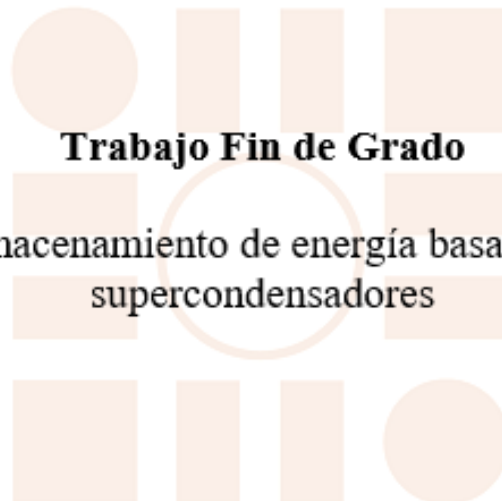


Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones



**Trabajo Fin de Grado**

Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y  
supercondensadores

ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Álvaro Cortés Sánchez-Migallón

**Tutor/es:** Dr. Emilio José Bueno Peña



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**Grado en Ingeniería Electrónica de  
Comunicaciones**

Trabajo Fin de Grado

*Estudio de sistemas de almacenamiento de energía  
basados en baterías y supercondensadores*

**Autor:** Álvaro Cortés Sánchez-Migallón

Director/es: Emilio José Bueno Peña

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** Pedro Martín Sánchez

**Vocal 1º:** Felipe Espinosa Zapata

**Vocal 2º:** Emilio José Bueno Peña

**CALIFICACIÓN:** .....

**FECHA:** .....







*La vida es lo que pasa mientras esperas a que algo ocurra.*

*A mi familia, mis amigos y todas esas personas que  
me han ayudado a ser la persona que soy hoy.*









# Índice de contenidos

Resumen.....	1
Abstract.....	3
1. Introducción a los sistemas de almacenamiento de energía .....	9
1.1 Sistemas de almacenamiento por sistemas de bombeo hidráulico (Pumped Hydro Storage) .....	10
1.2 Sistemas de almacenamiento basados en aire comprimido (Compressed Air Storage) .....	11
1.3 Sistemas de almacenamiento basados en volantes de inercia (flywheel) 12	
1.4 Sistemas de almacenamiento basados en Superconductores Magnéticos.....	13
1.5 Sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores .....	14
1.6 Sistemas de almacenamiento basados en baterías de flujo .....	16
2. Sistemas de almacenamiento de Energía .....	19
2.1 Sistemas de almacenamiento de energía basados en Baterías. ....	19
2.2 Sistemas de almacenamiento de energía basados en supercondensadores.....	23
3 Simulación de sistemas basados en baterías.....	27
3.1 Simulación de recta de descarga. ....	34
3.2 Simulación de ciclo de descarga-carga de la batería.....	37
3.3 Simulación de un ciclo de carga y descarga de un sistema completo de 16 celdas.....	41
3.4 Simulación y cálculo del rendimiento de una Batería .....	43
3.5 Comparación con el sistema real .....	44
4. Simulación de un Supercondensador .....	47
4.1 Simulación de una recta de descarga .....	53
4.2 Simulación de un ciclo de carga-descarga.....	57
4.3 Simulación de un ciclo de carga y descarga para una batería de Supercondensadores .....	59
4.4 Comparación con el sistema real .....	61
5. Diseño del sistema de control para el DC/DC.....	65
5.1 Modelado de ecuaciones la planta del sistema.....	69

5.2	Linealización de las ecuaciones de la planta .....	72
5.3	Obtención de los modelos de planta .....	75
5.4	Diseño del controlador .....	78
5.5	Diseño de la perturbación sobre la carga.....	85
6.	Comparativa de sistemas de almacenamiento híbrido y sistemas de almacenamiento único. ....	89
6.1	Efectos en la alimentación .....	93
6.2	Efecto sobre el ciclo de trabajo .....	97
6.3	Efecto sobre la carga .....	99
7.	Conclusiones .....	105
Anexo	.....	109
Script - 1	.....	109
Script – 2	.....	110
Bibliografía	.....	115
Presupuesto	.....	117

# Índice de figuras

<i>Figura 1 - Curva de demanda de energía en España. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2 – Modelo genérico de sistema de aire comprimido. ....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3– Volante de inercia seccionado para observar su composición.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4– Modelo de sistema basado en Superconductores .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5–Agrupación de supercondensadores con controladores de tensión. 15</i>	
<i>Figura 6 – Modelo teórico de baterías de flujo .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 – Esquema que nos relaciona la relación potencia peso en función de la relación potencia volumen de cada tipo de batería .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8 – Referencia de densidad de energía de los supercondensadores respecto a otros sistemas de almacenamiento de energía .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9 – Esquema de supercondensador .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10 – Modelo de batería con sus características.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11 – Curvas de tensión e intensidad en función del ratio de descarga .</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12 – Estructura interna simplificada del modelo de batería.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13 – Estructura interna del modelo matemático de batería.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14 – Modelado matemático de la curva exponencial en función de la electroquímica seleccionada.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15 – Modelado matemático de la curva de descarga en función de la electroquímica seleccionada.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16 – Modelo del circuito de descarga controlada de una batería. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17 – Curvas de SoC (State of Charge), Intensidad de descarga y Tensión en bornes de la batería.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18- Curvas de SoC (State of Charge), Intensidad de descarga y Tensión en bornes de la batería a diversos ratios de descarga.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19 – Modelo del circuito de carga y descarga de una batería.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la batería en un ciclo de carga y descarga.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la batería en un ciclo de carga y descarga con distinto ratios de carga-descarga.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22 – Parámetros de la batería para la simulación de una agrupación de baterías .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la agrupación de baterías en un ciclo de carga y descarga .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24 – Esquema de bloques del cálculo del rendimiento de la batería ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25 – Curvas de descarga del supercondensador.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26 – Rectas de descarga del modelo de batería proporcionado por Simulink.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27 – Modelo de Supercondensador y parámetros internos del modelo</i>	<i>47</i>

<i>Figura 28 – Modelo matemático simplificado de un Supercondensador .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29 – Modelo matemático de un Supercondensador.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 30 – Modelado matemático de la tensión y carga en función de la carga .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31 – Modelo matemático de la curva de descarga de función de la variación de la intensidad.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32 – Circuito de autodescarga de un Supercondensador .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 33 – Curvas de autodescarga de Supercondensador .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34 – Modelo teórico del Supercondensador.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35 – Circuito de comparación de modelos teórico y real.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 36 – Rectas de descarga real y teórica del Supercondensador.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37 – Circuitos para ciclo de carga y descarga del supercondensador ..</i>	<i>57</i>
<i>Figura 38 – Gráficas de estado de carga, intensidad, tensión y potencia .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39 – Configuración para la batería de 18 Supercondensadores .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40 – Señales sobre el supercondensador .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 41 – Tensión e intensidad sobre los bornes de la batería de 18 supercondensadores.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 42 – Comportamiento de la señal de tensión respecto a la de intensidad en supercondensador real.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 43 – Señal de entrada.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 44 – Sistema de comparación de supercondensadores.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 45 – Tensión e Intensidad en el modelo matemático de supercondensador.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 46 - Tensión e Intensidad en el modelo Simulink de supercondensador .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 47 – Sistema Elevador DC/DC alimentado por baterías .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 48 – Subsistema de Alimentación .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 49 – Modelo de Elevador .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 50 – Intensidad a través de la Inductancia (Izquierda) e Intensidad a través de la Carga en relación con la que atraviesa la inductancia (Derecha). 67</i>	<i>67</i>
<i>Figura 51 – Subsistema de Perturbación de la intensidad sobre la carga.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 52 – Sistema Elevador DC/DC Controlado .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 53 – Modelo teórico convertidor Boost bidireccional en corriente .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 54 – Modelo teórico simplificado de convertidor Boost, S1 corte S2 activo <math>u(t)=0</math> .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 55 - Modelo teórico simplificado de convertidor Boost, S1 corte S2 activo <math>u(t)=1</math>.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 56 – Estructura de control .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 57 – Estructura interna del controlador PID .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 58 – Módulo PID Controller.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 59 – Modelo de control de la planta en función de la tensión de salida y el ciclo de trabajo .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 60 – Pantalla de configuración del bloque PID Controller .....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 61 – Imagen de la respuesta temporal de la combinación del controlador en serie a la planta del sistema .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 62 – Respuesta temporal del modelo de sistema .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 63 – Respuesta temporal de la tensión sobre la carga en el sistema real .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 64 – Rizado de tensión estable en la carga .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 65 – Subsistema de perturbación en la carga .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 66 – Señal de perturbación en Potencia (verde), Intensidad(azul) y Tensión (rojo) sobre la carga.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 67 – Señal de perturbación en Potencia, Intensidad y Tensión sobre la carga. ....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 68 – Modelo lineal de cálculo de control de tensión.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 69 – Sistema de control de tensión para el módulo de baterías.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 70 – Sistema de control de la intensidad en Supercondensadores.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 71 – Sistema de Control de la tensión y control de perturbaciones .....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 72 – Efecto de la perturbación sobre las tensiones de alimentación.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 73 – Efecto de la perturbación sobre las tensiones de alimentación.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 74 – Efecto de la perturbación sobre las intensidades de alimentación</i>	<i>94</i>
<i>Figura 75 – Efecto de la perturbación sobre las intensidades de alimentación</i>	<i>94</i>
<i>Figura 76 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 77 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 78 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 79 – Efecto de la perturbación sobre el ciclo de trabajo.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 80 – Efecto de la perturbación sobre el ciclo de trabajo.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 81 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 82 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 83 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 84 – Intensidad de perturbación sobre la carga .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 85 – Intensidad de perturbación sobre la carga .....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 86 – Intensidad de perturbación sobre la carga .....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 87 – Intensidad de perturbación sobre la carga .....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 88 – Intensidad de perturbación sobre la carga .....</i>	<i>102</i>









## Resumen

El presente trabajo aporta una visión de los sistemas utilizados en la actualidad, haciendo hincapié en los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, Baterías y Supercondensadores, mostrando simulaciones de su uso y cálculos de eficiencia. Se han utilizado los modelos aportados con Matlab Simulink 2015 para el modelado de este tipo de sistemas.

