicial que se puede aproximar a una zona lineal sin cometer mucho error. Esta zona determinará nuestro tiempo de ciclo.

Como hemos calculado anteriormente la intensidad es:

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

En la función exponencial tenemos unos coeficientes de $-\frac{t}{RC}$. En estas funciones exponenciales la zona lineal se encuentra cuando el exponente se mueve entre ± 1 , por lo que en nuestro caso la zona lineal estará en $t < RC$.

Para calcular la expresión lineal de la intensidad lo hacemos en torno al punto $t=0$, sabiendo que:

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} + \frac{dI}{dt} \cdot t$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot \left(\frac{V_{bat} - V_1}{R} \right)$$

Quedando:

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} - \frac{1}{RC} \cdot \left(\frac{V_{bat} - V_1}{R} \right) \cdot t$$

$$I = \frac{V_{bat} - V_1}{R} \cdot \left(1 - \frac{t}{RC} \right)$$

Siempre que $t < RC$ la intensidad se podrá aproximar a esta ecuación lineal.

Tiempos muertos y relación con el tiempo total:

Ahora vamos a ver los tiempos muertos que se producen en nuestro sistema y que importancia tienen en relación al tiempo total.

Primero debemos saber cuál es el tiempo de conmutación de nuestros interruptores. Este tiempo dependerá del interruptor que escojamos pero como todavía no lo tenemos, vamos a ponernos en una situación en la que tardemos en hacer la conmutación $50\mu\text{s}$.

Para saber si los tiempos muertos son importantes o no, vamos a coger la situación en la que cargamos el condensador durante un tiempo de RC, ya que es el tiempo más pequeño que nos hemos propuesto para nuestra frecuencia de conmutación. La resistencia será la suma de la resistencia interna del condensador de equilibrado más la resistencia que oponen los interruptores de conmutación. Esta suma será una resistencia relativamente pequeña que pondremos típicamente en torno a 0.5Ω . El condensador de equilibrado será relativamente grande y su valor final dependerá de su tamaño y de las opciones que encontremos en el mercado, pero podemos presuponer para hacer estos cálculos que se encontrará en torno a 0.5F .

La combinación de la resistencia y el condensador nos da un tiempo de $0.5 \cdot 0.5 = 0.25\text{s}$. Tiempo muy superior al de los tiempos muertos y estos solo serían el 0.02% del tiempo total.

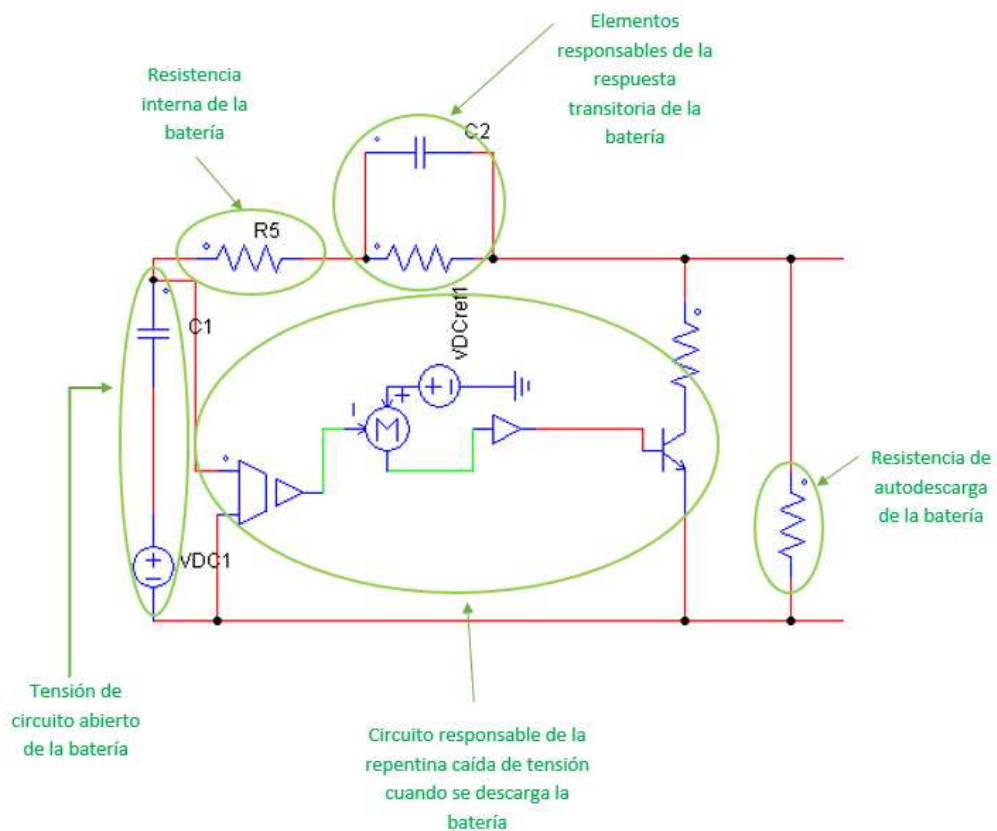
Si para realizar las conmutaciones usamos la red como reloj, tendremos una frecuencia de conmutación de 50Hz , lo que supone 0.02s por conmutación. Este tiempo de conmutación hace que el porcentaje de tiempos muertos suba al 0.25% del tiempo total.

Aun así, estos tiempos son todavía pequeños, así que ahora comprobamos cual sería el tiempo de carga y descarga mínimo que tendríamos que tener para que los tiempos muertos no superasen un valor de más del 1% del tiempo total. En nuestro caso y con un tiempo de conmutación de $50\mu\text{s}$, el tiempo mínimo de carga del condensador sería de 5ms . Si consideramos que la resistencia de nuestro circuito será de aproximadamente 0.5Ω , el condensador que deberíamos usar tendrá un valor de al menos 10mF .

Simulaciones.

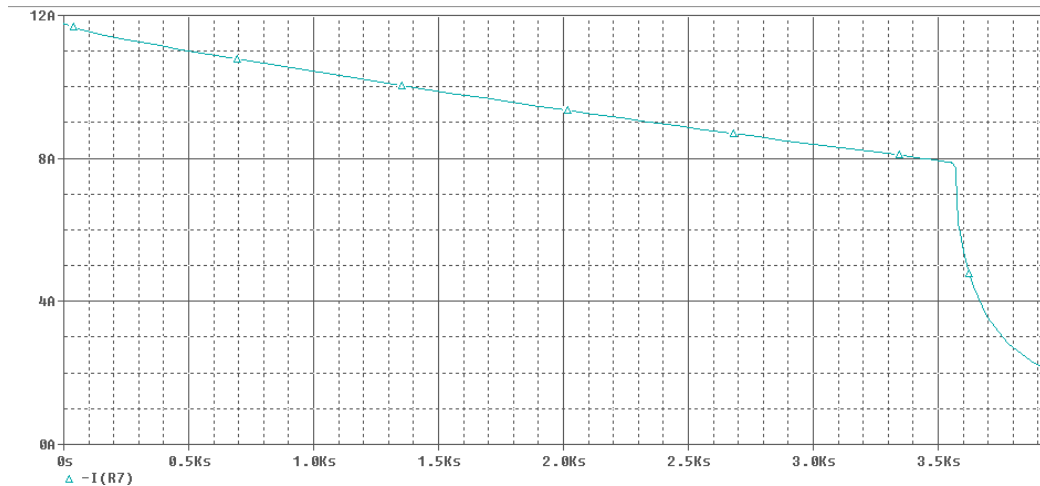
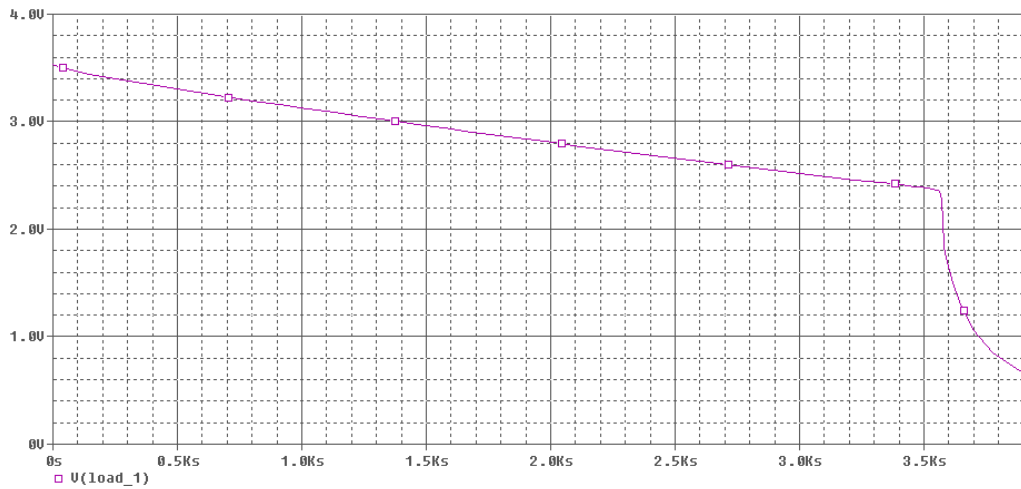
Para simular como es el funcionamiento de nuestro BMS, primero debemos tener un circuito que imite el comportamiento de una batería, ya que, aunque suponemos que una batería es un elemento con tensión constante realmente la tensión que tiene varía con el tiempo y la carga, por lo que no podemos simularla con los elementos básicos.

