



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DOS
TÉCNICAS DE EQUILIBRADO PARA SISTEMAS
DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS)**

Autor:

Prieto Martínez, Silvia María

Tutor:

**Domínguez Vázquez, José Antonio
Depto. Tecnología Electrónica**

Resumen

Este trabajo de fin de grado tiene por objetivo estudiar y analizar dos técnicas activas de ecualizado de celdas de baterías basadas en condensadores y en inductancias, con la finalidad de realizar una comparativa que permita seleccionar la mejor de ellas para su aplicación. Así mismo, en este proyecto se han desarrollado varias técnicas activas de ecualizado con inductancias con diferentes grados de control estudiando a fondo los ciclos de trabajo de carga y descarga del circuito. Todos los desarrollos teóricos se han apoyado mediante simulaciones realizadas con la herramienta PSIM.

Palabras clave

BMS, ecualización activa, circuitos resonantes, ciclo de trabajo, optimización del equilibrado.

Abstract

The objective of this final degree project is to study and analyze two active equalization techniques for battery cells based on capacitors and inductances, in order to make a comparative study to select the best one for its application. Likewise, in this project several active equalization techniques with inductances with different degrees of control have been developed by studying in depth the charge and discharge duty cycles of the circuit. All theoretical developments have been supported by simulations performed with the PSIM tool.

Keywords

BMS, active equalization, resonant circuits, duty cycle, balancing optimization.

Índice

| | |
|---|------|
| Índice de figuras | vii |
| Índice de tablas | xi |
| Glosario | xiii |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 1 |
| 2. Estado de la técnica..... | 3 |
| 2.1. Baterías: introducción y características. | 3 |
| 2.1.1. Características de las celdas electroquímicas. | 3 |
| 2.2. Sistemas BMS | 4 |
| 2.3. Desequilibrios en las celdas de baterías. | 5 |
| 2.3.1. Técnicas de equilibrado de baterías | 6 |
| 3. Presentación del problema..... | 9 |
| 3.1. Circuito de equilibrado de celdas basado en la conmutación de condensadores que implementa la estrategia “Adjacent cell to cell” AC2C. | 9 |
| 4. Estudio teórico del problema | 15 |
| 4.1. Análisis teórico de un inductor como elemento de transferencia de energía. | 15 |
| 4.2. Estudio del diodo como elemento protector del inductor en las conmutaciones..... | 20 |
| 4.3. Estudio del condensador como elemento protector del inductor en las conmutaciones..... | 27 |
| 4.4. Diseño del circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de inductores entre celdas adyacentes AC2C. | 40 |
| 4.5. Análisis comparativo de ambos modelos..... | 55 |
| 4.6. Optimización del circuito equilibrador de celdas por conmutación de inductores entre celdas adyacentes. Aplicación del concepto de modo de conducción continua. | 70 |
| 5. Diseño y desarrollo de dos técnicas de equilibrado de celdas de baterías basadas en la conmutación de un único inductor..... | 87 |
| 5.1. Técnica de equilibrado de celdas por conmutación de un único inductor y estrategia “Cell to Pack” (C2P) | 87 |
| 5.2. Técnica de equilibrado de celdas “Direct Cell to Cell” (DC2C) | 103 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.1. Optimización del circuito DC2C. Modo de conducción continua en régimen permanente. | 116 |
| 6. Conclusiones | 121 |
| 7. Bibliografía..... | 123 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Funciones del BMS dentro de un EV [4]. | 5 |
| Figura 2. Clasificación de los métodos de equilibrado de baterías. | 6 |
| Figura 3. Equilibrado de celdas mediante métodos pasivos. | 6 |
| Figura 4. Equilibrado de celdas mediante métodos activos. | 7 |
| Figura 5. Circuito básico de una celda conectada con el condensador de equilibrado. | 9 |
| Figura 6. Circuito que se asemeja al de una celda electroquímica real [7]. | 11 |
| Figura 7. Circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de condensadores entre celdas adyacentes. | 12 |
| Figura 8. Señal de tensión cuadrada [10]. | 15 |
| Figura 9. Señales generadas para la conmutación de los polos. | 16 |
| Figura 10. Esquema básico de una bobina. | 17 |
| Figura 11. Diodo polarizado en directa. | 20 |
| Figura 12. Circuito carga/descarga del conjunto inductor-diodo en paralelo. | 20 |
| Figura 13. Modelo del diodo aproximado [13]. | 21 |
| Figura 14. Proceso de ecualización con el conjunto inductor-diodo en paralelo. | 21 |
| Figura 15. Circuito con la bobina en paralelo con el diodo conmutando entre dos tensiones distintas. | 23 |
| Figura 16. Circuito resultante durante la carga de la bobina (descarga de una celda). | 24 |
| Figura 17. Simulación del circuito con diodo en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y diodo. | 26 |
| Figura 18. Esquema básico de un condensador. | 27 |
| Figura 19. Circuito con el condensador en paralelo con el inductor. | 28 |
| Figura 20. Proceso de ecualización con el conjunto inductor-condensador en paralelo. | 29 |
| Figura 21. Circuito bobina en paralelo con condensador conmutando entre dos tensiones distintas. | 30 |
| Figura 22. Circuito resultante durante la carga de la bobina. | 31 |
| Figura 23. Circuito resonante ideal. | 33 |
| Figura 24. Circuito resultante durante el tiempo muerto. | 33 |
| Figura 25. Simulación del circuito con condensador en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y condensador. | 37 |
| Figura 26. Segunda simulación del circuito con condensador en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y condensador. | 39 |
| Figura 27. Circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de inductores entre celdas adyacentes. | 41 |
| Figura 28. Técnica AC2C: proceso de descarga de las celdas. | 43 |
| Figura 29. Técnica AC2C: tiempo muerto. | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 30. Técnica AC2C: proceso de carga de las celdas..... | 45 |
| Figura 31. Modelo ideal del proceso de carga de la bobina. | 47 |
| Figura 32. Corriente por la bobina durante un periodo de carga y descarga. | 48 |
| Figura 33. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: análisis de tensiones y potencias. | 56 |
| Figura 34. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: análisis de las corrientes..... | 58 |
| Figura 35. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de tensiones y potencias..... | 59 |
| Figura 36. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de las corrientes. | 60 |
| Figura 37. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis del tiempo muerto. | 60 |
| Figura 38. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de corrientes durante la descarga..... | 61 |
| Figura 39. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias..... | 63 |
| Figura 40. Técnica AC2C. Inductor. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias.. | 64 |
| Figura 41. Técnica AC2C. Inductor. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias. Ampliada. | 65 |
| Figura 42. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias..... | 66 |
| Figura 43. Técnica AC2C. Inductor. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias.... | 67 |
| Figura 44. Técnica AC2C. Inductor. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias. Ampliada. | 68 |
| Figura 45. Corriente por la bobina en régimen transitorio [15]. | 70 |
| Figura 46. Corriente por la bobina en régimen permanente..... | 71 |
| Figura 47. Corriente por la bobina en régimen permanente..... | 72 |
| Figura 48. Modelo ideal del circuito de carga de la bobina. | 73 |
| Figura 49. Modelo ideal del circuito de descarga de la bobina. | 74 |
| Figura 50. Técnica AC2C optimizada. Sistema de control..... | 75 |
| Figura 51. Técnica AC2C optimizada. Caso 1: análisis de las tensiones y potencias. | 77 |
| Figura 52. Técnica AC2C optimizada. Caso 1: análisis de las corrientes..... | 77 |
| Figura 53. Técnica AC2C optimizada. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias. | 78 |
| Figura 54. Técnica AC2C optimizada. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias. | 79 |
| Figura 55. Técnica AC2C. Cargador empleado. Aporte de energía constante a la tensión nominal de las celdas..... | 80 |
| Figura 56. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: análisis de las tensiones y potencias..... | 80 |
| Figura 57. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias. | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias..... | 83 |
| Figura 59. Circuito propuesto para la técnica de equilibrado de baterías C2P. | 88 |
| Figura 60. Técnica C2P: proceso de descarga de una celda. | 89 |
| Figura 61. Técnica C2P: tiempo muerto. | 90 |
| Figura 62. Técnica C2P: proceso de carga del pack..... | 91 |
| Figura 63. Técnica C2P. Circuito de control. | 95 |
| Figura 64. Técnica C2P. Señales de activación de los polos. | 96 |
| Figura 65. Técnica C2P. Simulación 1. Tensiones de las celdas y potencias..... | 97 |
| Figura 66. Técnica C2P. Simulación 1: análisis de las corrientes. | 98 |
| Figura 67. Técnica C2P. Simulación 1: análisis de las corrientes en el tiempo muerto. | 99 |
| Figura 68. Técnica C2P. Simulación 1: Análisis de las corrientes al descargar la bobina..... | 100 |
| Figura 69. Técnica C2P. Simulación 2: Tensiones de las celdas y potencias..... | 102 |
| Figura 70. Técnica C2P. Simulación 2: Resultados. | 102 |
| Figura 71. Circuito propuesto para la técnica de equilibrado de baterías DC2C. | 104 |
| Figura 72. Técnica DC2C: proceso de descarga de una celda. | 105 |
| Figura 73. Técnica DC2C: tiempo muerto..... | 106 |
| Figura 74. Técnica DC2C: proceso de carga de una celda..... | 107 |
| Figura 75. Técnica DC2C. Circuito de control..... | 111 |
| Figura 76. Técnica DC2C. Señales de activación de los polos. | 112 |
| Figura 77. Técnica DC2C. Simulación 3. Tensiones de las celdas y potencias. | 113 |
| Figura 78. Técnica DC2C. Simulación 3: análisis de las corrientes..... | 114 |
| Figura 79. Técnica DC2C. Simulación 3: análisis de las corrientes durante el tiempo muerto. | 115 |
| Figura 80. Técnica DC2C. Simulación 3: Análisis de las corrientes durante descarga de la bobina. | 115 |
| Figura 81. Técnica DC2C optimizada. Circuito de control. | 117 |
| Figura 82. Técnica DC2C optimizada. Señales de activación de los polos..... | 118 |
| Figura 83. Técnica DC2P optimizada. Simulación 4. Tensiones de las celdas y potencias..... | 119 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Tasa de C. Ejemplo para una celda de 10Ah..... | 3 |
| Tabla 2. Parámetros considerados para el cálculo de L..... | 49 |
| Tabla 3. Técnica AC2C: Señales de reloj. | 55 |
| Tabla 4. Caso 1. Condiciones de simulación..... | 56 |
| Tabla 5. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: resultados..... | 57 |
| Tabla 6. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: cálculo de errores absolutos..... | 57 |
| Tabla 7 Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: cálculo de errores relativos..... | 57 |
| Tabla 8. Caso 2. Condiciones de simulación..... | 63 |
| Tabla 9. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: resultados..... | 63 |
| Tabla 10. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: cálculo de errores absolutos. | 63 |
| Tabla 11. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: cálculo de errores relativos. | 64 |
| Tabla 12. Caso 3. Condiciones de simulación. | 66 |
| Tabla 13. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: respuesta. | 66 |
| Tabla 14. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: cálculo de errores absolutos. | 66 |
| Tabla 15. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: cálculo de errores relativos. | 67 |
| Tabla 16. Técnica AC2C optimizada. Caso 1. Condiciones de simulación..... | 76 |
| Tabla 17. Técnica AC2C optimizada. Caso 2. Condiciones de simulación..... | 78 |
| Tabla 18. Técnica AC2C optimizada. Caso 3: Condiciones de simulación..... | 79 |
| Tabla 19. Caso 1. Condiciones de simulación. | 80 |
| Tabla 20. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: resultados..... | 81 |
| Tabla 21. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: cálculo de errores absolutos..... | 81 |
| Tabla 22. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: cálculo de errores relativos. | 81 |
| Tabla 23. Caso 2. Condiciones de simulación. | 82 |
| Tabla 24. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: resultados..... | 82 |
| Tabla 25. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: cálculo de errores absolutos..... | 82 |
| Tabla 26. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: cálculo de errores relativos. | 83 |
| Tabla 27 Caso 2. Condiciones de simulación. | 83 |
| Tabla 28. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: resultados..... | 84 |
| Tabla 29. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: cálculo de errores absolutos..... | 84 |
| Tabla 30. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: cálculo de errores relativos. | 84 |
| Tabla 31. Técnica C2P. Simulación 1: Señales de reloj. | 95 |
| Tabla 32. Técnica C2P. Condiciones de simulación. | 96 |
| Tabla 33. Técnica C2P. Resultados Simulación 1. | 97 |
| Tabla 34. Técnica C2P. Simulación 1: cálculo de errores absolutos..... | 97 |
| Tabla 35. Técnica C2P. Simulación 1: cálculo de errores relativos..... | 98 |
| Tabla 36. Técnica C2P. Simulación 2: Señales de reloj. | 101 |
| Tabla 37. Técnica C2P. Simulación 2: cálculo de errores absolutos..... | 102 |
| Tabla 38. Técnica C2P. Simulación 2: cálculo de errores relativos..... | 102 |
| Tabla 39. Técnica DC2C. Simulación 3: Señales de reloj..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 40. Técnica DC2C. Condiciones de simulación..... | 112 |
| Tabla 41. Técnica DC2C. Simulación 3: Resultados..... | 113 |
| Tabla 42. Técnica DC2C. Simulación 3: cálculo de errores absolutos. | 113 |
| Tabla 43. Técnica DC2C. Simulación 3: cálculo de errores relativos. | 113 |
| Tabla 44. Técnica DC2C optimizada. Condiciones de simulación..... | 119 |
| Tabla 45. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: Resultados. | 119 |
| Tabla 46. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: cálculo de errores absolutos. | 119 |
| Tabla 47. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: cálculo de errores relativos.. | 120 |

Glosario

A

AC2C

Término que describe la técnica activa de equilibrado de celdas basada en la conmutación del elemento equilibrador entre celdas adyacentes.

C

C2P

Término que describe la técnica activa de equilibrado de celdas basada en la transferencia de energía de la celda de mayor carga a todo el pack en cada conmutación.

D

DC2C

Término que describe la técnica activa de equilibrado de celdas basada en la transferencia directa de energía entre la celda de mayor carga y la más descargada en cada instante.

D

Es el ciclo de trabajo, duty cycle, o ciclo de servicio. Representa la relación entre el tiempo en que una señal se encuentra en estado activo (ON) respecto de la duración de todo un periodo T.

E

Ecualización: Sinónimo de equilibrado o balanceado. Términos que emplearemos indistintamente y que hacen referencia al proceso de corrección de desequilibrios en la batería.

P

PWM

Señales por modulación de ancho de pulso.

1. Introducción

Actualmente se está viviendo una transición a la electrificación motivada por una mayor conciencia por el cuidado del medio ambiente en la búsqueda de técnicas con cero emisiones para la movilidad en los vehículos.

La alta contaminación en las ciudades consecuencia del extendido uso de los vehículos de combustión ha provocado la imposición de muchas medidas en contra de estos con el objetivo de impulsar nuevas formas de movilidad que sean más respetuosas con el medio ambiente. En esta nueva tendencia se espera que sea el vehículo eléctrico el protagonista y que se adopte como opción mayoritaria.

Siendo la batería el elemento más importante y caro de los vehículos eléctricos, son muchos los estudios e investigaciones realizados para la mejora de su cuidado y aumento de su vida útil. El conocido BMS, o sistema de gestión de baterías, es un sistema que se encarga de realizar diversas funciones que permiten prolongar la vida útil de las baterías, mejorando la operación de los vehículos eléctricos.

Entre ellas destaca la función de equilibrado de las celdas de las baterías. Esta permite ecualizar el estado de carga de las baterías corrigiendo los desequilibrios presentes en ellas debido a diversos factores como resistencias internas, el nivel de degradación, la capacidad o la temperatura ambiente. Estos desequilibrios de no ser corregidos provocarán un menor rendimiento y vida útil de las baterías y, en el peor caso, comprometerán la seguridad de las personas.

1.1. Objetivos.

En este trabajo de fin de grado se realizará un estudio comparativo entre dos técnicas de equilibrado de baterías basadas en la conmutación de inductancias y condensadores con el objetivo de seleccionar la mejor de ellas para su aplicación.

Para ello se desarrollará la técnica basada en inductancias y se propondrán optimizaciones para la mejora del sistema.

Así mismo, se desarrollarán otras dos técnicas de ecualización activa basadas en inductancias funcionales.

2. Estado de la técnica

En este apartado se realizará una introducción a los conceptos y definiciones de mayor importancia relativos a las baterías, BMS y técnicas de equalizado de baterías.

2.1. Baterías: introducción y características.

Una batería es un dispositivo compuesto por dos o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en energía eléctrica [1].

Son un elemento crítico para los vehículos de propulsión eléctrica (HEV, PHEV, BEV). Existe una gran variedad de químicas disponibles en la actualidad empleadas para las diferentes aplicaciones. Para la propulsión de los EV hoy en día está ampliamente extendido el uso de celdas electroquímicas de Ion de Litio.

2.1.1. Características de las celdas electroquímicas.

Capacidad (Ah): representa la energía específica en amperios-hora. Los Ah de la batería representan la corriente de descarga que una batería puede entregar. Una celda de 10Ah podrá entregar 10A durante una hora. La velocidad con la que se realizan las cargas y descargas se expresa en tasas de C.

Tasa de C: especifica la velocidad a la que se carga o descarga una batería. Típicamente se asocia 1C a la carga o descarga realizada según el valor de su capacidad en Ah. Por lo que, siguiendo con el ejemplo anterior, una batería de 10Ah que se descargue a 1C estará entregando 10A durante una hora.

Para una celda de 10Ah de capacidad:

| Tasa de C | Duración de la descarga | Amperios de la descarga |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| 2C | 30 min | 20 |
| 1C | 1 h | 10 |
| 0.5C | 2 h | 5 |

Tabla 1. Tasa de C. Ejemplo para una celda de 10Ah.

Estado de carga o State of Charge (SoC) (%): su valor en porcentaje refleja el nivel de carga de la batería. Una batería totalmente cargada tendrá un SoC del 100%.

Estado de salud o State of Health (SoH) (%): su valor en porcentaje refleja la capacidad disponible de la celda en relación con la capacidad total inicial. El SoH de una celda se verá disminuido en función del tiempo y uso, factores que hacen que la química de la celda se vaya deteriorando poco a poco impidiendo cargarla al 100% de SoC.

Área segura de trabajo o Safe Operation Area (SAO): indica el rango de tensiones entre las que debe trabajar la celda para garantizar un buen funcionamiento y no comprometer la seguridad de esta. Típicamente el rango $[V_{min}, V_{max}]$ en las celdas de ion de litio está entre $[2,5-4,2]V$.

Energía específica o densidad de energía gravimétrica (Wh/Kg): define la capacidad de la batería en función del peso.

Densidad de energía o energía volumétrica (Wh/l): define la capacidad de la batería en función del volumen [2].

2.2. Sistemas BMS

Actualmente en el ámbito de la electromovilidad las baterías siguen siendo los componentes más caros de los vehículos eléctricos. Son numerosos los sistemas que contribuyen al cuidado y seguridad de estos, entre ellos se encuentra el BMS.

Los sistemas de gestión de baterías o BMS, son sistemas que surgen con el objetivo de garantizar las condiciones adecuadas para el funcionamiento de los packs de baterías. En la actualidad han ido evolucionando y además de sus funciones principales proporcionan información valiosa para la mejora de la eficiencia y operación de los vehículos [3].

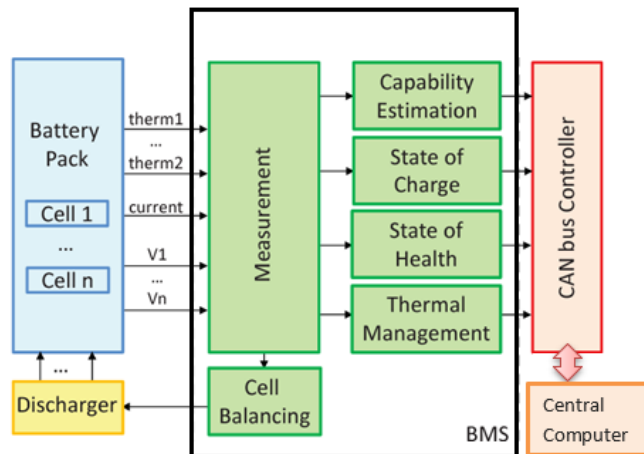


Figura 1. Funciones del BMS dentro de un EV [4].

Como se muestra en la figura 1, este sistema se encarga de la medición de parámetros como la corriente, tensión, temperatura...etc. de cada celda. Además, se encarga de su transmisión al ordenador central del vehículo mediante el protocolo de comunicación CAN.

Una de las funciones más importantes que realiza este sistema es el equilibrado de celdas.

2.3. Desequilibrios en las celdas de baterías.

Los desequilibrios presentes entre las celdas de un mismo pack se deben a características como la resistencia interna, el nivel de degradación, la capacidad y la temperatura ambiente entre otras. Estas diferencias inevitables pueden causar muchos problemas y provocar la reducción general de la capacidad del pack. Estos desequilibrios hacen que las celdas no se carguen y descarguen de la misma forma, produciendo que algunas de ellas lo hagan en exceso lo que puede suponer un problema para la seguridad. En conclusión, un pack de baterías con desequilibrios tendrá un menor rendimiento y vida útil.

Por ello este trabajo de fin de grado se enfoca en el estudio y diseño de diferentes técnicas para la ecualización de las celdas de baterías.

2.3.1. Técnicas de equilibrado de baterías

Estos sistemas se pueden dividir en dos grandes grupos, basados en los componentes que usan para ecualizar el voltaje de las celdas [5].

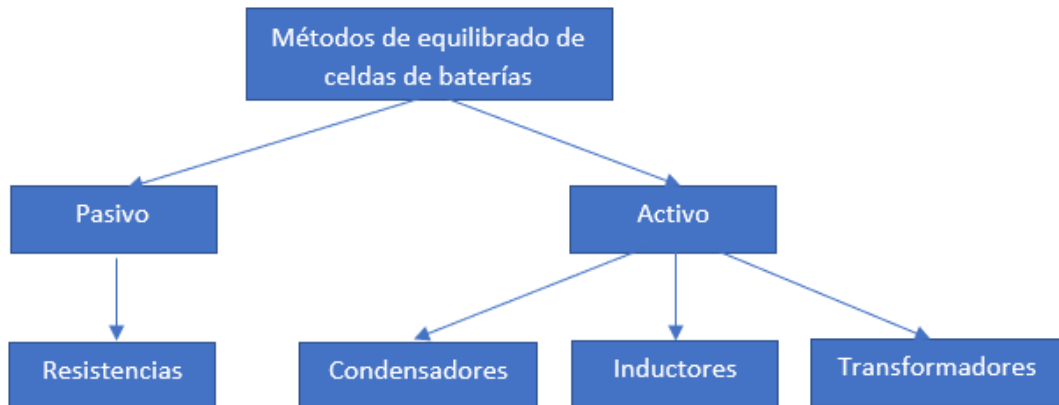


Figura 2. Clasificación de los métodos de equilibrado de baterías.

2.3.1.1. Métodos pasivos

Estos métodos de ecualizado se basan en el uso de resistencias para disipar el exceso de energía de las celdas más cargadas, igualando su carga a la de la celda de menor SoC. Este tipo de técnicas son populares en la industria debido al bajo coste de sus componentes, tamaño pequeño, control simple y fácil instalación.



Figura 3. Equilibrado de celdas mediante métodos pasivos.

2.3.1.2. Métodos activos

Estos métodos se basan en la transferencia de energía en vez de en su disipación, por ello son mucho más eficientes que los métodos pasivos. La energía de las celdas más cargadas es almacenada temporalmente (en un condensador, inductor o transformador) y es después utilizada para cargar las celdas de menor SoC.

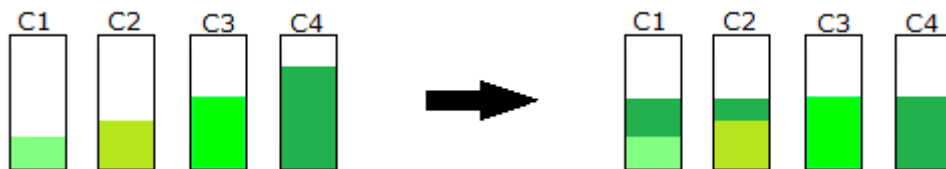


Figura 4. Equilibrado de celdas mediante métodos activos.

Debido a su mejor eficiencia en comparación con el método pasivo, este trabajo se centrará en los métodos de ecualizado activo.

Estrategias de equilibrado de baterías para métodos activos

Algunas de las estrategias de equilibrado más conocidas son [6]:

1. Conmutación entre celdas adyacentes (Adjacent Cell to Cell - AC2C)

Son los circuitos más sencillos, realizan las conmutaciones sin la necesidad de un control complejo ni una medición precisa de los voltajes de las celdas. En ellos la conmutación de los polos se realiza continuamente entre dos estados, permitiendo a las celdas adyacentes equilibrarse. El elemento equilibrador está conmutando entre celdas adyacentes. La velocidad del proceso depende directamente del número de celdas del pack y de la disposición de las celdas más desequilibradas dentro de él (al final o en el medio).

2. Conmutación entre celdas (Direct cell to cell - DC2C)

Esta técnica se basa en la transferencia directa de la energía de la celda más cargada a la menos cargada en cada conmutación. Es necesaria la medición de los voltajes y un sistema de control más complejo que permita seleccionar en cada instante la celda más cargada y la menos cargada. Este método es lento, sobre

todo cuando los packs son muy grandes debido a que solo se ecualiza una celda en cada instante.

3. Conmutación entre celdas y el pack (Cell to pack – C2P)

Esta técnica se basa en la transferencia de la energía de la celda más cargada a todo el pack o módulo. Este proceso continúa hasta que todo el pack esté equilibrado. Es necesario la medición de los voltajes de las celdas y un sistema de control que seleccione la celda más cargada.

4. Conmutación entre el pack y las celdas (Pack to Cell – P2C)

Esta técnica se basa en la transferencia de energía desde el pack hacia la celda menos cargada. Toma una pequeña cantidad de energía de todas las celdas y se la transfiere a la de menor carga en cada conmutación. Es necesario la medición de los voltajes de las celdas y un controlador que seleccione la celda menos cargada.

5. Conmutación entre múltiples de celdas (Multi Cell to Multi Cell – MC2MC)

Esta técnica se basa en la transferencia de energía de múltiples celdas a múltiples celdas. Requiere la medición de los voltajes y de un control complejo que pueda seleccionar una celda o múltiples para su descarga o carga.

- En este trabajo de fin de grado se realizará un análisis comparativo entre dos técnicas activas de equilibrado de celdas basadas en la estrategia “Adjacent Cell to Cell”. El tema de este trabajo surge como continuación con los estudios realizados en otros tres TFG ya leídos [7] [8] [9] cuyos contenidos hacen estudios similares a los realizados en el presente trabajo en relación con técnicas de ecualizado de baterías por métodos activos.

3. Presentación del problema

Se quiere realizar un estudio comparativo entre dos técnicas activas de equilibrado de celdas, una implementada mediante condensadores y otra mediante inductores, que siguen la estrategia de AC2C.

El circuito implementado mediante la conmutación de condensadores se ha extraído de un TFG ya leído [7], cuyo funcionamiento comentaremos en los próximos apartados, mientras que el circuito implementado mediante la conmutación de inductores será desarrollado en este documento.

3.1. Circuito de equilibrado de celdas basado en la conmutación de condensadores que implementa la estrategia “Adjacent cell to cell” AC2C.

Todo el contenido presente en este apartado pertenece al TFG titulado “*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*” [7], defendido por Aarón Bueno Salamanca en 2018. De él se extraerá el análisis e información relevante del circuito de ecualizado por conmutación de condensadores entre celdas adyacentes.

En el capítulo de “*Análisis y elección*” se realiza un estudio del comportamiento de un condensador en las diferentes situaciones que se darán durante el proceso de equilibrado. El modelo básico que se propone es:

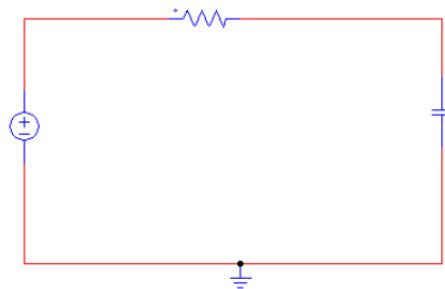


Figura 5. Circuito básico de una celda conectada con el condensador de equilibrado.

El circuito propuesto en la figura 5 representa la conexión en paralelo de una batería con el condensador de equilibrado. Se incluye una resistencia que representa las pequeñas pérdidas debidas al cableado y a la característica no ideal de los componentes.

Este sistema se analiza en dos situaciones: cuando la tensión de la batería es mayor que la tensión del condensador y cuando la tensión de la batería es menor que la del condensador. Para ambas situaciones, se analiza el modelo de la figura 5 y se obtiene la respuesta de la corriente que fluye por el condensador (V_1 representa la tensión del condensador en el instante inicial $t=0s$):

1. $V_{batería} > V_{condensador}$

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{C}{RC} * (V_{bat} - V_1)e^{\frac{-t}{RC}} \quad (1)$$

La corriente tendrá signo positivo, lo que implica que entrará al condensador, cargándolo (se está descargando la batería).

2. $V_{batería} < V_{condensador}$

$$I = \frac{dq}{dt} = -\frac{C}{RC} * (V_1 - V_{bat})e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2)$$

La corriente tendrá signo negativo, lo que implica que circulará del condensador hacia la batería, descargándolo (cargando la batería).

Todos los procedimientos de cálculo de estas expresiones y de las relativas a la tensión del condensador y tiempos de carga se pueden encontrar en el capítulo mencionado previamente “Análisis y elección” del TFG referenciado [7].

Con este breve desarrollo queda explicado el funcionamiento del condensador de equilibrado durante los procesos de carga y descarga.

La transferencia de energía entre la batería y el condensador se realiza únicamente de una tensión más alta a una más baja, siendo este elemento muy adecuado para los circuitos equilibradores de celdas de baterías. Esto se debe a que el condensador es un componente que se comporta como una fuente de tensión, al igual que las celdas de la batería. Debido a que la tensión de las celdas de la batería es función del nivel de carga, el condensador proporcionará un control de este flujo de carga de forma inherente, sin la necesidad de un sistema de control que controle el proceso de equilibrado.

Tras el desarrollo del cálculo del tiempo de funcionamiento del BMS y su optimización, presentes en los capítulos “Cálculo del tiempo de funcionamiento del

BMS” y “Optimización del tiempo de funcionamiento del BMS” [7] se propone un circuito equilibrador por conmutación de condensadores en el capítulo “Simulaciones”.

En este capítulo se presenta el circuito equilibrador para un conjunto de tres celdas representadas mediante un circuito cuyo funcionamiento se asemeja al de una celda electroquímica de Litio Fosfato de Hierro (LiFePO₄) de tensión nominal 3.2V.

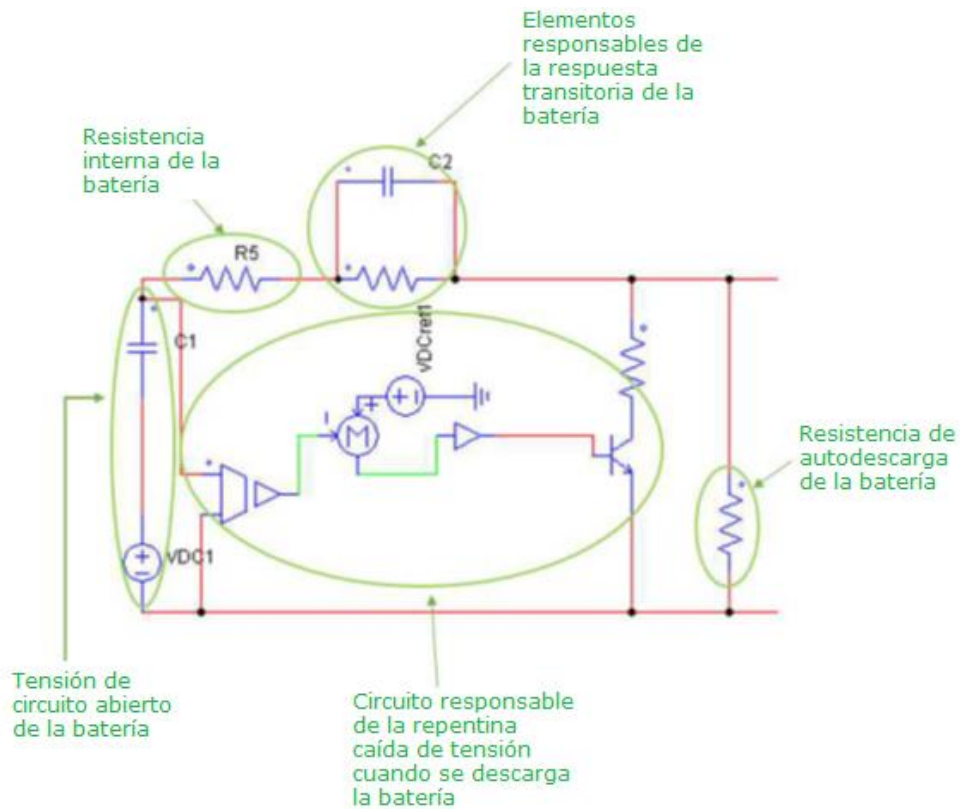


Figura 6. Circuito que se asemeja al de una celda electroquímica real [7].