Por último, se ha diseñado un sistema de control de un DC/DC que nos permite observar y verificar la mejora de los sistemas de alimentación híbridos respecto a los de alimentación única.



## Abstract

The present work provides a generic view regarding the various energy storage system currently used, with emphasis on electrical energy storage systems, batteries and ultracaps, showing with Matlab Simulink 2015 for modeling of this type of systems, also provides a comparison between the theoretical models and the real ones that are available to us in the market.

Finally, a control system of a DC/DC has been designed that allows us to observe and verify the importance of the hybrid power systems compared to the current ones seeing the improvement thanks to the combination of both.



## Resumen extendido.

Los Sistemas de Almacenamiento de energía representan una gran oportunidad para gestionar la energía e integrar sistemas de generación de energía poco estables, como pueden ser los sistemas de generación de energía basados en energía Eólica o Solar, estabilizando y controlando el flujo de energía para poder realizar un suministro regulado de la misma.

Gracias a los avances producidos por la investigación se está produciendo un aumento de la densidad y cantidades de energía que somos capaces de almacenar y transferir, aumentando su eficiencia haciéndolos más aptos para el uso industrial y cotidiano.

Es importante tener en cuenta el efecto que producen los avances en este campo de investigación, desde la regulación de las energías renovables, hasta el uso en sistemas más portables como puede ser el coche eléctrico, al ser el almacenamiento de energía y el tiempo de carga de estas baterías, una de las mayores problemáticas respecto a la eficiencia de los actuales modelos.

Estos sistemas de almacenamiento están diseñados para una gran variedad de potencias, desde aplicación industriales o utilización en grandes sistemas de generación de energía como campos eólicos o solares hasta en aplicaciones ideadas para una generación y consumo más centrado en la alimentación de viviendas individuales, con una perspectiva de mejora de la eficiencia para la disminución de pérdidas y la reducción de generación de energía.

El presente trabajo aporta una visión genérica respecto a los diversos sistemas de almacenamiento de energía utilizados en la actualidad, haciendo hincapié en los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, Baterías y Supercondensadores, mostrando simulaciones de su uso y cálculos de eficiencia.

Se han utilizado los modelos aportados con Matlab Simulink 2015 para el modelado de este tipo de sistemas. También se aporta una comparativa entre los modelos teóricos y los reales que se encuentran a nuestra disposición en el mercado.

Por último, se ha diseñado un sistema de control de un DC/DC que nos permite observar y verificar la importancia de los sistemas de alimentación híbridos respecto a los actuales viendo la mejora gracias a la combinación de ambos.





***Palabras clave: Almacenamiento de energía, Batería, Supercondensador, Simulink, Control.***

***Keywords: Energy storage, Battery, Ultracapacitors, Simulink, Control.***



# 1. Introducción a los sistemas de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es un concepto necesario desde el comienzo de la sociedad, pero recientemente el panorama eléctrico ha cambiado con lo que han surgido nuevos sistemas de generación, transporte y distribución de energía. Tradicionalmente las necesidades de almacenamiento energético se han cubierto con almacenamiento de combustible fósil destinado a las centrales de generación de energía y con los sistemas de almacenamiento hidráulicos.

Actualmente el panorama eléctrico tiene un mayor porcentaje de crecimiento y utilización de las energías renovables en especial la eólica y la solar, aunque estas formas de generación de energía son sostenibles tienen la dificultad de suministrar la energía de forma estable y constante bajo unas normas específicas de cada país.

Uno de los aspectos menos deseables que tienen estas energías es que no son controlables en el aspecto en que son de generación intermitente, en la eólica hay distintas rachas de viento, de forma que no siempre se pueden aprovechar los recursos disponibles, al igual que en la solar no se consigue el mismo brillo o intensidad y por las noches en las que no se puede aprovechar, por lo que hay que mejorar el rendimiento del almacenamiento de energía para poder suministrar la energía de forma regular a la red eléctrica.

Por la mejora de la estabilidad de la red, hay una gran demanda de instalaciones de almacenamiento de energía por lo que ha cambiado la arquitectura y la capacidad de controlar la red, haciendo necesarias redes de transporte de energía inteligentes y eficaces. Estas redes necesitan almacenar energía en lugares y momentos adecuados para evitar desperdiciar energía y mantener la estabilidad de la red.

La energía proporcionada por los sistemas de almacenamiento necesita estar regulada en frecuencia y amplitud, tener calidad, continuidad y seguridad de servicio marcadas por normativas de la RRE (Marco regulatorio de la red eléctrica de España).

Las tecnologías de almacenamiento de energía que más importancia tienen en la actualidad y por lo tanto más relevancia tienen son los sistemas de almacenamiento en baterías, variando la electroquímica, en función de la necesidad de almacenamiento y el uso de la energía, sistemas de bombeo hidráulico, el almacenamiento en sistemas de aire comprimido, sistemas basados en Hidrogeno, en baterías de flujo, volantes de inercia,

supercondensadores y superconductores magnéticos, a continuación se explica en más detalle el funcionamiento y utilidad de cada uno de estos sistemas.

## 1.1 Sistemas de almacenamiento por sistemas de bombeo hidráulico (Pumped Hydro Storage)

Los sistemas de almacenamiento de energía por sistemas de bombeo hidráulico aparecen principalmente en centrales hidroeléctricas reversibles, son sistemas de alta densidad de energía. El principio físico de esta tecnología de almacenamiento de energía es la transformación de la energía eléctrica que almacena de la red eléctrica en energía potencial, a través del bombeo de agua desde un punto de menor altura a otro de mayor altura, aumentando así su energía potencial de forma que se pueda utilizar en otro momento esta masa de agua para generar energía eléctrica.

El bombeo se produce en los momentos de menor demanda de energía a la red eléctrica, como puede ser el periodo desde las 23:00 a las 8:00 almacenando la energía evitando ser desperdiciada o quemada, pudiendo generar electricidad en momentos de mayor demanda de energía como sería de 8:00 a 23:00, en la *Figura 1* se observa la demanda de energía de la red eléctrica española.

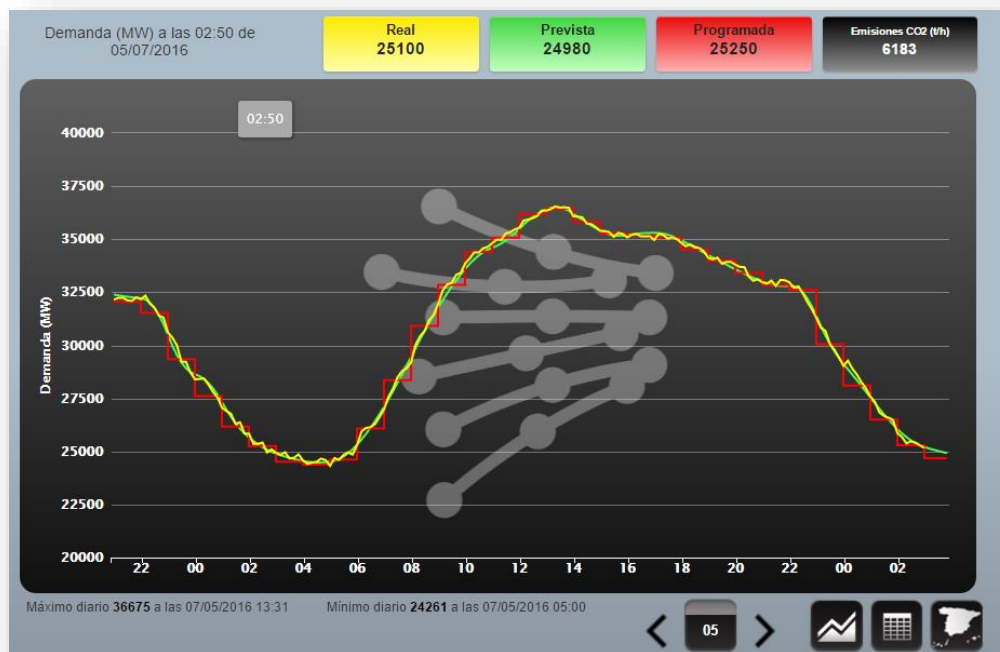


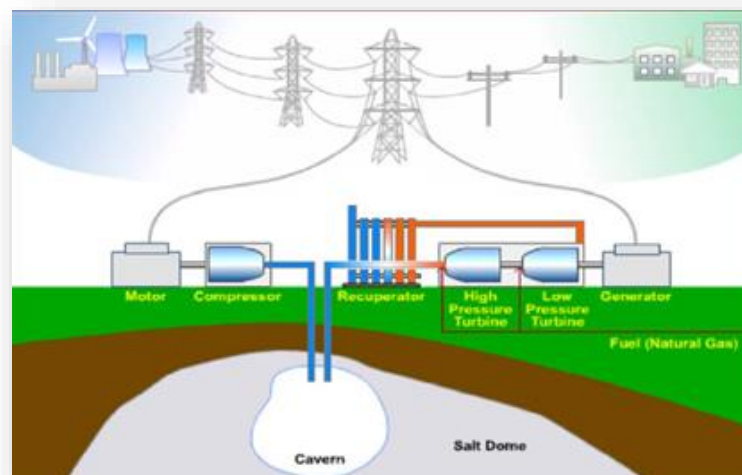
Figura 1 - Curva de demanda de energía en España.