El comportamiento de una batería se puede asemejar al del siguiente circuito:



Para simular, en primer lugar debemos conocer las características de las celdas de nuestra batería. Las celdas que vamos a usar tienen una capacidad de 10A/h y una tensión de 3.2V nominales.

La tensión de circuito abierto debe ser de 3.2V nominales aunque debemos tener en cuenta que cuando la batería está cargada completamente la tensión es ligeramente superior. La fuente de tensión representa una tensión mínima de la batería, establecida en 1.85V y la tensión inicial del condensador será de 1.75V. La capacidad del condensador es el valor que representa la capacidad de la batería y debe ser de 10A/h por lo que tras varias simulaciones hemos concluido que el valor será de 30kF.



Como podemos comprobar la duración de la batería simulada con una carga de 10 A es de 1 hora.

La resistencia interna y la de autodescarga son proporcionadas por el fabricante de la batería, que en nuestro caso valen 0.00250hm y 1M0hm respectivamente.

Los valores del condensador C2 y su resistencia en paralelo, que simulan la respuesta transitoria de la batería, se obtienen de la experimentación con la batería y el modelo simulado para obtener los valores que queremos. Tras ver las distintas simulaciones y comprobar los resultados con otros experimentos similares, llegamos a alcanzar unos valores de 20kF para el condensador y de 0.0050hm para la resistencia aproximadamente.

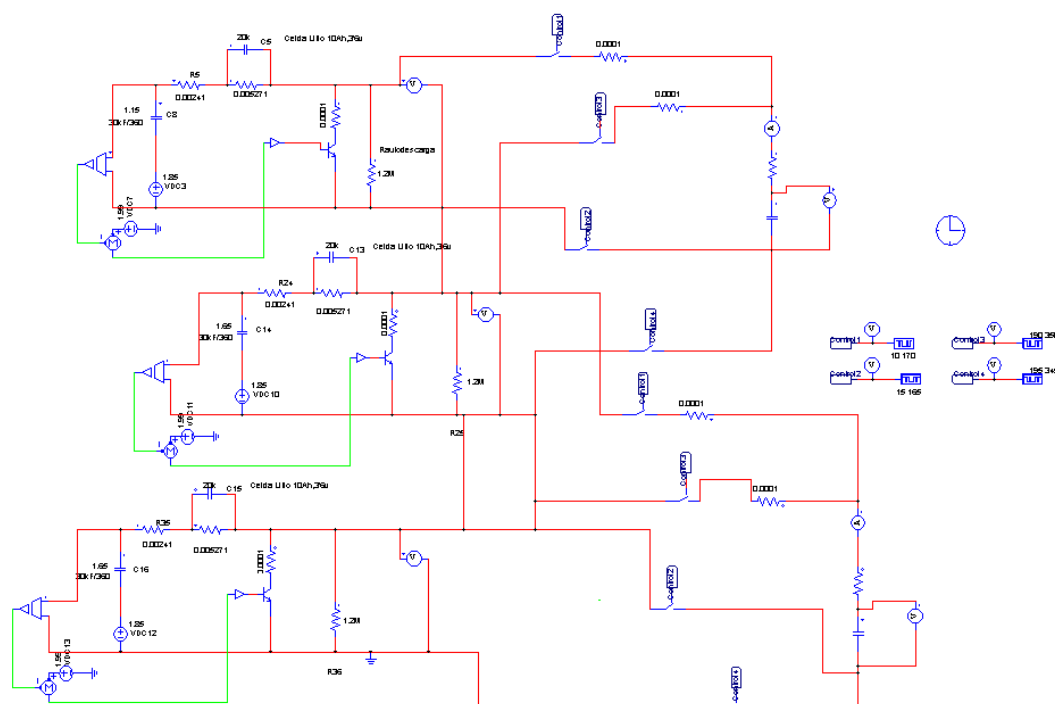
El circuito que provoca que la batería tenga una caída de tensión cuando se descarga por debajo de sus límites se compone básicamente de un transistor

que controlamos con la tensión de referencia de la celda y conduce cuando esta cae por debajo de los 2.5V.

Para ver el comportamiento del sistema vamos a simular 3 celdas que poseen nuestro circuito de equilibrado acoplado a ellas, variaremos diferentes parámetros y observaremos y sacaremos conclusiones de las simulaciones.

Con el fin de reducir los tiempos de simulación vamos a reducir la capacidad de la batería, aunque los resultados siguen siendo extrapolables a unas celdas de mayores dimensiones.

Nuestro circuito de simulación se muestra a continuación y nos referiremos como celda 1 a la situada en la parte superior, la celda 2 será la situada en el centro y la celda 3 es la situada en la parte inferior.



La finalidad de las simulaciones es comprobar el correcto funcionamiento del sistema, cómo evoluciona a lo largo del tiempo y comprobar la diferencia entre los tiempos de conmutación.

Las primeras simulaciones se realizan con un periodo de carga y descarga de $3RC$ para cargar los condensadores al 95%. Más adelante se comprobará como cambia el tiempo de equilibrado al variar el tiempo de conmutación.

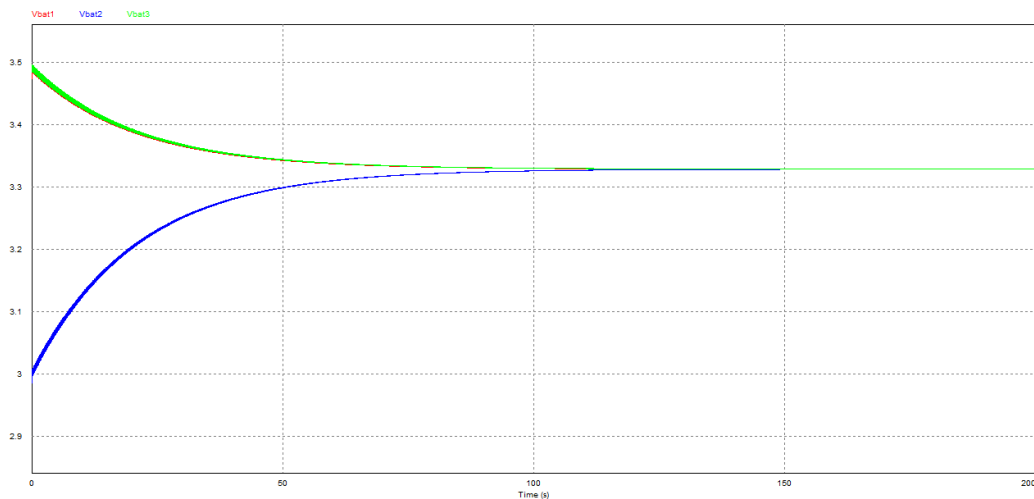
En primer lugar vamos a ver cómo se comporta el sistema cuando una de las tres celdas tiene una tensión menor que las otras dos. Comprobaremos cómo evolucionan las tensiones tanto si la celda más descargada está en un extremo como si está en el centro.