El circuito propuesto:

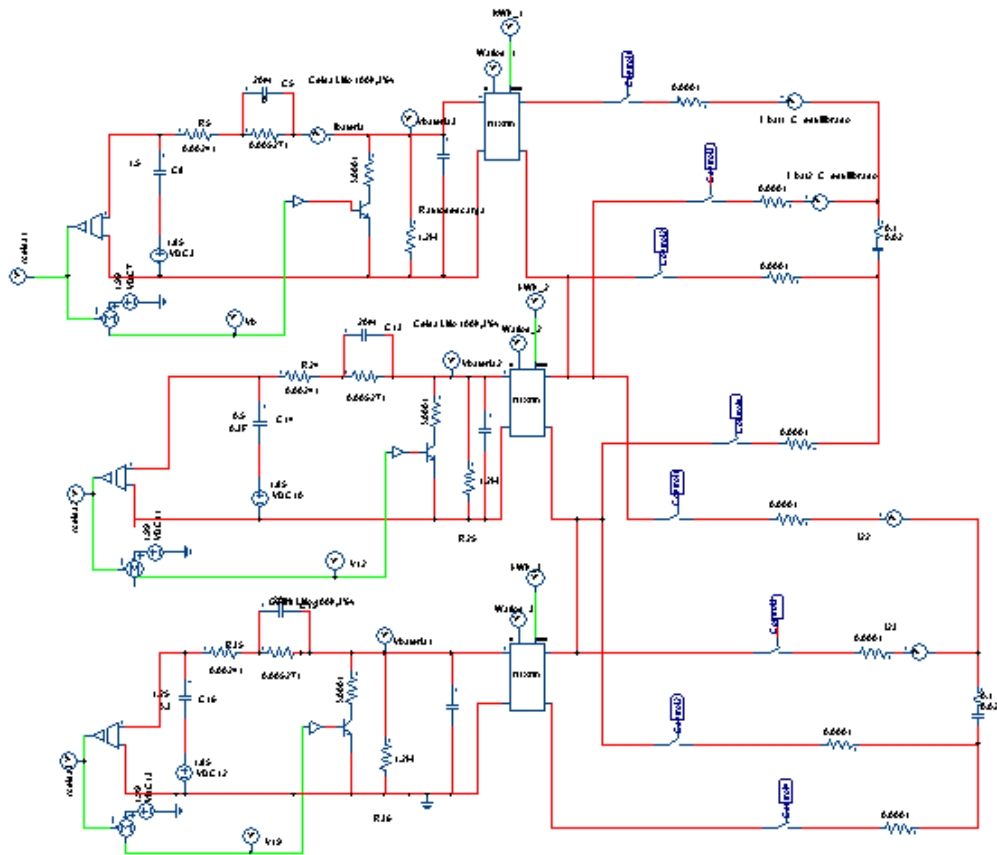


Figura 7. Circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de condensadores entre celdas adyacentes.

El circuito propuesto en la figura 7 realiza el proceso de equilibrado mediante un sistema de polos que se conmutan por la activación de dos señales de reloj, sin ser necesario ningún tipo de control adicional. Se utiliza un condensador por cada dos celdas adyacentes. En este caso concreto en el que el sistema se compone de tres celdas, será necesario la introducción dos condensadores, uno que comunique la primera con la segunda, y otro que comunique la segunda con la tercera.

La señal de activación “Control1”: conectará la celda1 con el condensador1 y la celda2 con el condensador2.

La señal de activación “Control2”: conectará la celda2 con el condensador1 y la celda3 con el condensador2.

La popularidad de este sistema radica en la simplicidad del circuito. La rapidez del equilibrado depende directamente del número de celdas del pack y de la localización de las más desequilibradas dentro de él. Los casos menos favorables

serán en los que las celdas más desequilibradas se encuentren en el medio o al final del pack.

Tras esta breve explicación del circuito, se procede al diseño de un circuito equivalente que emplee inductores en vez condensadores como elemento equilibrador. Tras su desarrollo se procederá a realizar el análisis comparativo entre ambas técnicas.

4. Estudio teórico del problema

En este capítulo se desarrollará un estudio teórico sobre el mecanismo de ecualizado de celdas de baterías mediante la conmutación de inductores. El objetivo de este apartado es desarrollar los modelos matemáticos cuyo desarrollo permitirá diseñar el circuito que nos ocupa.

4.1. Análisis teórico de un inductor como elemento de transferencia de energía.

Dentro de un circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de inductores, independientemente de la estrategia utilizada, el comportamiento del inductor como elemento equilibrador entre las celdas es crítico.

El proceso de ecualizado se puede dividir en dos etapas activadas mediante un conjunto de polos:

1. Carga de la bobina: mediante la descarga de una celda (o pack).
2. Descarga de la bobina: para cargar otra celda (o pack).

La repetición de este proceso, durante periodos de tiempo del orden de milésimas/microsegundos, permitirá obtener el equilibrado de las celdas tras un tiempo de ecualizado pequeño.

Típicamente la conmutación de los polos está controlada por señales de reloj, donde se ajusta el tiempo en estado alto (ON) a través del ciclo de trabajo o “duty cycle”. El ciclo de trabajo (D) es la relación entre el tiempo en que una señal se encuentra en estado activo (ON) respecto de la duración de todo un periodo T [10].

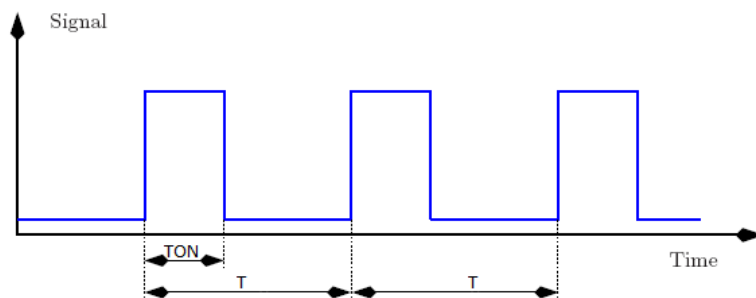


Figura 8. Señal de tensión cuadrada [10].

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (3)$$

Considerando la necesidad de utilizar dos señales de activación (a la misma frecuencia), una para las cargas y otra para las descargas de las celdas, es necesario desfasar estas señales e incluir un pequeño tiempo muerto “dead time” para dotar a los polos del tiempo suficiente para realizar el cambio de estado de ON a OFF, es decir, dotar del tiempo suficiente para que la corriente entre sus terminales se extinga y de esta forma evitar que en algún momento todos los polos estén activos y se produzca un cortocircuito.

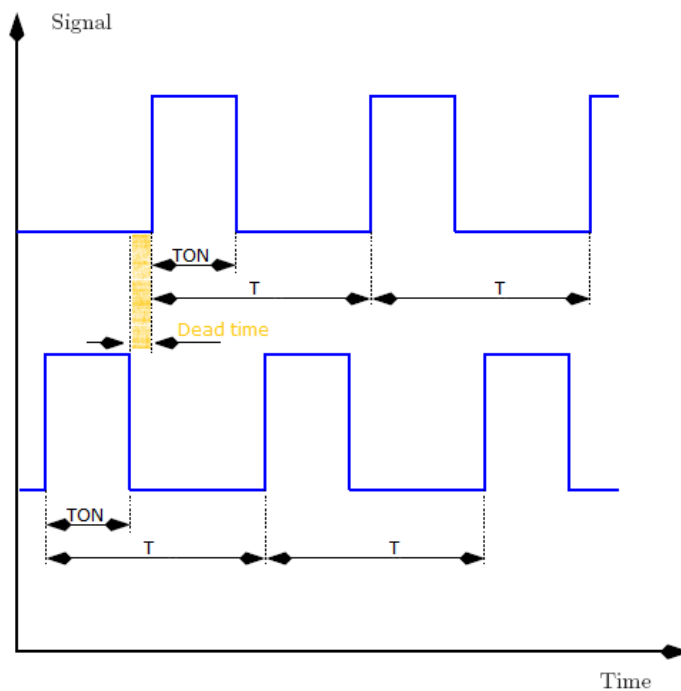


Figura 9. Señales generadas para la conmutación de los polos.

La incorporación del dead time implica que la bobina quedará desconectada de las celdas durante un tiempo, quedando el elemento en un estado flotante hasta la siguiente carga/descarga.

Al ser el inductor una fuente de corriente no es posible la desconexión simultánea de sus dos terminales mientras circula una corriente por la misma sin la aparición de un chispazo, es decir, de una disipación de energía de forma abrupta e instantánea. Esto sucede porque la corriente no tiene un camino por el que seguir circulando y se extingue a través del circuito de aire. En otros TFG leídos [7], el elemento utilizado para realizar la transferencia de energía no se ve negativamente afectado por esta situación y es capaz de almacenar por sí solo la energía previamente almacenada en este estado flotante.

Veamos la justificación técnica al anterior párrafo:

Un inductor es un componente pasivo que almacena energía en forma de campo magnético por un fenómeno llamado autoinducción. Es un arrollamiento de hilo conductor esmaltado alrededor de un núcleo. Es un elemento que se opone a la variación de la corriente.

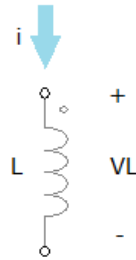


Figura 10. Esquema básico de una bobina.

La ecuación que describe el comportamiento básico de una bobina es la siguiente:

$$V_L(t) = -L \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

Expresada en el dominio de Laplace:

$$V_L(s) = sLI(s) - Li_0 \quad (5)$$

Donde i_0 es la corriente que circula por la bobina en el instante $t=0s$, L es el valor de la inductancia y s es la constante de Laplace.

La ecuación 4 define la tensión que experimenta un inductor como un valor proporcional y en sentido opuesto a la variación de corriente que fluye a través de él. Es decir, al circular corriente por una bobina, se genera un campo magnético que se opone a la variación de la corriente, esta fuerza es conocida como fuerza contraelectromotriz (FCEM).

Deducimos que un inductor no opone resistencia al paso de un flujo de corriente cuando por él circula una corriente constante, aplicando la ecuación 4 se comprueba:

$$V_L(s) = -L \frac{d0}{dt} = 0 \quad (6)$$

Al no haber variación de corriente, la derivada de esta respecto del tiempo es cero y por lo tanto el efecto de la inductancia se anula.

Por otro lado, cuando el inductor se somete a una tensión constante en sus extremos, como sucede en nuestro caso de estudio, aplicando la ecuación 4 la corriente variará y tendrá un valor creciente, de pendiente constante y en sentido opuesto al de la tensión que la origina:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_L}{L} \quad (7)$$

En este tipo de circuitos la corriente generada aumentará hasta que la fuente de voltaje no pueda sostener la demanda de más corriente.

Al tratar de cortar la corriente de forma abrupta estamos intentando que la corriente que fluye por el inductor pase de un valor finito a 0 de forma instantánea.

$$V_L = L \cdot \frac{i_{Lf} - i_{Lo}}{0} = \infty V \quad (8)$$

Esta situación no es posible ya que estaríamos considerando que en el momento de apertura del interruptor se genera una tensión en el inductor de valor infinito.

Lo que sucede en realidad es que este tiempo de conmutación no es instantáneo, pero si es muy pequeño (1µs por ejemplo).

$$V_L = 10mH \cdot \frac{0 - i_{Lo}}{1\mu s} = -i_{Lo} \cdot 10^3 V \quad (9)$$

Se generará una sobretensión en los extremos de la bobina de forma casi instantánea.

Hablando en términos de energía, la **potencia instantánea** o **tasa de transferencia de energía al inductor (P)** se define como:

$$P = V_L \cdot i_L = L \frac{di_L}{dt} \cdot i_L \quad (10)$$

La energía dE suministrada al inductor durante un intervalo de tiempo infinitesimal dt es:

$$dE = P dt = L \cdot i_L di_L \quad (11)$$

La energía total suministrada (E):

$$E = \int_{t_0}^{t_f} P dt = P(t_f - t_0) = P \cdot t \quad (12)$$

o

$$E = L \cdot \int_0^I i_L di_L = \frac{1}{2} L \cdot i_L^2 \quad (13)$$

Si aplicamos las ecuaciones 10 y 12 en el instante de apertura del interruptor:

$$P = V \cdot I = -i_{Lo} \cdot 10^3 V \cdot i_{Lo} = -i_{Lo}^2 \cdot 10^3 W \quad (14)$$

$$E = P \cdot t = -i_{Lo}^2 \cdot 10^3 W \cdot 1\mu s < 0 \quad (15)$$

Observamos como el inductor reacciona cediendo la energía que tenía almacenada ($E < 0$). En la práctica esto sucede en forma de chispa. Debido a la sobretensión generada cuando se abre el circuito, se facilita la ionización del aire entre los contactos del interruptor, haciéndolo conductor de electricidad durante un tiempo instantáneo, generándose un fenómeno conocido como arco eléctrico [11]. A través de este arco eléctrico la corriente encuentra una trayectoria por la que fluir y se produce una descarga luminosa similar a una llama que puede dañar los componentes cercanos en el circuito.

Para evitar que estas chispas ocurran hay que proporcionar un camino alternativo para que la corriente fluya. Muy comúnmente se utilizan diodos en paralelo con el inductor a modo de protección [12].

4.2. Estudio del diodo como elemento protector del inductor en las conmutaciones.

Un diodo es un elemento que permite el paso de la corriente en una sola dirección. Es un componente electrónico pasivo con pérdidas debidas a su conmutación.

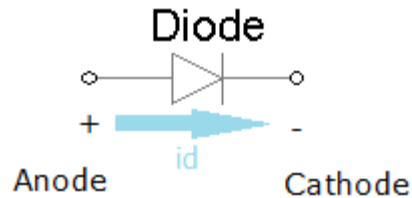


Figura 11. Diodo polarizado en directa.

Los diodos permiten el paso del flujo de corriente únicamente de ánodo a cátodo cuando está polarizado directamente, es decir, cuando la tensión en el ánodo es mayor que en el cátodo, y la bloquean cuando la tensión en el cátodo es mayor que en el ánodo. Se utilizan muy comúnmente como elementos protección.

El modelo resultante del conjunto inductor-diodo en paralelo durante los procesos de carga y descarga es el siguiente:

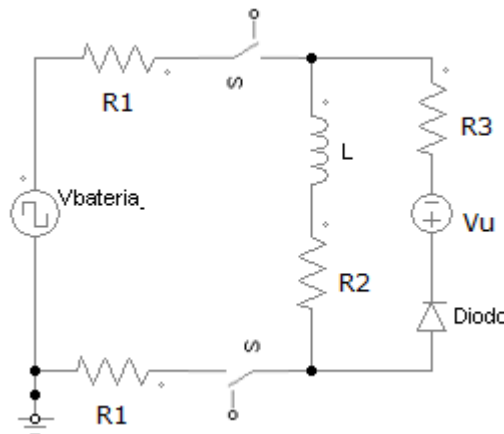


Figura 12. Circuito carga/descarga del conjunto inductor-diodo en paralelo.

El diodo se ha representado con su aproximación lineal, formada por una fuente de tensión V_u que representa su tensión umbral y por su resistencia interna R_3 .

$$V_d = V_u + i_d \cdot R_3 \quad (16)$$

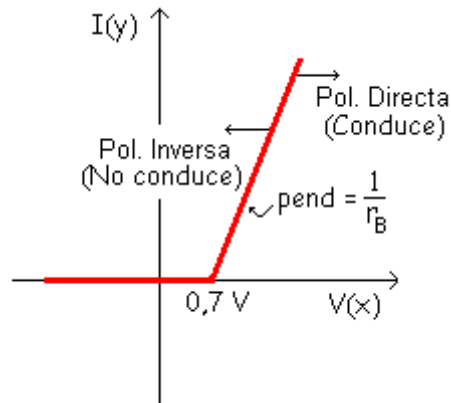


Figura 13. Modelo del diodo aproximado [13].

Analizando el modelo se consideran las siguientes situaciones:

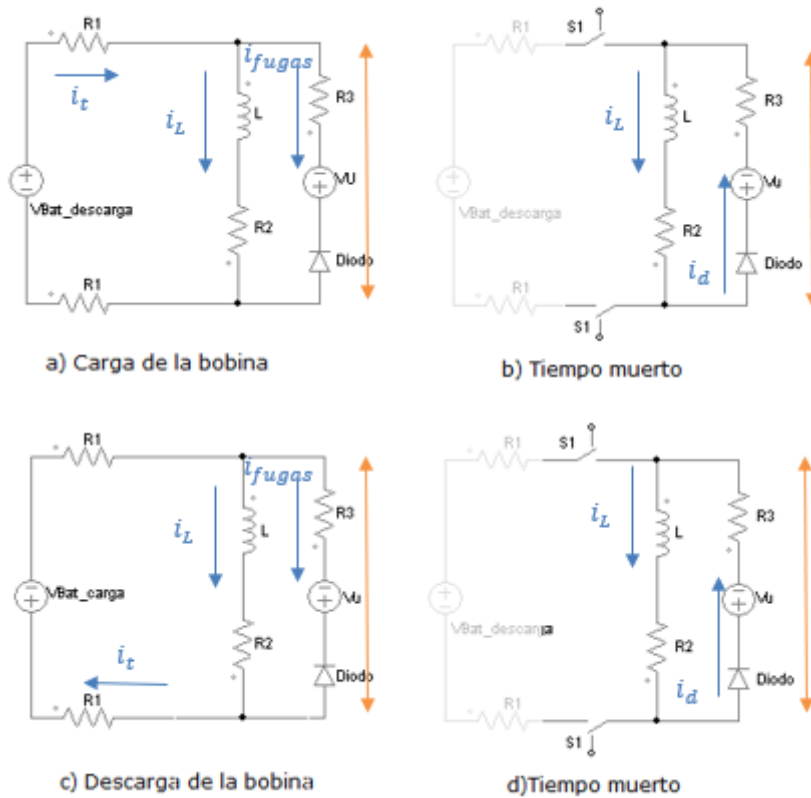


Figura 14. Proceso de ecualización con el conjunto inductor-diodo en paralelo.

- a) **Carga de la bobina** (descarga de una celda). Los polos están cerrados y fluye corriente desde la celda hacia la bobina. En esta situación el diodo se

encuentra polarizado inversamente ya que por la disposición de la celda que se está descargando, la tensión en el cátodo es mayor que en el ánodo. No circula corriente de ánodo a cátodo, sin embargo, existe una pequeña corriente de fugas que circula debida a la característica no ideal del diodo.

b) **Tiempo muerto.** Los polos se abren y el sistema inductor-diodo queda flotante. No se produce una sobretensión en los extremos de la bobina gracias a la disposición en paralelo del diodo que permite que la corriente fluya por un camino alternativo. La corriente circula por el conjunto inductor-diodo hasta que se activen los polos de nuevo para cargar la celda.

c) **Descarga de la bobina** (carga de la celda). Los polos están cerrados y fluye corriente desde la bobina hacia la celda. En esta situación la corriente por la bobina fluye en el mismo sentido que durante su carga, por lo que son la disposición del cableado y los polos los que permiten redirigir la corriente para que esta entre a la celda que se quiere cargar. Por ello es necesario, durante la descarga de la bobina, conectar los terminales de la celda de forma opuesta a su disposición durante la carga de esta. Sin embargo, al haber invertido la disposición de la celda, ahora la tensión en el ánodo es mayor que en el cátodo y el diodo está polarizado directamente permitiendo el paso de la corriente y evitando que toda energía se transfiera a la celda.

Este comportamiento hace que el proceso de equilibrado no se realice adecuadamente y en poco tiempo todas las celdas se acaben descargando.

d) **Tiempo muerto.** Misma respuesta del sistema que la explicada en el apartado b).

Debido a la necesidad de conectar las celdas con los terminales en sentido opuesto, con el conjunto inductor-diodo, durante la descarga del inductor, el diodo no permitirá realizar el proceso de equilibrado de forma correcta debido a su carácter unidireccional. Si bien realiza la tarea de protección contra las sobretensiones, no es adecuado para nuestro sistema.

Para poder analizar el comportamiento de este sistema y comprobar las deducciones teóricas desarrolladas se propone el siguiente modelo PSIM:

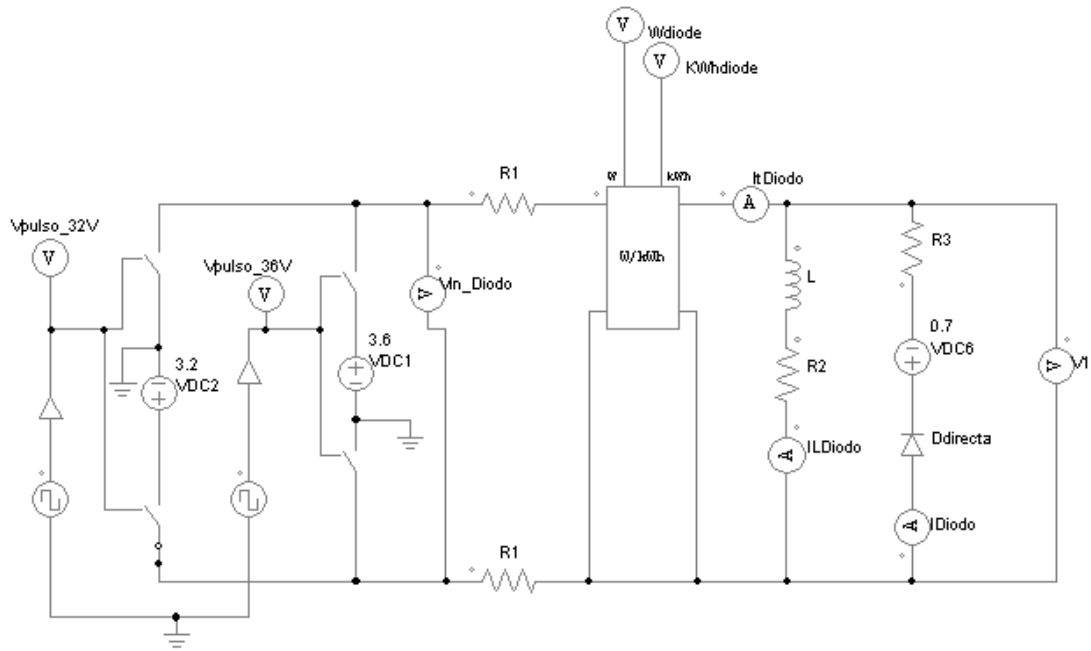
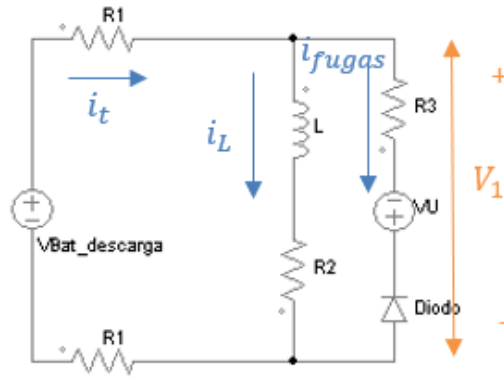


Figura 15. Circuito con la bobina en paralelo con el diodo conmutando entre dos tensiones distintas.

El sistema propuesto en la figura 15 simula de forma sencilla la conmutación del conjunto inductor-diodo en paralelo, entre dos tensiones de 3,6V y 3,2V respectivamente.

Las dos señales de conmutación están retardadas 180° entre sí y conmutan a una frecuencia de 1000Hz con ciclo de trabajo del 48%.

Analizaremos el comportamiento del sistema durante la descarga de una celda (figura 14 a) para dimensionar los elementos del sistema.



a) Carga de la bobina

Figura 16. Circuito resultante durante la carga de la bobina (descarga de una celda).

Desarrollamos el modelo:

$$i_t = i_L + i_{fugas} \quad (17)$$

$$V_1 = V_L + i_L \cdot R_2 \quad (18)$$

$$V_1 = L \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R_2 \quad (19)$$

$$I_t = \frac{V_{bateria} - V_1}{2R_1} \quad (20)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$V_1(s) = L(sI_L(s) - I_{L0}) + I_L(s) \cdot R_2 \quad (21)$$

$$I_L(s) = \frac{V_1(s) + LI_{L0}}{Ls + R_2} \quad (22)$$

$$I_t(s) = \frac{(V_1(s) + LI_{L0})}{Ls + R_2} + i_{fugas} \quad (23)$$

Con $V_1 = V_{bateria} - I_t(s)2R_1$ y suponiendo la corriente de fugas despreciable $i_{fugas} \approx 0$:

$$I_t(s) = \frac{V_{bateria} - I_t(s)2R_1 + LI_{L0}}{LS + R_2} \quad (24)$$

$$I_t(s)\left(1 + \frac{2R_1}{LS + R_2}\right) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{LS + R_2} \quad (25)$$

$$I_t(s)(LS + R_2 + 2R_1) = V_{bateria} + LI_{L0} \quad (26)$$

$$I_t(s) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{LS + 2R_1 + R_2} \quad (27)$$

Considerando $R_1 = R_2 = R$:

$$I_t(s) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{LS + 3R} \quad (28)$$

Dividiendo entre $3R$ obtenemos finalmente:

$$I_t(s) \approx I_L(s) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{3R} \cdot \frac{1}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (29)$$

Se dimensionarán los elementos teniendo en cuenta que la corriente a través de la bobina tiene una respuesta de primer orden:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (30)$$

K: ganancia del sistema

τ : constante de tiempo

De las ecuaciones 29 y 30 deducimos:

$$\tau = \frac{L}{3R} \quad (31)$$

El parámetro τ da una medida de como de rápido es el sistema en alcanzar su valor final. Cuanto menor sea este parámetro más rápido será.

Se propone $\tau=0,001$ y $R=0,2\Omega$, calculamos L aplicando la ecuación 31:

$$L = \tau \cdot 3R = 0,001 \cdot 3 \cdot 0,2 = 0,6 \text{ mH} \quad (32)$$

Simulamos el circuito para los valores calculados:

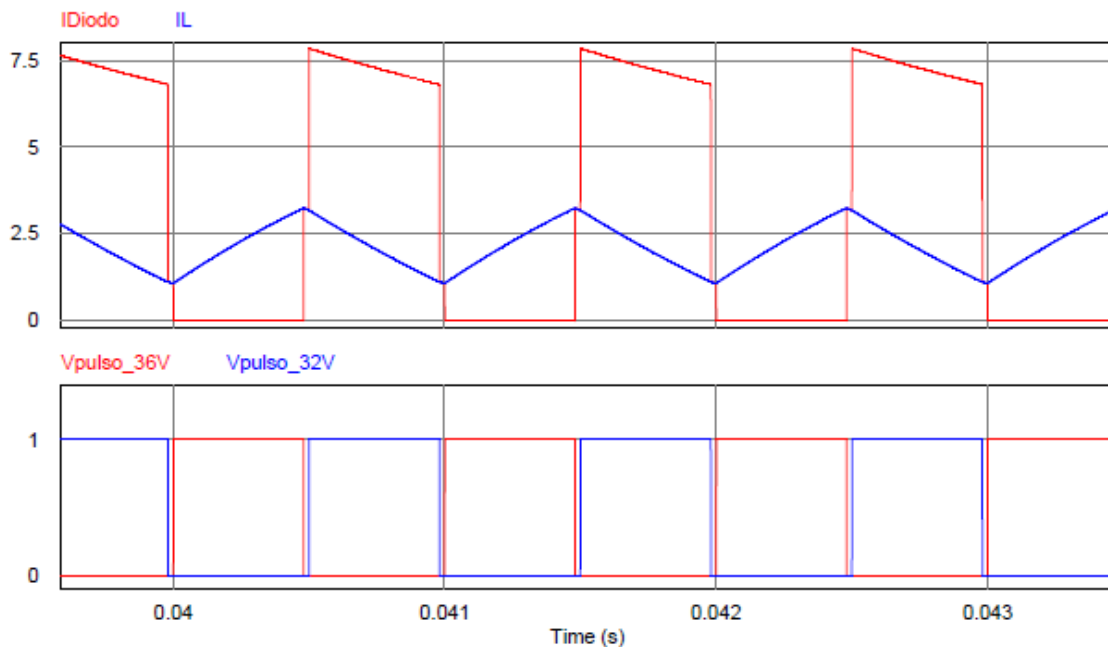


Figura 17. Simulación del circuito con diodo en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y diodo.

Observamos en la figura 17 como cuando el circuito está conectado a la tensión de 3.6 V (pulso de color rojo) la respuesta del sistema es la esperada, no circula corriente por el diodo y la corriente por la bobina aumenta. Durante el dead time observamos como sí que circula corriente por el diodo (debido a que ahora está polarizado en directa). Sin embargo, cuando se conecta el circuito a la tensión de 3.2V (con los terminales en sentido opuesto) observamos como sí que circula

corriente por el diodo, el cual debería estar polarizado inversamente en esta situación.

Vistos los resultados de la simulación, se comprueban las deducciones desarrolladas previamente, por lo que descartamos definitivamente usar un diodo como elemento protector del inductor para este tipo de aplicaciones.

Se propone entonces usar un condensador como elemento de protección.

4.3. Estudio del condensador como elemento protector del inductor en las conmutaciones.

Un condensador es un componente electrónico pasivo que almacena energía en forma de campo eléctrico.

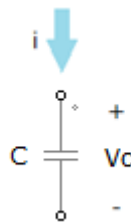


Figura 18. Esquema básico de un condensador.

Tiene un funcionamiento similar al de las baterías recargables ya que es capaz de almacenar y liberar energía eléctrica en forma de fuente de tensión. Está formado por un par de superficies conductoras en forma de placas o láminas. Estas placas sometidas a una diferencia de potencial adquieren una determinada carga eléctrica proporcional a la llamada capacidad o capacitancia, magnitud medida en faradios (F).

La ecuación que modela el comportamiento fundamental de un condensador es:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (33)$$

Expresada en el dominio de Laplace:

$$I_c(s) = C \cdot (sV_c(s) - V_{c0}) \quad (34)$$

Donde V_{C0} representa la tensión en los extremos del condensador en el instante $t=0s$.

De la ecuación 33 deducimos que la corriente que circula por el condensador es proporcional a la variación de tensión que experimente en el tiempo. Por lo que no existirá flujo de corriente si el componente está sometido a una tensión constante.

Idealmente es un componente que no genera pérdidas, sin embargo, la realidad es que la presencia de sobretensiones y sobrecorrientes generan microperforaciones y deterioros en su película aislante generándose así pequeñas pérdidas.

Se ha propuesto este elemento para la protección frente a las sobretensiones debido a que solo conducirá corriente cuando experimente una variación de tensión en sus terminales. En nuestro modelo, como la conexión del inductor con los terminales de las celdas tendrá una duración del orden de micro/milisegundos, se considera que durante este tiempo no se percibirá apenas una variación de tensión en la celda y que por lo tanto solo circulará corriente por la bobina.

El modelo resultante del conjunto inductor-condensador en paralelo durante los procesos de carga y descarga es el siguiente:

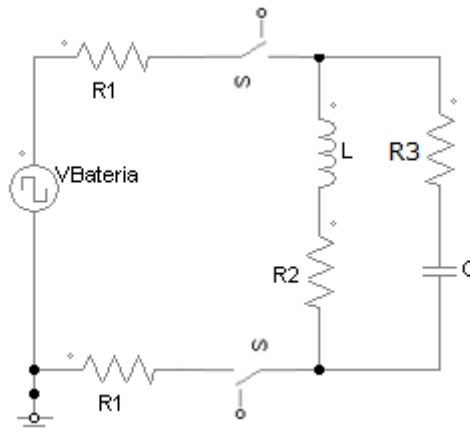


Figura 19. Circuito con el condensador en paralelo con el inductor

Analizando el modelo se consideran las siguientes situaciones:

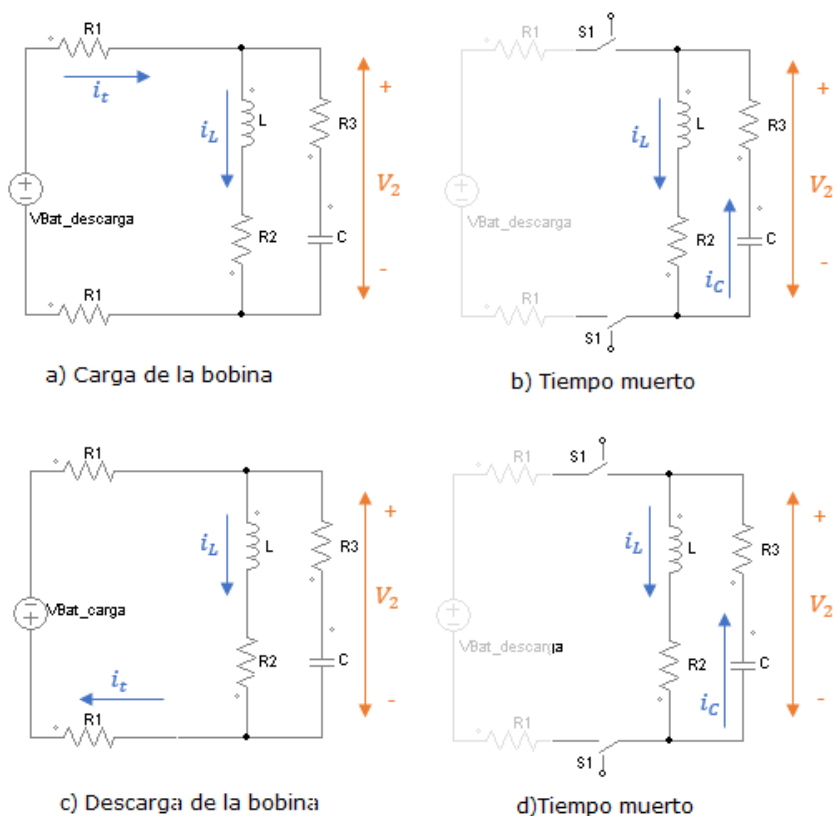


Figura 20. Proceso de equalización con el conjunto inductor-condensador en paralelo.