Estos sistemas son capaces de almacenar una gran cantidad de energía, por lo que ayudan a controlar variaciones en problemas en la red eléctrica como subtensiones, sobretensiones, la aparición de eventos transitorios, desbalanceo de la red o interrupciones de la misma, al tener la capacidad de generar decenas de Gigavatios en cortos periodos de tiempo.

## 1.2 Sistemas de almacenamiento basados en aire comprimido (Compressed Air Storage)

Los sistemas de Almacenamiento de aire comprimido están basados en turbinas de gas convencionales, estos sistemas tienen un gran rango energético de actuación en función del uso que se le proporcionará. En los que se utilizan para la red eléctrica el aire comprimido se almacena en tanques bajo tierra, o en instalaciones subterráneas.

En los momentos que se requiere inyectar energía a la red eléctrica, el aire comprimido almacenado en los tanques subterráneos o cuevas, es calentado expandiéndose y aumentando su volumen en turbinas de alta y baja presión que transforman la energía cinética del aire en energía eléctrica.



*Figura 2 – Modelo genérico de sistema de aire comprimido.*

En la *Figura 2* se puede ver la estructura simplificada del modelo de sistema de almacenamiento de aire comprimido, el principio físico de esta técnica es la transformación de la energía eléctrica en presión, que se utilizan en momentos de mayor demanda o necesidad para obtener energía eléctrica.

Al detectar baja demanda de energía de la red estos sistemas almacenan energía enfriando el aire y almacenándolo en los tanques de aire.

Estos sistemas se consideran de largo plazo por la lenta descompresión del aire, pueden llegar a competir con los sistemas hidráulicos, una ventaja respecto a los hidráulicos es que no provocan un cambio geográfico en el medio, pudiendo ser instalados en localizaciones más variadas.

### 1.3 Sistemas de almacenamiento basados en volantes de inercia (flywheel)

El volante de inercia es un sistema de almacenamiento de energía cinética, consiste en una masa rotativa sobre rodamientos magnéticos evitando pérdidas de energía por fricción.

Entre el volante y el soporte, se coloca en una cavidad de vacío que permite eliminar la resistencia aerodinámica, el volante gira a gran velocidad, estando conectado a una máquina eléctrica.

La máquina eléctrica a la que es conectado el volante de inercia tiene dos modos básicos de trabajo, puede trabajar como generador o como motor eléctrico, al trabajar como generador nuestro sistema suministra energía, transformando la energía cinética del volante en energía eléctrica y suministrándola a la red.

Al trabajar como máquina eléctrica absorbe energía de la red transformándola en energía cinética aumentando la velocidad en el volante, la energía almacenada en este sistema depende de la masa del volante por lo que a más masa tenga más energía será capaz de almacenar.

Para este tipo de sistema de almacenamiento de energía se utilizan materiales inertes, por lo que tiene una larga vida, con decenas de miles de ciclos de uso por lo que si trata de un sistema limpio y poco contaminante de almacenamiento de energía.



*Figura 3 – Volante de inercia seccionado para observar su composición*

Sin embargo, tiene un límite de potencia de pico por la energía almacenada en el volante y la rápida velocidad de autodescarga, además, precisa de un sistema complejo de control y muchos componentes como convertidores AC/DC, refrigeración, bomba de vacío etc. que aumenta el peso del equipo y disminuye la densidad de energía real.

#### 1.4 Sistemas de almacenamiento basados en Superconductores Magnéticos

Este sistema está basado en una tecnología reciente y aún en desarrollo, se basa en el almacenamiento de energía a través de un campo magnético, el campo magnético se consigue gracias a una corriente continua a través de una bobina muy grande creada con un material superconductor, disminuyendo la resistencia del mismo mejorando el rendimiento.

La bobina se almacena a muy baja temperatura, entre 3 y 50 °K, esto le permite reducir la resistencia del superconductor, el enfriamiento del material se consigue gracias a baños de nitrógeno o helio líquido, aun siendo métodos de enfriamiento energéticamente costosos requieren mucha menos cantidad de energía de la que puede almacenar el sistema llegando a alcanzar grandes rendimientos de hasta un 90%.

El enfriamiento nos permite aumentar sensiblemente la intensidad de corriente que lo atraviesa, llegando a circular alta intensidad de corriente, sabiendo que la energía almacenada responde de forma cuadrática respecto a

la intensidad que atraviesa la bobina por el valor de su inductancia se trata de una característica muy importante.

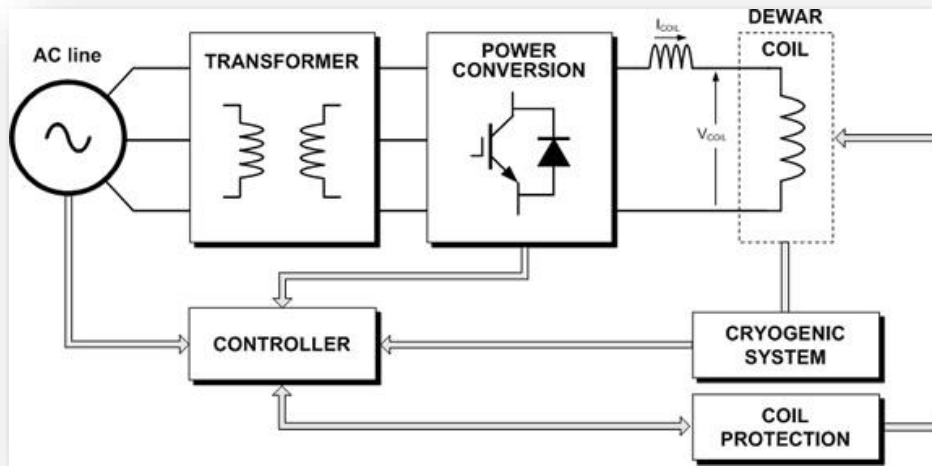


Figura 4 – Modelo de sistema basado en Superconductores

Con estos sistemas se puede llegar a trabajar con densidades energéticas de hasta  $40 \text{ MJ}/\text{m}^3$  lo que nos indica que está por encima del resto de tecnologías siendo una tecnología muy importante

La corriente que crea el campo magnético es inyectada por un convertidor de electrónica de potencia, general mente como fuente de tensión, pudiendo inyectar hasta 250kW en 20ms.

Al tratarse de un sistema creado con componentes inertes se trata de un sistema limpio que tiene un tiempo de vida muy elevado, siendo su principal desventaja la importante inversión inicial para su construcción, estimado, en función de su densidad de energía entre 1000 y 10000 €/kW.

## 1.5 Sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores

La base de este tipo de sistemas son lo ultracondensadores o condensadores de doble capa, al igual que las baterías están basados en células electroquímicas con dos electrodos, un electrolito y una membrana porosa a través de la cual se transportan los iones, la diferencia respecto a las baterías es que en los electrolitos de los supercondensadores no hay reacciones redox, ya que la tensión de operación es menor.



La energía almacenada en estos supercondensadores es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada siguiendo la fórmula de  $E = \frac{1}{2} * C * V^2$ , estos supercondensadores llegan a alcanzar valores de hasta 5kF, el inconveniente principal que tienen es su tensión de operación que ronda tensiones cercanas a los 3.5V.

En estos sistemas encontramos la interconexión de distintos supercondensadores en serie para poder formar un sistema de mayor tensión de operación estando repartida entre los distintos supercondensadores.



*Figura 5 –Agrupación de supercondensadores con controladores de tensión*

Se trata de elementos con muy pequeña resistencia interna por lo que su constante de tiempo de descarga es muy pequeña haciendo de estos sistemas unos de los más rápidos, pudiendo alcanzar densidades de energía decenas de veces mayores que los que nos pueden aportar las baterías, el inconveniente principal de tener una baja constante temporal es que tienden a descargarse rápidamente.

La aplicación principal para este tipo de sistema de almacenamiento de energía son sistemas para los que se necesite rápida respuesta y grandes cantidades de potencia, su tiempo de vida varía mucho en función de las condiciones de trabajo, es decir, en función de la temperatura y del número de ciclos de vida del elemento.

Estos sistemas requieren sistemas electrónicos de control complejos capaces de controlar la tensión sobre cada uno de los supercondensadores internos de forma que se mantenga una tensión estable, los precios en estos sistemas son mayores que los de las baterías, pero están disminuyendo gracias a su constante proceso de desarrollo y comercialización.

## 1.6 Sistemas de almacenamiento basados en baterías de flujo

Una batería de flujo es un sistema recargable en el que el electrolito que contiene una o más especies electro-activas, fluye a través de la celda electroquímica en la cual se convierte la energía química en eléctrica, se puede almacenar el electrolito en tanques externos desde los que es bombeado dentro de las celdas o stacks.

Se trata de baterías que se recargan rápidamente sustituyendo el electrolito o revirtiendo la reacción redox, por lo que el valor de la densidad de energía del sistema es proporcional a la cantidad de electrolito que seamos capaces de almacenar en el tanque y del tamaño del stack, los dos tipos de baterías de flujo comerciales, de Vanadio y de Zinc-Bromo.

Las baterías de Vanadio emplean pares de redox de vanadio en mezclas diluidas con ácido sulfúrico eliminando el problema de la contaminación por difusión de iones de un lado de la membrana, lo que hace que la vida útil del electrolito sea prácticamente infinita, por esto y por la configuración y operación del sistema se trata de una de las tecnologías de mayor proyección de la actualidad.