Tensiones iniciales:

Celda1: 3.5V

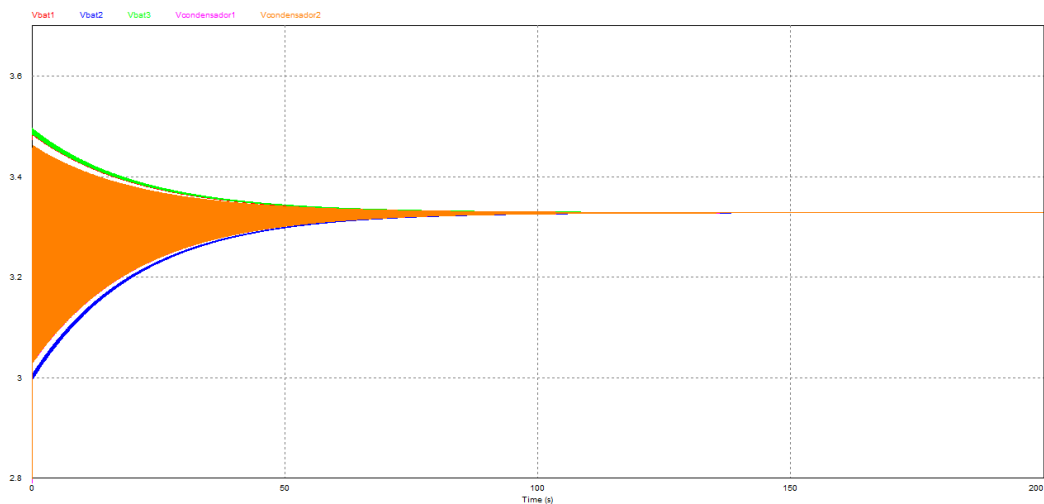
Celda2: 3V

Celda3: 3.5V

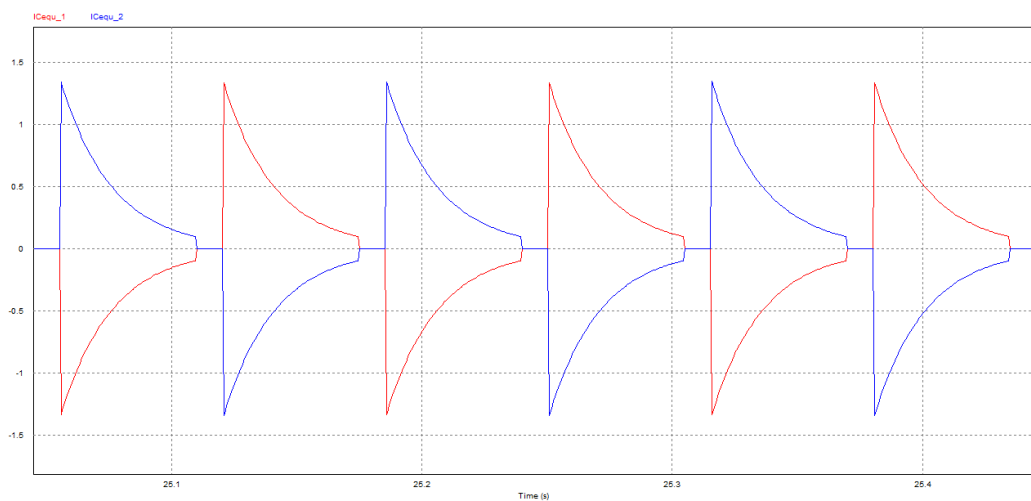


Gráfica de las tensiones de las celdas

Como podemos comprobar las celdas más cargadas bajan su tensión de la misma forma, ya que ambas están cediendo energía a la celda central en la misma medida.



Gráfica de las tensiones de las celdas con las tensiones de los condensadores



Intensidades de los condensadores

Las imágenes anteriores se usan para mostrar como los condensadores de equilibrado se cargan hasta el porcentaje de carga indicado. En las siguientes simulaciones se omitirá esta información ya que nos centraremos en las tensiones de las celdas.

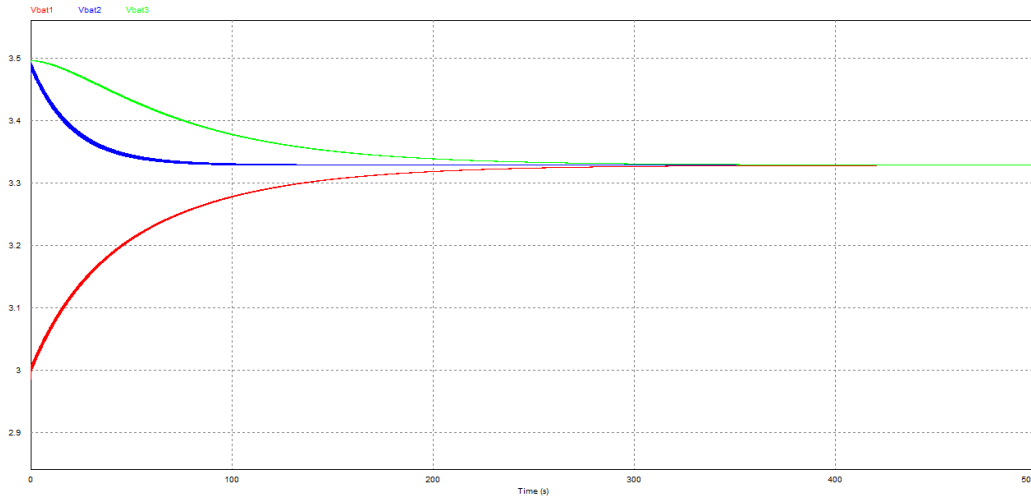
Ahora comprobamos las diferencias si la celda menos cargada está situada en un extremo.

Tensiones iniciales:

Celda1: 3V

Celda2: 3.5V

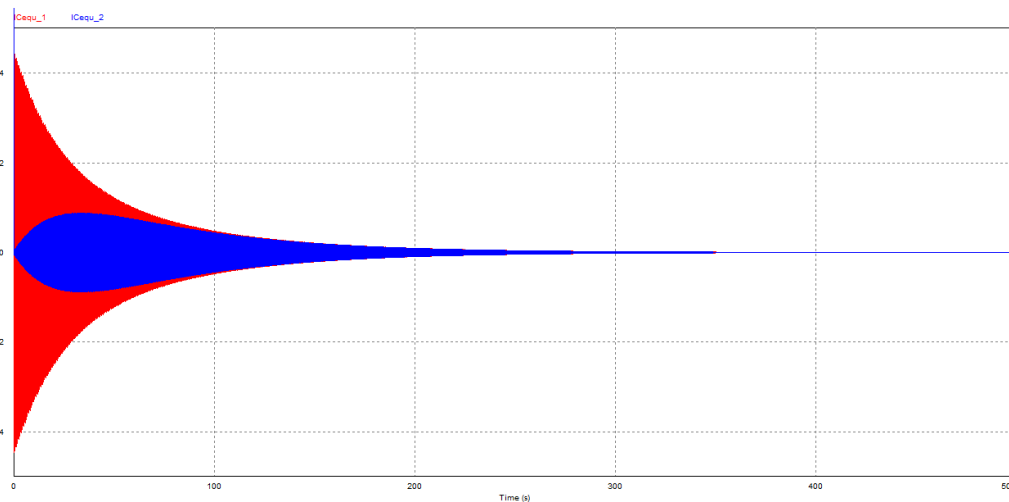
Celda3: 3.5V



Gráfica de las tensiones de las celdas

Ahora podemos observar como de las dos celdas con tensión más elevada, la que está más próxima a la celda con menor tensión comienza a descargarse con mayor rapidez, ya que su diferencia de tensión es mayor. La celda más alejada comienza a pasar energía a la celda central, en un principio más lento y a medida que sus tensiones se alejan más rápido. Cuando la diferencia entre las celdas 1 y 2 es la misma que entre la 2 y la 3, se llega a un punto de equilibrio ya que la celda central cede tanta energía como gana en cada ciclo, de ahí que su tensión se mantenga constante y las celdas converjan a esa tensión. Vemos como el equilibrado es algo más lento ya que realmente es la celda 3 la que cede tensión a la celda 1 pero antes tiene que pasar por la celda 2, por lo que el número de ciclos aumenta.

El punto en el que la diferencia de tensiones es la misma se puede observar en las intensidades de los condensadores, que se igualan:



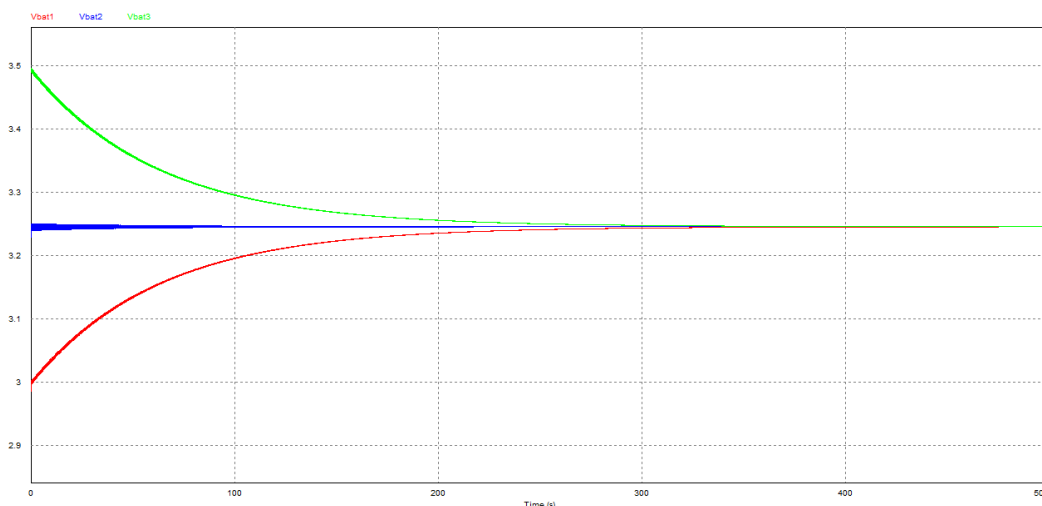
Intensidades de los condensadores de equilibrio

En las siguientes simulaciones vamos a ver cómo evolucionan las tensiones cuando cada celda tiene una tensión diferente.