- a) Carga de la bobina** (descarga de una celda). Los polos están cerrados y fluye corriente desde la celda hacia la bobina. En esta situación si consideramos un condensador con una capacidad muy pequeña, podemos suponer que no circulará corriente por él.
- b) Tiempo muerto.** Los polos se abren y el sistema inductor-condensador queda flotante. No se produce una sobretensión en los extremos de la bobina gracias a la disposición en paralelo del condensador que permite que la corriente fluya por un camino alternativo. La corriente circula por el conjunto inductor-condensador oscilando hasta que se activen los polos de nuevo para cargar la celda.
- c) Descarga de la bobina** (carga de la celda). Los polos están cerrados y fluye corriente desde la bobina hacia la celda. Debido al carácter bidireccional de los condensadores, aunque la disposición de los terminales de la celda a cargar haya cambiado, si consideramos un valor de capacidad muy pequeño, no circulará una corriente significativa por el condensador.

El condensador es capaz de proteger la bobina de las sobretensiones proporcionando un camino alternativo durante los tiempos muertos, único momento por el que circulará a través de él corriente.

d) Tiempo muerto. Misma respuesta del sistema que la explicada en el apartado b.

Para poder analizar el comportamiento de este sistema y comprobar las deducciones teóricas desarrolladas se propone el siguiente modelo PSIM:

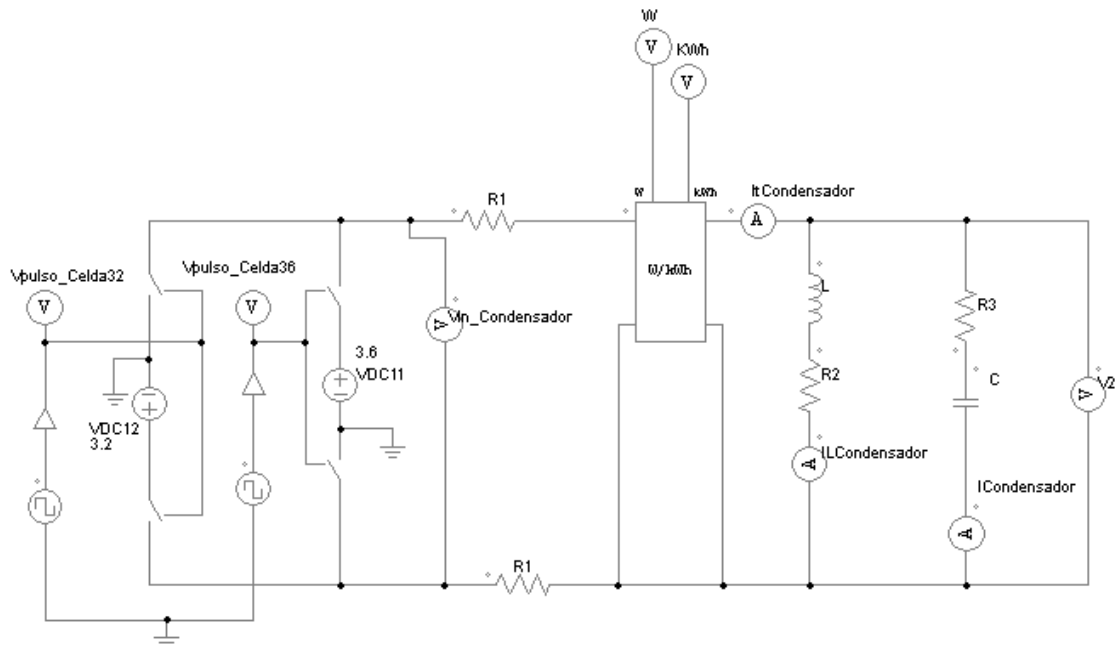


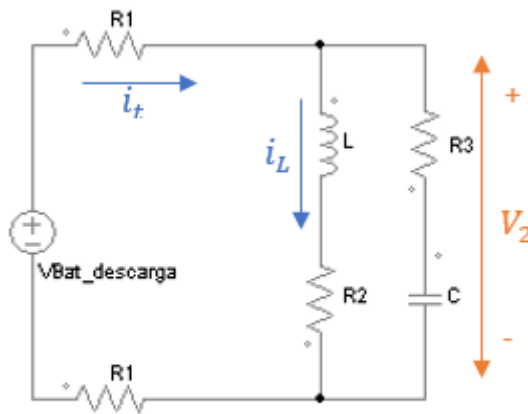
Figura 21. Circuito bobina en paralelo con condensador conmutando entre dos tensiones distintas.

El sistema propuesto en la figura 21 simula de forma sencilla la conmutación del conjunto inductor-condensador en paralelo, entre dos tensiones de 3,6V y 3,2V respectivamente.

Las dos señales de conmutación están retardadas 180° entre sí y conmutan a una frecuencia de 500Hz con ciclo de trabajo del 45%.

Analizaremos el comportamiento del sistema durante la descarga de una celda (figura 20 a) y durante el tiempo muerto (figura 20 b y figura 20 c) para dimensionar los elementos del sistema.

- Análisis del proceso de carga de la bobina (descarga de una celda)



a) Carga de la bobina

Figura 22. Circuito resultante durante la carga de la bobina.

Desarrollamos las ecuaciones:

$$i_t = i_L + i_c \quad (35)$$

$$V_2 = V_L + i_L \cdot R_2 = V_C + i_c \cdot R_3 \quad (36)$$

Considerando un condensador de capacidad muy pequeña, solo circulará una insignificante corriente por él en los instantes de conmutación de los polos (cuando la variación de tensión es perceptible). Por lo que consideramos que durante el proceso de carga y descarga de la bobina no circulará corriente a través de él.

Para $C \ll L$ aproximamos las ecuaciones 35 y 36:

$$i_t = i_L \quad (37)$$

$$V_2 = V_L + i_L \cdot R_2 \quad (38)$$

$$V_2 = L \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R_2 \quad (39)$$

$$I_t = \frac{V_{bateria} - V_2}{2 \cdot R_1} \quad (40)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$V_2(s) = L(sI_L(s) - I_{L0}) + I_L(s) \cdot R_2 \quad (41)$$

$$I_L(s) = \frac{V_2(s) + LI_{L0}}{R_2 + Ls} \quad (42)$$

Sustituyendo $V_2 = V_{bateria} - I_t(s) \cdot 2R_1$:

$$I_t(s) = \frac{V_2 + LI_{L0}}{R_2 + Ls} = \frac{V_{bateria} - I_t \cdot 2R_1 + LI_{L0}}{R_2 + Ls} \quad (43)$$

Despejamos $I_t(s)$:

$$I_t(s) \left[1 + \frac{2R_1}{R_2 + Ls} \right] = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{R_2 + Ls} \quad (44)$$

$$I_t(s) \frac{[R_2 + Ls + 2R_1]}{R_2 + Ls} = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{R_2 + Ls} \quad (45)$$

$$I_t(s) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{Ls + 2R_1 + R_2} \quad (46)$$

Considerando $R_1 = R_2 = R_3 = R$ y la aproximación $i_t = i_L$ obtenemos finalmente:

$$I_L(s) = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (47)$$

- **Análisis del circuito durante el tiempo muerto**

En este momento el circuito bobina-condensador queda flotante y la corriente circulará a través de ambos componentes, lo que se denomina circuito resonante [14].

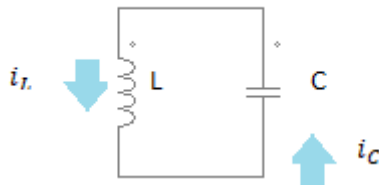
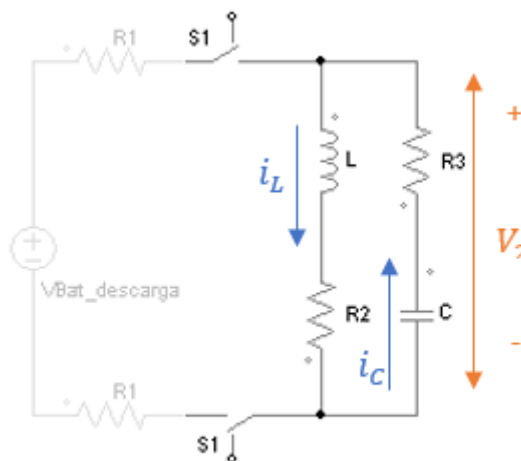


Figura 23. Circuito resonante ideal.

Un circuito resonante funciona de manera que la energía almacenada por el campo magnético del inductor es absorbida por el condensador que la almacena en forma de campo eléctrico y viceversa. Este vaivén constituye una oscilación electromagnética en la que cuando el campo magnético es máximo, el campo eléctrico es 0 y al revés. El proceso se repite indefinidamente hasta que debido a las pérdidas presentes en la resistencia interna del inductor y a las corrientes de fuga del dieléctrico del condensador, poco a poco la oscilación se va atenuando hasta finalmente desaparecer.

El modelo, considerando las resistencias internas de la bobina y el condensador es el siguiente:



b) Tiempo muerto

Figura 24. Circuito resultante durante el tiempo muerto.

Desarrollamos las ecuaciones:

El circuito actúa como un resonador eléctrico basado en el almacenamiento de energía oscilante a la frecuencia de resonancia del circuito.

$$i_L = i_C \quad (48)$$

$$V_2 = V_L + i_L \cdot R_2 = -(V_C + i_C \cdot R_3) \quad (49)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$L(sI_L(s) - I_{L0}) + I_L(s) \cdot R_2 = -(V_C(s) + I_C(s) \cdot R_3) \quad (50)$$

De la ecuación 34 se deduce:

$$V_C(s) = \frac{I_C(s)}{Cs} + \frac{V_{C0}}{s} \quad (51)$$

Considerando $I_C(s) = I_L(s)$, $I_{L0} \neq 0$ y $V_{C0} \neq 0$ despejamos $I_L(s)$:

$$L(sI_L(s) - I_{L0}) + I_L(s) \cdot R_2 = -\left(\frac{I_C(s)}{Cs} + \frac{V_{C0}}{s} + I_C(s) \cdot R_3\right) \quad (52)$$

$$L(sI_L(s) - I_{L0}) + I_L(s) \cdot R_2 = -\left(\frac{I_L(s)}{Cs} + \frac{V_{C0}}{s} + I_L(s) \cdot R_3\right) \quad (53)$$

$$I_L(s) \cdot \left[R_2 + Ls + \frac{1}{Cs} + R_3\right] = -\frac{V_{C0}}{s} + LI_{L0} \quad (54)$$

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{s} + LI_{L0}}{Ls + R_2 + R_3 + \frac{1}{Cs}} \quad (55)$$

Multiplico el numerado y denominador por s:

$$I_L(s) = \frac{-V_{C0} + LI_{L0}s}{Ls^2 + (R_2 + R_3)s + \frac{1}{C}} \quad (56)$$

Divido entre L numerador y denominador:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{R_2+R_3}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (57)$$

Considerando $R_2 = R_3 = R$ obtenemos finalmente:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (58)$$

Procedemos a dimensionar los elementos del sistema LC para realizar las simulaciones según el esquema presentado en la figura 21.

En el anterior circuito ya se había fijado en la ecuación 47 que el valor de la inductancia L venía dado por:

$$\tau = \frac{L}{3R} \quad (59)$$

Se propone $\tau=0,001$ y $R=0,2\Omega$, calculamos L aplicando la ecuación 59:

$$L = \tau \cdot 3R = 0,001 \cdot 3 \cdot 0,2 = 0,6mH \quad (60)$$

El valor de C debe ser mucho más pequeño que el de L. Un posible valor será:

$$C = \frac{L}{10^4} = \frac{0,6mH}{10^4} = 60nF \quad (61)$$

La respuesta de la corriente durante los tiempos muertos queda definida por el sistema de segundo orden obtenido en la ecuación 58. Un sistema de segundo orden presenta la siguiente respuesta:

$$G(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (62)$$

K: ganancia del sistema

ξ : coeficiente de amortiguamiento

w_n : frecuencia natural no amortiguada [rad/s]

Para que la corriente muestre una respuesta oscilatoria $\xi = 0$.

De las ecuaciones 58 y 62 deducimos:

$$2\xi w_n = \frac{2R}{L} \quad (63)$$

$$w_n^2 = \frac{1}{LC} \quad (64)$$

El coeficiente de amortiguamiento para este sistema queda definido por la expresión:

$$\xi = \frac{2R}{2Lw_n} = \frac{R}{Lw_n} \quad (65)$$

La frecuencia natural para este sistema queda definida por la expresión:

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (66)$$

Para los valores de inductancia y capacidad calculados en las ecuaciones 60 y 61 obtenemos la frecuencia natural, de la respuesta de la corriente por el inductor durante los tiempos muertos:

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,6mH \cdot 60nF}} = 166,66 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \quad (67)$$

Hallamos la frecuencia a la que oscila la corriente (en Hz):

$$f = \frac{\omega_n}{2 \cdot \pi} = \frac{166,66 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi} = 26,52 \text{ kHz} \quad (68)$$

A partir del valor calculado de la frecuencia natural, ecuación 67, calculamos el amortiguamiento:

$$\xi = \frac{R}{L\omega_n} = \frac{0.2}{0,6m \cdot 166,66 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3} \quad (69)$$

Al ser un valor muy cercano a cero, el sistema de segundo orden será oscilatorio. Durante los tiempos muertos la corriente oscilará por el circuito inductor-condensador según la frecuencia f calculada en la ecuación 68.

Simulamos el circuito para los valores calculados:

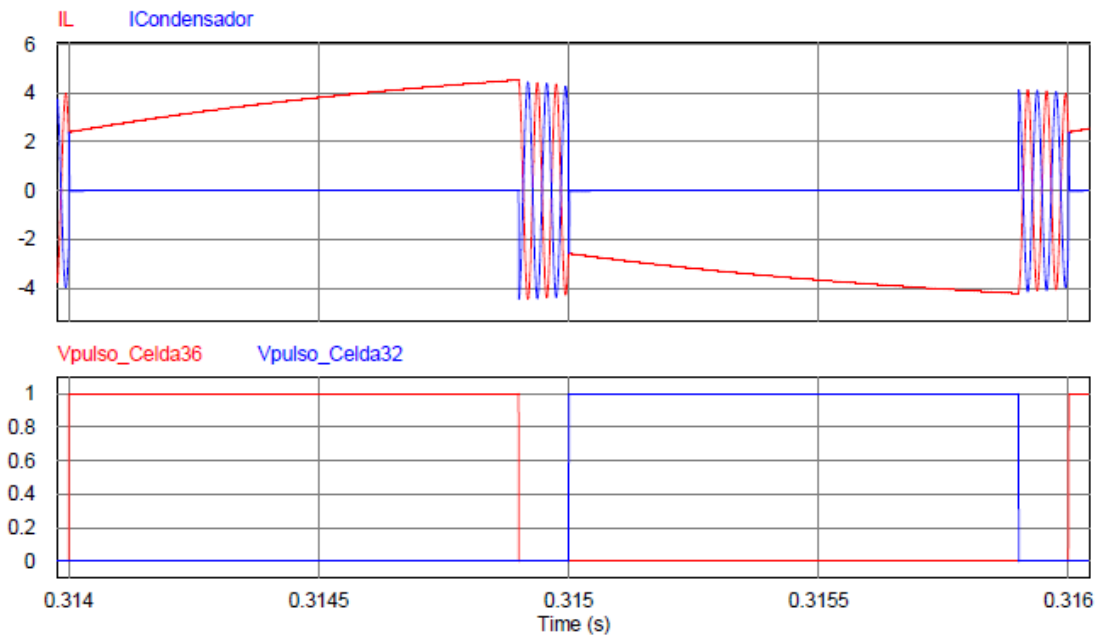


Figura 25. Simulación del circuito con condensador en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y condensador.

Observamos en la figura 25 como cuando el circuito está conectado a cualquiera de las tensiones, la respuesta del sistema es la esperada, no circula corriente por el condensador, la corriente por la bobina aumenta cuando está conectada a la celda de 3,6V y disminuye cuando se conecta a la de 3,2V.

Únicamente circula corriente por el condensador durante los tiempos muertos. Observamos como la corriente oscila por el circuito resonante, almacenándose la energía en forma campo magnético y eléctrico hasta la siguiente conmutación. Cabe destacar que, para los valores de capacidad e inductancia diseñados, la corriente oscila varias veces durante la duración del tiempo muerto y además coincide que cuando este termina y la bobina se conecta la celda de 3,2V la corriente I_L está justo tomando un valor negativo en la oscilación, por lo que no se está transfiriendo toda la energía que había almacenado la bobina durante la conexión a la celda de 3,6V.

Para obtener la mayor transferencia de energía posible durante los tiempos muertos se deben dimensionar la inductancia y capacidad para que durante este tiempo, la corriente oscile un periodo. Reduciendo el número de oscilaciones reduciremos también las pérdidas asociadas a las resistencias internas de la bobina y condensador.

Realizamos de nuevo los cálculos, esta vez diseñando L y C para una frecuencia:

$$f_{oscilacion} = \frac{1}{T_{dead}} = \frac{1}{(0,5 - DutyCycle) \cdot T} \quad (70)$$

$$f_{oscilacion} = \frac{1}{(0,5 - 0,45) \cdot \left(\frac{1}{500}\right)} = 10 \text{ kHz} \quad (71)$$

Por lo tanto, la frecuencia natural será:

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 10k = 62831,85 \text{ rad/s} \quad (72)$$

Suponiendo que la relación entre L y C es:

$$C = \frac{L}{100} \quad (73)$$

Obtenemos el valor de L en función de la frecuencia natural calculada a través de la ecuación 66:

$$L = \sqrt{\frac{100}{\omega_n^2}} = \sqrt{\frac{100}{62831,85^2}} = 159,1 \mu H \quad (74)$$

Calculamos el valor de C a partir de la expresión de la ecuación 73:

$$C = \frac{159.1 \mu H}{100} = 1,591 \mu F \quad (75)$$

Realizamos de nuevo la simulación del circuito para los nuevos valores L y C calculados:

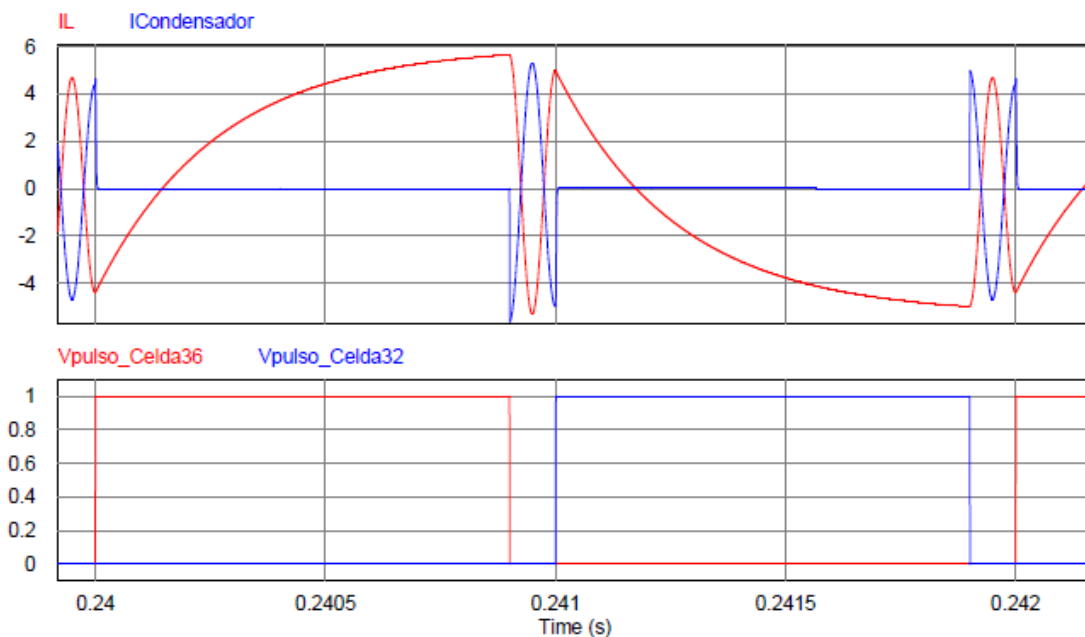


Figura 26. Segunda simulación del circuito con condensador en paralelo. Análisis de las corrientes por la bobina y condensador

La respuesta de la corriente es ahora la buscada. En la figura 26 se puede ver como durante los tiempos muertos la corriente realiza una única oscilación, comenzando el siguiente periodo de conexión a la celda de 3,2V en el punto más alto de su oscilación, permitiendo una mayor transferencia de energía. Por lo tanto, se confirma que la forma adecuada de diseñar los elementos del sistema es dimensionando la L y la C para que la corriente oscile una vez durante el tiempo muerto.

En conclusión, la introducción de un condensador en paralelo con el inductor si resuelve el problema de la sobretensión que se daba en la bobina al conmutar los polos y cortar la corriente de forma abrupta. Además, este “nuevo camino” que proporciona el condensador en paralelo permite preservar la energía previamente almacenada en el inductor durante los tiempos muertos, al contrario que ocurría

con el diodo. De manera que damos por válido el uso del condensador en paralelo con el inductor para el futuro circuito equilibrador de baterías que se diseñará en este trabajo.

Decididos los elementos necesarios para hacer la transferencia de energía, bobina en paralelo con un condensador, se procede a diseñar el circuito equilibrador basado en la conmutación de inductores entre celdas adyacentes.

4.4. Diseño del circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de inductores entre celdas adyacentes AC2C.

En orden a comparar los circuitos equilibradores de celdas de baterías basados en la conmutación de condensadores y bobinas, realizaremos el diseño de un sistema AC2C.

Esta técnica realiza el equilibrado de las celdas mediante un proceso periódico en el que se conmutan los inductores entre las celdas adyacentes.

El control de este sistema es muy sencillo, solo será necesario el diseño de las señales de activación de los polos adecuadamente.

Realizaremos el diseño del esquema con el software PSIM para un módulo de baterías compuesto de tres celdas, siendo el sistema escalable para módulos más grandes con n celdas.

Se utilizará un elemento inductivo por cada dos celdas adyacentes para realizar la ecualización.

El inductor tendrá en paralelo un condensador para garantizar la seguridad del circuito durante los tiempos muertos como se explicó en el anterior apartado.

El sistema propuesto es el siguiente:

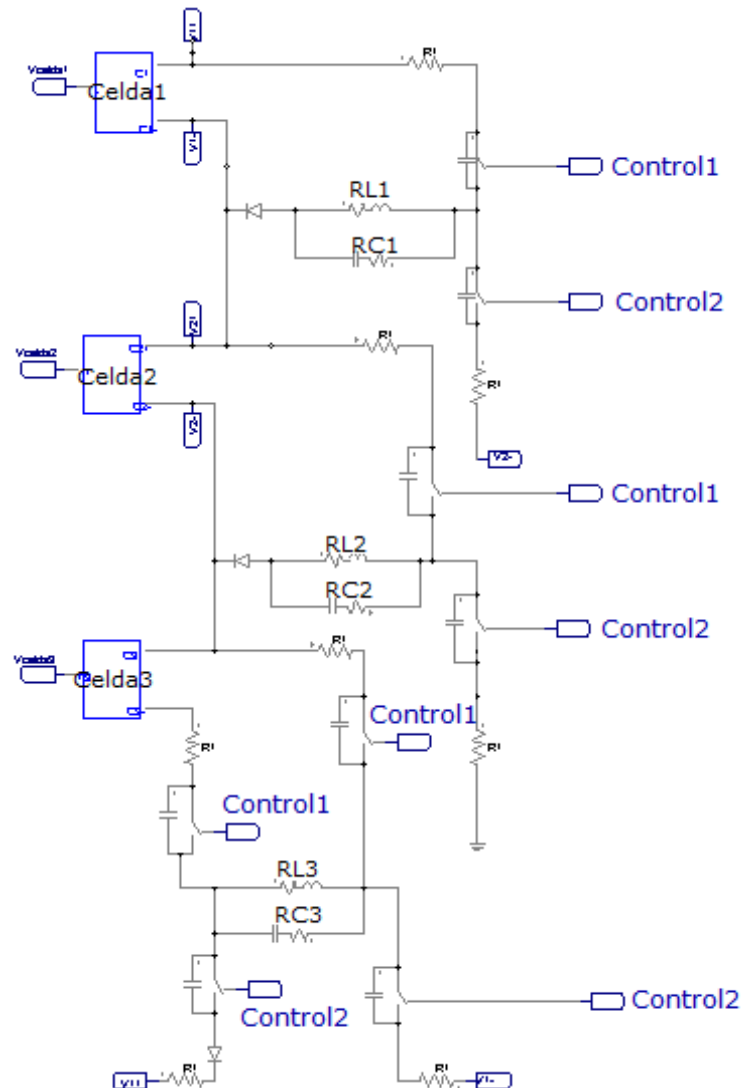


Figura 27. Circuito equilibrador de celdas de baterías basado en la conmutación de inductores entre celdas adyacentes.

Modo de operación del circuito

- Descarga de la celda: para poder llevar a cabo la descarga de cualquiera de las n celdas, cada una de ellas está conectada con el inductor correspondiente mediante dos polos. Estos polos serán activados por la señal denominada "Control1", que se activará en los momentos de carga del inductor.

- Tiempo muerto: En este instante todos los polos de conmutación están abiertos y los sistemas inductor-condensador quedarán flotantes.
- Carga de las celdas: para poder llevar a cabo la carga de cualquiera de las n celdas, cada una de ellas está conectada con el inductor correspondiente, en concreto al que estaba conectado su celda adyacente durante el tiempo de descarga, mediante dos polos. Estos polos serán activados por la señal denominada "Control2", que se activará en los momentos de descarga del inductor.
Además, se utiliza un diodo para asegurar el sentido de la corriente hacia el terminal positivo de la celda.

Proceso de equilibrado de las celdas

Suponiendo un conjunto de tres celdas en las que en un determinado instante: $V_{celda1} > V_{celda2} > V_{celda3}$, siendo "Vcelda n " el valor de la tensión de cada celda, el procedimiento será el siguiente:

1. Se activará la señal Control1 cerrando los interruptores y transfiriendo energía de las celdas al inductor correspondiente. Esta señal de activación conectará la celda1 con la bobina1, la celda2 con la bobina2 y la celda3 con la bobina3, extrayendo energía de ellas.

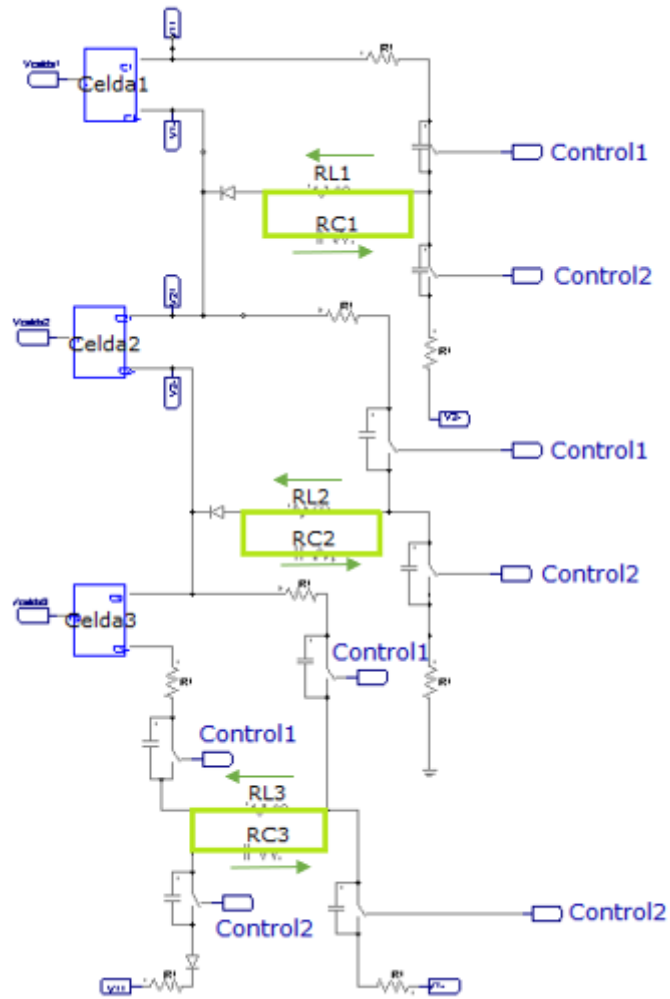


Figura 29. Técnica AC2C: tiempo muerto.

En la figura 29 distinguimos en verde y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente, oscilando en el circuito resonante.

- Tras el tiempo muerto se activará la señal para la carga de las celdas Control2 y se transferirá la energía almacenada por los sistemas resonantes. Esta señal de activación conectará la celda1 con la bobina3, la celda2 con la bobina1 y la celda3 con la bobina2.

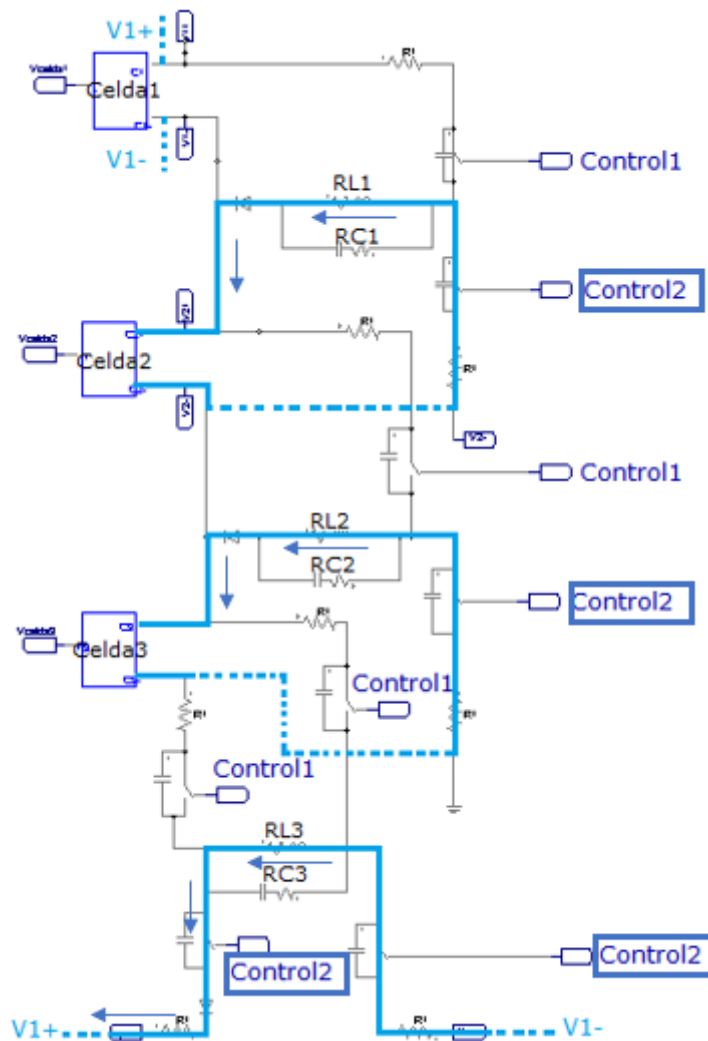


Figura 30. Técnica AC2C: proceso de carga de las celdas.

En la figura 30 distinguimos en azul y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente para descargar la bobina.

4. Tras este periodo habrá de nuevo un tiempo muerto y el proceso descrito se volverá a ejecutar hasta que la diferencia de tensión entre las celdas sea mínima.

Diseño de los elementos del circuito

Las ecuaciones que modelan la corriente que circula por la bobina en cada instante son las mismas que las desarrolladas en el estudio del condensador como elemento protector de la bobina, con algunos cambios:

1. Proceso de descarga de una celda / carga de la bobina.

La ecuación 47 modela la corriente que circula por la bobina mediante un sistema de primer orden:

$$I_L(s) = \frac{\frac{V_{CeldaDescarga} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (76)$$

2. Tiempo muerto

La ecuación 58 modela la corriente que fluye por el circuito resonante como un sistema de segundo orden:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (77)$$

3. Carga de las celdas/Descarga de la bobina.

La corriente que fluye de la bobina hacia la celda sigue la misma ecuación que cuando se está descargando su celda adyacente, con los terminales conectados en sentido opuesto:

$$I_L(s) = \frac{\frac{-V_{CeldaCarga} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (78)$$

4. Tiempo muerto de nuevo. Ecuación 58:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (79)$$

Hipótesis para el diseño de los elementos del circuito AC2C:

Condición 1: el valor de la capacidad (C), debe ser mucho menor que el de la inductancia (L), para que el efecto del condensador cuando estamos en los estados de carga/descarga de la bobina sea mínimo y no fluya corriente a través de él. Además, esto ayudará a que el amortiguamiento del sistema en la condición 3 sea lo menor posible.

Condición 2: la corriente transferida en los procesos de carga/descarga, ecuación 47, debe alcanzar su valor final rápidamente para obtener la mayor transferencia de corriente posible en cada conmutación.

Condición 3: se debe dimensionar el tiempo dead time y los elementos del circuito para que las pérdidas ocurridas durante este periodo sean mínimas, con el objetivo de poder transferir la mayor cantidad de energía posible en el siguiente periodo carga/descarga. Se dimensionarán los elementos para que el tiempo muerto se corresponda con un único periodo de oscilación de la corriente.