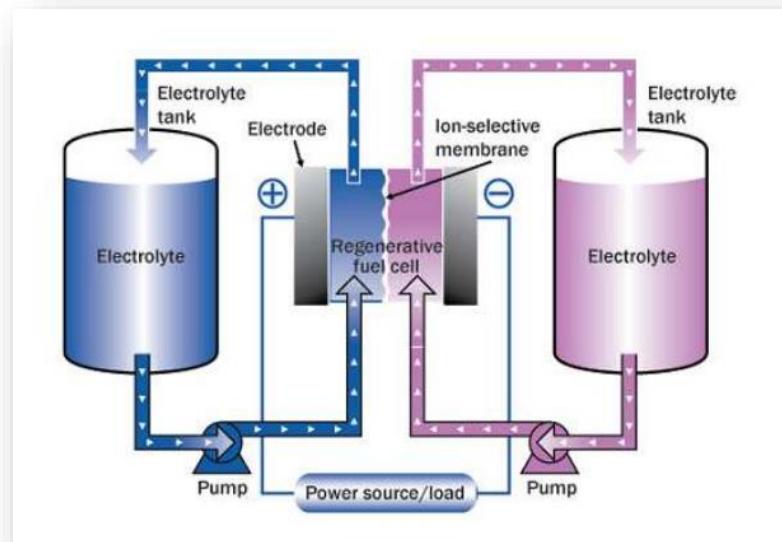


Figura 6 – Modelo teórico de baterías de flujo

Tienen una gran rapidez de respuesta de carga descarga pudiendo utilizarse en la solución de huecos de tensión y calidad de la energía, pudiendo

responder en un milisegundo y duplicar su potencia nominal durante periodos de minutos, no existen condiciones especiales de carga por que el electrolito de suministra a cada semi-celda, sin embargo, el manejo es muy seguro por lo que la temperatura de operación es la ambiente.

Las desventajas residen en la baja densidad de energía de cada celda por separado, de aproximadamente 1,2V, por lo que es necesaria la interconexión de muchas celdas, las limitaciones aparecen al tener que controlar grandes volúmenes de electrolito con bombas ya que el control es complejo y costoso.



## 2. Sistemas de almacenamiento de Energía

### 2.1 Sistemas de almacenamiento de energía basados en Baterías.

Las baterías son sistemas de almacenamiento de energía eléctrica basados en reacciones electroquímicas de reducción-oxidación que en función de la tecnología o materiales utilizados devuelve casi en su totalidad la energía eléctrica almacenada.

El ciclo de carga-descarga es un proceso de vida limitada por lo que se pierde eficiencia en función del número de ciclos y con ello la vida útil de la batería, se trata de un generador de electricidad constante con necesidad de un proceso previo de carga.

El funcionamiento de la batería está basado en un proceso químico reversible (reacciones REDOX, reducción-oxidación) en el que sus componentes no son consumidos ni perdidos, sino que se transforman para poder volver a transformarse químicamente en el momento que sea necesario.

Al conectar una batería a un circuito aporta la intensidad de corriente requerida por el circuito externo de forma constante hasta un máximo definido por las características de la batería mientras esté cargada, absorbiendo corriente eléctrica si se produce un proceso de carga.

La batería está compuesta de tres elementos básicos, el ánodo, terminal de menor potencial eléctrico, el cátodo, el terminal de mayor potencial eléctrico y el electrolito, que es el elemento que permite el paso de los electrones de un terminal a otro, a medida que se extrae la corriente comienza a circular desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito.

Las baterías actuales y de gran capacidad como las que se utilizan en los sistemas de almacenamiento de energía, están compuestas de distintos módulos de baterías, electrolitos, colocados en serie y paralelo formando una red para aumentar la tensión que soportan y la intensidad de corriente máxima que pueden ofrecer.

Existen distintos tipos de baterías según la electroquímica de la que estén compuestas, siendo específicos en algunos casos sus campos de aplicación, las electroquímicas más importantes son: baterías de Ácido Plomo, níquel-cadmio (NiCd), sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), níquel-metal hidruro (NiMH), Ion-litio, baterías de sal fundida (zebra).

Las aplicaciones en las que nos centramos serán sobre todo las que requieren una alta densidad de energía como puede ser almacenamiento para la regulación de la energía entrante a la red eléctrica o la energía suministrada a vehículos híbridos, completamente eléctricos.

- Baterías de Ácido Plomo

Se trata de la tecnología más antigua dentro de las utilizadas en la actualidad y por lo tanto en el tipo de batería más utilizado actualmente en el mercado. Sus ciclos de vida oscilan entre 1500 y 2000, alcanzando rendimientos desde un 80 hasta un 85%.

Una de sus desventajas es su dependencia respecto a la temperatura por lo que requiere un mantenimiento periódico para reparación y recarga de los electrolitos, también son elementos pesados y difíciles de transportar, en función de la aplicación de uso de estas baterías se distinguen distintos tipos, las de Shallow-Cycle o de ciclo corto, con ciclos cortos y mayor potencia instantánea para aplicaciones más de automovilismo, y las Deep-Cycle o de ciclo lento, diseñadas para ciclos más continuos de carga y descarga de forma más lenta.

Este tipo de baterías se utilizan sobre todo en aplicaciones de automoción como puede ser para suministrar la energía que necesitan los vehículos en el arranque, en aplicaciones de tracción industrial, como pueden ser carretillas, vehículos especiales anti-humos en lugares como minas o en ayuda a la continuidad de la energía en los servicios de red.

- Baterías de Níquel-Cadmio

Estas baterías alcalinas son recargables, de tecnología madura y de baja resistencia interna por lo que tienen muy baja tasa de autodescarga, esto provoca ciclos de carga-descarga rápidos

Están caracterizadas por sus celdas selladas y por ser más tolerantes con altas temperaturas que las baterías de plomo-ácido, se trata de elementos de bajo mantenimiento y larga vida útil, sin embargo tienen efecto memoria, que significa que la eficiencia de las mismas depende de las características de los ciclos y de su regularidad.

Son aproximadamente 10 veces más caras que las de Ácido Plomo, una de sus principales desventajas es la toxicidad del Níquel y del Cadmio, por lo que son difícil de tratar una vez son inservibles.

- Baterías de níquel-metal hidruro

Estas baterías han surgido a partir de la evolución de las baterías de NiCd, cuyo uso se prohibió en septiembre de 2008 por la directiva europea salvo para aplicaciones específicamente autorizadas.

Las ventajas de tienen respecto a sus predecesoras es su aumento de densidad de energía y disminución de su acusado efecto memoria, aparte de no utilizar materiales tóxicos, por lo que tiene facilidad para ser recicladas.

Tienen una larga vida útil con usos superiores a 1000 ciclos y una baja resistencia interna, característica que provoca una elevada autodescarga, sus aplicaciones más comunes son vehículos híbridos como pueden ser versiones del Toyota Prius, Honda Civic Hybrid o vehículos parecidos, vehículos de propulsión totalmente eléctrica como el Honda EV plus, Ford Ranger EV o la Scooter Vectrix y aplicaciones ferroviarias de tranvías, también se ha utilizado en prototipos humanoides como el prototipo ASIMO diseñado por Honda.

- Baterías de ion-Litio

Su uso está muy extendido en pequeñas aplicaciones como teléfonos móviles u ordenadores portátiles, al ser una tecnología muy utilizada se invierte en su constate investigación con fin de utilizarla en aplicaciones de mayores densidades de energía como pueden ser vehículos eléctricos o sistemas de almacenamiento.

Una de sus principales características es su alta densidad de energía, aproximadamente  $300wh/l$  y una energía específica de  $125Wh/kg$ . También se identifican por su rápida capacidad de carga y descarga pudiendo alcanzar constantes de tiempo de hasta 200ms con rendimiento del 78% durante 3500 ciclos de vida.

Se trata de una tecnología con grandes ventajas, pero también tienen importantes inconvenientes, como por ejemplo el acusado efecto memoria y la facilidad de descarga por lo que son desaconsejadas para aplicaciones de seguridad, es muy importante controlar sus condiciones de temperatura-tensión para su buen rendimiento y durabilidad.

- Baterías de Sulfuro de Sodio

También llamada tecnología basada en sal fundida, es una tecnología más reciente que las nombradas con anterioridad y prometedora, se trata de tecnología basada en sal fundida construida a partir de líquido de sodio y azufre,

son capaces de operar a altas temperaturas, hasta los 300°C pudiendo llegar a los 350°C, lo cual es una de sus principales ventajas, tiene una muy elevada densidad de energía y rendimiento, aproximadamente desde un 89% hasta un 82% de rendimiento y  $150kWh/m^3$ .

No se descargan por sí mismas, necesitando muy poco mantenimiento, su precio no es alto ya que los materiales de los que está compuesta son de bajo costo, pero tiene una naturaleza corrosiva.

No son adecuadas para aplicaciones no móviles sino en sistemas que deban estar en constante funcionamiento como aplicaciones de soporte o almacenamiento de forma que si no se están descargando se estén cargando, utilizadas a gran escala para el almacenamiento de energía en la red eléctrica.