En primer lugar simulamos cuando la celda central tiene una tensión intermedia entre las otras dos

Tensiones iniciales:

- Celda1: 3V
- Celda2: 3.25V
- Celda3: 3.5V



Gráfica de las tensiones de las celdas

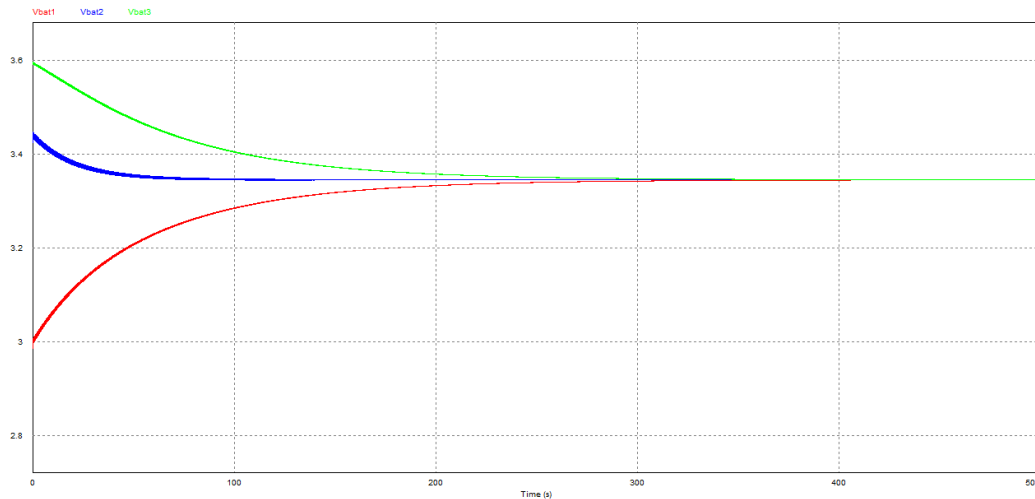
Como era de esperar las tensiones tienden a la media, que en este caso es la tensión de la celda 2, por lo que permanece constante. Vemos como el rizado

es mayor al principio debido a que la diferencia de tensiones es más grande y por lo tanto las intensidades del circuito son mayores provocando unas caídas y subidas de tensión más elevadas. La celda 2 puede sufrir una ligera caída de tensión debida a las resistencias del circuito aunque no es significativa.

A continuación variamos los valores para que la celda 2 tenga una tensión mayor a la media.

Tensiones iniciales:

Celda1: 3V
Celda2: 3.45V
Celda3: 3.6V



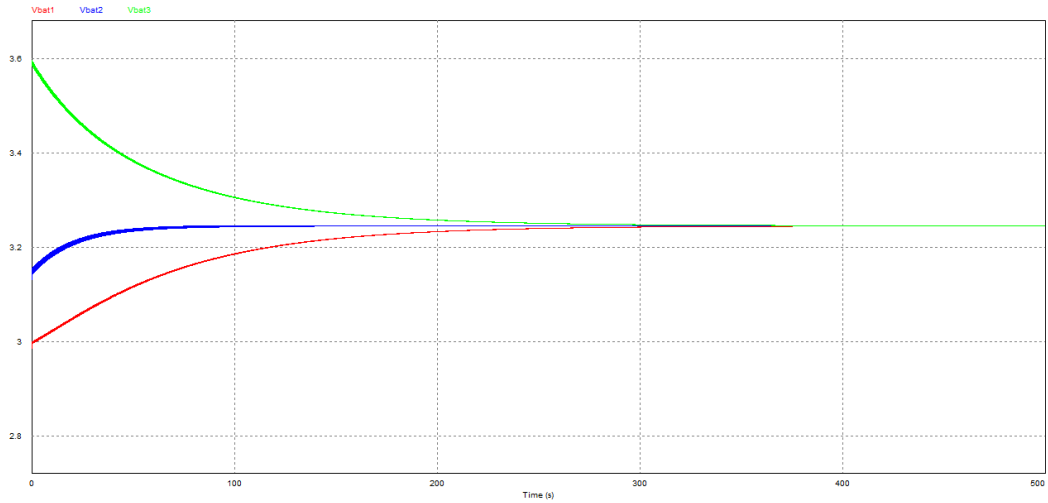
Gráfica de las tensiones de las celdas

Como vemos el comportamiento es similar al que veíamos cuando las celdas 2 y 3 tenían la misma tensión. La celda 2 se equilibra en torno a la media de las tensiones y las otras celdas van acercándose hasta que todas adquieren el mismo valor.

Ahora la celda central tiene una tensión menor a la media.

Tensiones iniciales:

Celda1: 3V
Celda2: 3.15V
Celda3: 3.6V



Gráfica de las tensiones de las celdas

Como se puede apreciar las dos celdas que están por debajo de la media suben su tensión, con la diferencia de que la celda que está más próxima a la celda más cargada sube con una pendiente mayor y alcanza el valor medio antes.

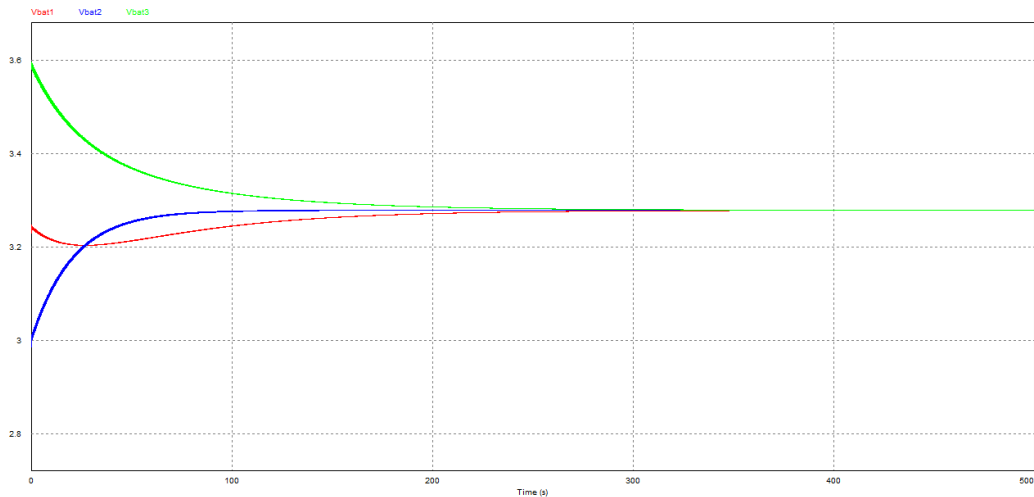
Ahora las tensiones de las celdas no van en progresión, sino que están desordenadas.

Tensiones iniciales:

Celda1: 3.25V

Celda2: 3 V

Celda3: 3.6V



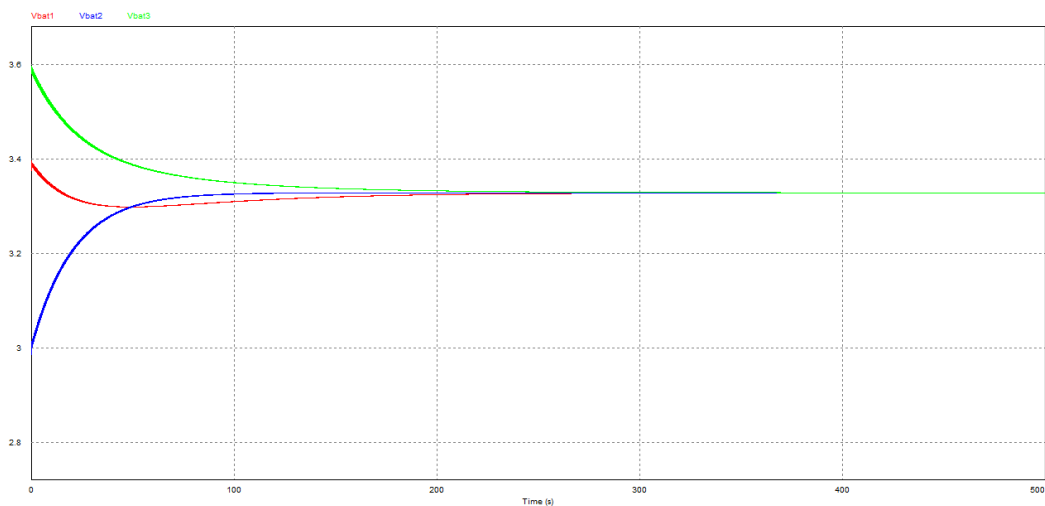
Gráfica de las tensiones de las celdas

Tensiones iniciales:

Celda1: 3.4V

Celda2: 3 V

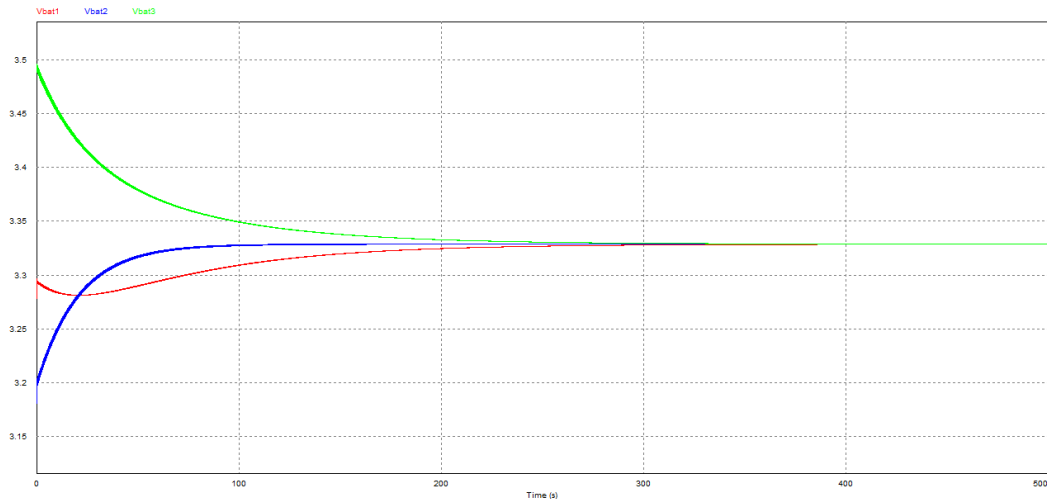
Celda3: 3.6V



Gráfica de las tensiones de las celdas

Tensiones iniciales:

Celda1: 3.3V
Celda2: 3.2 V
Celda3: 3.5V



Gráfica de las tensiones de las celdas

Como vemos cuando las celdas tienen diferentes tensiones el resultado es similar independientemente de la carga de las celdas.

La celda menos cargada de las que se encuentran en los extremos tiende a igualar su tensión con la celda central en un primer momento, pero la celda central iguala su tensión con ambas celdas y tiende a alcanzar la tensión media de las 3 celdas por lo que se produce un “cruce” en los valores de las tensiones entre las dos celdas menos cargadas ya que una vez que las celdas menos cargadas igualan sus tensiones la celda central recibe una cantidad de energía de la celda de más tensión y que luego tendrá que ir cediendo a la celda menos cargada para que todas tengan la misma tensión.

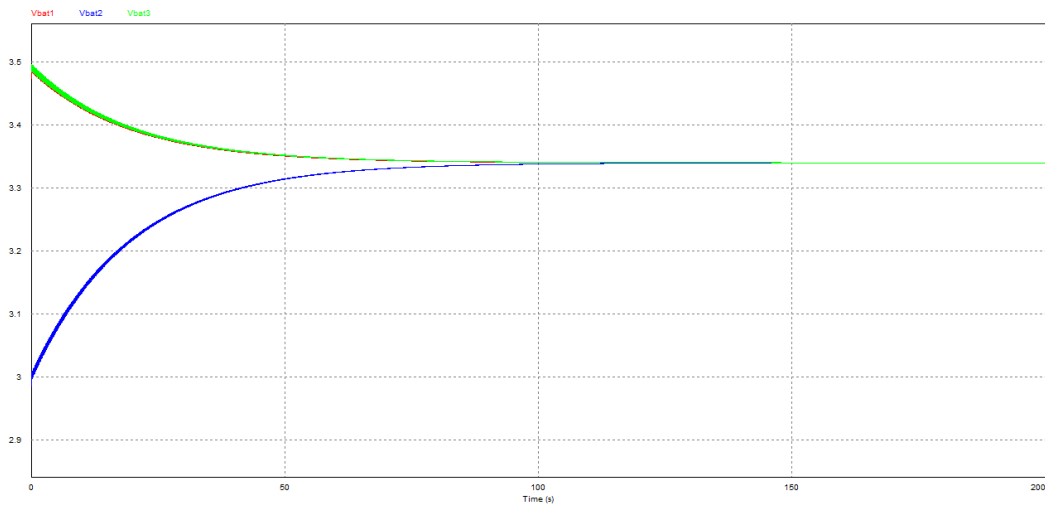
Ahora vamos a variar la capacidad de las baterías y ver cómo afecta a su funcionamiento.

En primer lugar vamos a bajar un 10% la capacidad de la celda 2 y lo vamos a comparar con los resultados anteriores.

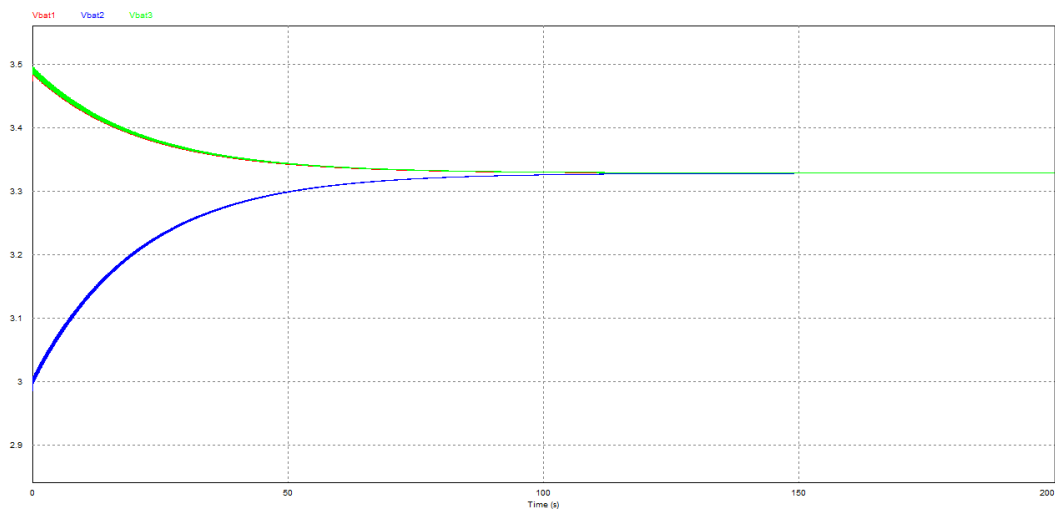
Tensiones iniciales:

Celda1: 3.5V

Celda2: 3V
Celda3: 3.5V



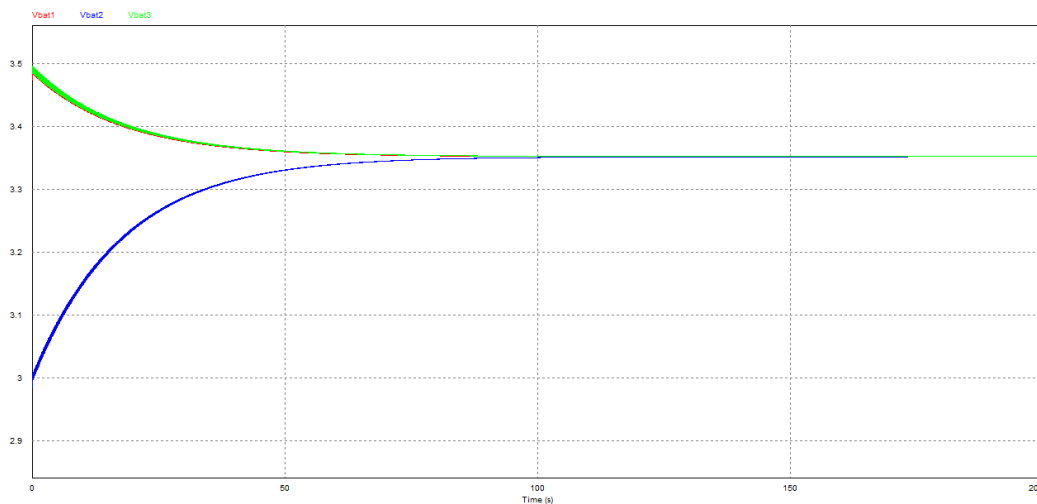
Gráfica de las tensiones de las celdas con la capacidad reducida



Gráfica de las tensiones de las celdas de capacidad normal

Se empiezan a apreciar diferencias ya que si nos fijamos en un tiempo $t=50$, en la simulación con la capacidad reducida, la celda 2 ha alcanzado un valor mayor en el mismo tiempo. Así que como era de esperar al poseer una capacidad más pequeña puede variar su tensión más rápidamente.