Con estas tres condiciones proponemos el siguiente diseño:

Analizando en el espacio temporal el comportamiento de la corriente que circula por la bobina en los procesos de carga y descarga del modelo ideal:

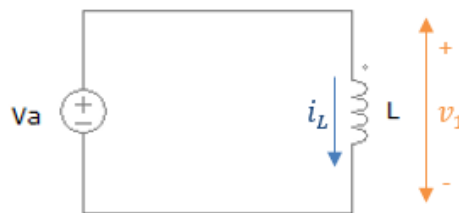


Figura 31. Modelo ideal del proceso de carga de la bobina.

$$V_{bateria} = V_L \quad (80)$$

$$V_{bateria} = L \frac{di_L}{dt} \quad (81)$$

$$V_{bateria} dt = L di_L \quad (82)$$

Suponiendo que la corriente por la bobina tendrá una respuesta para las cargas y descargas según la figura 32:

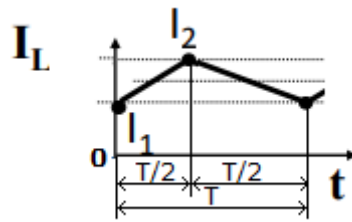


Figura 32. Corriente por la bobina durante un periodo de carga y descarga.

Integraremos la expresión obtenida en la ecuación 82 durante el tiempo que dura el proceso de carga. Haciendo referencia a la imagen 32, el proceso de carga dentro de un periodo de carga/descarga se ha aproximado a la mitad del periodo ($T/2$), por lo que integraremos en el tiempo entre $[0, T/2]$. Para el caso de la corriente, se integrará entre el valor de la corriente al inicio (I_1) y al final del proceso de carga (I_2).

$$\int_0^{T/2} V_{batería} dt = \int_{I_1}^{I_2} L di_L \quad (83)$$

Obtenemos:

$$[V_{batería}] \cdot \left(\frac{T}{2} - 0\right) = L \cdot (I_2 - I_1) \quad (84)$$

$$[V_{batería}] \cdot \left(\frac{T}{2}\right) = L \cdot \Delta i_L \quad (85)$$

Despejamos el valor de la inductancia:

$$L = \frac{V_{batería}}{\Delta i_L} \cdot \frac{T}{2} \quad (86)$$

La ecuación 86 nos permitirá calcular el valor de la inductancia L en función del incremento de corriente que impongamos durante el proceso de carga y la duración del periodo escogido.

La frecuencia natural será:

$$w_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad (87)$$

Se deduce que la frecuencia f_1 será la correspondiente a la duración del proceso de carga, es decir T/2:

$$f_1 = \frac{1}{T/2} \quad (88)$$

Calculamos la frecuencia natural para un periodo de T/2 de duración, que es la duración del proceso de carga o descarga:

$$w_1 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T/2} \quad (89)$$

Despejando T/2:

$$\frac{T}{2} = \frac{2 \cdot \pi}{w_1} \quad (90)$$

Sustituyendo T/2 en la ecuación 86:

$$L = \frac{V_{batería} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{w_1}}{\Delta i_L} \quad (91)$$

Hemos obtenido una ecuación mediante la que podemos calcular el valor de la inductancia en función de la frecuencia natural escogida y la variación de la corriente deseada.

Se proponen los siguientes parámetros para su cálculo:

| | |
|------------------------|----------------------------|
| $f_1 = 500 \text{ Hz}$ | $\Delta i_L = 1 \text{ A}$ |
|------------------------|----------------------------|

Tabla 2. Parámetros considerados para el cálculo de L.

Se ha considerado que el incremento de la corriente sea tan solo de un amperio para poder utilizar componentes de baja potencia en el circuito, ya que serán más baratos y de menor tamaño y precio.

Calculamos el valor de la inductancia L a partir de los parámetros propuestos y considerando un valor para $V_{batería} = 3,2 V$ ya que es el valor de la tensión nominal de las celdas de litio $LiFePO_4$ que se equilibrarán en este circuito

$$L = \frac{3,2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{500 \cdot 2 \cdot \pi}}{1} = 6,4 \text{ mH} \quad (92)$$

Una vez obtenido el valor de la inductancia, procedemos a calcular el valor del condensador. Debido a que hemos despreciado su efecto durante los procesos de cargas y descargas, será a partir de la ecuación que modela la respuesta de la corriente por la inductancia durante los tiempos muertos como calcularemos su capacidad.

El diseño de la capacidad se hará acorde con la duración del tiempo muerto. En apartados anteriores se confirmó que para obtener la mayor transferencia de energía entre los periodos de descarga y carga de las celdas, la corriente circulante por el circuito resonante durante el dead time debe oscilar una sola vez. Esto se debía a dos motivos:

1. Reducir al máximo las oscilaciones de la corriente, ya que cada oscilación genera una serie de pérdidas.
2. Conseguir que la corriente de la bobina, cuando pase del estado en tiempo muerto a el de carga de una celda, se encuentre en el mismo punto de la senoide en el que entró al iniciar el tiempo muerto.

La ecuación 58 modela la respuesta de la corriente por la bobina mediante un sistema de segundo orden. Recordamos que los sistemas de segundo orden muestran la siguiente estructura:

$$G(s) = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (93)$$

K : ganancia del sistema

ξ : coeficiente de amortiguamiento

w_n : frecuencia natural no amortiguada [rad/s]

De las ecuaciones 58 y 93 se deduce que:

$$\omega_n^2 = \frac{1}{LC} \quad (94)$$

Esta ecuación permite relacionar la frecuencia natural a la que oscila la corriente por el circuito resonante en función de los valores de capacidad e inductancia escogidos.

Por lo tanto, el valor de la capacidad se obtiene:

$$C = \frac{1}{\omega_n^2 L} \quad (95)$$

Despejando la inductancia a partir de la expresión obtenida en la ecuación 91 obtenemos:

$$C = \frac{1}{\omega_n^2 \cdot \frac{V_{batería} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega_1}}{\Delta i_L}} = \frac{\Delta i_L}{\omega_n^2 \cdot V_{batería} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega_1}} \quad (96)$$

Esta ecuación relaciona directamente los valores de las frecuencias naturales de la corriente en los periodos de carga/descarga y en el tiempo muerto. Llamaremos K a la relación existente entre estos dos valores:

$$K = \frac{\omega_n}{\omega_1} \quad (97)$$

Sustituyendo K en la ecuación 96 obtenemos otra expresión para calcular la capacidad del condensador en función de la relación existente entre las frecuencias naturales de ambos procesos:

$$C = \frac{\Delta i_L}{V_{batería} \cdot 2 \cdot \pi \cdot K \cdot \omega_n} = \frac{\Delta i_L}{V_{batería} \cdot 2 \cdot \pi \cdot K^2 \cdot \omega_1} \quad (98)$$

Se propone utilizar un tiempo muerto de 20µs, por lo que la frecuencia de oscilación de la corriente será:

$$f_n = \frac{1}{20\mu s} = 50 \text{ kHz} \quad (99)$$

La frecuencia natural será entonces:

$$w_n = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ k} = 314,159 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \quad (100)$$

Obtenemos el valor de K:

$$K = \frac{w_n}{w_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 500} = 100 \quad (101)$$

A partir de la ecuación 98, el valor de la inductancia calculada y las frecuencias w_n y w_1 escogidas, calculamos el valor de la capacidad:

$$C = \frac{1}{3,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 500} = 1,58 \text{ nF} \quad (102)$$

Podemos comprobar que el sistema será oscilatorio calculando el valor del coeficiente de amortiguamiento ξ . De las ecuaciones 58 y 93 se deduce:

$$2\xi w_n = \frac{2R}{L} \quad (103)$$

Despejando el coeficiente de amortiguamiento y considerando para las resistencias un valor $R=0,2\Omega$:

$$\xi = \frac{2R}{2w_n L} = \frac{2 \cdot 0,2}{2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3) \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}} = 9,94 \cdot 10^{-5} \approx 0 \quad (104)$$

Se comprueba que el coeficiente de amortiguamiento es muy cercano a 0 por lo que la respuesta del sistema será oscilatoria.

Por lo tanto, el sistema queda definido con los siguientes valores:

$$T_{Dead} = 20\mu\text{s} \quad R = 0,2\Omega \quad L' = 6,4\text{mH} \quad C' = 1,58\text{nF}$$

En este caso se ha decidido ajustar la variación de la corriente a un 1 A. Calcularemos la corriente máxima que podría haber circulado por la bobina de haber escogido otras frecuencias. Analizando la ecuación 47 cuando s tiende a 0.

$$I_L(s)_{s \rightarrow 0} = \frac{\frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R} \cdot 0 + 1} = \frac{V_{bateria} + LI_{L0}}{3R} \approx \frac{V_{bateria}}{3R} = \frac{3,2}{0,6} = 5,33 \text{ A} \quad (105)$$

A partir de este valor podremos calcular la frecuencia de oscilación a la que el sistema obtendría la corriente máxima calculada.

De la ecuación 47 se deduce que el valor de la frecuencia natural es:

$$\omega_1 = \frac{3R}{L} \quad (106)$$

Sustituyendo en ella la expresión de la inductancia:

$$\omega_1 = \frac{3R}{L} = \frac{3 \cdot 0,2}{6,4m} = 93,75 \frac{rad}{s} \quad (107)$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi} = \frac{93,75}{2 \cdot \pi} = 14,9 \text{ Hz} \quad (108)$$

De estos resultados deducimos que, para alcanzar la corriente máxima de 5,33A en el proceso de carga de la bobina, la frecuencia $\omega_n = \omega_1$ debería ser de 14,9 Hz.

Esto implicaría que el periodo de carga/descarga sería mucho más largo que el propuesto de 0,002 s, en concreto 33 veces mayor. Por este motivo no utilizaremos esta frecuencia de corte debido a que se tardaría mucho en alcanzar el 100% del valor final de la corriente.

Diseño de las señales de activación de los polos

El último paso para terminar el diseño es generar las señales de activación de los polos. Para ello se ha decidido utilizar dos señales de reloj, una para la descarga de las celdas "Control1" y otra para la carga "Control2". El dimensionamiento de sus ciclos de trabajo (D) será un factor determinante en el resultado de la ecualización.

Se utilizará como frecuencia de conmutación los 500Hz propuestos para el diseño del periodo de carga/descarga de la bobina y para el tiempo muerto la duración propuesta de 20µs.

Como en un mismo periodo existen dos tiempos muertos, en porcentaje representan:

$$\%Dead\ Time = \frac{2 \cdot 20\mu s}{0.002} \cdot 100 = 2\% \quad (109)$$

Por lo tanto, debemos repartir el 98% restante del periodo entre el proceso de descarga y carga de las celdas.

Comparando la corriente que circula por la bobina en ambas situaciones la relación entre ellas será:

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{\frac{-V_{CeldaCarga} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \right| \quad (110)$$

$$\left| \frac{V_{CeldaDescarga} + LI_{L0}}{\frac{L}{3R}s + 1} \right|$$

Considerando que los valores de la tensión de las celdas van variando a lo largo del proceso, al igual que las corrientes iniciales LI_{L0} , la relación R entre ambas corrientes no es constante.

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{-V_{celda} + LI_{L0}}{V_{Celda} + LI_{L0}} \right| = R \quad (111)$$

Sin embargo, si despreciamos los efectos de las corrientes iniciales debido a que están multiplicadas por el valor de la inductancia y consideramos el caso más positivo, que se dará siempre al final de los procesos de la ecualización, en el que aproximadamente ambas tensiones son iguales, podemos aproximar la relación R:

$$R \approx 1 \quad (112)$$

$$I_{LDescarga}(s) \approx I_{LCarga}(s)$$

Se deduce de esta relación entre corrientes, que el ciclo de trabajo de la señal que descarga las celdas (D1) debe ser aproximadamente el mismo que el de carga de las celdas (D2).

$$D1 = D2 \quad (113)$$

Por lo tanto, el 98% del periodo restante se repartirá de la siguiente forma:

$$D1 + D2 = 98\% \quad (114)$$

$$D2 = \frac{98}{2} = 49\% \quad (115)$$

De manera que:

| |
|-----------------------------|
| $D1 = 49\% \quad D2 = 49\%$ |
|-----------------------------|

Para que las señales no coincidan activas al mismo tiempo hay que desfasar una de ellas. Como el proceso de eculizado comienza mediante la descarga de una celda habrá que desfasar la señal de activación de los polos para la carga de la celda.

Con una simple regla de tres obtenemos el valor θ de desfase:

$$\frac{0,5}{0,49 + 0,01} = \frac{180}{\theta} \rightarrow \theta = 180^\circ \quad (116)$$

| | Control1 | Control2 |
|----------------|----------|----------|
| Vpeak [V] | 10 | 10 |
| Frecuency [Hz] | 500 | 500 |
| Duty Cycle | 0,49 | 0,49 |
| Phase Delay | 0 | 180° |

Tabla 3. Técnica AC2C: Señales de reloj.

4.5. Análisis comparativo de ambos modelos

Tras el diseño del circuito equilibrador basado en la conmutación de inductores procedemos a realizar su comparación con el modelo basado en la conmutación de condensadores presentado al inicio de este trabajo.

Simularemos varios casos, en los que variaremos los valores de tensión inicial de las celdas.

Para que la comparación sea válida, simularemos ambos sistemas con sus respectivas señales de reloj funcionando a la misma frecuencia. Por lo que para el circuito equilibrador por conmutación de condensadores las señales de activación de los polos llamadas también “Control1” y “Control2” serán las mismas que las dimensionadas para el circuito de inductores, tabla 3.

Simulaciones

Caso 1: Vcelda1>Vcelda2>Vcelda3

| | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V |
|---------------|---------------|---------------|--------------|

Tabla 4. Caso 1. Condiciones de simulación.

Circuito de condensadores:

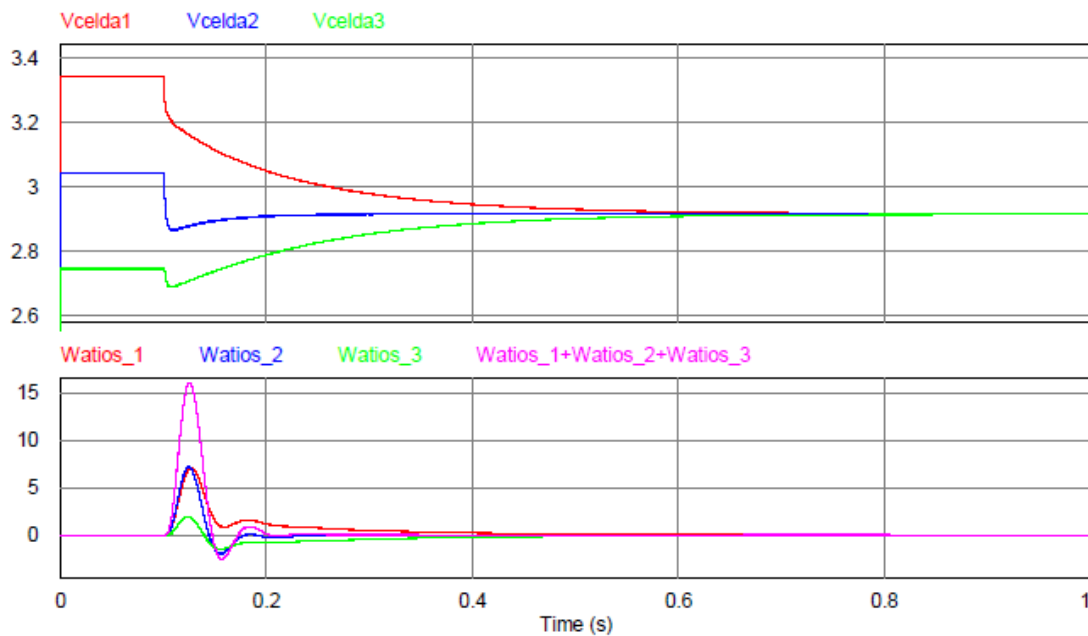


Figura 33. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: análisis de tensiones y potencias.

| | | | |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
| 0,9599 s | 2,9169 V | 2,9164 V | 2,9159 V |

Tabla 5. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

$$e_{abs} = |V_{media} - V_{final}| \quad (117)$$

| | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $e_{abs}(V_{celda1})$ | $e_{abs}(V_{celda2})$ | $e_{abs}(V_{celda3})$ |
| 0,1331 V | 0,1336 V | 0,1341 V |

Tabla 6. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

$$e_{rel} = \frac{|V_{media} - V_{final}|}{V_{media}} \cdot 100 \quad (118)$$

| | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $e_{rel}(V_{celda1})$ | $e_{rel}(V_{celda2})$ | $e_{rel}(V_{celda3})$ |
| 4,36 % | 4,38 % | 4,39 % |

Tabla 7 Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: cálculo de errores relativos.

En la figura 33, observamos en el gráfico de las potencias de transferencia de energía de cada celda, como la suma de todas ellas (línea morada) alcanza un valor elevado al inicio de la simulación. Esto implica que, al inicio del proceso de equilibrado, toda la energía con la que se están cargando las bobinas, no se está transfiriendo a las celdas durante su carga.

Analizamos las corrientes en las celdas y los condensadores. Observamos lo que ocurre durante un periodo:

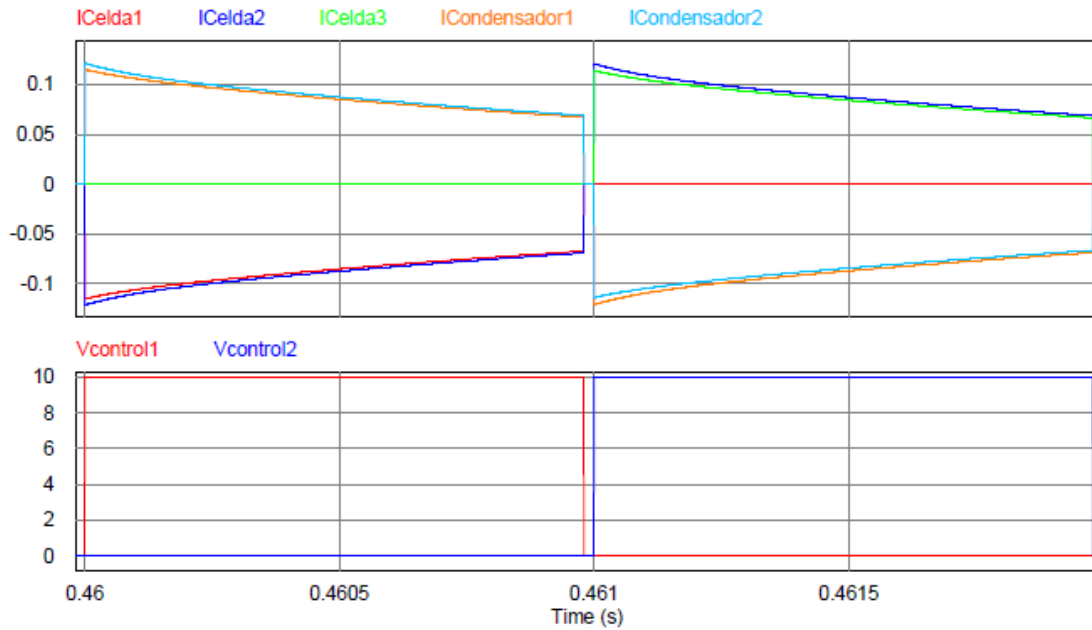


Figura 34. Técnica AC2C. Condensador. Caso 1: análisis de las corrientes.

El periodo comienza con la activación de la señal “Control1”. Debido a que en esta simulación $V_{celda1} > V_{celda2}$ la corriente por el condensador 1 aumentará, descargando la celda1. De la misma forma como $V_{celda2} > V_{celda3}$, la corriente por el condensador2 aumentará descargando la celda2. Como en este momento la celda3 no está conectada a ningún condensador, no circulará corriente por ella.

Después de un tiempo muerto en el que no hay flujo de corriente, se activará la señal “Control2”. Ahora la celda1 no estará conectada a ningún condensador, por lo que no circulará corriente por ella. Como en este caso concreto $V_{celda1} > V_{celda2}$ la corriente fluirá del condensador1 a la celda2, cargándola. De la misma forma como $V_{celda2} > V_{celda3}$, la corriente fluirá del condensador2 a la celda3 cargándola.

Se comprueba que el circuito tiene el comportamiento adecuado. Su funcionamiento sin ningún tipo de sistema de control es tan bueno debido a que los condensadores se comportan como fuentes de tensión y la tensión de las celdas depende fuertemente de la carga de las mismas. Debido a la propia naturaleza de los condensadores, estos realizan de forma inherente un control del flujo de energía dejando únicamente trasvasarla desde una tensión mayor a una tensión menor, es decir, de una celda de mayor carga a otra menos cargada.

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (119)$$

Por lo que el sentido de la corriente, positivo o negativo en función de si se está cargando o descargando el condensador, dependerá de la variación de la tensión a la que se le someta. Si su tensión es mayor que la de la celda a la que se conecta, la variación de tensión será negativa y por lo tanto la corriente se dirigirá hacia la celda, descargando el condensador. De esta forma se obtiene el equilibrado de las celdas de todo el pack sin necesidad de emplear un control complejo.

Circuito de inductores

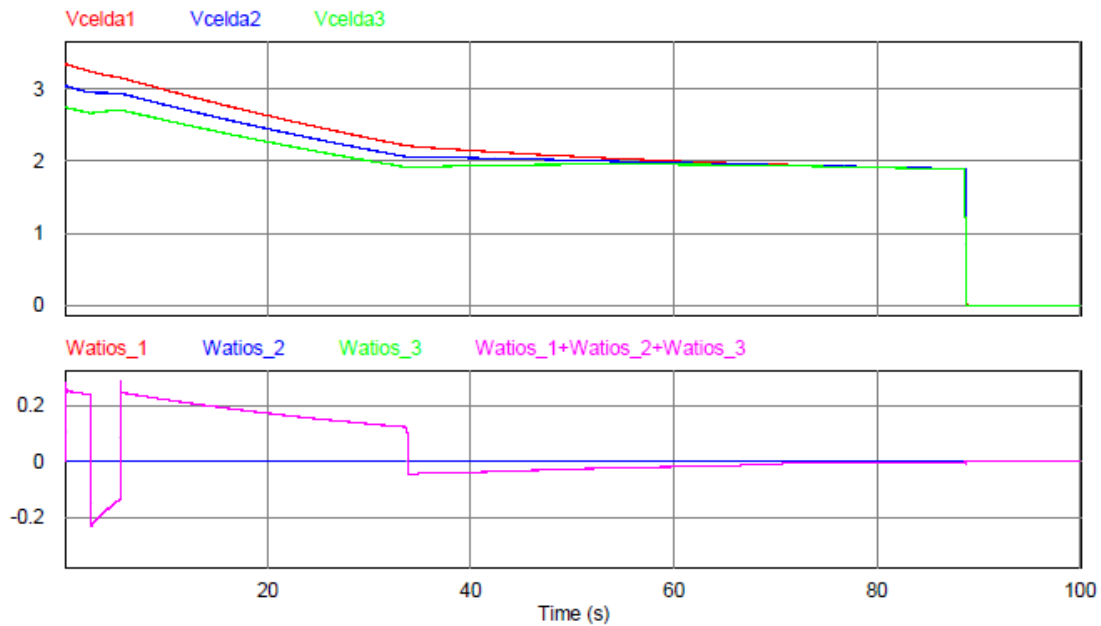


Figura 35. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de tensiones y potencias.

Observamos como las celdas llegan a alcanzar un valor muy parecido, pero por debajo de 2.5 V, que es uno de los límites de seguridad de operación de las celdas electroquímicas de ion litio. Después, se descargan todas debido al tiempo de simulación. Analizando el gráfico de potencias, se aprecia como no se está transfiriendo prácticamente nada de la energía que se obtiene de la descarga de las celdas. Solo se produce una pequeña transferencia de energía cuando los valores de las tensiones de las celdas son muy similares (en torno al segundo 30 de la simulación).

Analizamos las corrientes en las celdas, bobinas y condensadores durante un periodo:

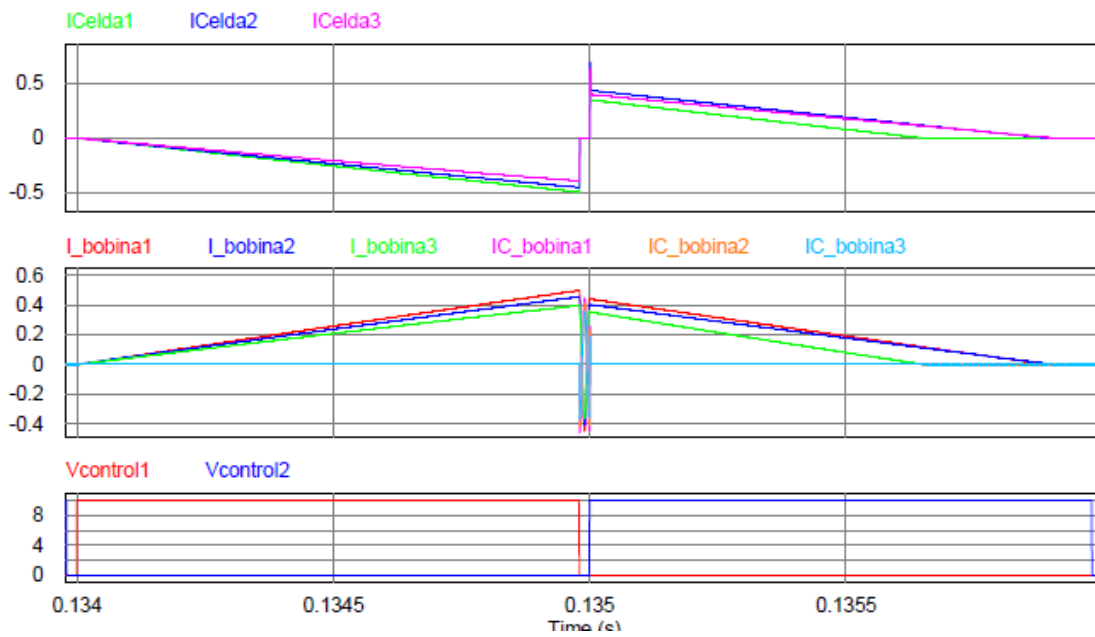


Figura 36. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de las corrientes.

El periodo comienza con la activación de la señal “Control1” que realiza la carga de los inductores, descargando las tres celdas, como se puede apreciar en la figura 36. También se puede observar como las celdas de mayor tensión se descargan antes que las de menor tensión. No circula corriente por el condensador.

Tras desactivarse la señal “Control1” hay un pequeño tiempo muerto:

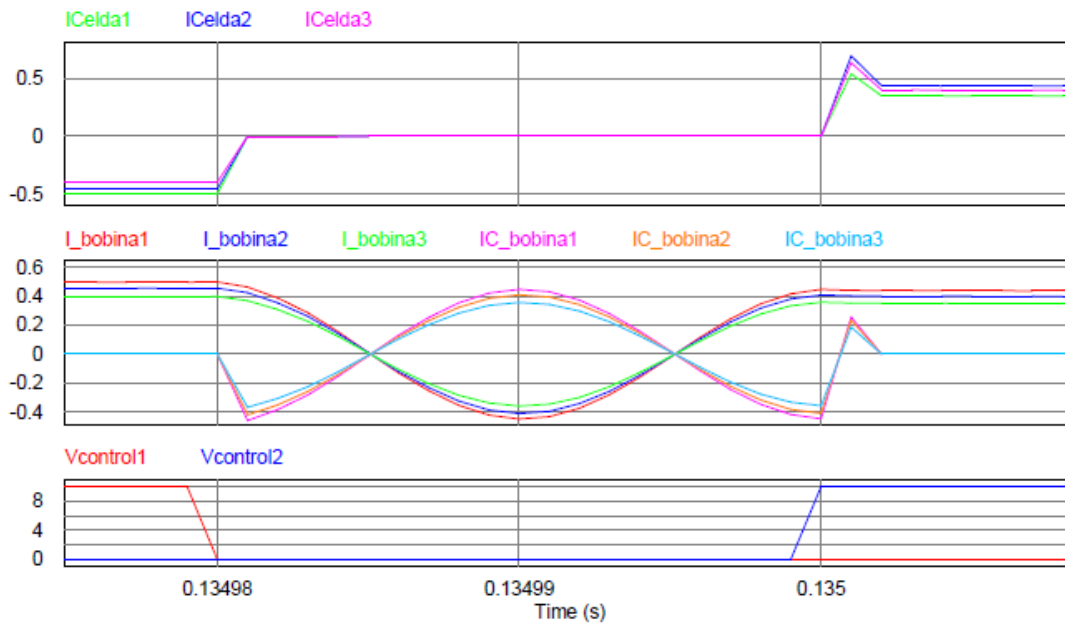


Figura 37. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis del tiempo muerto.

Las corrientes por la bobina y condensador realizan una única oscilación durante el tiempo muerto, por lo que se ha dimensionado bien los elementos del circuito.

Tras el tiempo muerto se activa la señal “Control2” que realiza la carga de las celdas con la energía almacenada en los circuitos resonantes, obtenida de la descarga de su celda adyacente. Observamos en la figura 37 como al final el tiempo muerto las corrientes por las celdas aumentan rápidamente. Ampliando la figura 36:

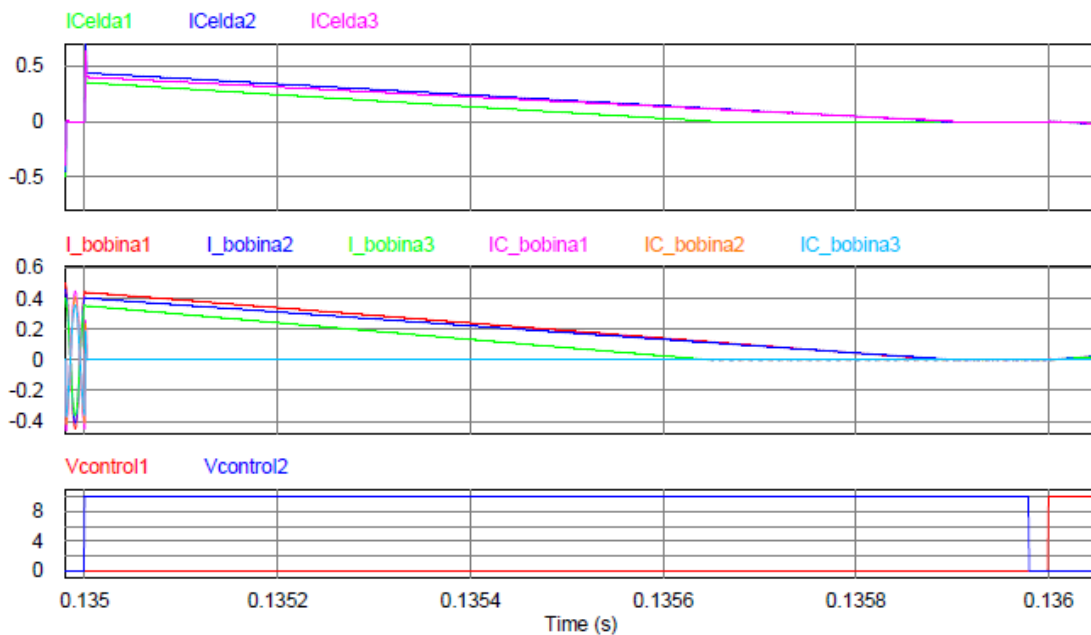


Figura 38. Técnica AC2C. Inductor. Caso 1: análisis de corrientes durante la descarga.

Observamos como la corriente por las celdas decrece hasta anularse antes de terminar el tiempo de activación de la señal “Control2”, por lo que, en el siguiente proceso de descarga de las celdas, no quedará casi energía almacenada en el circuito resonante.

La introducción de los diodos en este sistema ha sido pensada precisamente para estas situaciones, en las que la bobina se descarga mucho antes que la duración del tiempo de descarga debido a la tensión de las celdas. De no haber un diodo que asegure que la transferencia de energía hacia la celda se hace en un único sentido durante la descarga de la bobina, si se da un caso como el presente en la figura 36, cuando la bobina no pueda transferir más energía a la celda, el proceso de transferencia se invertiría y empezaría a fluir corriente desde la celda hacia la bobina, descargándola durante el tiempo en el que debería estar cargándose. Esta respuesta del sistema repercute negativamente en el proceso de equilibrado, por lo

que la introducción de los diodos es clave para conseguir una transferencia de corriente coherente con el proceso de carga o descarga de las celdas.

Se puede apreciar como en el siguiente tiempo muerto casi no circula corriente por el circuito resonante.

Esto se debe a que hemos impuesto unos tiempos de descarga y carga de las celdas fijos. Según la ecuación 111:

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{-V_{celda} + LI_{L0}}{V_{celda} + LI_{L0}} \right| = R \quad (120)$$

Las corrientes que circularán por las bobinas durante su descarga y carga no tienen una relación constante. Esto quiere decir que cuanto mayor sea la diferencia de tensión entre las celdas adyacentes peor se transferirá la energía. En nuestro circuito lo que ocurre es que, por ejemplo, en el caso de la celda3 (2,75V) de tensión mucho menor que la celda1 (3,35V) la carga de la bobina3 (que descarga la celda3) será mucho más lenta que la carga de la celda1, es por ello que, durante el proceso de carga de esta celda, la corriente se anula antes de que se desactive la señal de reloj, no siendo eficiente el proceso de equilibrado.

Caso 2: $V_{celda1} < V_{celda2} < V_{celda3}$

| | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| $V_{celda1}=2,85V$ | $V_{celda2}=3,3V$ | $V_{celda3}=3,45V$ | $V_{media}=3,2V$ |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|

Tabla 8. Caso 2. Condiciones de simulación.