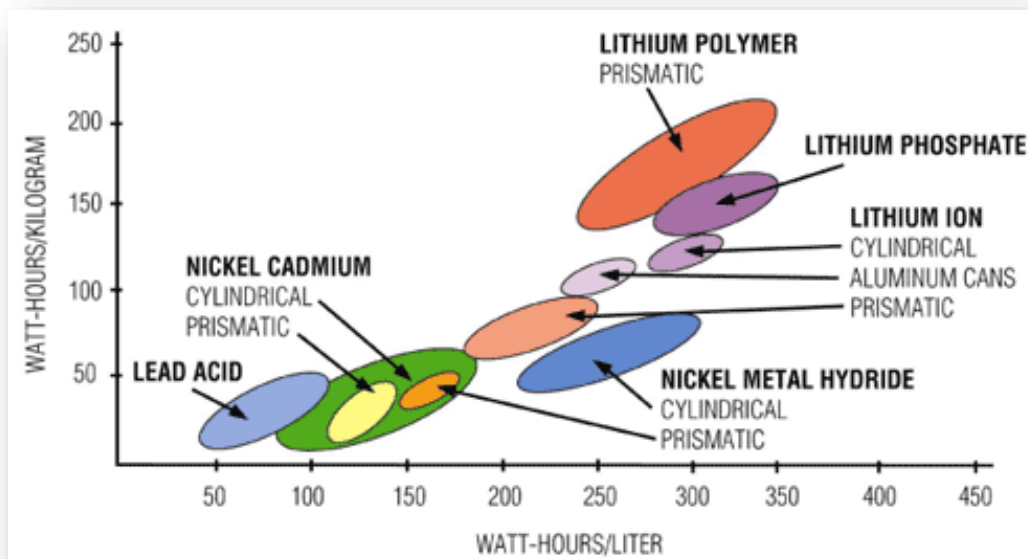


Figura 7 – Esquema que nos relaciona la relación potencia peso en función de la relación potencia volumen de cada tipo de batería

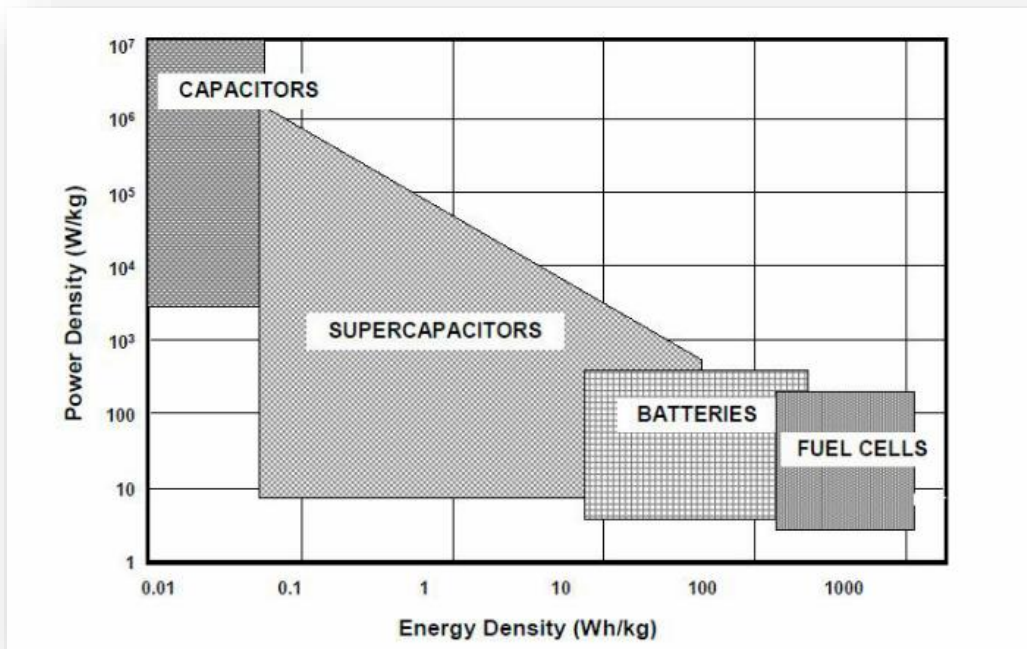
En la Figura 7 se observa la relación entre los distintos tipos de baterías en función de su tamaño y peso respecto a la energía que son capaces de desarrollar para así poder seleccionar correctamente el tipo de batería en función de la potencia necesaria para la aplicación o la portabilidad que se pueda requerir de estos sistemas.



## 2.2 Sistemas de almacenamiento de energía basados en supercondensadores

Los supercondensadores son dispositivos electroquímicos de doble capa, también conocidos como ultracaps son dispositivos capaces de almacenar y trabajar con grandes cantidades de densidad de energía, muy superiores a los condensadores convencionales, las capacidades que pueden llegar a tener son de miles de faradios, pudiendo llegar a densidades de 30Wh/kg.

Los supercondensadores, a diferencia de los condensadores son dispositivos electroquímicos, por lo que el almacenamiento de energía se produce sobre el electrolito y un material aislante y no solo entre las capas metálicas separadas por un aislante.



*Figura 8 – Referencia de densidad de energía de los supercondensadores respecto a otros sistemas de almacenamiento de energía*

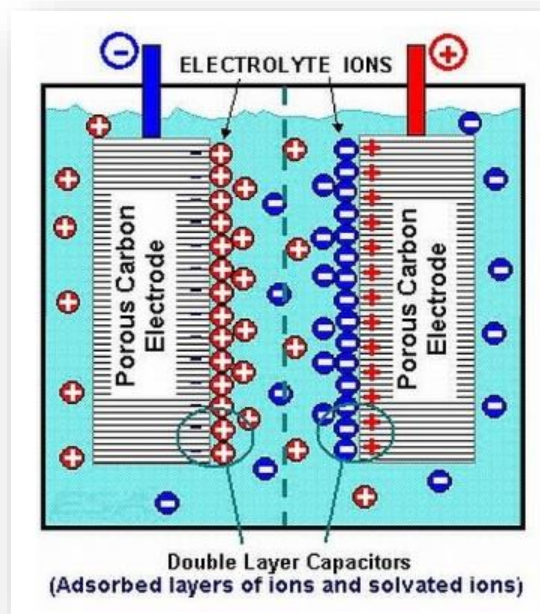
Hay distintos tipos de electrolitos utilizados en la construcción de supercondensadores, hidróxidos de sodio e hidróxidos de potasio, pero en la actualidad se buscan nuevos materiales como pueden ser nanotubos de carbono y nanoespumas. La densidad de los elementos internos provoca un aumento de la resistencia interna del elemento.

Los supercondensadores se dividen en distintos grupos en función de sus elementos de composición y características internas.

- Supercondensadores electrolíticos de entrecaras de carbono de doble capa.

Los electrolitos más utilizados en este tipo de supercondensadores son hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o ácido sulfúrico, en ellos el electrolito se disocia en iones positivos de sodio o potasio ante la diferencia de potencial de las placas metálicas internas de forma que parte de la energía que con la que se carga el condensador.

Se almacena de forma química y parte de forma potencial eléctrica por la separación de las placas como en un condensador corriente, en la *Figura 9* se muestra un esquema de los elementos internos que componen los supercondensadores.



*Figura 9 – Esquema de supercondensador*

- Supercondensadores no electrolíticos de entrecaras de carbono de doble capa.

Los principales son los creados a partir de nanotubos de carbono, carbón activo, aerogeles, que se trata de un material coloidal, similar al gel, en el cual el componente líquido se cambia por un gas para decrementar la densidad del componente, se trata de un gran aislante, por lo que es un elemento ideal para

utilizar como elemento interno en los supercondensadores, y soles, que son partículas sólidas en un líquido con un movimiento browniano que nos permite el almacenamiento de energía.

Para la creación de soles para los supercondensadores se introduce el óxido de un metal en agua a altas temperaturas, posteriormente es gelado por deshidratación o aumentando el pH del compuesto, el resultado es un material homogéneo, muy poroso que nos proporciona una gran capacitancia, al combinar este material con una interfaz de carbono se pueden llegar a alcanzar capacitancias de 400F/g.

- Supercondensadores acuosos de óxido de doble capa con pseudo-capacitancia redox.

Los elementos internos utilizados para la construcción de estos dispositivos son óxido de litio, dióxido de rutenio, dióxido de iridio, óxido de cobalto y dióxido de magnesio entre otros

La metodología seguida para la creación de este tipo de supercondensadores suele ser la explicada anteriormente para la creación de soles, pero también se puede conseguir a partir de la deposición de un óxido metálico por medio de electrólisis

A partir del óxido de rutenio se han llegado a alcanzar capacitancias de 400F/g, pero los más rentables suelen ser los fabricados a partir del óxido de níquel, con menores capacitancias de hasta 50 F/g, pero con menor coste de producción.

Una forma alternativa para generar la estructura porosa es la acción de un óxido de litio sobre un metal como puede ser el platino, para retirar el litio y mantener la estructura porosa metálica se le aplica ácido que lo retira de una forma sencilla.

- Supercondensadores de polímeros conductores.

Un polímero conductor es una sustancia orgánica que conduce la electricidad de una forma similar a la conducción producida a través de un metal, tiene una gran capacidad de reversibilidad entre el estado conductor y no conductor con una gran flexibilidad mecánica.

Los principales polímeros utilizados en la fabricación de supercondensadores son el politiofeno, polipirrol y polianilina, tiene una gran densidad de energía, superior a 500W/kg, se trata de uno de los campos de investigación de los supercondensadores.



## 3 Simulación de sistemas de almacenamiento basados en baterías

En este apartado vamos a realizar la simulación de distintos tipos de baterías, con la herramienta Matlab 2015 a partir de las librerías que nos proporciona Simulink, se crea un modelo de batería basada en un datasheet de una batería real y que se estudia, mostrando distintos aspectos característicos de la misma como sus curvas características y su rendimiento en cada momento.

Se comienza explicando en profundidad el modelo de batería que nos proporciona Simulink, el modelo a explicar lo encontramos en la librería Simscape/SimPowerSystems/Specialized Technology/Electric Drives/Extra Sources de Simulink, junto al modelo de supercondensador y el de pilas de combustible.

Como se puede observar en la *Figura 10* se trata de un modelo modificable de batería, por lo que tiene una gran variedad de parámetros a partir de los cuales se modela el comportamiento de la misma, es importante que estos parámetros sean correctamente ajustados para una buena simulación.