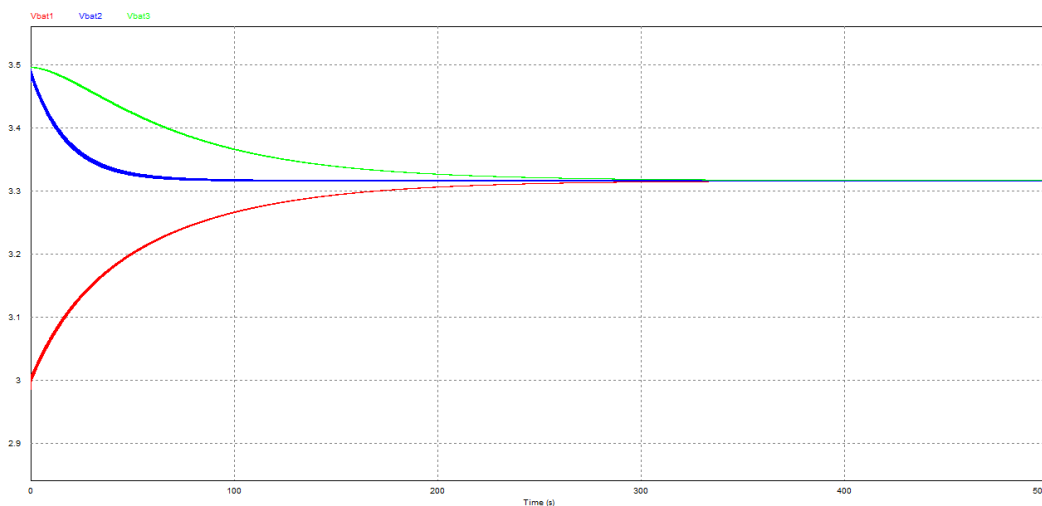
A continuación, vamos a reducir la capacidad de la celda 2 un 20% para apreciar aún más esas diferencias.



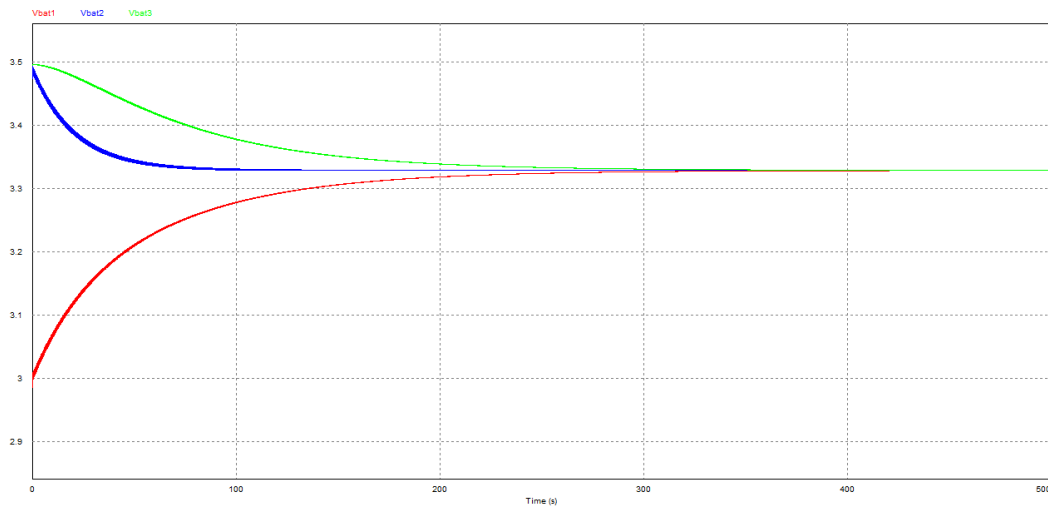
Gráfica de las tensiones de las celdas con una reducción del 20%

Tensiones iniciales:

- Celda1: 3V
- Celda2: 3.5V
- Celda3: 3.5V



Gráfica de las tensiones de las celdas con una reducción del 20%



Gráfica de las tensiones de las celdas de capacidad normal

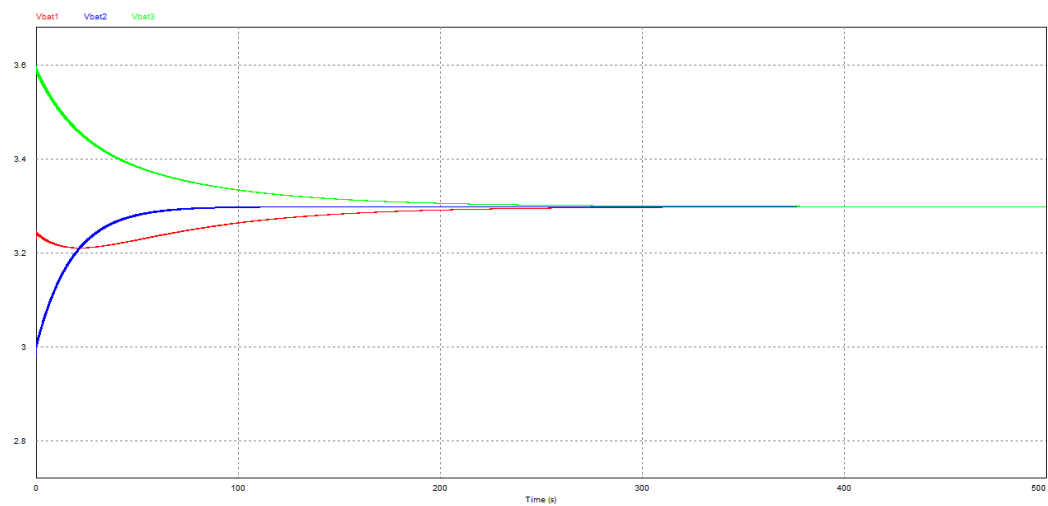
En esta simulación también comprobamos como la celda 2 al tener una menor capacidad tiene una pendiente más elevada.

Tensiones iniciales:

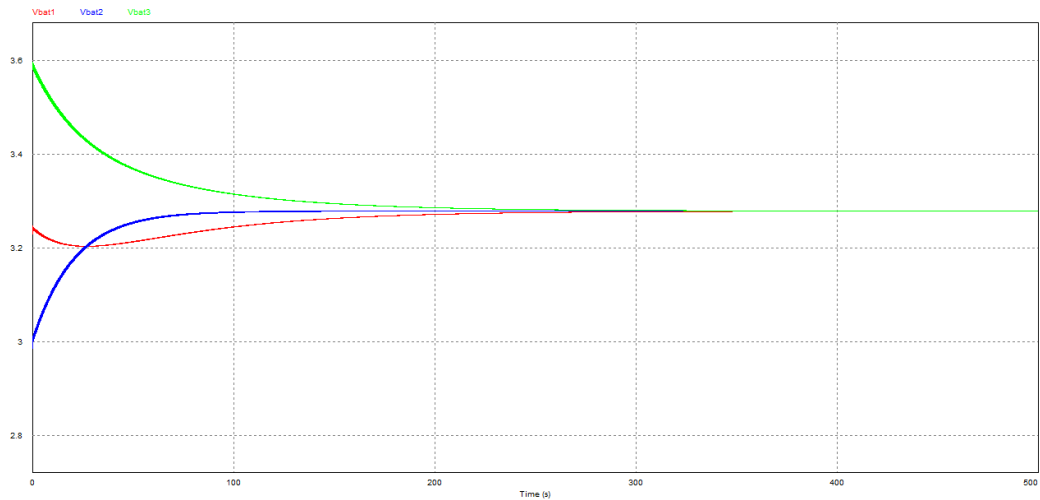
Celda1: 3.25V

Celda2: 3 V

Celda3: 3.6V



Gráfica de las tensiones de las celdas con una reducción del 20%



Gráfica de las tensiones de las celdas de capacidad normal

Como estamos viendo en todas las simulaciones, la celda 2 al tener una menor capacidad varía su tensión con una mayor rapidez.