Circuito de condensadores

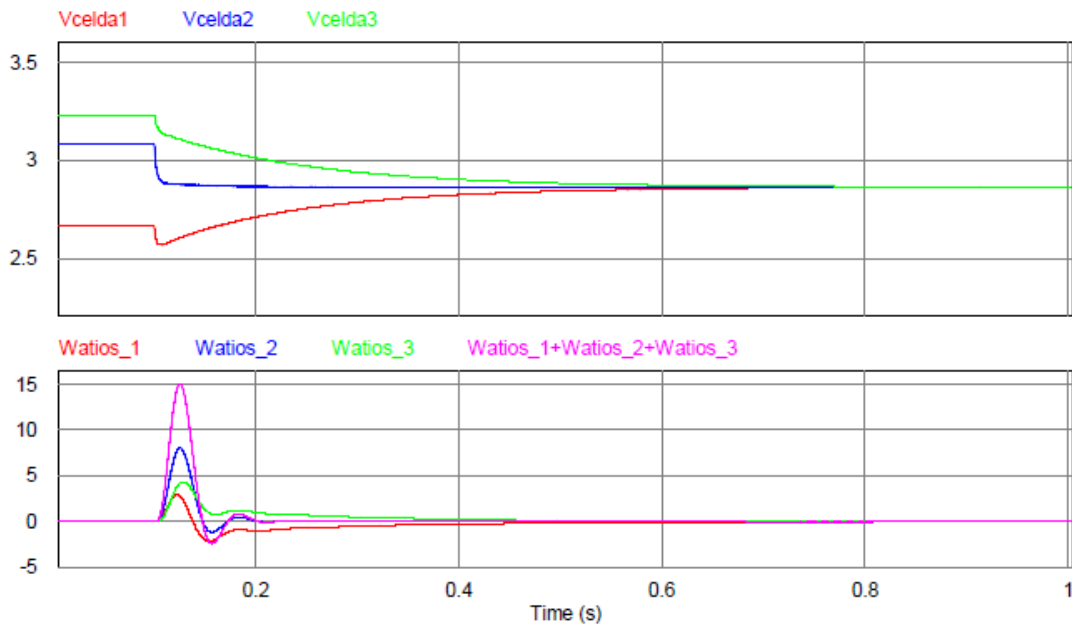


Figura 39. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias.

| Stop Time | V_{celda1}_{final} | V_{celda2}_{final} | V_{celda3}_{final} |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,046 s | 2,8653 V | 2,8658 V | 2,8663 V |

Tabla 9. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(V_{celda1})$ | $e_{abs}(V_{celda2})$ | $e_{abs}(V_{celda3})$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,3347 V | 0,3342 V | 0,3337 V |

Tabla 10. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 10,97 % | 10,44 % | 10,42 % |

Tabla 11. Técnica AC2C. Condensador. Caso 2: cálculo de errores relativos.

Circuito de inductores

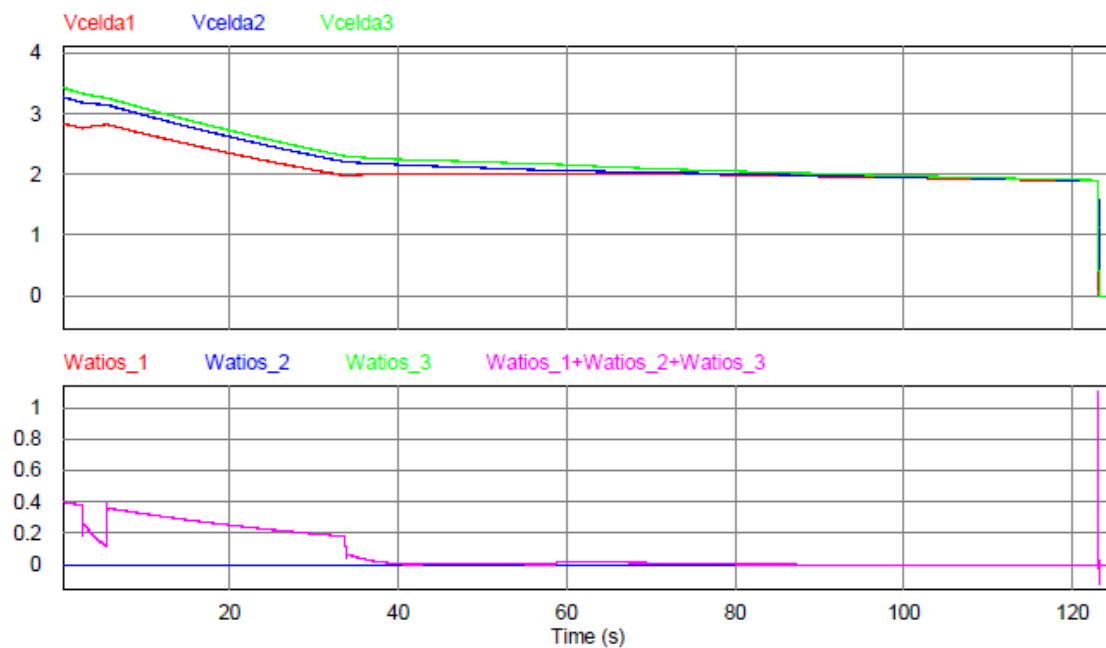


Figura 40. Técnica AC2C. Inductor. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias.

Observamos como las celdas llegan a alcanzar un valor muy parecido, pero por debajo de 2.5 V, que es uno de los límites de seguridad de operación de las celdas electroquímicas de ion litio. Después, se descargan todas debido al tiempo de simulación. Separamos el gráfico de potencias para poder apreciar mejor las curvas:

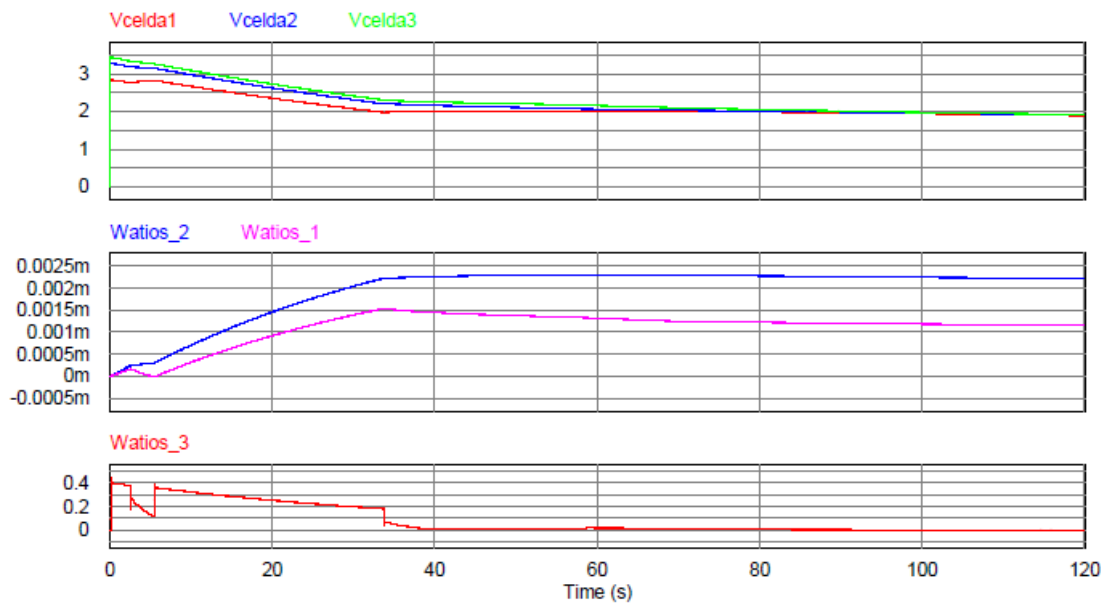


Figura 41. Técnica AC2C. Inductor. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias. Ampliada.

Analizando el gráfico de potencias, se aprecia como no se está transfiriendo nada de la energía que se obtiene de la descarga de las celdas. Ninguna de ellas está recibiendo aporte de energía.

Caso 3: $V_{celda1} < V_{celda2} > V_{celda3}$

| | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| $V_{celda1}=3,05V$ | $V_{celda2}=3,3V$ | $V_{celda3}=2,8 V$ | $V_{media}=3,15V$ |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|

Tabla 12. Caso 3. Condiciones de simulación.

Circuito de condensadores

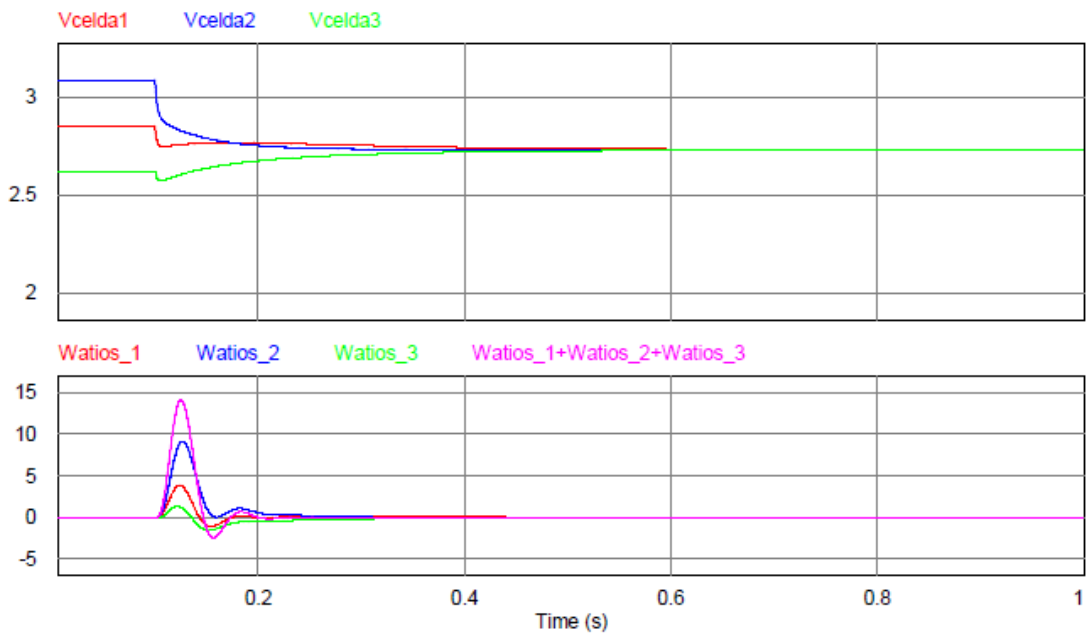


Figura 42. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias.

| Stop Time | V_{celda1}_{final} | V_{celda2}_{final} | V_{celda3}_{final} |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 8,69 s | 2,7329 V | 2,7314 V | 2,7309 V |

Tabla 13. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: respuesta.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $e_{abs}(V_{celda1})$ | $e_{abs}(V_{celda2})$ | $e_{abs}(V_{celda3})$ |
| 0,4171 V | 0,4186 V | 0,4191 V |

Tabla 14. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 13,24 % | 13,28 % | 13,30 % |

Tabla 15. Técnica AC2C. Condensador. Caso 3: cálculo de errores relativos.

Circuito de inductores

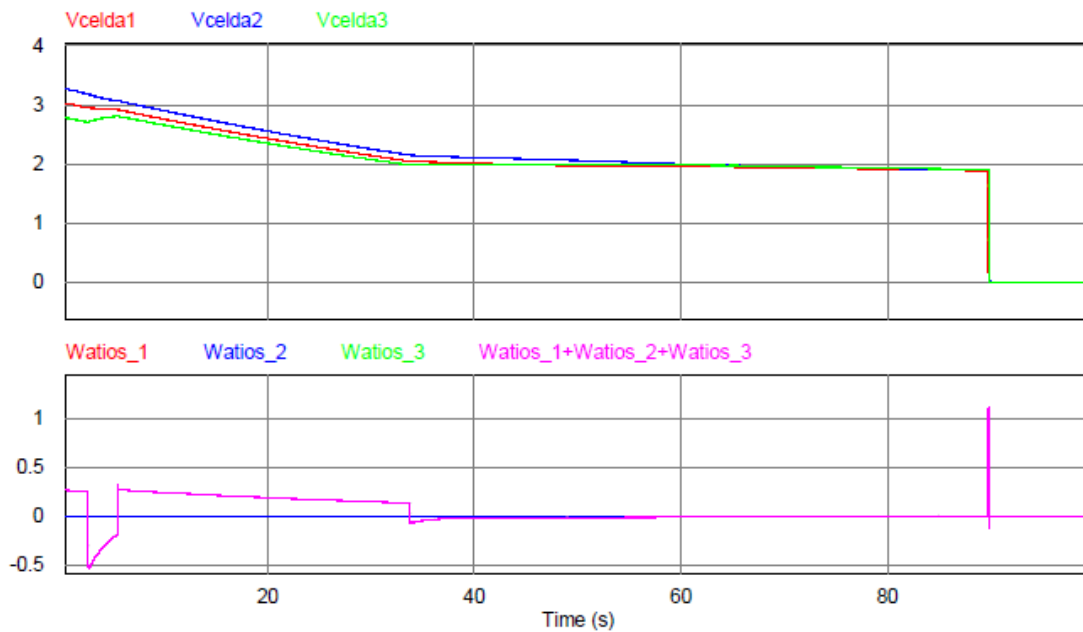


Figura 43. Técnica AC2C. Inductor. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias.

Observamos como las celdas llegan a alcanzar un valor muy parecido, pero por debajo de 2,5 V, que es uno de los límites de seguridad de operación de las celdas electroquímicas de ion litio. Después, se descargan todas debido al tiempo de simulación. Separamos el gráfico de potencias para poder apreciar mejor las curvas:

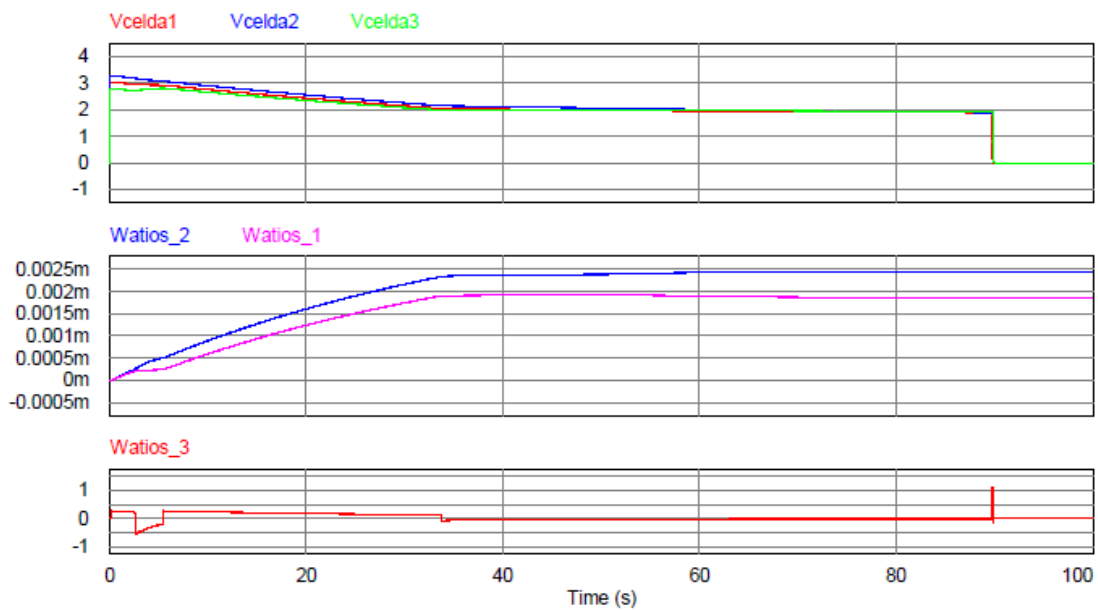


Figura 44. Técnica AC2C.Inductor. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias. Ampliada.

Analizando el gráfico de potencias, se aprecia como en este caso sí que se está transfiriendo algo de la energía a la celda3, que es la menos descargada. Sin embargo, no se está transfiriendo nada a las otras dos, que solo se descargan.

Conclusión

Tras realizar tres simulaciones para distintos valores de las tensiones de las celdas, resulta evidente que el circuito que realiza el equilibrado mediante la conmutación de condensadores entre celdas adyacentes es mucho mejor que el que lo hace mediante la conmutación de inductores, ya que este no consigue realizar el equilibrado de forma adecuada.

La diferencia de funcionamiento entre estos dos circuitos radica en que los condensadores funcionan como fuentes de tensión, y los inductores funcionan como fuentes de corriente, es decir:

$$i_C(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (121)$$

$$di_L = \frac{V_L(t)}{L} dt \quad (122)$$

Por lo que, en el proceso de equilibrado mediante condensadores, el estado de la carga de las celdas depende directamente de las tensiones y se transfiere la energía de forma inherente, pudiendo hacerlo de forma bidireccional durante cualquiera de las dos señales de activación de los polos.

Mientras que, en el proceso de equilibrado mediante inductores esto no ocurre. Al no realizarse la transferencia de energía de forma inherente, como ocurre con los condensadores, es necesario diferenciar entre los periodos de descarga y carga de las celdas mediante las señales de reloj "Control1" y "Control2". Debido a esta estructura de transferencia de energía, en la que siempre se descargan unas celdas y luego se cargan sus adyacentes, la eficiencia del equilibrado se ve altamente reducida. Esto se debe a que las celdas de menor carga de todo el pack serán descargadas al igual que las de mayor carga del pack, no favoreciendo la transferencia de energía de las celdas más cargadas a las menos cargadas, lo que sería el funcionamiento más lógico.

Lo que ocurre en el caso de los inductores, es que es la diferencia en magnitud entre las tensiones de las celdas lo que fija el valor de la corriente, siendo más grande para las celdas de mayor tensión y más pequeña para las de menor.

Para obtener una transferencia de energía eficiente sería necesario ajustar las duraciones de los tiempos de descarga y carga de las celdas en función de sus tensiones.

Proponemos como optimización del circuito la generación de las señales de activación de los polos con ciclos de trabajo variables en el tiempo de ecualizado en función a la relación entre la tensión de la celda que se va a descargar con la celda que se va a cargar. Esto se conoce en la rama de electrónica de potencia como modo de conducción continua (MCC).

4.6. Optimización del circuito equilibrador de celdas por conmutación de inductores entre celdas adyacentes. Aplicación del concepto de modo de conducción continua.

Esta forma de operación es comúnmente utilizada en los circuitos convertidores CC/CC como el circuito reductor (Buck) y elevador (Boost).

Este modo de conducción se caracteriza por el parámetro ciclo de servicio (D), que relaciona directamente la tensión de salida con la de la entrada. En nuestro caso esas tensiones serán las de la celda a descargar y celda a cargar.

Este modo de conducción se caracteriza porque la corriente por la bobina nunca se anula [15].

El circuito inicialmente diseñado funciona en régimen transitorio, es decir, la corriente por la bobina aumenta cuando se somete a una tensión constante, en nuestro caso cuando se conecta en paralelo con una celda.

La conducción en régimen transitorio tiene el siguiente comportamiento:

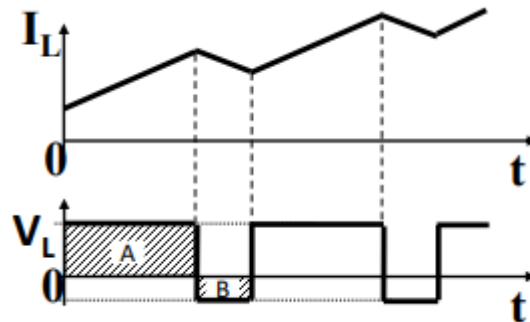


Figura 45. Corriente por la bobina en régimen transitorio [15].

La corriente por la bobina en régimen permanente tiene el siguiente comportamiento:

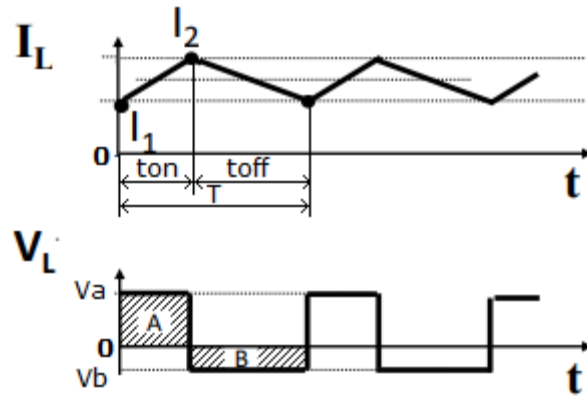


Figura 46. Corriente por la bobina en régimen permanente.

Observamos en la figura 46 como la corriente por la bobina circula de manera permanente $i_L(t) \geq 0$ y comienza y termina el periodo en el mismo valor, $i_L(T) = i_L(0)$. Por lo tanto:

$$i_L(T) - i_L(0) = 0 \quad (123)$$

$$i_L(T) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^T V_L(t) dt = 0 \quad (124)$$

De la ecuación 124 deducimos que la variación de la tensión de la bobina en un periodo debe ser cero.

$$\int_0^T V_L(t) dt = \int_0^{t_1} V_L(t) dt + \int_{t_1}^T V_L(t) dt = 0 \quad (125)$$

Esto implica que las áreas A y B de la figura 46 deben ser iguales:

$$(V_a - V_b) \cdot t_{ON} = -V_b \cdot t_{OFF} = V_b \cdot (T - t_{ON}) \quad (126)$$

$$T = t_{ON} + t_{OFF} \quad (127)$$

$$V_a \cdot t_{ON} = V_b \cdot t_{OFF} \quad (128)$$

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \quad (129)$$

$$D = \frac{t_{ON}}{T} \quad (130)$$

De esta forma, en estos circuitos convertidores CC/CC la tensión de salida depende únicamente de la tensión a la entrada y del ciclo de servicio.

En nuestro caso utilizaremos los conceptos desarrollados de manera distinta y más adecuada para nuestra aplicación.

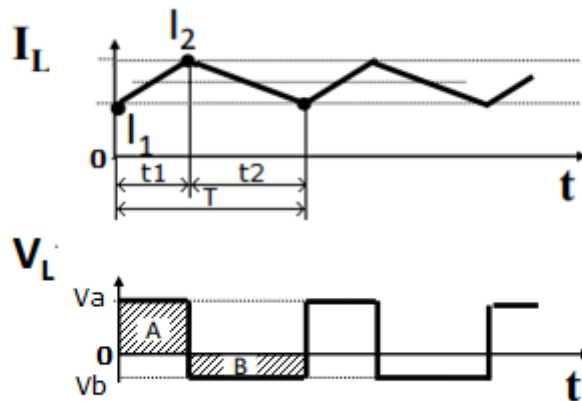


Figura 47. Corriente por la bobina en régimen permanente.

Identificamos en la figura 47 los siguientes elementos:

Va: Tensión de la celda que vamos a descargar.

Vb: la tensión (en negativo) de la celda que vamos a cargar.

I1: corriente de la bobina al comenzar a descargar una celda.

I2: corriente de la bobina al comenzar a cargar una celda.

t1: duración del proceso de descarga de la celda.

t2: duración del proceso de carga de la celda.

Procedimiento:

El objetivo es la obtención de las expresiones para calcular t_1 y t_2 a partir de los valores de las tensiones V_a y V_b (variables en el tiempo) y las corrientes I_1 e I_2 (constantes).

Para ello analizaremos las situaciones de carga/descarga de la bobina en el tiempo:

Analizaremos el modelo ideal:



Figura 48. Modelo ideal del circuito de carga de la bobina.

Desarrollamos el modelo:

$$V_1 = V_L = V_a \quad (131)$$

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_a \quad (132)$$

$$L \cdot di_L = V_a \cdot dt \quad (133)$$

Considerando como límites de integración $[0, t_1]$:

$$\int_0^{t_1} L \cdot di_L = \int_0^{t_1} V_a \cdot dt \quad (134)$$

$$L \cdot (i_L(t_1) - i_L(0)) = V_a(t_1 - 0) \quad (135)$$

Teniendo en cuenta que $i_L(0) = I_1$ y que $i_L(t_1) = I_2$:

$$L(I2 - I1) = Va \cdot t1 \quad (136)$$

Despejamos la duración t1:

$$t1 = \frac{L(I2 - I1)}{Va} \quad (137)$$

De la misma forma analizamos el proceso de descarga de la bobina:

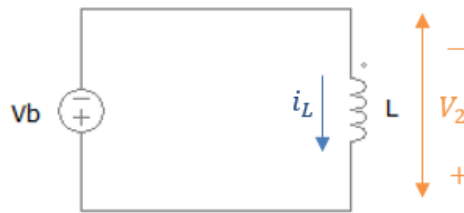


Figura 49. Modelo ideal del circuito de descarga de la bobina.

$$V2 = -V_L = Vb \quad (138)$$

$$-L \cdot \frac{di_L}{dt} = Vb \quad (139)$$

$$-L \cdot di_L = Vb \cdot dt \quad (140)$$

Considerando como límites de integración [t1,T]:

$$\int_{t1}^T -L \cdot di_L = \int_{t1}^T Vb \cdot dt \quad (141)$$

$$-L \cdot (i_L(T) - i_L(t1)) = Vb(T - t1) \quad (142)$$

Teniendo en cuenta que $i_L(t1) = I2$ y que $i_L(T) = I1$:

$$-L(I1 - I2) = Vb \cdot (T - t1) \quad (143)$$

$$L(I2 - I1) = Vb \cdot t2 \quad (144)$$

$$t2 = \frac{L(I2 - I1)}{Vb} \quad (145)$$

Calculamos el ciclo de servicio como:

$$D = \frac{t1}{t1 + t2} \quad (146)$$

$$D = \frac{\frac{L(I2-I1)}{Va}}{\frac{L(I2-I1)}{Va} + \frac{L(I2-I1)}{Vb}} = \frac{Vb}{Va + Vb} \quad (147)$$

Obtenidas las expresiones que permiten calcular el ciclo de servicio en tiempo de simulación procedemos a realizar la programación.

Programación

Para poder implementar esta optimización debemos incluir un bloque de programación en lenguaje C.

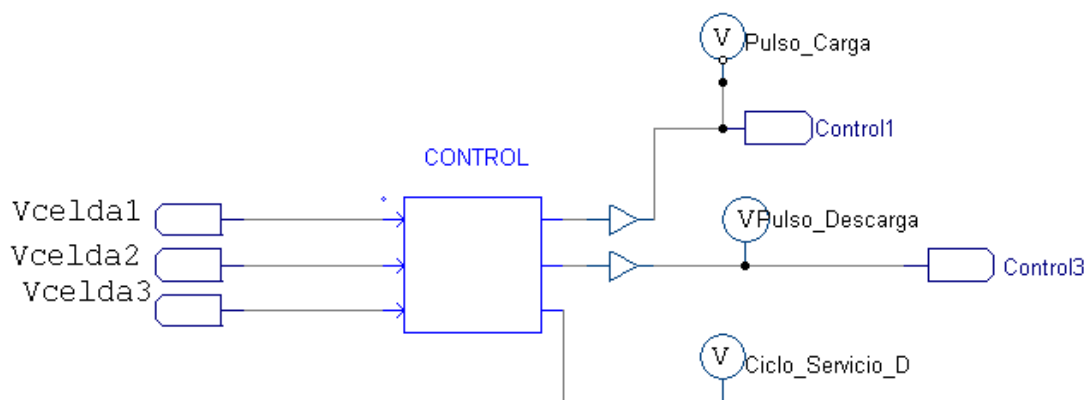


Figura 50. Técnica AC2C optimizada. Sistema de control.

Este bloque recibe 3 señales:

- **Vcelda1**: estado de carga de la celda 1 en voltios.
- **Vcelda2**: estado de carga de la celda 2 en voltios.
- **Vcelda3**: estado de carga de la celda 3 en voltios.

A partir de estas entradas el bloque genera 3 salidas:

- **Control1**: señal de activación para la descarga de las celdas.
- **Control2**: señal de activación para la carga de las celdas.
- **Ciclo de servicio (D)**: ciclo de servicio.

Se ha programado el bloque para que en el momento en que todas las celdas se encuentren a la misma tensión con un error de $\pm 0,001V$ las señales de salida se desactiven y la ecualización finalice.

Simularemos el sistema en los mismos tres casos propuestos previamente. Cabe destacar, que para obtener un tiempo muerto de $20\mu s$, es necesario realizar las simulaciones con un time step de dicho valor.

Caso 1: Vcelda1>Vcelda2>Vcelda3

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V | Step: 2e-05 |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|

Tabla 16. Técnica AC2C optimizada. Caso1. Condiciones de simulación.

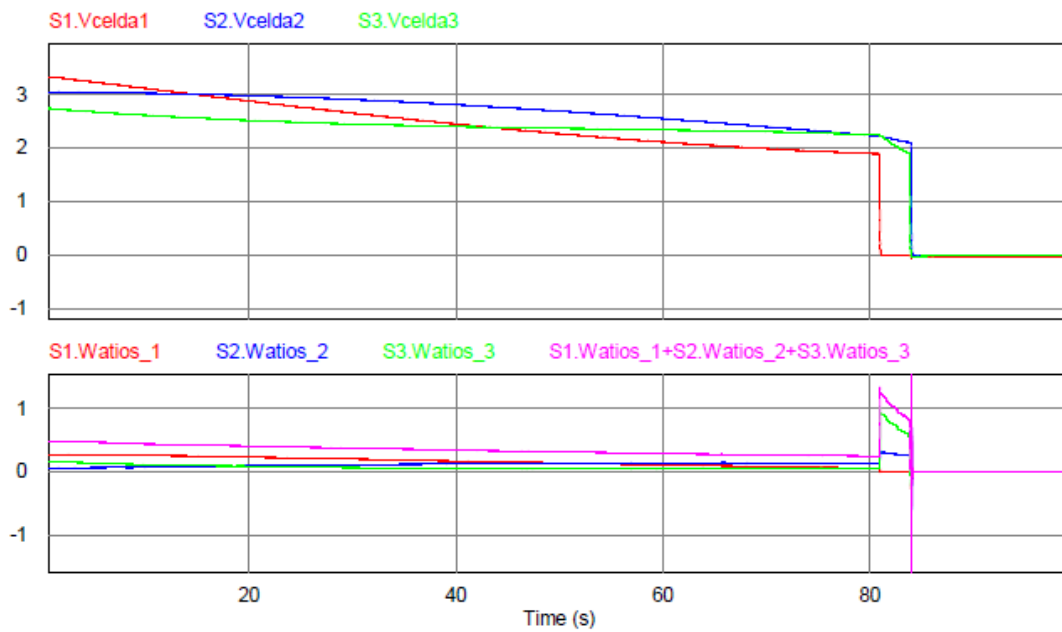


Figura 51. Técnica AC2C optimizada. Caso 1: análisis de las tensiones y potencias.

Analizamos las corrientes de las celdas, bobinas y condensadores durante un periodo:

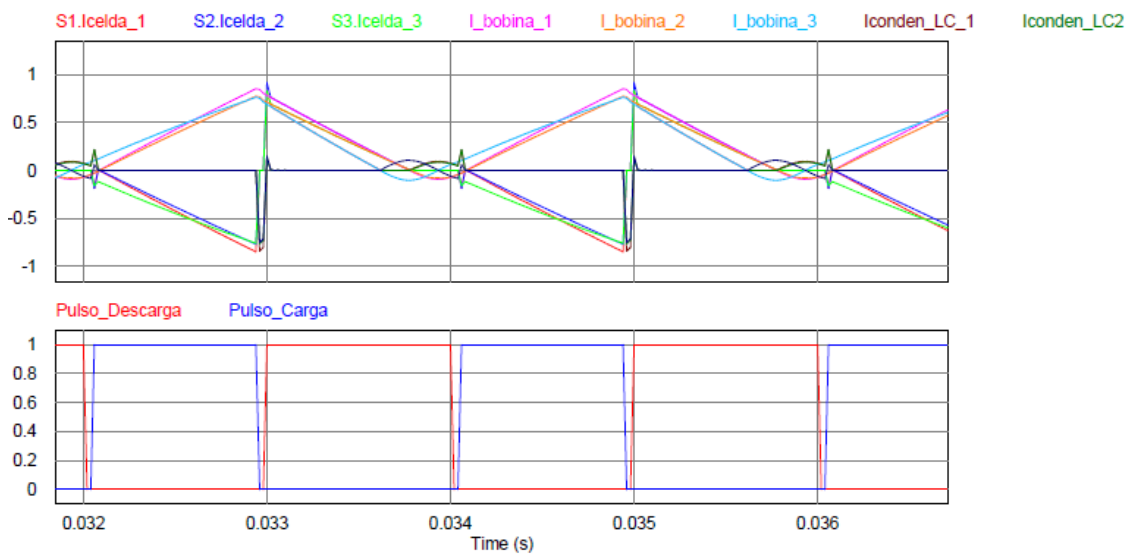


Figura 52. Técnica AC2C optimizada. Caso 1: análisis de las corrientes.

De la figura 52 destaca que la corriente de las celdas durante los procesos de descarga de las bobinas se hace cero antes de que termine el ciclo de descarga. En

el momento en que las bobinas no pueden seguir aportando energía a las celdas, la corriente restante se queda oscilando en el circuito resonante. Este comportamiento se debe a la introducción de los diodos en el sistema, que evitan que cuando las bobinas no pueden transferir más energía a las celdas, la corriente en vez de invertir su sentido y fluir de las celdas hacia la bobina, descargándolas, se mantenga oscilando en el circuito resonante. Gracias a la disposición del diodo se bloquea el flujo de corriente en el sentido de descarga de las celdas, cuando estamos en los periodos de carga de estas.

Caso 2: $V_{celda1} < V_{celda2} < V_{celda3}$

| | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| $V_{celda1}=2,85V$ | $V_{celda2}=3,3V$ | $V_{celda3}=3,45V$ | $V_{media}=3,2V$ |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|

Tabla 17. Técnica AC2C optimizada. Caso 2. Condiciones de simulación.