A continuación, se explica el significado de los parámetros del modelo, en la primera pestaña muestran los parámetros internos que caracterizan nuestra pila, en la imagen mostrada a continuación mostramos la configuración que se aplicará a nuestro modelo de simulación.

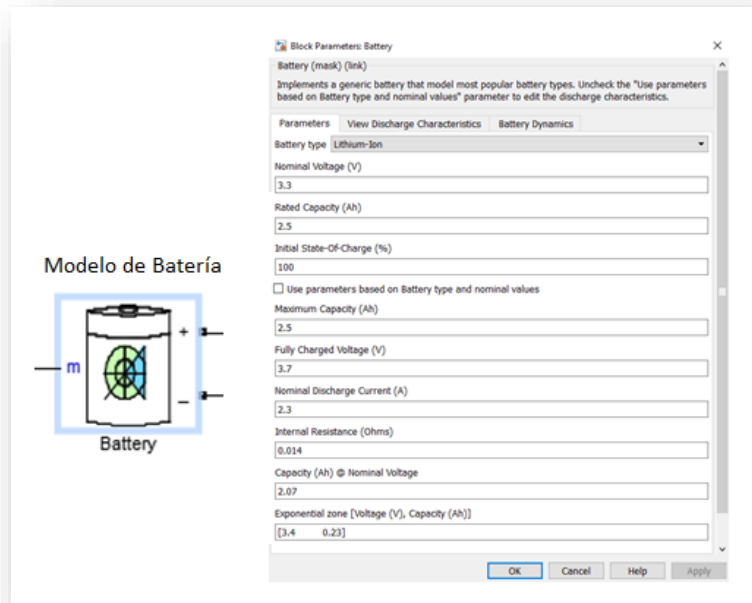


Figura 10 – Modelo de batería con sus características

Los parámetros que aparecen en nuestro modelo de batería son los explicados a continuación:

**Battery type:** En este parámetro desplegable se observa los distintos tipos de electroquímicas que simularán se pueden simular, baterías de ácido, ion-Litio, Níquel-Cadmio y Níquel Metal Hidruro

**Rated Capacity (Ah):** Ratio de carga, es la velocidad de carga descarga de la pila, se trata de un parámetro importante porque define el tiempo en el que nuestra batería mantendrá la tensión y el amperaje que es capaz de producir de forma nominal.

**Initial State-Of-Charge (%):** Estado inicial de carga, nos indica el porcentaje de carga que tiene nuestra pila al comienzo de la simulación, son los parámetros iniciales, nos puede ayudar para crear ciclos de carga descarga desde un punto decidido por el usuario.

**Maximum Capacity (Ah):** Máxima Velocidad de descarga, se trata de los Amperios Hora que es capaz de ofrecer la batería a simular, ayuda a modelar las limitaciones físicas de nuestro componente.

**Fully Charged Voltage (V):** Tensión máxima de carga es la tensión para la cual se tiene un 100% de tensión en la batería, se utiliza para saber cuándo se debe parar de cargar la pila

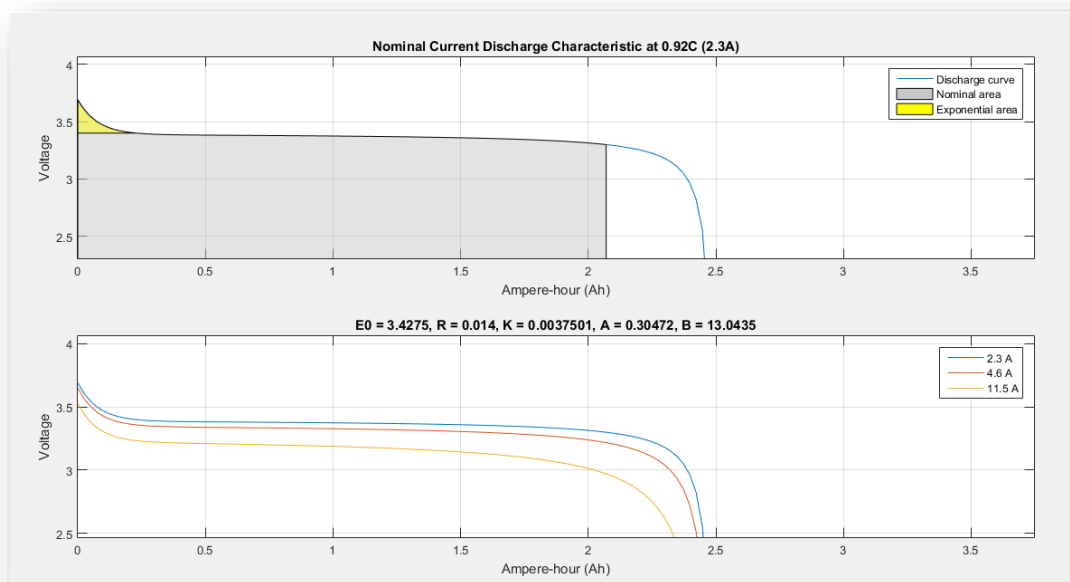
**Nominal Discharge Current (A):** Corriente nominal de descarga, se trata del amperaje nominal que proporciona nuestra batería en condiciones normales de descarga

**Internal Resistance (Ohms):** Resistencia interna de la batería, depende del tipo de electroquímica utilizada en la pila, es un dato proporcionado por los fabricantes

**Capacidad (Ah) @ Nominal Voltage:** Nos indica la tensión mínima para una capacidad nominal constante en Amperios-hora, se trata del límite inferior de tensión para mantener la intensidad nominal constante y el inicio de la zona exponencial de tensión.

**Exponential zone [Voltage (V), Capacity(Ah)]:** nos proporcionan los límites de la zona lineal, a partir de los cuales aparece una zona exponencial de carga máxima y descarga, modelada por el tipo de electroquímica del modelo.

En la segunda pestaña se configuran las características de descarga, Simulink nos proporciona una ayuda para la comparación entre distintos ratios de descarga para que podamos ver cuál es el ratio óptimo o el que más nos conviene para las simulaciones, indicando que las comparaciones de tres ratios distintos, por ejemplo el nominal, el doble del nominal y cinco veces la nominal introduciendo [1 2 5]\*2.3, con ello nos proporciona las gráficas que observamos en la *Figura 11*.



*Figura 11 – Curvas de tensión e intensidad en función del ratio de descarga*

La *Figura 11* nos muestra la gráfica de descarga con las características nominales y las zonas lineales que nos serán de mayor utilidad marcando las

zonas de trabajo donde se obtiene un correcto rendimiento de la pila y límites de las zonas exponenciales.

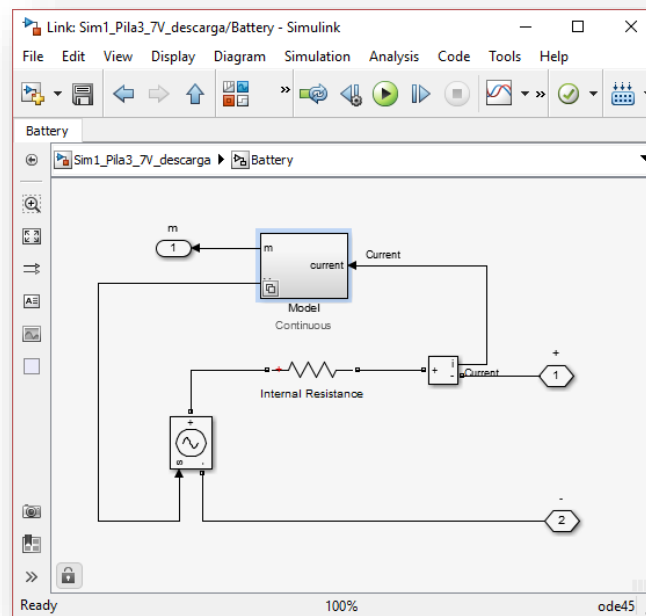
En la segunda gráfica nos muestra la descarga de la batería modelada para los parámetros indicados y los distintos ratios de descarga, indicados en la leyenda.

Por último, en la tercera pestaña aparece el tiempo que se mantiene la simulación de descarga de la pila, nos indica la dinámica de la pila, es decir su tiempo de vida útil con las condiciones que se le impone en la configuración.

Estos parámetros se introducen en el modelo de batería a través de una relación de variables que nos permiten una configuración sencilla y con un alto nivel de abstracción de la matemática interna del modelo.

Para un estudio más profundo del modelo, se necesita observar su estructura interna realizando un Look Under Mask, pudiendo así realizar un estudio matemático más profundo del modelo y sus ecuaciones en función de los distintos parámetros seleccionados en la configuración del modelo.

En la *Figura 12* se muestra el primer nivel de abstracción, en el que se puede observar que está compuesto por la resistencia interna, que es un parámetro modificable desde las opciones de configuración y un modelo teórico matemático de pila que contiene la lógica matemática que implementa los distintos modelos en función de las propiedades seleccionadas en las opciones de configuración.



*Figura 12 – Estructura interna simplificada del modelo de batería*



Es en el modelo teórico de pila en el que encontramos la configuración del resto de parámetros de nuestro modelo, se observa que el modelo tiene tres interfaces a partir de las cuales se realizan las conexiones V+ y V-, terminales positivo y negativo de la batería y terminal m que nos proporciona datos internos de la pila como el porcentaje de carga, la tensión instantánea y la intensidad instantánea.