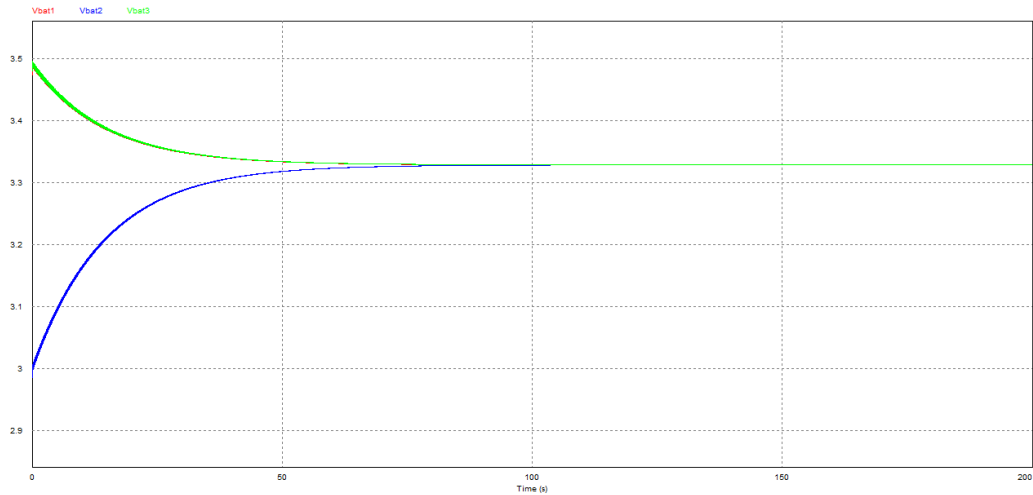
Ahora, procedemos a simular uno de los aspectos que más nos interesan. Vamos a comparar la simulación con un periodo de conmutación de $3RC$ y otra con un periodo de RC y ver si el tiempo empleado en que se igualen las tensiones de las baterías disminuye.

Tensiones iniciales:

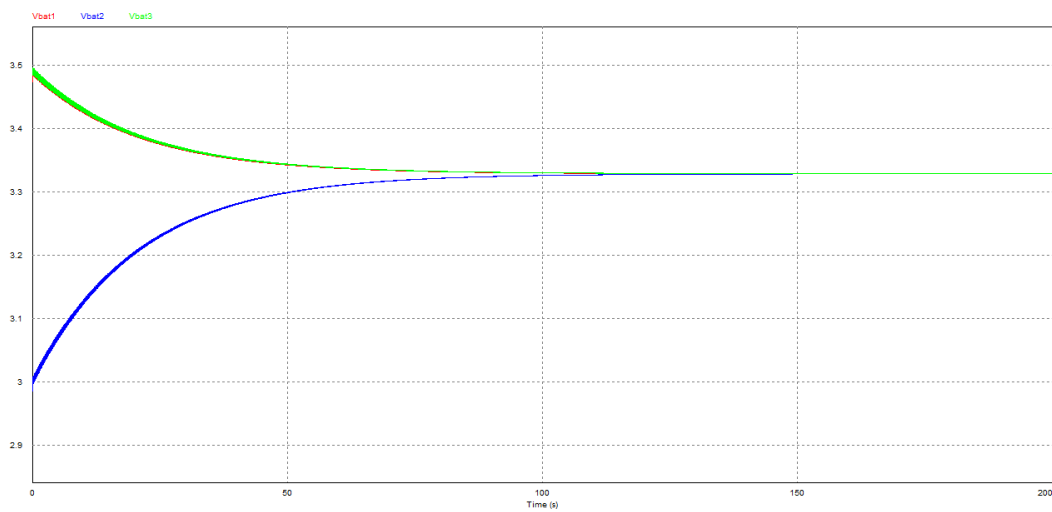
Celda1: 3.5V

Celda2: 3V

Celda3: 3.5V

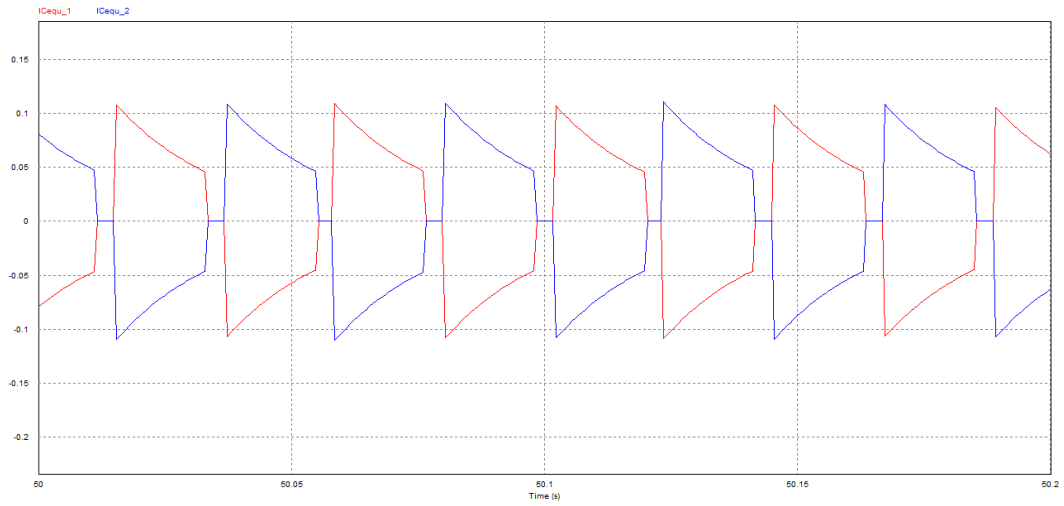


RC



3RC

Al realizar las simulaciones hemos obtenido los resultados deseados, ya que, al hacer trabajar al sistema en la zona lineal hemos conseguido reducir el tiempo de equilibrado.

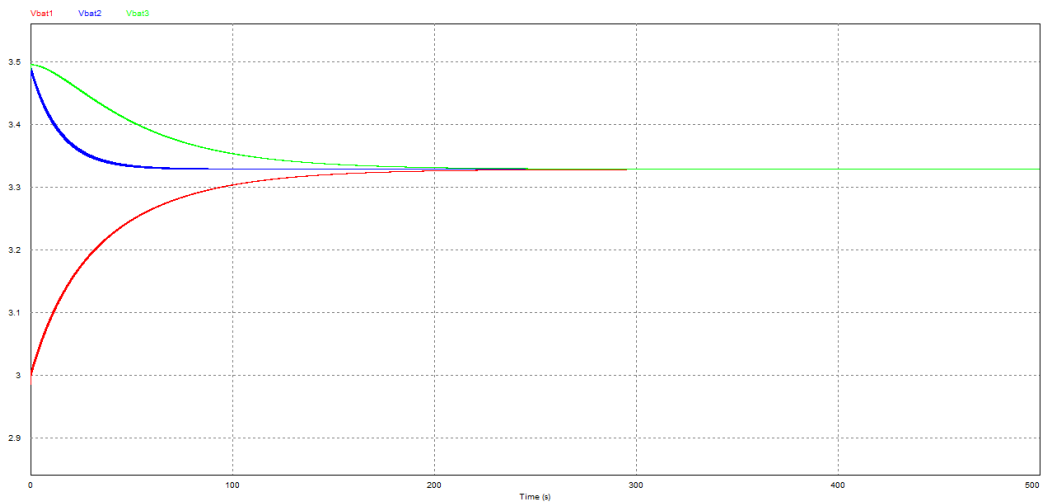


Intensidades de los condensadores de equilibrado

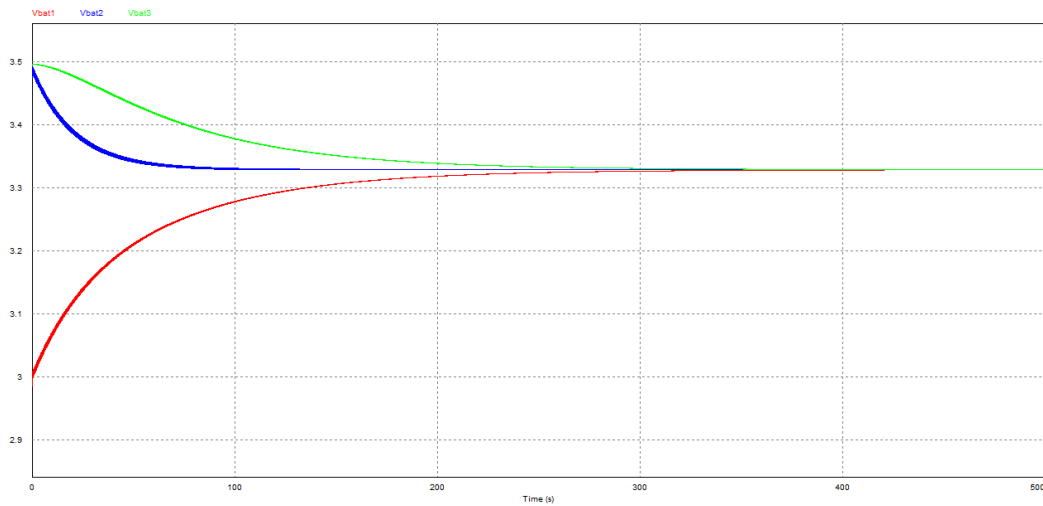
En la gráfica de las intensidades de los condensadores podemos ver como ahora no desciende tanto la intensidad que los atraviesa.