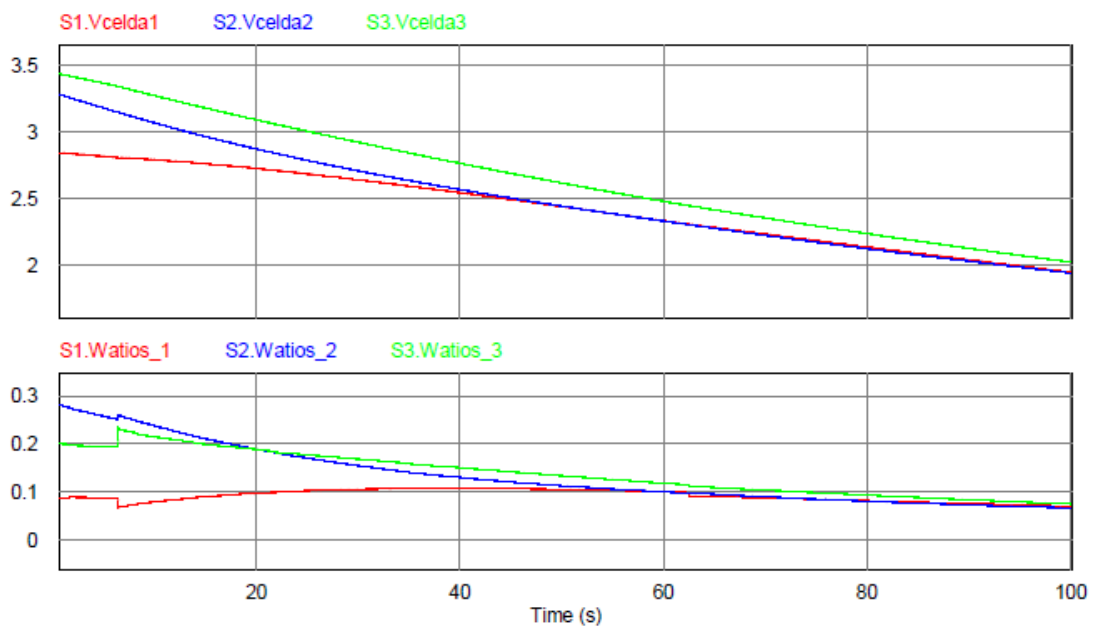


Figura 53. Técnica AC2C optimizada. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias.

Caso 3: $V_{celda1} < V_{celda2} > V_{celda3}$

| | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| $V_{celda1}=3,05V$ | $V_{celda2}=3,3V$ | $V_{celda3}=2,8 V$ | $V_{media}=3,15V$ |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|

Tabla 18. Técnica AC2C optimizada. Caso 3: Condiciones de simulación.

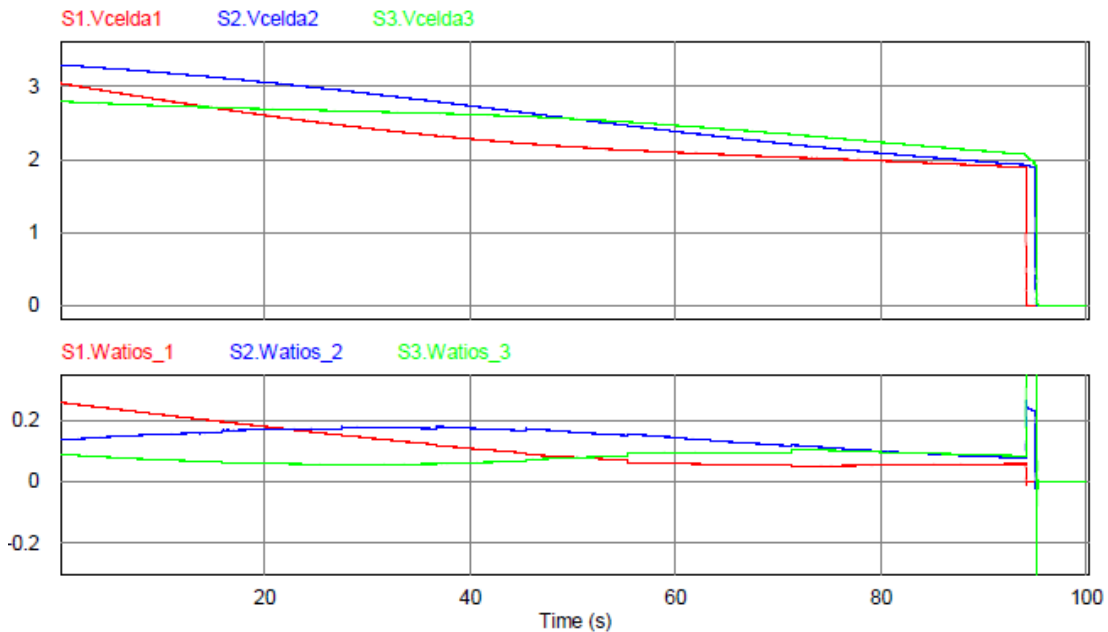


Figura 54. Técnica AC2C optimizada. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias.

No se consigue equilibrar las celdas en ninguno de los tres casos propuestos. No se consigue la transferencia de energía entre celdas. La optimización implementada mediante los ciclos de servicio no ha conseguido unos buenos resultados.

Sin embargo, si existe un aporte de energía constante, es decir, si estamos realizando el proceso de equilibrado mientras se está usando un cargador, se obtienen mejores resultados, pero siempre con peor eficiencia que la técnica basada en condensadores.

Realizamos las simulaciones de los tres casos propuestos introduciendo un cargador al circuito AC2C sin la optimización del ciclo de servicio. Este cargador carga a la tensión nominal de 3.2V. Presentamos los resultados:

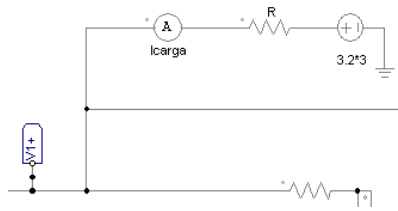


Figura 55. Técnica AC2C. Cargador empleado. Aporte de energía constante a la tensión nominal de las celdas

Caso 1: Vcelda1>Vcelda2>Vcelda3

| | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V |
|---------------|---------------|---------------|--------------|

Tabla 19. Caso 1. Condiciones de simulación.

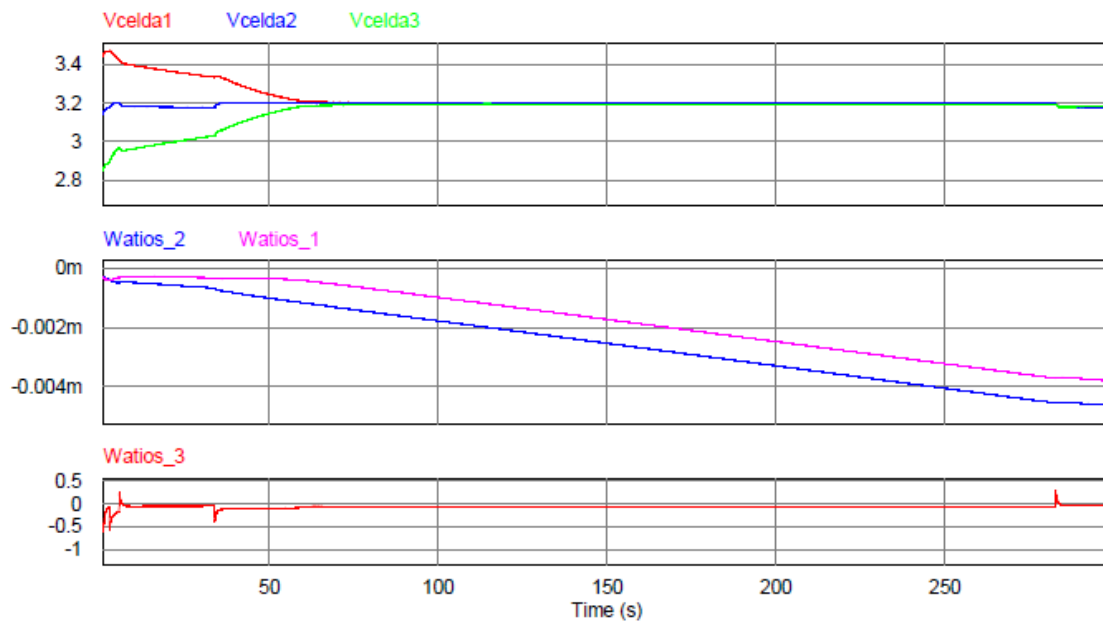


Figura 56. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: análisis de las tensiones y potencias.

Tras una simulación de 300 segundos, estos son los mejores resultados que se obtienen:

| | | | |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
| 73,28 s | 3,2021 V | 3,2004 V | 3,1903 V |

Tabla 20. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
| 0,1521 V | 0,1504 V | 0,1403 V |

Tabla 21. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
| 4,9868 % | 4,9311 % | 4,6 % |

Tabla 22. Técnica AC2C con cargador. Caso 1: cálculo de errores relativos.

Se obtienen unos valores de tensión muy cercanos a 3,2V debido al cargador. Sin embargo, el equalizado no es capaz de obtener una tensión para las celdas con un error de $\pm 10^{-3}V$, como se ha conseguido en el circuito basado en condensadores. En este caso se obtiene un error entre celdas $\pm 10^{-2}V$.

El error relativo es alto debido a que la tensión a la que se están equilibrado las celdas son 3,2 V debido al cargador, siendo la tensión media que tendrían que haber alcanzado 3,05 V.

Caso 2: $V_{celda1} < V_{celda2} < V_{celda3}$

| | | | |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| $V_{celda1}=2,85V$ | $V_{celda2}=3,3V$ | $V_{celda3}=3,45V$ | $V_{media}=3,2V$ |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|

Tabla 23. Caso 2. Condiciones de simulación.

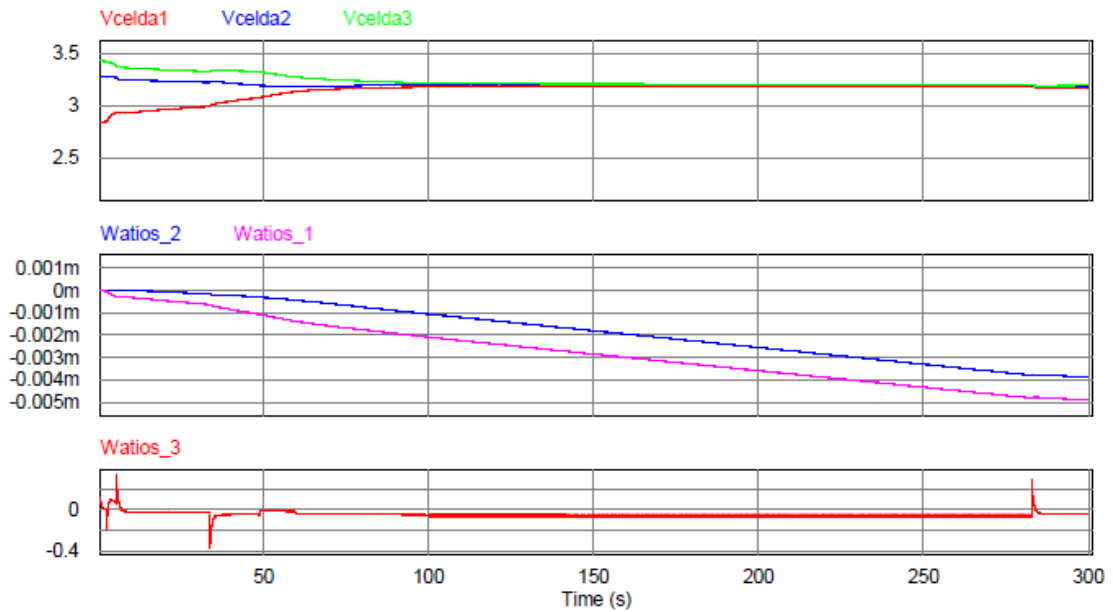


Figura 57. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: análisis de las tensiones y potencias.

Tras una simulación de 300 segundos, estos son los mejores resultados que se obtienen:

| Stop Time | $V_{celda1_{final}}$ | $V_{celda2_{final}}$ | $V_{celda3_{final}}$ |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 156,73 s | 3,1887 V | 3,1982 V | 3,2059 V |

Tabla 24. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(V_{celda1})$ | $e_{abs}(V_{celda2})$ | $e_{abs}(V_{celda3})$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,0013 V | 0,0018 V | 0,0059 V |

Tabla 25. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,3531 % | 0,0562 % | 0,1843 % |

Tabla 26. Técnica AC2C con cargador. Caso 2: cálculo de errores relativos.

Se obtienen unos valores de tensión muy cercanos a 3,2V debido al cargador. Sin embargo, el ecualizado no es capaz de obtener una tensión para las celdas con un error de $\pm 10^{-3}V$, como se ha conseguido en el circuito basado en condensadores. Al igual que en el primer caso se obtiene un error entre celdas $\pm 10^{-2}V$.

El error relativo es bajo debido a que la tensión a la que se están equilibrado las celdas son 3,2 V la cual coincide con el valor de la tensión media que tendrían que haber alcanzado.

Caso 3: $Vcelda1 < Vcelda2 > Vcelda3$

| | | | |
|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Vcelda1=3,05V | Vcelda2=3,3V | Vcelda3=2,8 V | Vmedia=3,15V |
|---------------|--------------|---------------|--------------|

Tabla 27 Caso 2. Condiciones de simulación.

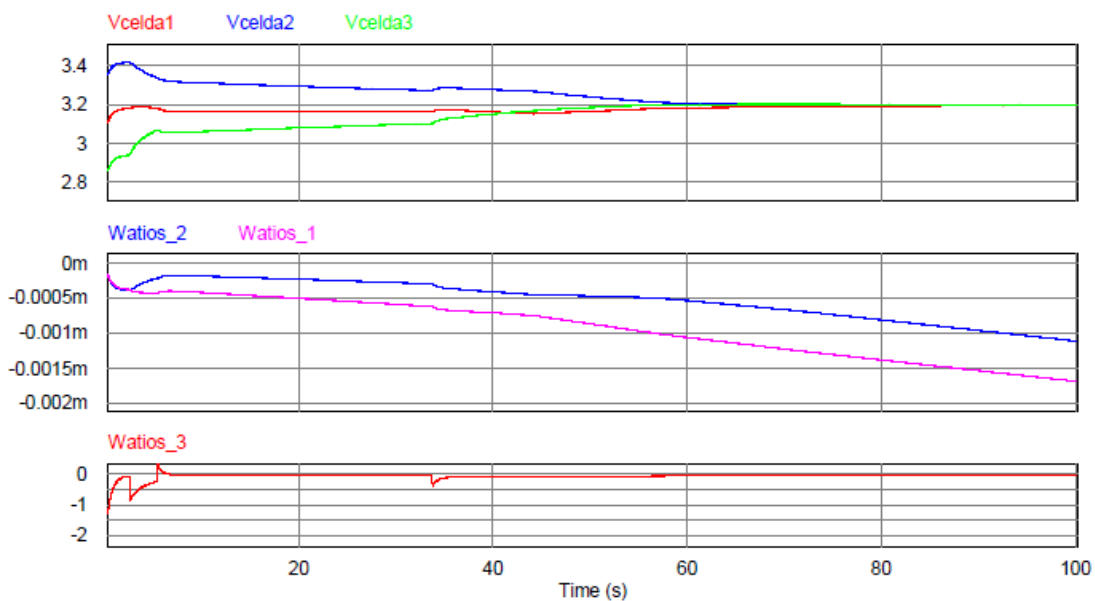


Figura 58. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: análisis de las tensiones y potencias.

| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 97,94 s | 3,1961 V | 3,1978 V | 3,1989 V |

Tabla 28. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.0461 V | 0,0478 V | 0,0489 V |

Tabla 29. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1,4634 % | 1,5174 % | 1,5523 % |

Tabla 30. Técnica AC2C con cargador. Caso 3: cálculo de errores relativos.

Se obtienen unos valores de tensión muy cercanos a 3,2V debido al cargador. Sin embargo, en este caso el ecualizado si es capaz de obtener una tensión para las celdas con un error de $\pm 10^{-3}V$, al contrario que lo que ocurría en los casos 1 y 2.

El error relativo es bajo debido a que la tensión a la que se están equilibrado las celdas son 3,2 V la cual es muy similar al valor de la tensión media que tendrían que haber alcanzado de 3,15V.

Comparando los tres casos, se observa que el tiempo de ecualizado es mucho mayor para el caso en el que la tensión de la celda en mitad del pack es la más alta y mucho más pequeño cuando son la primera o la última las más cargadas.

Conclusión

La introducción del concepto de ciclo de servicio no ha permitido llegar a una optimización del circuito inicial planteado. Esto se debe a que el ciclo de servicio se calcula según la expresión:

$$D = \frac{Vb}{Va + Vb} = \frac{Vmin}{Vmax + Vmin} \quad (148)$$

Debido a que la relación existente entre dos celdas adyacentes puede ser distinta de la relación de los demás pares de celdas adyacentes dentro del pack, el ciclo D que se calcula es probable que solo sea eficiente para el par de celdas adyacentes cuyos valores corresponden a V_{min} y V_{max} no siéndolo para el resto. Al tener varios inductores realizando los procesos de carga/descarga a la vez resulta complicado encontrar un valor de ciclo de servicio que permita optimizar el proceso, más aún si hay muchas celdas en el pack.

Respecto al sistema AC2C con cargador, se obtiene un equilibrado más o menos bueno de las celdas a la tensión nominal de 3,2V al cabo de un tiempo muy largo. Esto se puede deber a que se ha utilizado baterías con capacidades muy pequeñas para poder simular en tiempos cortos los sistemas. Posiblemente utilizando baterías reales se produzca de forma más adecuada el equilibrado.

Se confirma entonces que la técnica de equilibrado de celdas adyacentes mediante la conmutación de inductores no es competitiva con la basada en condensadores y no funciona para los circuitos diseñados en este trabajo sin un aporte de energía.

Motivados por desarrollar un circuito equilibrador de celdas basado en la conmutación de inductores que funcione de forma adecuada, se propone completar este trabajo de fin de grado con el desarrollo y estudio de dos técnicas basadas en la conmutación de un único inductor.

5. Diseño y desarrollo de dos técnicas de equilibrado de celdas de baterías basadas en la conmutación de un único inductor.

En este trabajo se proponen las siguientes técnicas:

1. Técnica de equilibrado basada en la transferencia de energía de la celda más cargada a todo el pack, conocida como "Cell to pack" (C2P).
2. Técnica de equilibrado basada en la transferencia de energía de la celda más cargada a la de menor carga, conocida como "Direct Cell to Cell" (DC2C).

5.1. Técnica de equilibrado de celdas por conmutación de un único inductor y estrategia "Cell to Pack" (C2P)

Esta técnica realiza el equilibrado de las celdas mediante un proceso periódico en el que se descarga la celda más cargada y se transfiere su energía a todo el pack.

El control de este sistema requiere el conocimiento del voltaje de todas las celdas de la batería en cada instante y la distinción de la celda que se encuentra más cargada de entre todas las existentes.

Realizaremos el diseño del esquema con el software PSIM para un módulo de baterías compuesto de tres celdas, siendo el sistema escalable para módulos más grandes con n celdas.

Se utilizará un único elemento inductivo para realizar la ecualización. Se ha optado por este diseño para facilitar la escalabilidad del circuito al no depender del número de celdas de la batería, como ocurre en otras técnicas.

El inductor tendrá en paralelo un condensador para garantizar la seguridad del circuito durante los tiempos muertos como se explicó en el anterior capítulo.

El sistema propuesto es el siguiente:

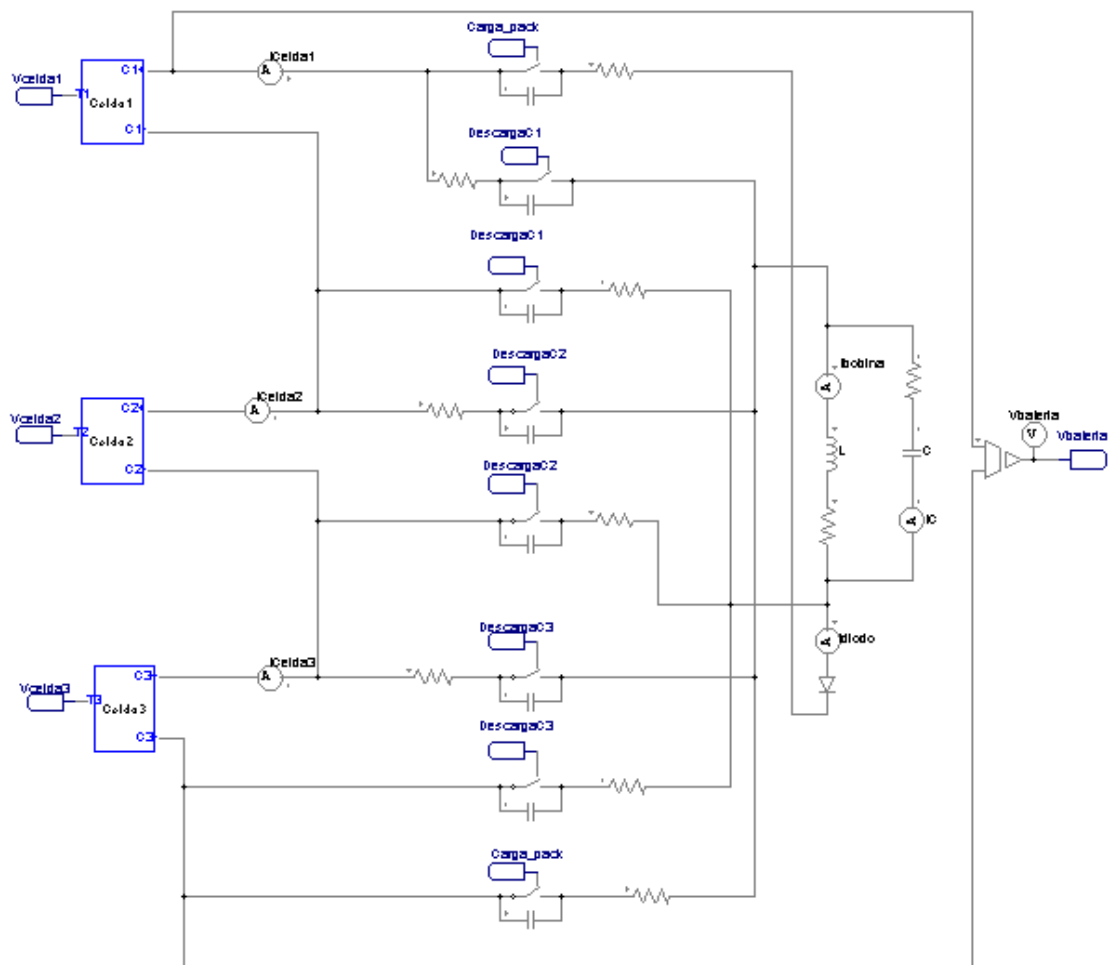


Figura 59. Circuito propuesto para la técnica de equilibrado de baterías C2P.

En el circuito de la figura 59 se distinguen tres bloques que representan de forma aproximada las tres celdas que vamos a equilibrar. El subcircuito que implementan es el mismo que el utilizado en los circuitos desarrollados en este trabajo en capítulos anteriores [7].

Modo de operación del circuito

- Descarga de la celda: para poder llevar a cabo la descarga de cualquiera de las n celdas, cada una de ellas está conectada con el inductor mediante dos polos. Estos polos serán activados por las señales denominadas “DescargaCn”, que se activarán en los momentos de carga del inductor si la celda n en dicho instante es la de mayor carga.
- Tiempo muerto: En este instante todos los polos de conmutación están abiertos y el sistema inductor-condensador queda flotante.

- **Carga del pack:** para poder realizar la transferencia de energía a todo el pack se comunica el terminal positivo de la primera celda y el terminal negativo de la última con el inductor mediante dos polos de conmutación activados por la señal “Carga_pack”. Además, se utiliza un diodo para asegurar el sentido de la corriente hacia el terminal positivo.

En total estamos considerando un total de 6 interruptores unidireccionales, 2 por cada celda y 2 más para todo el pack.

Para n celdas necesitaríamos m interruptores:

$$m = 2 \cdot n + 2 \quad (149)$$

Proceso de equilibrado de las celdas

Suponiendo un conjunto de tres celdas en las que en un determinado instante: $V_{celda1} > V_{celda2} > V_{celda3}$, siendo “Vcelda n” el valor de la tensión de cada celda, el procedimiento será el siguiente:

1. Se activarán la señal DescargaC1 cerrando los interruptores y transfiriendo energía de la celda 1 al inductor.

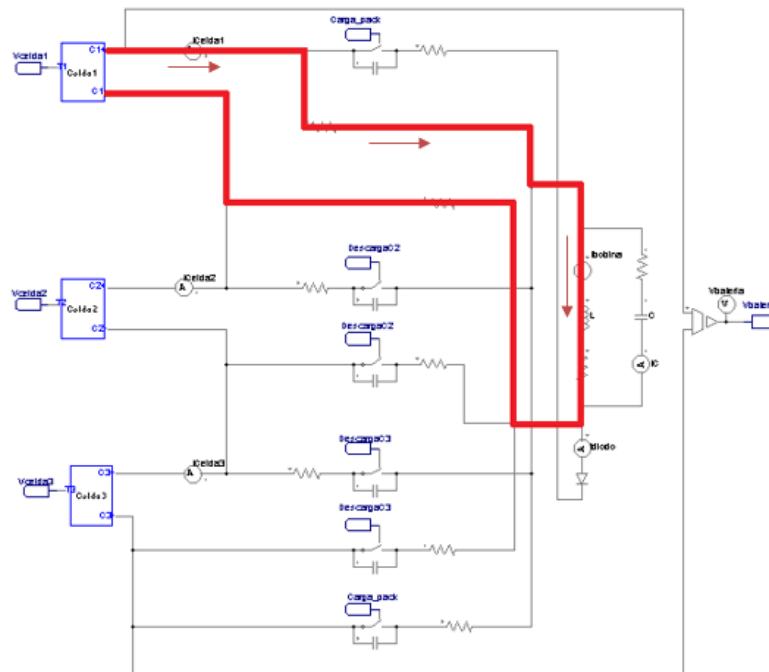


Figura 60. Técnica C2P: proceso de descarga de una celda.

En la figura 60 distinguimos en rojo y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente para cargar la bobina.

- Tras la descarga de la celda, la señal DescargaC1 se desactivará y habrá un breve tiempo muerto en el que el sistema LC quedará flotante. Diseñaremos este sistema resonante para que la energía almacenada en la bobina no se disipe en este periodo y pueda ser transferida a todo el pack en el siguiente paso.

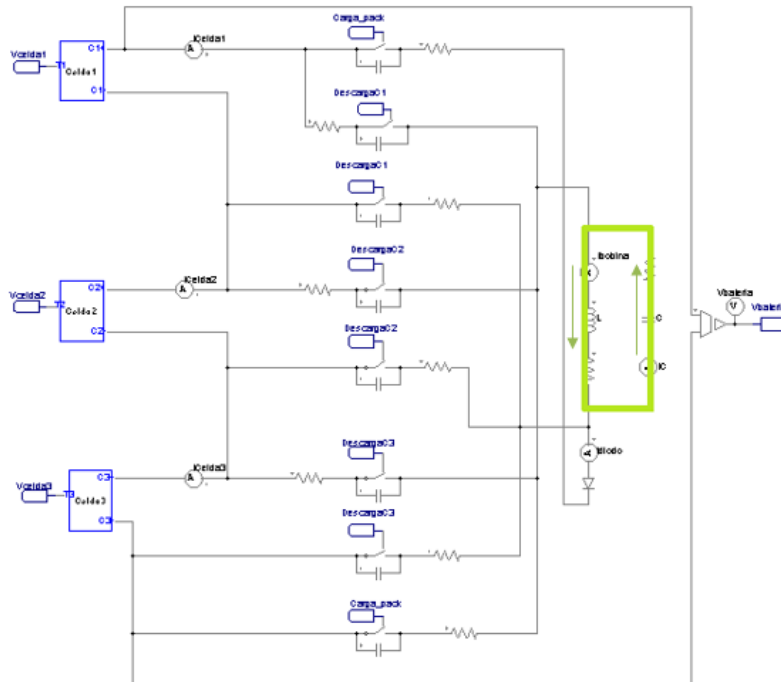


Figura 61. Técnica C2P: tiempo muerto.

En la figura 61 distinguimos en verde y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente durante el tiempo muerto.

- Tras el tiempo muerto se activarán las señales para la carga del pack “Carga_Pack” y se transferirá la energía almacenada por el sistema resonante a todo el conjunto de celdas, equilibrando las menos cargadas poco a poco.

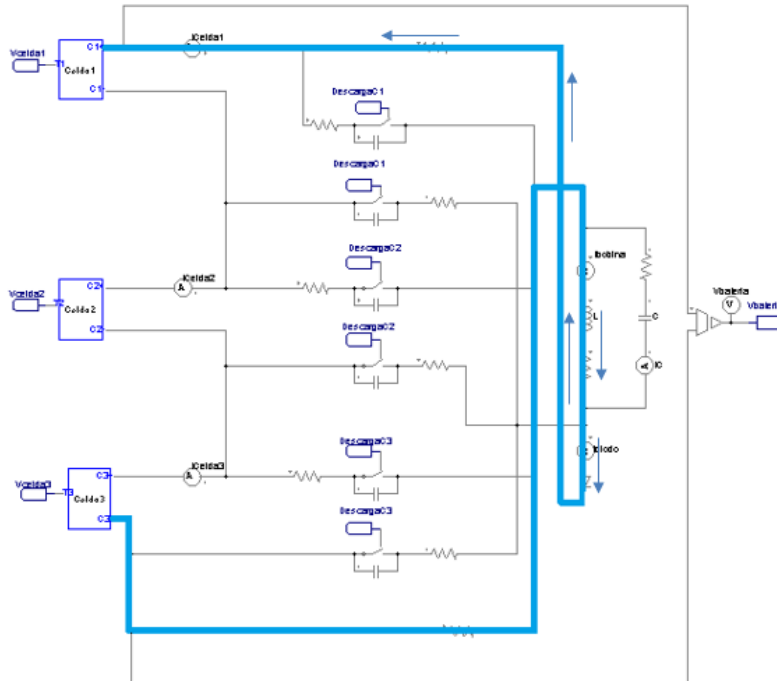


Figura 62. Técnica C2P: proceso de carga del pack.

En la figura 62 distinguimos en azul y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente al descargar la bobina.

Tras este periodo habrá de nuevo un tiempo muerto y el proceso descrito se volverá a ejecutar hasta que la diferencia de tensión entre las celdas sea mínima.

Diseño de los elementos del circuito

Las ecuaciones que modelan la corriente que circula por la bobina en cada instante son las mismas que las desarrolladas en el estudio del condensador como elemento protector de la bobina, con algunos cambios:

1. Proceso de descarga de una celda / carga de la bobina.

La ecuación 47 modela la corriente que circula por la bobina mediante un sistema de primer orden:

$$I_L(s) = \frac{V_{Celda} + LI_{L0}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (150)$$

2. Tiempo muerto

La ecuación 58 modela la corriente que fluye por el circuito resonante como un sistema de segundo orden:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (151)$$

3. Carga del pack /Descarga de la bobina.

La corriente que fluye de la bobina hacia el pack sigue la misma ecuación que cuando se está descargando una celda, con la diferencia de que ahora la bobina está sometida a la tensión de todo el pack (con los terminales en sentido opuesto) en vez de solo a una celda, lo que aproximadamente equivale a la tensión de tres celdas. La ecuación 47 queda modificada tal que:

$$I_L(s) = \frac{\frac{-V_{Bateria} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} = \frac{\frac{-3 \cdot V_{Celda} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (152)$$

4. Tiempo muerto de nuevo. Ecuación 58:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (153)$$

Diseño de los elementos del circuito

Se reutilizará el diseño desarrollado para la técnica de equilibrado de celdas adyacentes mediante la conmutación de inductores:

$$T_{Dead} = 20\mu s \quad R = 0,2\Omega \quad L' = 6,4mH \quad C' = 1,58nF$$

Diseño de las señales de activación de los polos

El último paso para terminar el diseño es generar las señales de activación de los polos. Para ello se ha decidido utilizar dos señales de reloj, una para la descarga de las celdas y otra para la carga del pack. El dimensionamiento de sus ciclos de trabajo (D) será un factor determinante en el resultado de la ecualización.

Se utilizará como frecuencia de conmutación los 500Hz propuestos para el diseño del periodo de carga/descarga de la bobina y para el tiempo muerto la duración propuesta de 20µs.

Como en un mismo periodo existen dos tiempos muertos, en porcentaje representan:

$$\%Dead\ Time = \frac{2 \cdot 20\mu s}{0.002} \cdot 100 = 2\% \quad (154)$$

Por lo tanto, debemos repartir el 98% restante del periodo entre el proceso de descarga de la celda y de carga del pack.