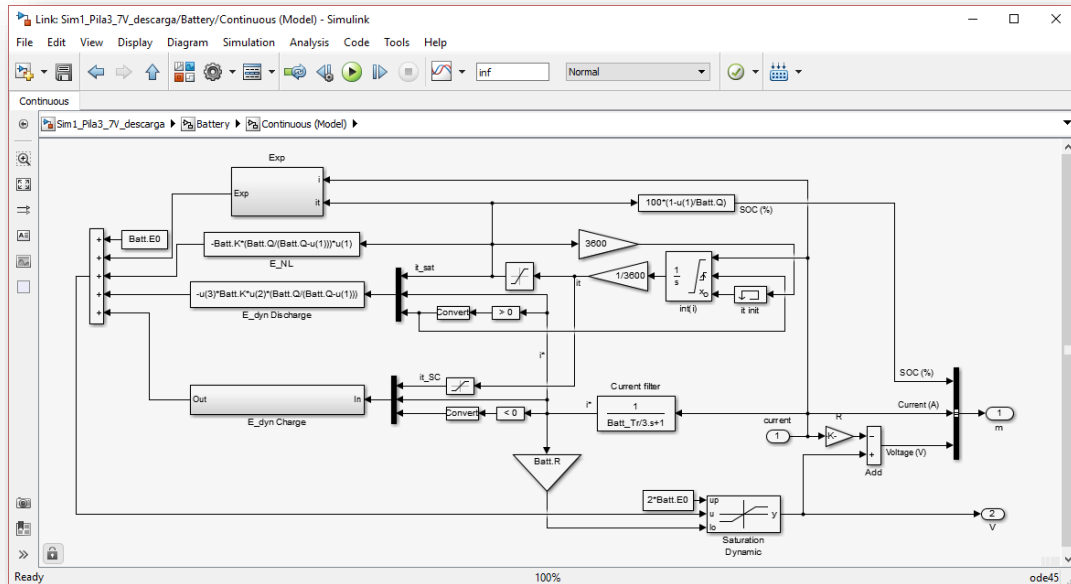


Figura 13 – Estructura interna del modelo matemático de batería

Como se observa en el modelo teórico nos presenta una interfaz con la intensidad como parámetro de entrada y de parámetros de salida la tensión instantánea y los valores de parámetros internos.

En la parte de la izquierda observamos un sumador que nos suma los distintos parámetros utilizados para la obtención de la tensión instantánea de la batería, influyen muchos parámetros que no son constantes.

El primero es la tensión nominal de la batería, el segundo la parte de la curva exponencial de carga descarga, el en tercero la recta con la función de no linealidad de la tensión de salida, el cuarto y quinto parámetro nos indican la tensión en función de la dinámica de carga y descarga de la batería.

El tipo de electroquímica del modelo de pila es un parámetro básico que influye en distintos aspectos, produciendo una variación en las curvas exponenciales de principio y final de carga como se puede ver en el bloque Exp.

Este bloque nos devuelve la curva exponencial de final de carga y descarga de la batería gracias a un switch que nos permite modificarlo teniendo en un principio todas las ecuaciones para todas las electroquímicas,

influenciadas también por los valores de los parámetros previamente seleccionados.

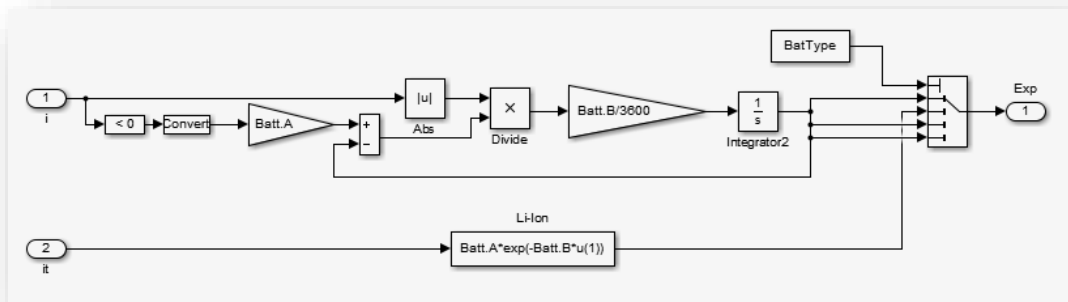


Figura 14 – Modelado matemático de la curva exponencial en función de la electroquímica seleccionada

La tensión en función de la dinámica de carga también es un parámetro que depende de la electroquímica, se observa en el bloque E\_dyn\_Charge en el que se observan las distintas funciones matemáticas en función de la electroquímica interna, unidas a la salida a través de un switch de selección.

La recta de carga en función de la dinámica de descarga es la misma en todas las baterías al igual que el parámetro de no linealidad.

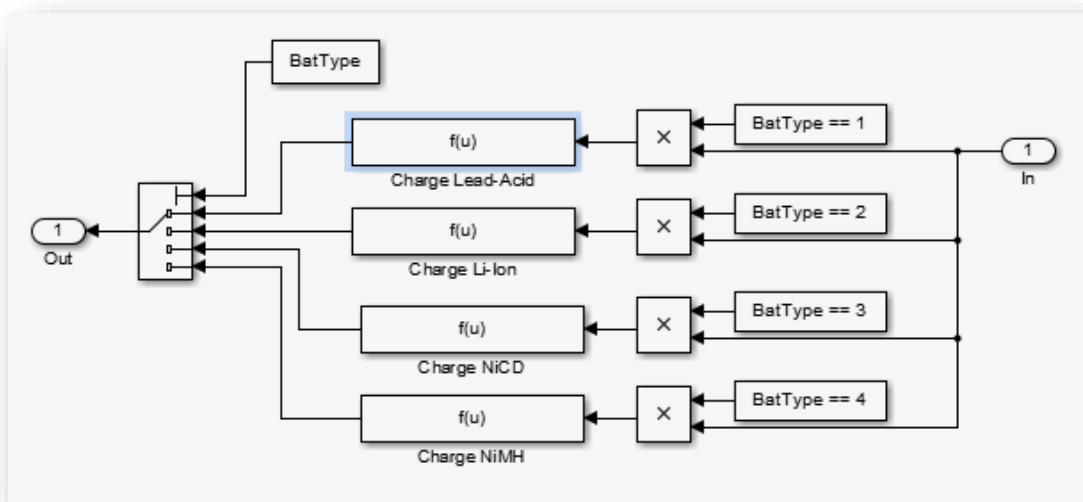


Figura 15 – Modelado matemático de la curva de descarga en función de la electroquímica seleccionada

La conclusión a la que se llega después del estudio de este modelo de batería que nos ofrece Simulink, es que se trata de un modelo muy completo para utilizar en el modelado de sistemas reales, nos aporta una gran complejidad

matemática, de forma que se tiene la capacidad de realizar una gran cantidad de pruebas hasta hallar el modelo ideal de batería del sistema en el que se pretende utilizar.

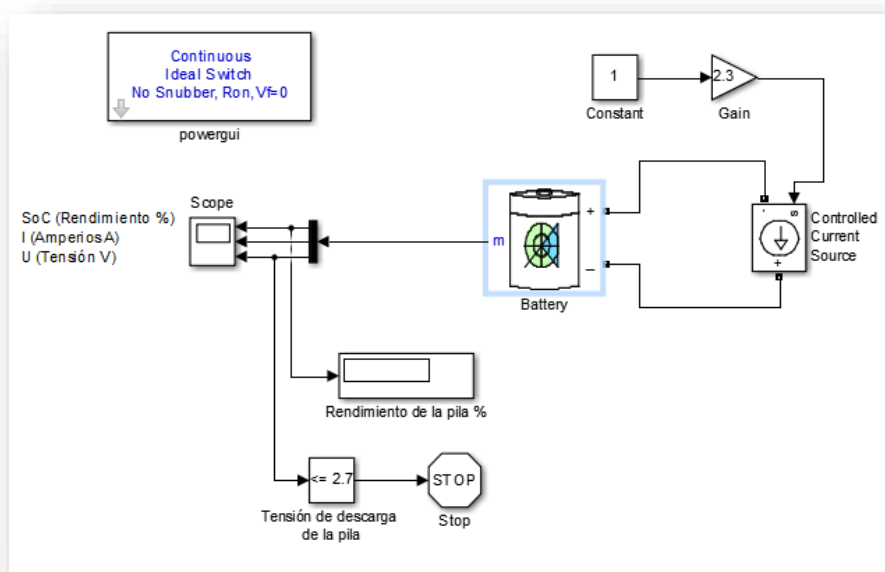
También nos permite un gran nivel de abstracción pudiendo utilizar este modelo de forma sencilla a partir de la configuración de sus parámetros básicos sin la necesidad de parametrizar todos los aspectos de la batería que se utilizará.

### 3.1 Simulación de recta de descarga.

Para representar la recta de descarga del modelo de batería se ha creado el circuito de la *Figura 16*, se observa que es un circuito sencillo en el que se provoca una descarga de la pila a través de una fuente de intensidad controlada de intensidades múltiples de la nominal, observando la variación de la tensión y del porcentaje de carga de la pila como parámetros que nos proporciona el modelo a través de la salida *m*.

Esta simulación durara hasta que la tensión instantánea de la batería baje por debajo de una tensión de 2.7V, valor hasta que se puede tomar como final de zona de trabajo de nuestro componente.

En esta simulación se monitoriza el rendimiento, tensión e intensidad de la batería para después poder realizar una comparación con las presentadas por el fabricante y poder así entender mejor nuestro sistema de batería.



*Figura 16 – Modelo del circuito de descarga controlada de una batería.*

Los resultados de la simulación son los mostrados en la siguiente *Figura 17*, se trata de las características de uso de la batería a lo largo de la zona lineal de tensión o zona de trabajo que es en la que nos interesa trabajar, es importante observar que se obtiene una intensidad constante de salida.

También es importante la gráfica del rendimiento, para relacionar los límites de tensión de la zona lineal con los porcentajes de carga y ver si se cumplen los que nos marca el fabricante.