Tensiones iniciales:

- Celda1: 3V
- Celda2: 3.5V
- Celda3: 3.5V



RC



3RC

La reducción de tiempo en el equilibrado al bajar el tiempo de conmutación es significativo, siendo ahora mucho más eficaz.

Además las intensidades que atraviesan el circuito son mucho menores, ya que no hay tanta variación de tensión

Incidencia de la frecuencia de conmutación en el equilibrado.

Como hemos visto en las simulaciones, al conmutar en una frecuencia más alta conseguimos que las tensiones se igualen antes, pero para saber cuál es realmente la diferencia que existe realizamos una comparación.

Tenemos 2 situaciones distintas. Una en la que el condensador de equilibrado se carga al 95% y otra que se carga al 50%. La energía que es capaz de almacenar el condensador que se carga al 50% es menor con cada ciclo pero los ciclos son mucho más rápidos (x3), por eso buscamos una relación entre la energía que es capaz de almacenar uno y otro condensador.

La energía de un condensador es: $\frac{1}{2}C_{cond}V_1^2 - \frac{1}{2}C_{cond}V_2^2$

Si V1 y V2 son las tensiones de las celdas de la batería entre las que se mueven los condensadores el que carga al 95% se moverá entre (V1-0.025(V1-V2)) y (V2+0.025(V1-V2)) y el que se carga al 50% se mueve entre (V1-0.25(V1-V2)) y (V2+0.25(V1-V2)).

Por lo que la relación entre uno y otro será

$$\frac{\frac{1}{2}C_{con}(V_1 - 0.25(V_1 - V_2))^2 - \frac{1}{2}C_{con}(V_2 + 0.25(V_1 - V_2))^2}{\frac{1}{2}C_{con}(V_1 - 0.025(V_1 - V_2))^2 - \frac{1}{2}C_{con}(V_2 + 0.025(V_1 - V_2))^2}$$

$$\frac{(V_1 - 0.25(V_1 - V_2))^2 - (V_2 + 0.25(V_1 - V_2))^2}{(V_1 - 0.025(V_1 - V_2))^2 - (V_2 + 0.025(V_1 - V_2))^2}$$

$$\frac{V_1^2 - 0.5V_1(V_1 - V_2) + \frac{1}{16}(V_1 - V_2)^2 - V_2^2 - 0.5V_2(V_1 - V_2) - \frac{1}{16}(V_1 - V_2)^2}{V_1^2 - V_1 \cdot 0.05(V_1 - V_2) + \frac{1}{1600}(V_1 - V_2)^2 - V_2^2 - V_2 \cdot 0.05(V_1 - V_2) - \frac{1}{1600}(V_1 - V_2)^2}$$

$$\frac{(V_1^2 - V_2^2) - 0.5V_1(V_1 - V_2) - 0.5V_2(V_1 - V_2)}{(V_1^2 - V_2^2) - 0.05V_1(V_1 - V_2) - 0.05V_2(V_1 - V_2)}$$

$$\frac{(V_1^2 - V_2^2) + 0.5(V_1 - V_2)(-V_1 - V_2)}{(V_1^2 - V_2^2) + 0.05(V_1 - V_2)(-V_1 - V_2)}$$

$$\frac{V_1^2 - V_2^2 + 0.5(-V_1^2 - V_1V_2 + V_1V_2 + V_2^2)}{V_1^2 - V_2^2 - 0.05(-V_1^2 - V_1V_2 + V_1V_2 + V_2^2)}$$

$$\frac{0.5V_1^2 - 0.5V_2^2}{0.95V_1^2 - 0.95V_2^2}$$

$$\frac{0.5(V_1^2 - V_2^2)}{0.95(V_1^2 - V_2^2)}$$

$$\frac{0.5}{0.95}$$

Como era de esperar al ser la energía función de la tensión, la relación entre la energía de una situación y otra es la relación entre las tensiones en las que se mueven.

Es por ello que en cada ciclo en alta frecuencia solo movemos el 52.6% de la energía que se mueve en baja frecuencia pero se realizan el triple de ciclos, así que, para el mismo tiempo movemos el 157.9% de la energía que se mueve a bajas frecuencias.

Este es un resultado teórico de suponer conmutación instantánea. En el proceso a alta frecuencia por tener ciclos más pequeños tiene más conmutaciones y si el polo de potencia es el mismo en ambas situaciones no llegará a hacer 3 ciclos por cada ciclo a bajas frecuencias.

A todo esto hay que sumar las pérdidas en conmutación de los polos de potencia que afectan más en alta frecuencia que en baja. Por todo ello el 157.9% se verá reducido.

Para ver cuantos ciclos reales se hacen en alta frecuencia por cada ciclo en baja sumamos al tiempo de carga del condensador el tiempo de conmutación. Para ello escogemos un polo que por características nos sirva para nuestro propósito y miramos sus tiempos de subida y bajada. Típicamente dependiendo del fabricante y características tienen un tiempo de conmutación de unos 20ns en subida y 200ns en bajada. En nuestro caso no fijamos en el fabricante Toshiba con su producto TPC8125 que se ajusta a nuestras necesidades y que posee un tiempo de subida de 16ns y 245ns de bajada. El tiempo de conmutación vendrá dado por el tiempo más largo, 245ns, al que añadimos un tiempo muerto para evitar solapes entre conmutaciones, por lo que el tiempo total de cada conmutación será de unos 250ns y como cada ciclo tiene dos conmutaciones tenemos 500ns por ciclo. Nuestro condensador se carga en un

tiempo $3RC$ o RC dependiendo de la situación por lo que cada ciclo el polo deberá estar conduciendo un tiempo de $6RC$ o $2RC$.

El condensador elegido en nuestro circuito es de $0.2F$ y la resistencia total, contando resistencia del condensador, del polo de potencia y resistencias de la batería es de aproximadamente 0.10Ω , por lo que el tiempo de conducción por ciclo será de entre 0.12 segundos y 0.04 segundos.

Si añadimos el tiempo de conmutación nos queda un tiempo de ciclo de $120.0005ms$ y $40.0005ms$. Es decir la relación entre ambos casos es de $120.0005/40.0005=2.999$.

Si aplicamos este factor a la diferencia de energía tenemos que en altas frecuencias pasamos $52.6\%*2.99=157.8\%$. Como vemos al tener un tiempo de conmutación tan reducido apenas existen diferencias entre tener en cuenta o no el tiempo de conmutación.

Conclusiones.

Partiendo del problema inicial se han analizado las diferentes propuestas tecnológicas existentes y a partir de un análisis preliminar se ha elegido un método adecuado que se adecue al problema inicial. Una vez seleccionado un método, se ha realizado un análisis más profundo, se ha comprobado que el método elegido es realizable en nuestro sistema y a través de simulación se ha verificado su funcionamiento.

Con los cálculos, pruebas y simulaciones realizadas se puede decir que la solución adoptada funciona de forma correcta y se adapta a nuestras necesidades y una vez realizados todos estos pasos quedaría realizar el modelo físico para acoplarlo en el modelo real.

Bibliografía

“Cell-balancing currents in parallel strings of a battery sistem”
Matthieu Dubarry, Arnaud Devie, Bor Yann Liaw.

“Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries” Federico Baronti, Roberto Roncella, Roberto Saletti.

“Novel active LiFePO₄ battery balancing method based on chargeable and dischargeable capacity” Xiudong Cuia, Weixiang Shena, Yunlei Zhangb, Cungang Hub, Jinchuan Zhenga.

“Heterogeneous behavior modeling of a LiFePO₄-graphite cell using an equivalent electrical circuit” Nicolas Damay, Christophe Forgez, Guy Friedrich, Marie-Pierre Bichat.

“Effects of imbalanced currents on large-format LiFePO₄/graphite batteries systems connected in parallel” Wei Shi, Xiaosong, Chao Jin, Jiuchun Jiang, Yanru Zhang, Tony Yip.

“Development of a converterless energy management system for reusing automotive lithium-ion battery applied in smart-grid balancing” Yi-Hsien Chiang, Wu-Yang Sean, Chien-Hsun Wu, Chih-Yung Huang.

“Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review” M.M. Hoquea, M.A. Hannanb, A. Mohameda, A. Ayoba

“Model Based Design of Balancing Systems for Electric Vehicle Battery Packs”
Thomas Bruen, James Marco, Miguel Gama

“A Cell Level Model for Battery Simulation” Suguna Thanagasundram, Raghavendra Arunachala, Kamyar Makinejad, Tanja Teutsch, Andreas Jossen

“Modelado y Simulación de una Bateria de Ion-Litio Comercial Multicelda” R. Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M.J. Moure, M.D. Valdés