Comparando la corriente que circula por la bobina en ambas situaciones la relación entre ellas será:

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{\frac{-V_{Bateria} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \right| \quad (155)$$

Considerando que $V_{Bateria} \approx 3 \cdot V_{Celda}$ y despreciando el término I_{L0} al estar multiplicado por el valor de la inductancia:

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \frac{3 \cdot V_{Celda}}{V_{Celda}} = 3 \quad (156)$$

$$I_{LDescarga}(s) = 3 \cdot I_{LCarga}(s) \quad (157)$$

Observamos que aproximadamente, en términos de potencia, la descarga de la bobina (carga del pack) es tres veces mayor que cuando estamos cargando la bobina (descargando una celda). Se deduce de esta relación entre potencias que, como la energía debe ser la misma, el tiempo de descarga de la bobina deberá tener una duración tres veces menor. Entonces, el ciclo de trabajo de la señal “Pulso_DescargaCelda” que descarga las celdas (D1) debe ser tres veces mayor que “Pulso_CargaBatería” que carga el pack (D2), para que toda la energía almacenada en la bobina se transfiera de la forma más eficiente.

$$D1 = 3 \cdot D2 \quad (158)$$

Por lo tanto, el 98% del periodo restante se repartirá de la siguiente forma:

$$D1 + D2 = 98\% \quad (159)$$

$$3 \cdot D2 + D2 = 98\% \quad (160)$$

$$D2 = \frac{98}{4} = 24.5\% \quad (161)$$

De manera que diseñamos las señales como:

$$D1 = 73.5\% \quad D2 = 24.5\%$$

Para que las señales no coincidan activas al mismo tiempo hay que desfasar una de ellas. Como el proceso de ecualizado comienza con la descarga de una celda habrá que desfasar la señal de activación de los polos para la carga del pack.

Con una simple regla de tres obtenemos el valor θ de desfase:

$$\frac{0.5}{0.735 + 0.01} = \frac{180}{\theta} \rightarrow \theta = 268.21^\circ \quad (162)$$

| | Pulso_DescargaCelda | Pulso_CargaBateria |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Vpeak [V] | 10 | 10 |
| Frecuency [Hz] | 500 | 500 |
| Duty Cycle | 0,735 | 0,245 |
| Phase Delay | 0 | 268.21° |

Tabla 31. Técnica C2P. Simulación 1: Señales de reloj.

Programación

El último paso es programar la lógica que determinará que celda es la que hay que descargar.

Para ello se ha introducido un bloque de programación en lenguaje C, que estará en tiempo real comprobando que celda es la más cargada y activando la salida correspondiente.

El bloque de programación es el siguiente:

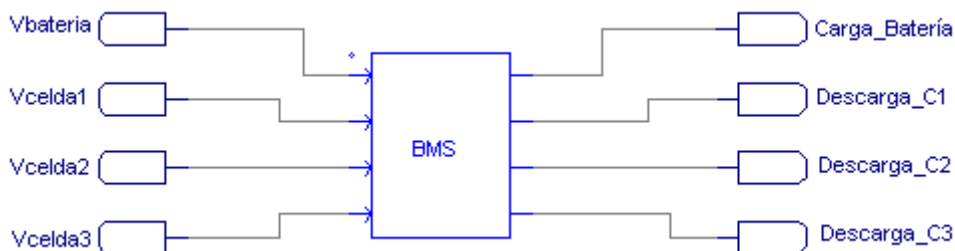


Figura 63. Técnica C2P. Circuito de control.

Este bloque recibe 4 señales:

- **Vbatería:** la tensión de todo el pack en voltios.
- **Vcelda1:** estado de carga de la celda 1 en voltios.
- **Vcelda2:** estado de carga de la celda 2 en voltios.
- **Vcelda3:** estado de carga de la celda 3 en voltios.

A partir de estas entradas el bloque genera 4 salidas:

- **Carga_Batería:** señal de activación para la carga del pack/descarga de la bobina. Siempre activa hasta que el proceso de equilibrado finalice.
- **Descarga_C1:** señal que indica que la celda 1 es la más cargada.
- **Descarga_C2:** señal que indica que la celda 2 es la más cargada.

- **Descarga_C3**: señal que indica que la celda 3 es la más cargada.

Se ha programado el bloque para que en el momento en que todas las celdas se encuentren a la misma tensión con un error de $\pm 0,001V$ las cuatro señales de salida se desactiven y la ecualización finalice.

Estas señales de salida conmutarán los polos de acuerdo con las dos señales de activación diseñadas anteriormente Pulso_DescargaCelda y Pulso_CargaBateria.

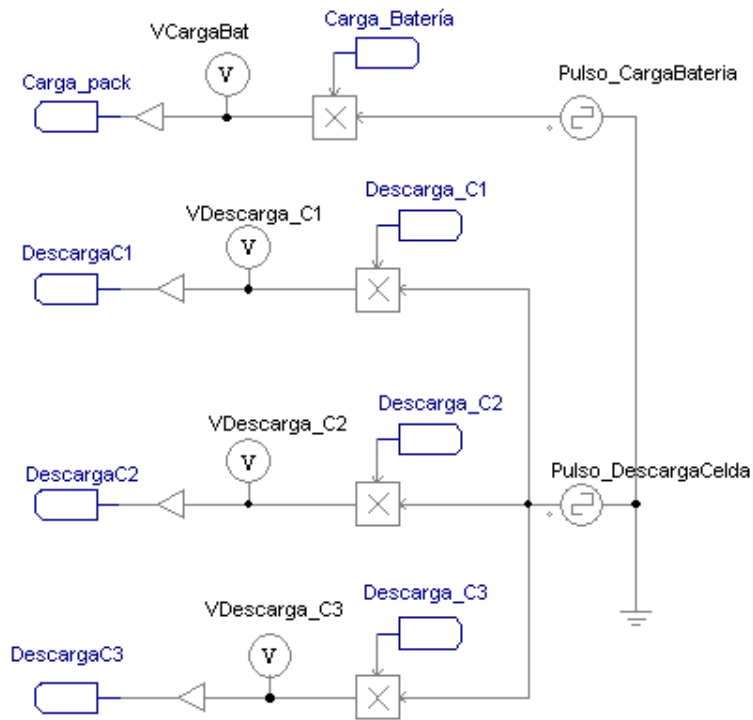


Figura 64. Técnica C2P. Señales de activación de los polos.

Diseñados todos los elementos, simulamos el circuito bajo las siguientes condiciones:

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V | Step=10 ⁻⁴ |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------|

Tabla 32. Técnica C2P. Condiciones de simulación.

Obtenemos:

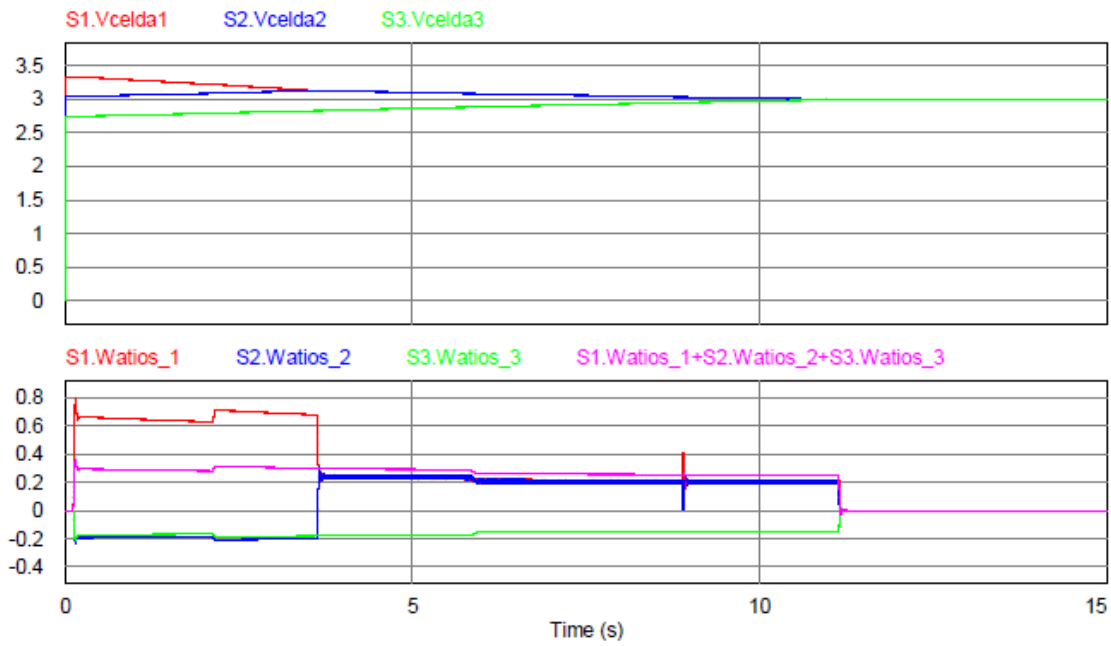


Figura 65. Técnica C2P.Simulación 1. Tensiones de las celdas y potencias.

| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11,22 s | 2,9996 V | 2,9999 V | 2,9990 V |

Tabla 33.Técnica C2P. Resultados Simulación 1.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,0504 V | 0,0501 V | 0,051 V |

Tabla 34. Técnica C2P. Simulación 1: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1,6524 % | 1,6426 % | 1,6721 % |

Tabla 35. Técnica C2P. Simulación 1: cálculo de errores relativos.

En la figura 65, observamos en el gráfico de las potencias transferidas por cada celda, como durante todo el proceso de equilibrado la suma de potencias (línea morada) nunca es 0. Esto implica que parte de la energía extraída de las celdas más cargadas no se está transfiriendo a las celdas menos cargadas.

Realizamos una simulación con un time step más pequeño (E-06s) para analizar las corrientes en las celdas, en la bobina y condensador. Observamos lo que ocurre durante un periodo:

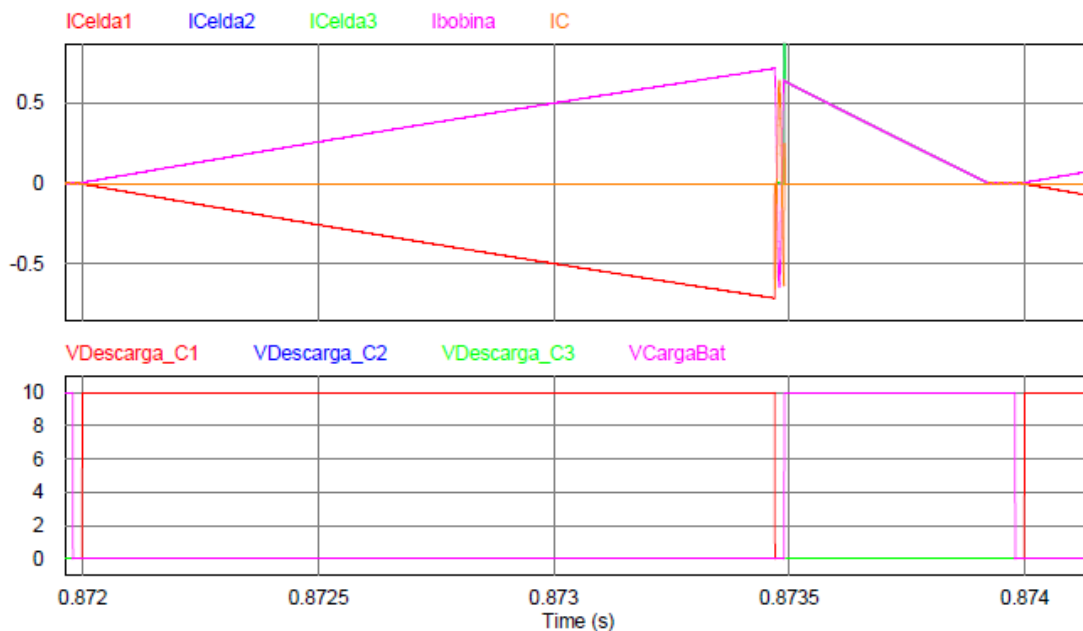


Figura 66. Técnica C2P. Simulación 1: análisis de las corrientes.

El periodo comienza con la descarga de la celda 1, observamos como la corriente por la bobina aumenta a la vez que la corriente por la celda 1 decrece. No existe corriente por el condensador, por lo que la capacidad calculada es lo suficientemente pequeña.

Después de la descarga de la celda 1 hay un pequeño tiempo muerto. Ampliando la gráfica:

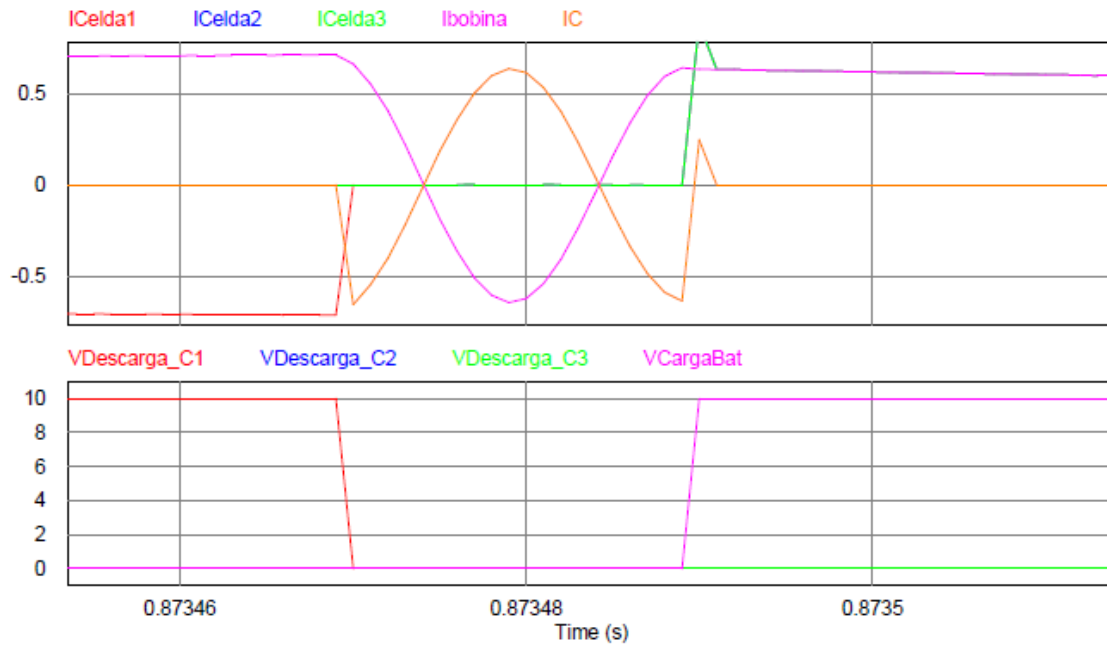


Figura 67. Técnica C2P. Simulación 1: análisis de las corrientes en el tiempo muerto.

La corriente muestra el comportamiento esperado, realizando un único ciclo. Este es el único momento en el que circula corriente por el condensador.

Después del tiempo muerto, se realiza la carga del pack. Ampliando la gráfica de la figura 66:

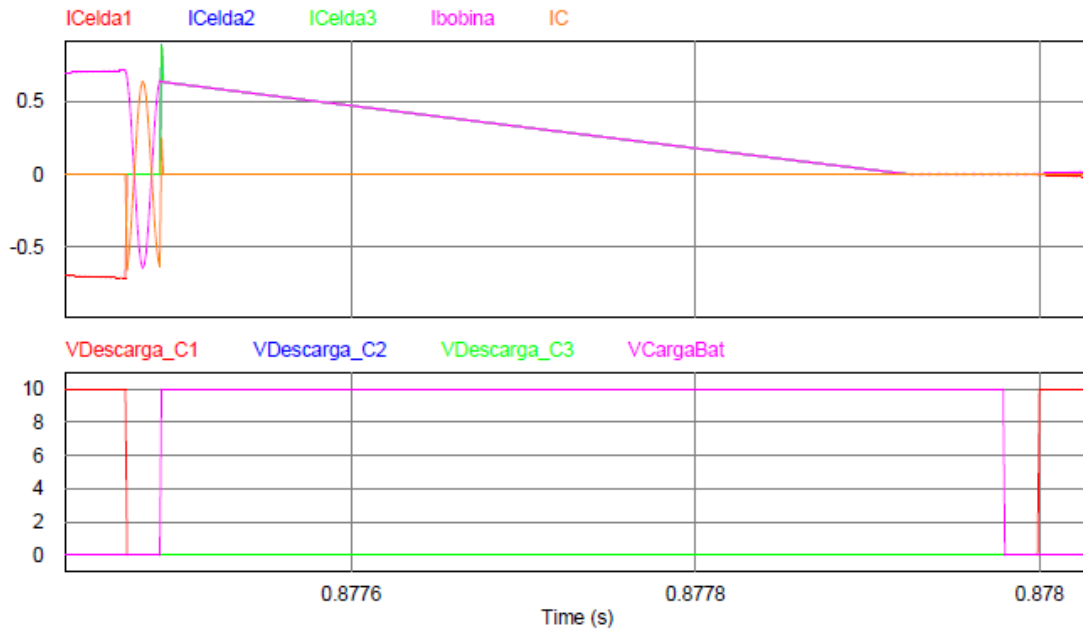


Figura 68. Técnica C2P. Simulación 1: Análisis de las corrientes al descargar la bobina.

Se observa como cuando comienza la descarga de la bobina al pack, la corriente en las celdas 1 y 2 (están superpuestas en la imagen) aumenta rápidamente, mientras que la corriente por la bobina disminuye. La respuesta del sistema parece la adecuada, sin embargo, antes de que se termine el tiempo de carga del pack, la corriente por las celdas se hace 0 y existe un periodo de tiempo pequeño, que se suma al siguiente periodo de tiempo muerto, en el que una pequeña corriente queda oscilando hasta que se produzca de nuevo la carga de la bobina. Se evita que el sentido de la transferencia se invierta del pack hacia la bobina mediante la introducción de un diodo.

Esto se debe al mal dimensionamiento de los ciclos de trabajo de las señales de activación de los polos.

Para un funcionamiento mejor, el ciclo de trabajo de la descarga de la bobina debe ser más pequeño que el diseñado, para evitar que la corriente por la bobina se anule. Esta solución podría implementarse mediante la introducción de la técnica basada en el cálculo de los ciclos de servicio desarrollada para la técnica AC2C. Sin embargo, para evitar necesitar un control tan complejo, se ha decidido ajustar manualmente este problema mediante la reducción de ciclo de trabajo de la señal que activa el proceso de carga del pack.

Probamos a reducir el ciclo de trabajo un total de 80µs. Ahora el segundo tiempo muerto de cada periodo durará 100µs. Hay que redimensionar la inductancia y capacidad para que la corriente oscile una sola vez durante estos 100µs.

La frecuencia de oscilación ahora es:

$$f = \frac{1}{100\mu s} = 10KHz \quad (163)$$

Calculamos la L y la C a partir de las ecuaciones 92 y 98:

$$L = \frac{3,2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{500 \cdot 2 \cdot \pi}}{1} = 6,4 mH \quad (164)$$

Como el valor de w_1 no ha cambiado, el valor de la inductancia es el mismo.

Calculamos la relación K entre las dos frecuencias mediante la ecuación 97:

$$K = \frac{w_n}{w_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10k}{2 \cdot \pi \cdot 500} = 20 \quad (165)$$

El valor de la capacidad será entonces:

$$C = \frac{1}{V_{batería} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10k} = 39,57nF \quad (166)$$

Por lo tanto, el nuevo circuito queda definido por:

$$T_{Dead} = 20\mu s \quad R = 0,2\Omega \quad L' = 6,4mH \quad C' = 39,57nF$$

Simulamos el sistema bajo los siguientes parámetros:

| | Pulso_DescargaCelda | Pulso_CargaPack |
|----------------|---------------------|-----------------|
| Vpeak [V] | 10 | 10 |
| Frecuency [Hz] | 500 | 500 |
| Duty Cycle | 0,735 | 0,205 |
| Phase Delay | 0 | 268,21° |

Tabla 36. Técnica C2P. Simulación 2: Señales de reloj.

Obtenemos:

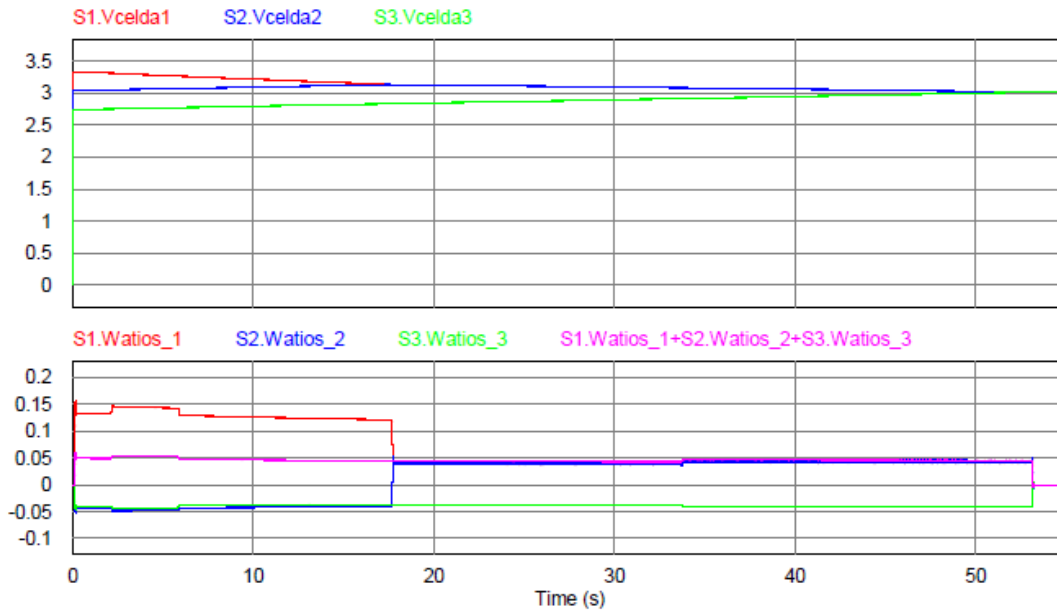


Figura 69. Técnica C2P. Simulación 2: Tensiones de las celdas y potencias.

| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 53.20 s | 3.0206 V | 3.0205 V | 3.0196 V |

Figura 70. Técnica C2P. Simulación 2: Resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.0294 V | 0.0295 V | 0.0304 V |

Tabla 37. Técnica C2P. Simulación 2: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.9639 % | 0.9672 % | 0.9967 % |

Tabla 38. Técnica C2P. Simulación 2: cálculo de errores relativos.

En comparación con el diseño anterior se realiza un equilibrado más eficiente y se obtienen mejores resultados, pero tiene una duración casi 5 veces mayor.

Comparando las tablas de los errores relativos cometidos (35 y 38) podemos calcular la mejora obtenida:

| Vcelda1 | Vcelda2 | Vcelda3 |
|---------|---------|---------|
| 41.68 % | 41.12 % | 40.4% |

Se ha reducido el error respecto del primer sistema en torno a un 40% en todas las celdas.

5.2. Técnica de equilibrado de celdas “Direct Cell to Cell” (DC2C)

Esta técnica realiza el equilibrado de las celdas mediante un proceso repetitivo en el que se descarga la celda más cargada y se transfiere su energía a la menos cargada en cada periodo.

El control de este sistema requiere el conocimiento del voltaje de todas las celdas de la batería en cada instante y la distinción de la celda más cargada y menos cargada de todo el pack.

Realizaremos el diseño del esquema con el software PSIM para un módulo de baterías compuesto de tres celdas, de forma similar a la técnica C2P.

Se utilizará de nuevo, un único elemento inductivo para realizar la ecualización.

El inductor tendrá en paralelo un condensador para garantizar la seguridad del circuito durante los tiempos muertos como se explicó en el anterior apartado.

El sistema propuesto es el siguiente:

- **Carga de una celda:** para poder realizar la transferencia de energía a cualquiera de las n celdas, cada una de ellas está conectada con el inductor mediante dos polos. Estos polos serán activados por las señales denominadas “Cn”, que se activarán en los momentos de descarga del inductor si la celda n en dicho instante es la de menor carga.

En total estamos considerando un total de 12 interruptores unidireccionales.

Para n celdas necesitaríamos m interruptores:

$$m = 4 \cdot n \quad (167)$$

Proceso de equilibrado de las celdas

Suponiendo un conjunto de tres celdas en las que en un determinado instante: $V_{celda1} > V_{celda2} > V_{celda3}$, siendo “Vceldan” el valor de la tensión de cada celda, el procedimiento será el siguiente:

1. Se activarán la señal DC1 cerrando los interruptores y transfiriendo energía de la celda 1 al inductor.

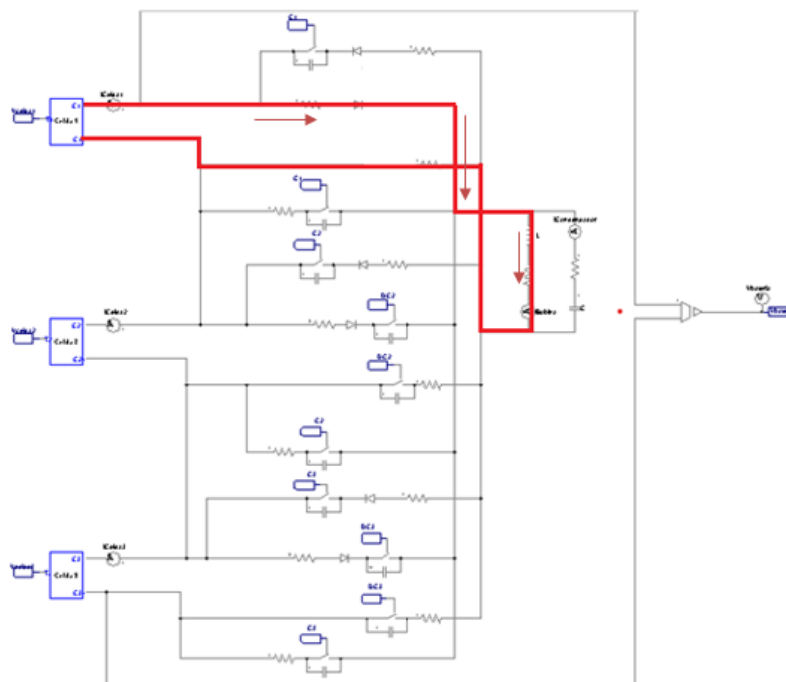


Figura 72. Técnica DC2C: proceso de descarga de una celda.

En la figura 72 distinguimos en rojo y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente para cargar la bobina.

2. Tras la descarga de la celda, la señal DC1 se desactivará y habrá un breve tiempo muerto en el que el sistema LC quedará flotante. Diseñaremos este sistema resonante para que la energía almacenada en la bobina no se disipe en este periodo y pueda ser transferida a todo el pack en el siguiente paso.

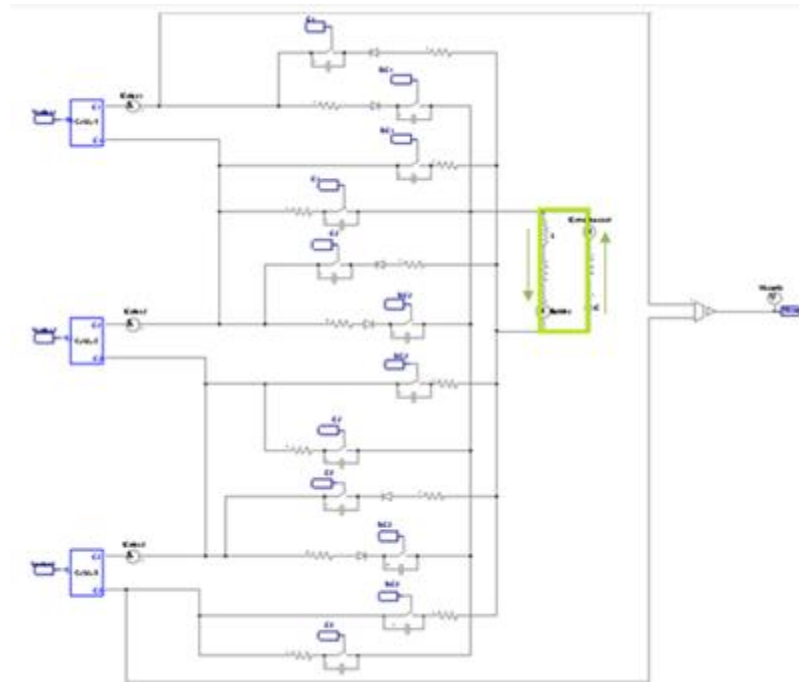


Figura 73. Técnica DC2C: tiempo muerto.

En la figura 73 distinguimos en verde y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente durante el tiempo muerto.

3. Tras el tiempo muerto se activarán la señal para la carga de la celda de menor tensión, C3 en este caso, y se le transferirá la energía almacenada por el sistema resonante.

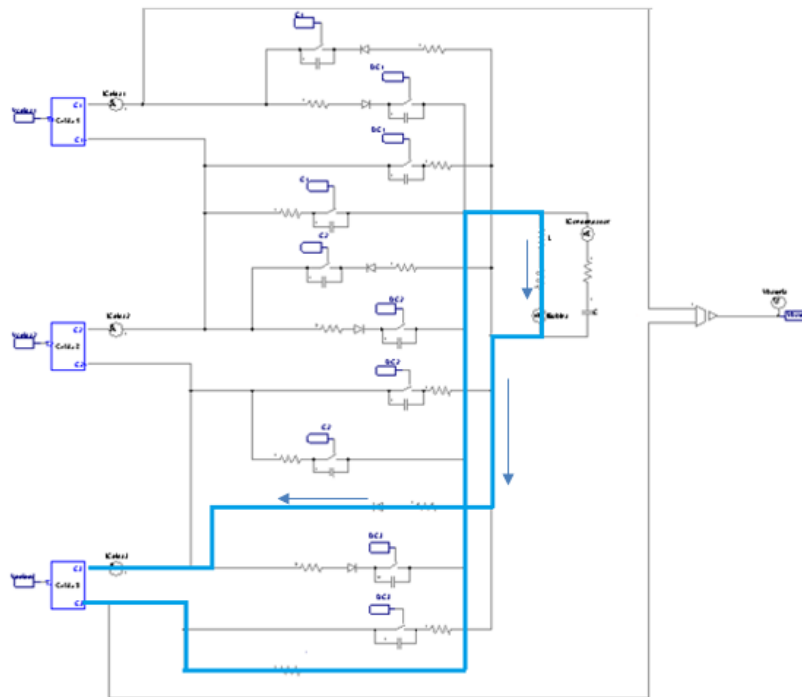


Figura 74. Técnica DC2C: proceso de carga de una celda.

En la figura 74 distinguimos en azul y en el sentido de las flechas el recorrido que realiza el flujo de corriente al descargar la bobina.

Tras este periodo habrá de nuevo un tiempo muerto y el proceso descrito se volverá a ejecutar hasta que la diferencia de tensión entre las celdas sea mínima.

Diseño de los elementos del circuito

Las ecuaciones que modelan la corriente que circula por la bobina en cada instante son las mismas que las desarrolladas en el estudio del condensador como elemento protector de la bobina, con algunos cambios:

1. Proceso de descarga de una celda / carga de la bobina.

La ecuación 47 modela la corriente que circula por la bobina mediante un sistema de primer orden:

$$I_L(s) = \frac{V_{CeldaDescarga} + LI_{L0}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (168)$$

2. Tiempo muerto

La ecuación 58 modela la corriente que fluye por el circuito resonante como un sistema de segundo orden:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (169)$$

3. Proceso de carga de una celda/descarga de la bobina.

La corriente que fluye de la bobina hacia una celda sigue el mismo modelo de primer orden que cuando se está descargando una celda, con la diferencia del sentido de conexión de los terminales. La ecuación 47 queda modificada tal que:

$$I_L(s) = \frac{\frac{-V_{Celda\ Carga} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \quad (170)$$

4. Tiempo muerto de nuevo. Ecuación 58:

$$I_L(s) = \frac{-\frac{V_{C0}}{L} + I_{L0}s}{s^2 + \frac{2R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (171)$$

Diseño de los elementos del circuito:

Se considera el mismo que el utilizado en la técnica C2P:

$$T_{Dead} = 20\mu s \quad R = 0,2\Omega \quad L' = 6,4mH \quad C' = 1,58nF$$

Diseño de las señales de activación de los polos

El último paso para terminar el diseño es generar las señales de activación de los polos. Para ello se ha decidido utilizar dos señales de reloj, una para la descarga de las celdas "Pulso_DescargaCelda" y otra para las cargas "Pulso_CargaCelda". El dimensionamiento de sus ciclos de trabajo (D) será un factor determinante en el resultado de la ecualización.

Se utilizará como frecuencia de conmutación los 500Hz propuestos para el diseño del periodo de carga/descarga de la bobina y para el tiempo muerto la duración propuesta de 20µs.

Como en un mismo periodo existen dos tiempos muertos, en porcentaje representan:

$$\%Dead\ Time = \frac{2 \cdot 20\mu s}{0,002} \cdot 100 = 2\% \quad (172)$$

Por lo tanto, debemos repartir el 98% restante del periodo entre el proceso de descarga de la celda y de carga del pack.

Comparando la corriente que circula por la bobina en ambas situaciones la relación entre ellas será:

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{\frac{-V_{celda} + LI_{L0}}{3R}}{\frac{L}{3R}s + 1} \right| \quad (173)$$

Considerando que los valores de la tensión de las celdas van variando a lo largo del proceso, al igual que las corrientes iniciales LI_{L0} , la relación R entre ambas corrientes no es constante.

$$\frac{I_{LDescarga}(s)}{I_{LCarga}(s)} = \left| \frac{-V_{celda} + LI_{L0}}{V_{celda} + LI_{L0}} \right| = R \quad (174)$$

Sin embargo, si despreciamos los efectos de las corrientes iniciales debido a que están multiplicadas por el valor de la inductancia y consideramos el caso más positivo, que se dará siempre al final de los procesos de la ecualización, en el que aproximadamente ambas tensiones son iguales, podemos aproximar la relación R:

$$R \approx 1 \quad (175)$$

$$I_{LDescarga}(s) \approx I_{LCarga}(s)$$

Se deduce de esta relación entre corrientes, que el ciclo de trabajo de la señal que descarga las celdas (D1) debe ser aproximadamente el mismo que el de carga de las celdas(D2). Esta aproximación será cierta al final del proceso de ecualización,

cuando las tensiones de las celdas sean muy parecidas, sin embargo, al inicio del proceso esto no se cumple y por lo tanto el proceso de equilibrado no se logrará de forma eficiente. Habrá que calcular los ciclos de trabajo de forma dinámica con el concepto de ciclo de servicio utilizado en las técnicas desarrolladas en apartados anteriores. Esto se llevará a cabo en el apartado 5.2.1.

Continuando con el cálculo de D1 y D2:

$$D1 = D2 \quad (176)$$

Por lo tanto, el 98% del periodo restante se repartirá de la siguiente forma:

$$D1 + D2 = 98\% \quad (177)$$

$$D2 = \frac{98}{2} = 49\% \quad (178)$$

De manera que:

$$D1 = 49\% \quad D2 = 49\%$$

Para que las señales no coincidan activas al mismo tiempo hay que desfasar una de ellas. Como el proceso de eculizado comienza mediante la descarga de una celda habrá que desfasar la señal de activación de los polos para la carga de la celda.

Con una simple regla de tres obtenemos el valor θ de desfase:

$$\frac{0.5}{0,49 + 0,01} = \frac{180}{\theta} \rightarrow \theta = 180^\circ \quad (179)$$

| | Pulso_DescargaCelda | Pulso_CargaCelda |
|----------------|---------------------|------------------|
| Vpeak [V] | 10 | 10 |
| Frecuency [Hz] | 500 | 500 |
| Duty Cycle | 0,49 | 0,49 |
| Phase Delay | 0 | 180° |

Tabla 39. Técnica DC2C. Simulación 3: Señales de reloj.

El último paso es programar la lógica que determinará que celdas son las que hay que descargar y cargar.

Programación

Para ello se ha introducido un bloque de programación en lenguaje C, que estará en tiempo real comprobando que celda es la más cargada y menos cargada y activando las salidas correspondientes.

El bloque de programación es el siguiente:

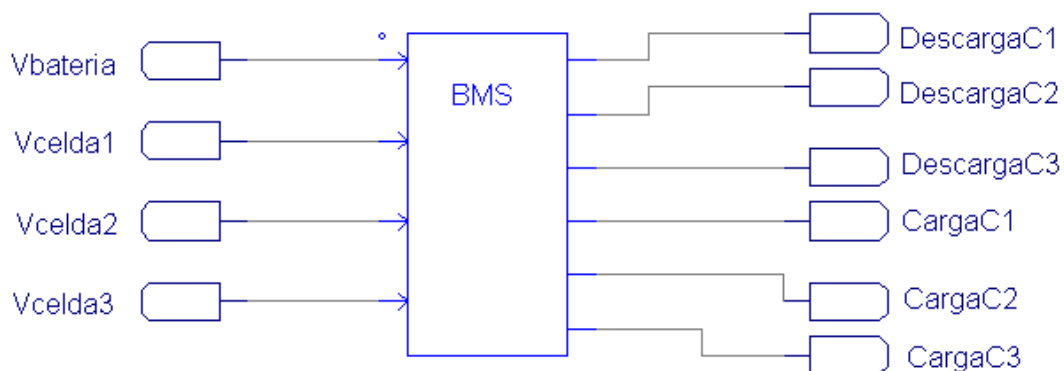


Figura 75. Técnica DC2C. Circuito de control.

Este bloque recibe 4 señales:

- **Vbatería:** la tensión de todo el pack en voltios.
- **Vcelda1:** estado de carga de la celda 1 en voltios.
- **Vcelda2:** estado de carga de la celda 2 en voltios.
- **Vcelda3:** estado de carga de la celda 3 en voltios.

A partir de estas entradas el bloque genera 6 salidas:

- **DescargaC1:** señal que indica que la celda 1 es la más cargada.
- **DescargaC2:** señal que indica que la celda 2 es la más cargada.
- **DescargaC3:** señal que indica que la celda 3 es la más cargada.
- **CargaC1:** señal que indica que la celda 1 es la menos cargada.
- **CargaC2:** señal que indica que la celda 2 es la menos cargada.
- **CargaC3:** señal que indica que la celda 3 es la menos cargada.

Se ha programado el bloque para que en el momento en que todas las celdas se encuentren a la misma tensión con un error de $\pm 0,001V$ las seis señales de salida se desactiven y la ecualización finalice.

Estas señales de salida conmutarán los polos de acuerdo con las dos señales de activación diseñadas anteriormente Pulso_DescargaCelda y Pulso_CargaCelda.

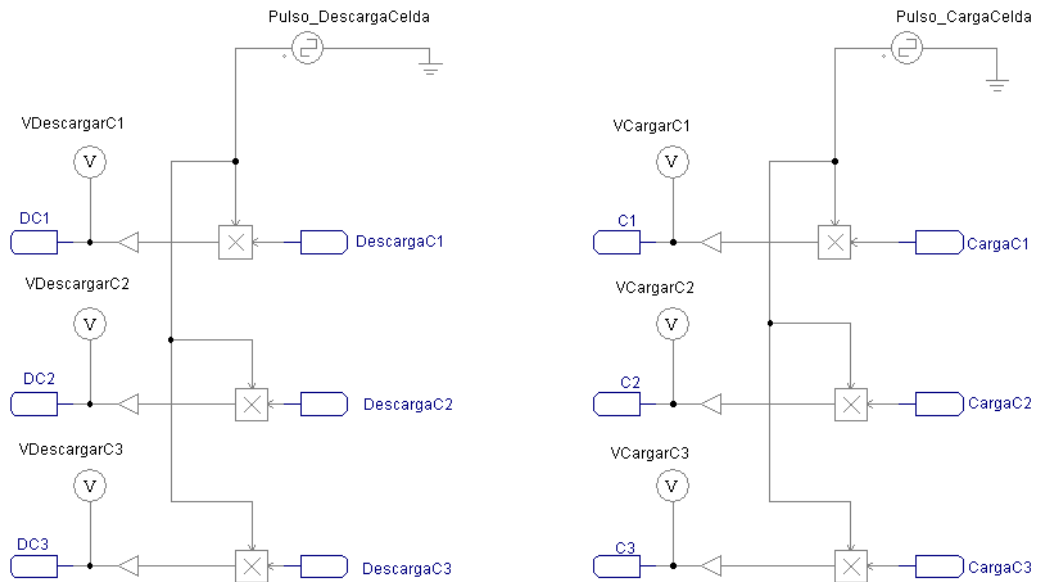


Figura 76. Técnica DC2C. Señales de activación de los polos.

Diseñados todos los elementos simulamos el circuito bajo las siguientes condiciones

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V | Step=10 ⁻⁴ |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------|

Tabla 40. Técnica DC2C. Condiciones de simulación.

Obtenemos:

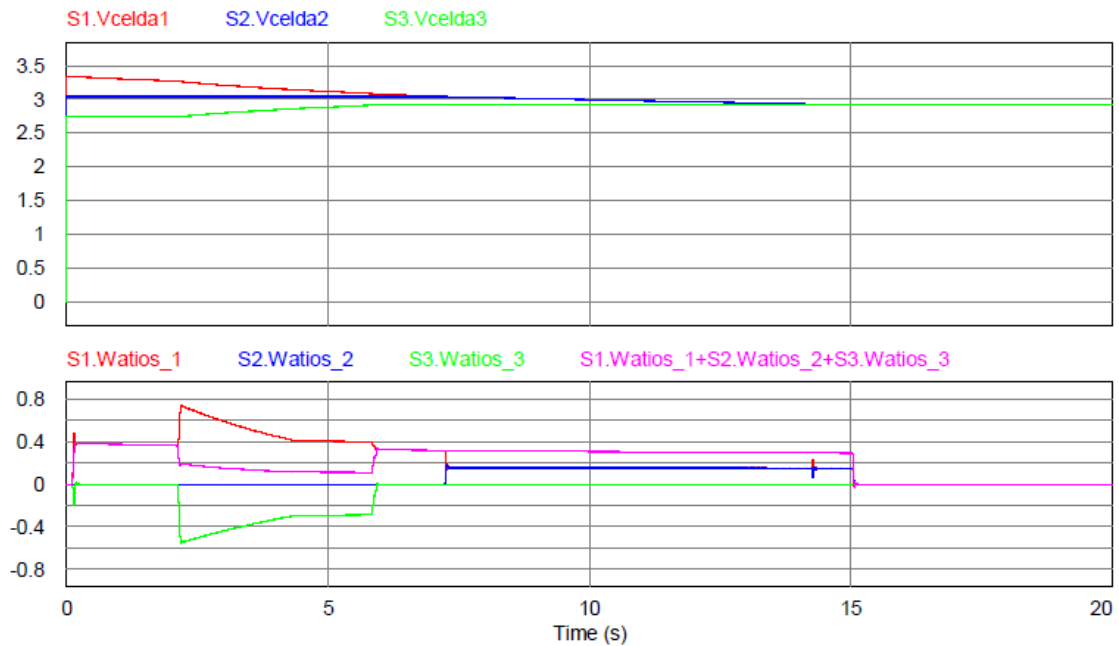


Figura 77. Técnica DC2C. Simulación 3. Tensiones de las celdas y potencias.

| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 15,05 s | 2,9197 V | 2,9196 V | 2,9189 V |

Tabla 41. Técnica DC2C. Simulación 3: Resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,1303 V | 1,1304 V | 0,1311 V |

Tabla 42. Técnica DC2C. Simulación 3: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 4,2721 % | 4,2754 % | 4,2983 % |

Tabla 43. Técnica DC2C. Simulación 3: cálculo de errores relativos.

En la figura 77, observamos en el gráfico de las potencias transferidas por cada celda, como durante todo el proceso de equilibrado la suma de potencias (línea

morada) nunca es 0. Esto implica que parte de la energía transferida de las celdas más cargadas al inductor no se está transfiriendo de forma eficiente a las celdas menos cargadas en los tiempos de descarga de la bobina.

Realizamos una simulación con un time step más pequeño (E-06s) para analizar las corrientes en las celdas, en la bobina y condensador. Observamos lo que ocurre durante un periodo:

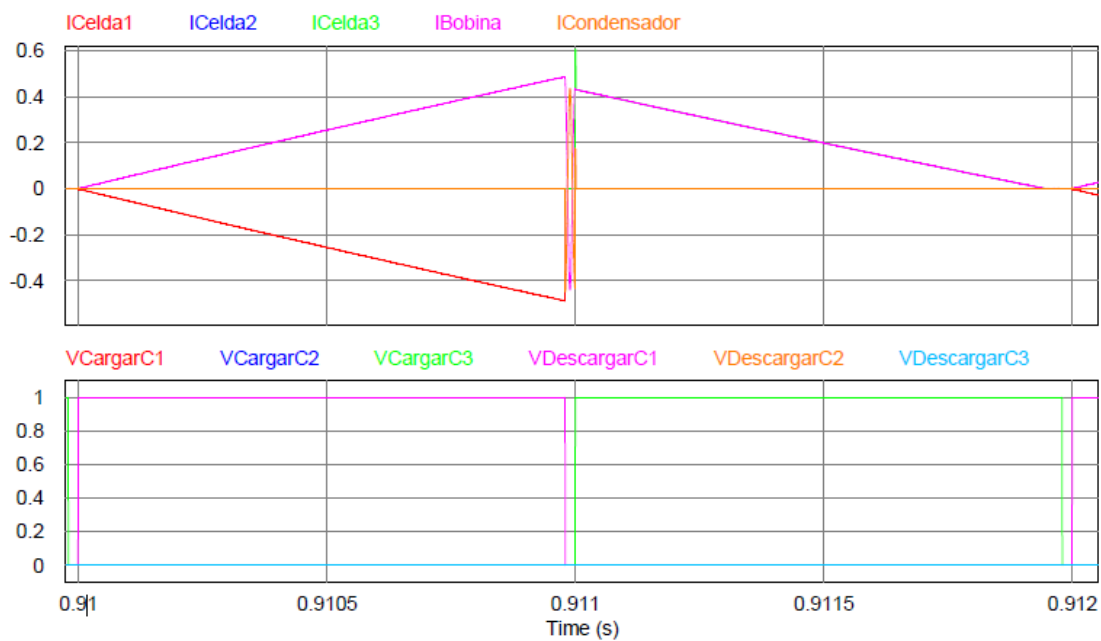


Figura 78. Técnica DC2C. Simulación 3: análisis de las corrientes.

El periodo comienza con la descarga de la celda 1, observamos como la corriente por la bobina aumenta a la vez que la corriente por la celda 1 decrece. No existe corriente por el condensador, por lo que la capacidad calculada es lo suficientemente pequeña.

Después de la descarga de la celda 1 hay un pequeño tiempo muerto. Ampliando la gráfica:

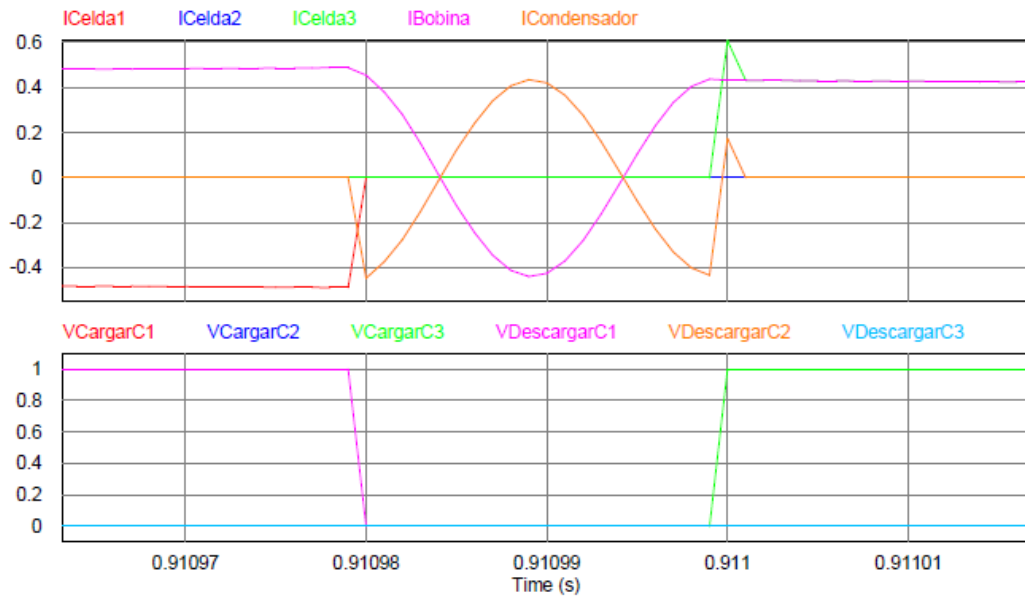


Figura 79. Técnica DC2C. Simulación 3: análisis de las corrientes durante el tiempo muerto.

La corriente muestra el comportamiento esperado, realizando un único ciclo. Este es el único momento en el que circula corriente por el condensador.

Después del tiempo muerto, se realiza la carga de la celda. Ampliando la gráfica de la figura 78:

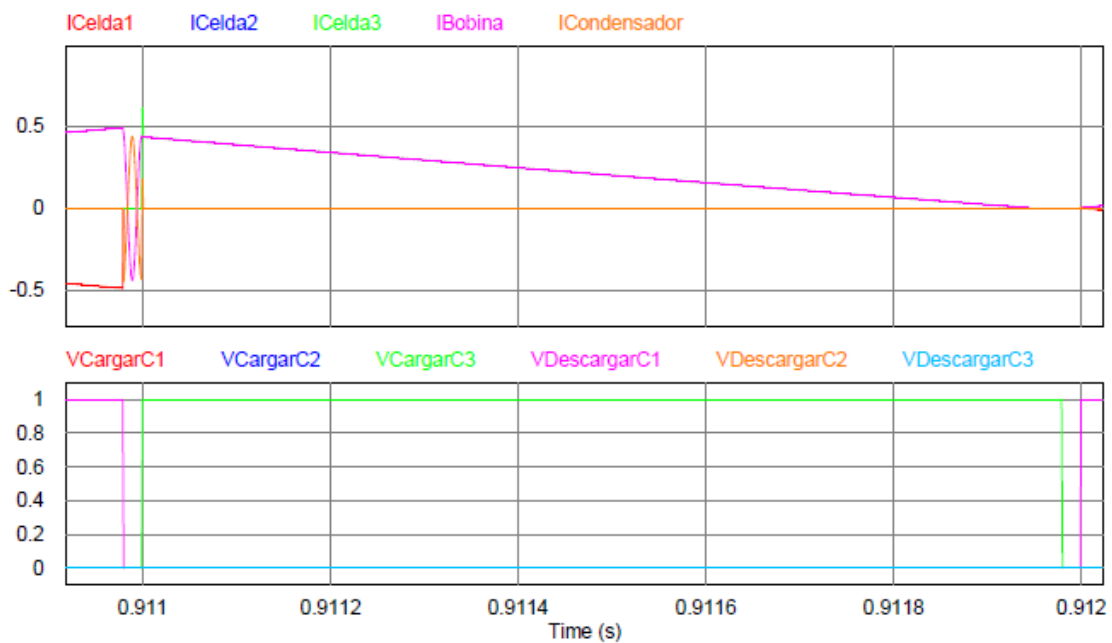


Figura 80. Técnica DC2C. Simulación 3: Análisis de las corrientes durante descarga de la bobina.

Se observa como cuando comienza la descarga de la bobina a la celda menos cargada (en este caso la 3), la corriente en la celda 3 aumenta rápidamente, mientras que la corriente por la bobina disminuye. La respuesta del sistema parece la adecuada, sin embargo, antes de que se termine el tiempo de carga de la celda, la corriente por la celda se hace cero. La bobina no puede aportar más energía a la celda por lo que existe un periodo de tiempo pequeño, que se suma al siguiente periodo de tiempo muerto en el que una pequeña corriente queda oscilando hasta el siguiente proceso de carga de la bobina. Gracias a la disposición de un diodo, la corriente que no se puede aportar a las celdas se queda oscilando en el circuito resonante, evitando que se invierta el sentido de la descarga y sea la celda 3 la que se descargue.

Esto se debe a que los ciclos de trabajo de las señales no se han dimensionado correctamente. De la ecuación 174 se deduce que no vamos a poder encontrar un valor fijo para los ciclos de trabajo con el que el ecualizado sea eficiente debido a que los valores de las tensiones y corrientes iniciales están variando durante todo el proceso.

Proponemos como optimización del circuito la generación de las señales de activación de los polos con ciclos de trabajo variables en el tiempo de ecualizado, en función a la relación entre la tensión de la celda que se va a descargar con la celda que se va a cargar. Es el mismo método con el que tratamos de optimizar el circuito AC2C sin resultados. Sin embargo, en este circuito sí que debería funcionar ya que solo se está realizando la carga o descarga de una celda en cada instante de conmutación.

5.2.1.Optimización del circuito DC2C. Modo de conducción continua en régimen permanente.

Hacemos uso de los desarrollos planteados sobre el modo de conducción continua en régimen permanente del anterior capítulo.

$$t1 = \frac{L(I2 - I1)}{Va} \quad (180)$$

$$t2 = \frac{L(I2 - I1)}{Vb} \quad (181)$$

$$D = \frac{\frac{L(I2-I1)}{Va}}{\frac{L(I2-I1)}{Va} + \frac{L(I2-I1)}{Vb}} = \frac{Vb}{Va + Vb} \quad (182)$$

Obtenidas las expresiones que permiten calcular el ciclo de servicio en tiempo de simulación procedemos a realizar la programación.

Programación

El bloque de programación es el siguiente:

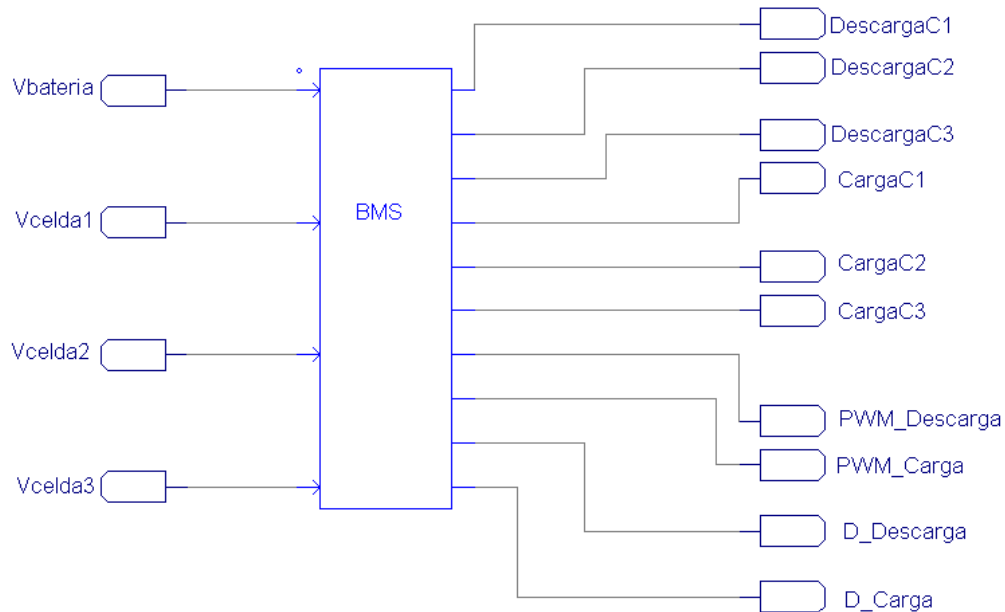


Figura 81. Técnica DC2C optimizada. Circuito de control.

Este bloque recibe 4 señales:

- **Vbatería:** la tensión de todo el pack en voltios.
- **Vcelda1:** estado de carga de la celda 1 en voltios.
- **Vcelda2:** estado de carga de la celda 2 en voltios.
- **Vcelda3:** estado de carga de la celda 3 en voltios.

A partir de estas entradas el bloque genera 10 salidas:

- **DescargaC1:** señal que indica que la celda 1 es la más cargada.
- **DescargaC2:** señal que indica que la celda 2 es la más cargada.
- **DescargaC3:** señal que indica que la celda 3 es la más cargada.
- **CargaC1:** señal que indica que la celda 1 es la menos cargada.
- **CargaC2:** señal que indica que la celda 2 es la menos cargada.

- **CargaC3**: señal que indica que la celda 3 es la menos cargada.
- **PWM_Descarga**: señal que genera los pulsos para realizar las descargas de las celdas.
- **PWM_Carga**: señal que genera los pulsos para realizar las cargas de las celdas.
- **D_Descarga**: representa el ciclo de servicio para el proceso de descarga de la celda.
- **D_Carga**: representa el ciclo de servicio para el proceso de carga de la celda.

Se ha programado el bloque para que en el momento en que todas las celdas se encuentren a la misma tensión con un error de $\pm 0,001V$ las señales de salida se desactiven y la ecualización finalice.

Las primeras seis señales de salida, que indican que celdas son las más y menos cargadas, activarán los polos de conmutación (DCn y Cn) en función de las señales PWM generadas en el propio bloque:

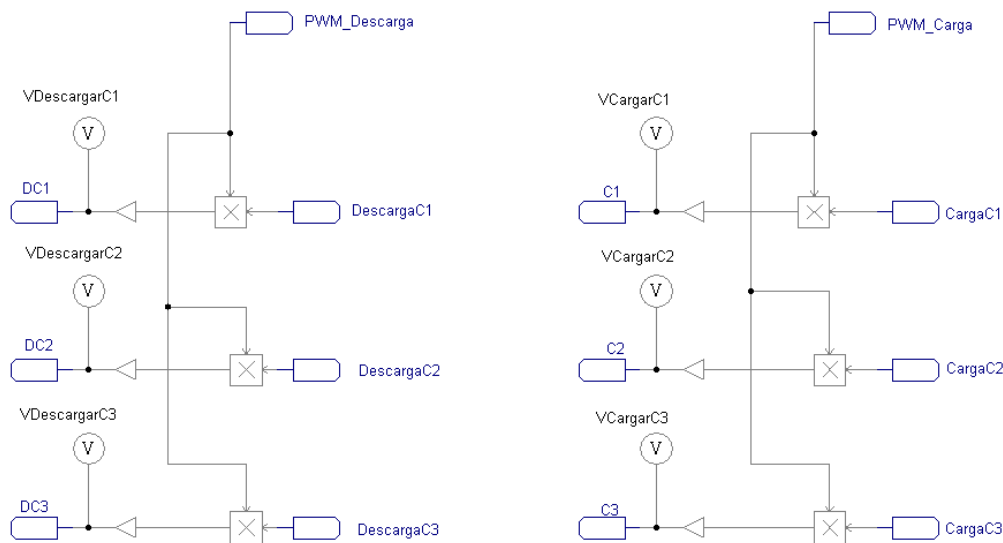


Figura 82. Técnica DC2C optimizada. Señales de activación de los polos.

Realizamos la misma simulación que la realizada con el sistema DC2C sin optimizar, pero con distinto valor de muestreo, en este caso es necesario ajustar el step time al mismo valor que el tiempo muerto de $20\mu s$, por lo tanto:

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------------------|
| Vcelda1=3,35V | Vcelda2=3,05V | Vcelda3=2,75V | Vmedia=3,05V | Step=2 10 ⁻⁵ |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------------------|

Tabla 44. Técnica DC2C optimizada. Condiciones de simulación.

Obtenemos los siguientes resultados:

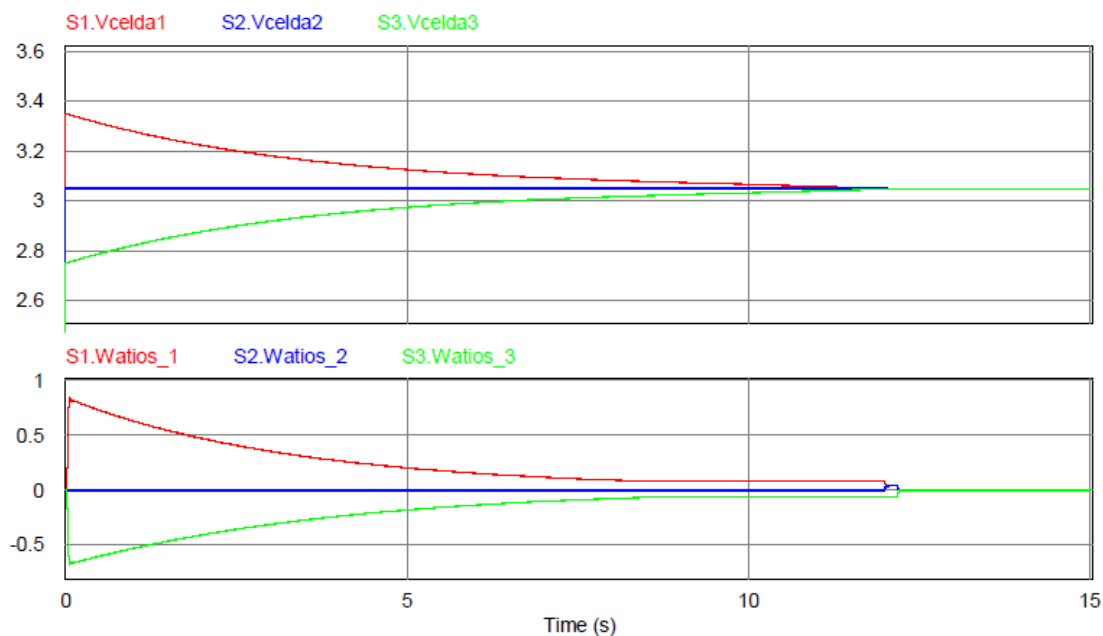


Figura 83. Técnica DC2P optimizada. Simulación 4. Tensiones de las celdas y potencias.

| Stop Time | Vcelda1 _{final} | Vcelda2 _{final} | Vcelda3 _{final} |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 12,19 s | 3,0492 V | 3,0492 V | 3,0482 V |

Tabla 45. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: Resultados.

Cálculo de errores:

- Error absoluto:

| | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| $e_{abs}(Vcelda1)$ | $e_{abs}(Vcelda2)$ | $e_{abs}(Vcelda3)$ |
| $8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ | $8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ | $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ V}$ |

Tabla 46. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: cálculo de errores absolutos.

- Error relativo:

| $e_{rel}(Vcelda1)$ | $e_{rel}(Vcelda2)$ | $e_{rel}(Vcelda3)$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,0262 % | 0,0262 % | 0,0590 % |

Tabla 47. Técnica DC2C optimizada. Simulación 4: cálculo de errores relativos.

Obtenemos unos resultados excepcionales en un tiempo menor que en el sistema sin optimizar.

En la figura 83, observamos en el gráfico de las potencias transferidas por cada celda, como durante prácticamente todo el proceso de equilibrado toda la energía que se extrae de las celdas más cargadas se transfiere a las de menor carga. Esto implica que se está haciendo el trasvase de energía entre celdas de forma muy eficiente y prácticamente se consigue alcanzar el valor medio de la tensión en todas las celdas.

Comparando las tablas de los errores relativos cometidos (43 y 47) podemos calcular la mejora obtenida:

| Vcelda1 | Vcelda2 | Vcelda3 |
|---------|---------|---------|
| 99.38 % | 99.38 % | 98.62 % |

Se ha reducido el error respecto del primer sistema casi en un 99% en todas las celdas.

6. Conclusiones

Finalizado el presente trabajo, podemos confirmar que se ha alcanzado el objetivo principal: análisis y comparativa de dos sistemas de equilibrado de celdas basados en la conmutación de condensadores e inductancias entre celdas adyacentes (AC2C). Para ello ha sido necesario el desarrollo de un circuito que implementa la técnica basada en los inductores. Tras su estudio, diseño y desarrollo, se realizó la comparativa con el circuito de condensadores y podemos concluir con que:

- El sistema mediante condensadores presenta un funcionamiento mucho mejor respecto al de inductancias en la técnica basada en la conmutación entre celdas adyacentes. Esta importante mejora se debe a que los condensadores funcionan como fuente de tensión. Como la tensión de las celdas depende fuertemente de la carga de estas, el proceso de equilibrado se realiza de forma inherente sin necesidad de ningún tipo de control ni de periodos diferenciados para realizar las cargas y descargas.
- El sistema basado en inductancias en cambio se comporta como una fuente de corriente, por lo que sí que es necesario hacer esa diferenciación. Debido a esta estructura de transferencia de energía, en la que siempre se descargan unas celdas y luego se cargan sus adyacentes, la eficiencia del equilibrado se ve altamente reducida. Esto se debe a que las celdas de menor carga de todo el pack serán descargadas al igual que las de mayor carga del pack, no favoreciendo la transferencia de energía de las celdas más cargadas a las menos cargadas.
- En términos de costes, el sistema de condensadores necesita 8 polos bidireccionales, mientras que el de inductores necesita 8 unidireccionales, por lo que el circuito de la técnica basada en condensadores ocupará más tamaño y tendrá un coste mayor debido a que necesita el doble de polos.

Así mismo, en este trabajo se han desarrollado otras dos técnicas de equilibrado basadas en la conmutación de un inductor que implementan dos estrategias de transferencia de energía conocidas como "C2P" y "C2C". Estas técnicas han requerido de un control más complejo que el desarrollado en la técnica "AC2C". Al dotar de inteligencia al circuito se han obtenido dos sistemas válidos para la ecuilización de celdas de baterías mediante la utilización de inductores.

Cabe destacar que la técnica "C2C" ha obtenido unos resultados excepcionales tras la incorporación del concepto de ciclo de servicio, el cual permite variar de forma activa los periodos de carga y descarga de las celdas. Consideramos pues,

que esta técnica si es competitiva para su uso en los sistemas BMS y aconsejamos su utilización.

Consideramos las siguientes líneas de trabajo futuro:

- 1.- Comparar las técnicas C2C utilizando condensadores o inductancias.
- 2.-Realizar un prototipo hardware con las técnicas C2C propuestas en este TFG basadas en inductancias.
- 3.- Diseñar nuevas estrategias de control y/o estructuras que aprovechen las ventajas de sistemas mixtos con condensadores e inductancias.

7. Bibliografía

- [1] Wikipedia. [En línea]. Available:]:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_\(electricidad\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_(electricidad)). [Último acceso: 28 Junio 2022].
- [2] «Battery university,» [En línea]. Available:
<https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>. [Último acceso: 29 Junio 2022].
- [3] «EV expert,» [En línea]. Available: <https://www.evexpert.es/eshop1/centro-de-conocimiento/sistema-de-gestion-de-baterias>. [Último acceso: 10 Julio 2022].
- [4] B. Luca, «International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC),» 2016.
- [5] P. S. K. S. T. M. Y. I. I. S. M. E. J. M. S. A. S. Uptal Kumar, «Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review,» *ScienceDirect*, 2020.
- [6] Z. F. J. C. Jonathan Carter, «Cell equalisation circuits: A review,» *ScienceDirect*, 2020.
- [7] A. B. Salamanca, «Trabajo de Fin de Grado "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",» 2018.
- [8] Á. R. Blanco, «Bachelor Paper "AN EFFICIENT CELL BALANCING METHOD FOR LiFePO₄ BATTERIES BASED ON INDUCTORS",» *Universidad de ciencias aplicadas de Viena*, 2021.
- [9] G. C. Galindo, «Trabajo de Fin de Garado" IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO BALANCEADOR PARA BATERÍAS LIFEPO₄ BASADO EN CONMUTACIÓN DE CONDENSADORES.",» *Universidad de Valladolid*, 2021.
- [10] «Electrontools,» [En línea]. Available:
<https://www.electrontools.com/Home/WP/que-es-el-duty-cycle-o-ciclo-de-trabajo/>. [Último acceso: Julio 6 2022].
- [11] «Risoul,» [En línea]. Available: <https://www.risoul.com.mx/blog/fenomeno-de-arco-electrico-y-como-estar-protegido-contrasus-catastroficos->