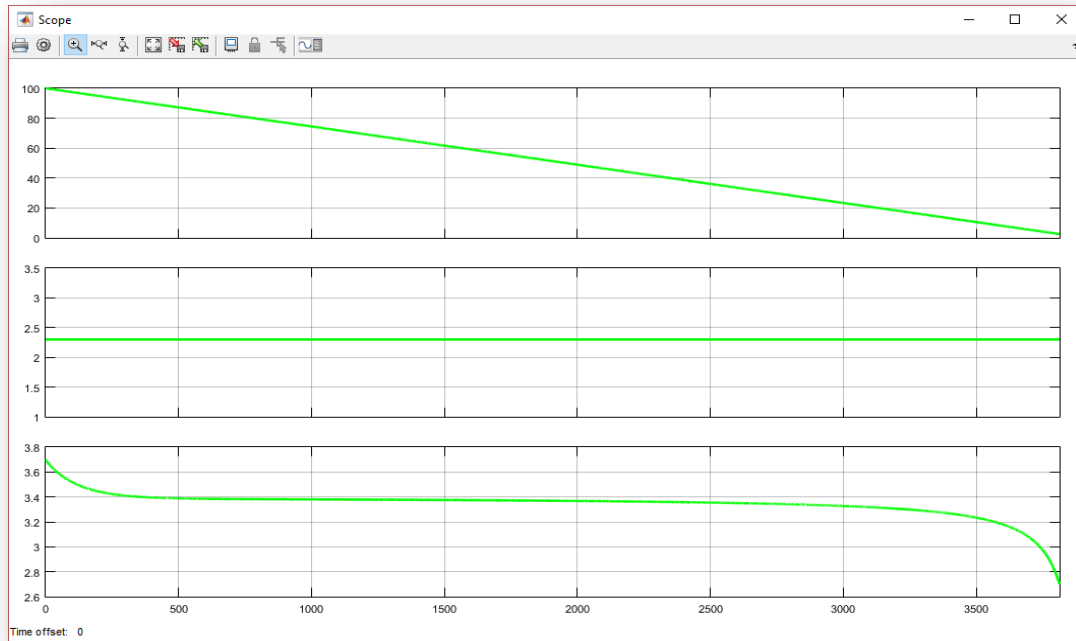


Figura 17– Curvas de SoC (State of Charge), Intensidad de descarga y Tensión en bornes de la batería

A continuación, se muestran simulaciones a mayor ratio de descarga de la nominal para ver el estrés provocado sobre la batería y la variación de tensión que tiene en función de la intensidad requerida a la batería por nuestro sistema.

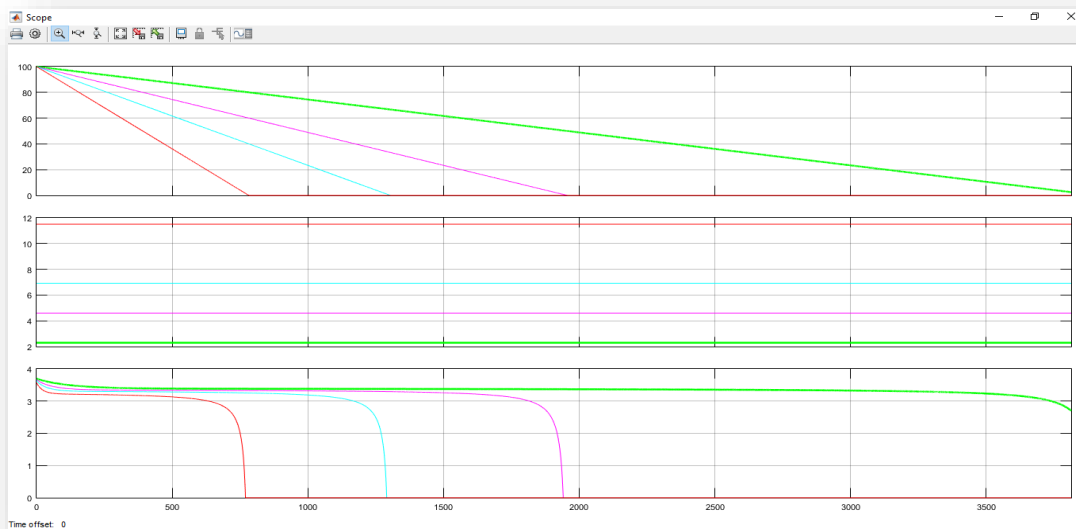


Figura 18 - Curvas de SoC (State of Charge), Intensidad de descarga y Tensión en bornes de la batería a diversos ratios de descarga

En la *Figura 18* se observa distintas curvas de descarga en paralelo para poder realizar una comparativa entre la estabilidad y duración de la tensión y carga en la batería.

En las gráficas de la *Figura 18* se observa en color verde las gráficas a  $\frac{1}{2}$  C, es decir a la mitad del ratio de descarga nominal de la batería, en color magenta 1 C, el color azul representa 2 C y el color rojo a 5 C.

Se puede observar que hasta el 8% de descarga aproximadamente vamos a tener una tensión prácticamente estable en las baterías, apareciendo la mayor variación en la duración en zona de trabajo lineal de la batería

Como se sabe, y se explica en el apartado teórico inicial, las baterías tienen ciclos limitados de carga descarga, por lo que es necesario regular la intensidad saliente para aumentar el tiempo de vida de las mismas con sistemas que regulen o eviten las altas intensidades de salida.

También se puede observar que el valor de la tensión que mantendrá la batería en la zona lineal depende de la intensidad que el sistema requiere de la alimentación, este es un factor que se tiene que mejorar en las alimentaciones y evitar la variación rápida de la intensidad requerida por el sistema.

Para ayudar a regular la tensión de alimentación de las baterías y los picos de intensidad se introduce más adelante baterías de supercondensadores, teniendo sistemas de alimentación o almacenamiento de energía híbridos, realizando simulaciones y comparativas para ver la mejora respecto a los sistemas sencillos de baterías o supercondensadores.

### 3.2 Simulación de ciclo de descarga-carga de la batería

Para poder simular el ciclo de descarga-carga introducimos ciertos elementos, en este caso se para la simulación al llegar al 100% del porcentaje de carga de la batería que será el que nos indique que está completamente cargada

Como en el caso anterior la intensidad de carga-descarga será la nominal definida en los parámetros de la pila, con un Relay que nos cambiará el sentido de la intensidad para pasar de la descarga a la carga al estar la batería completamente descargada.

Como se puede observar el porcentaje inicial de carga con el que se precarga es del 100% para poder simular en un primer instante no se debe evaluar la condición de stop, por ello introducimos un reloj con el que eliminamos esta condición durante el primer segundo de simulación.

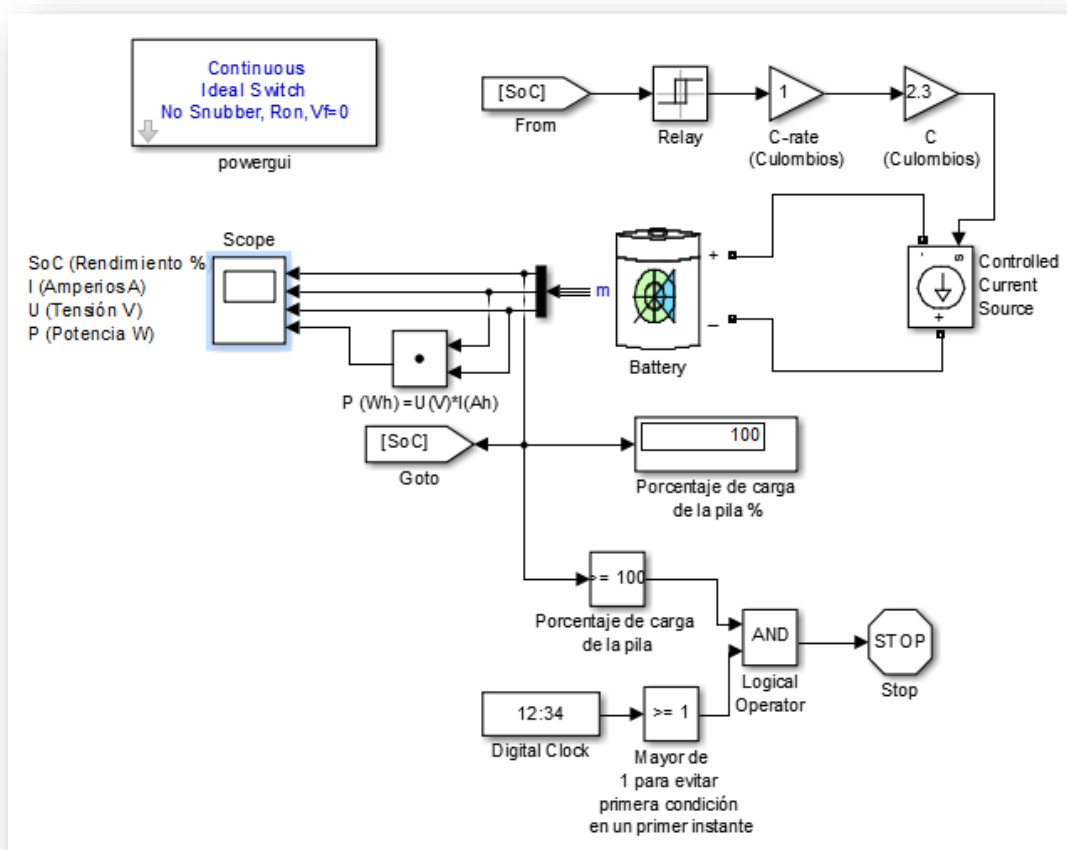
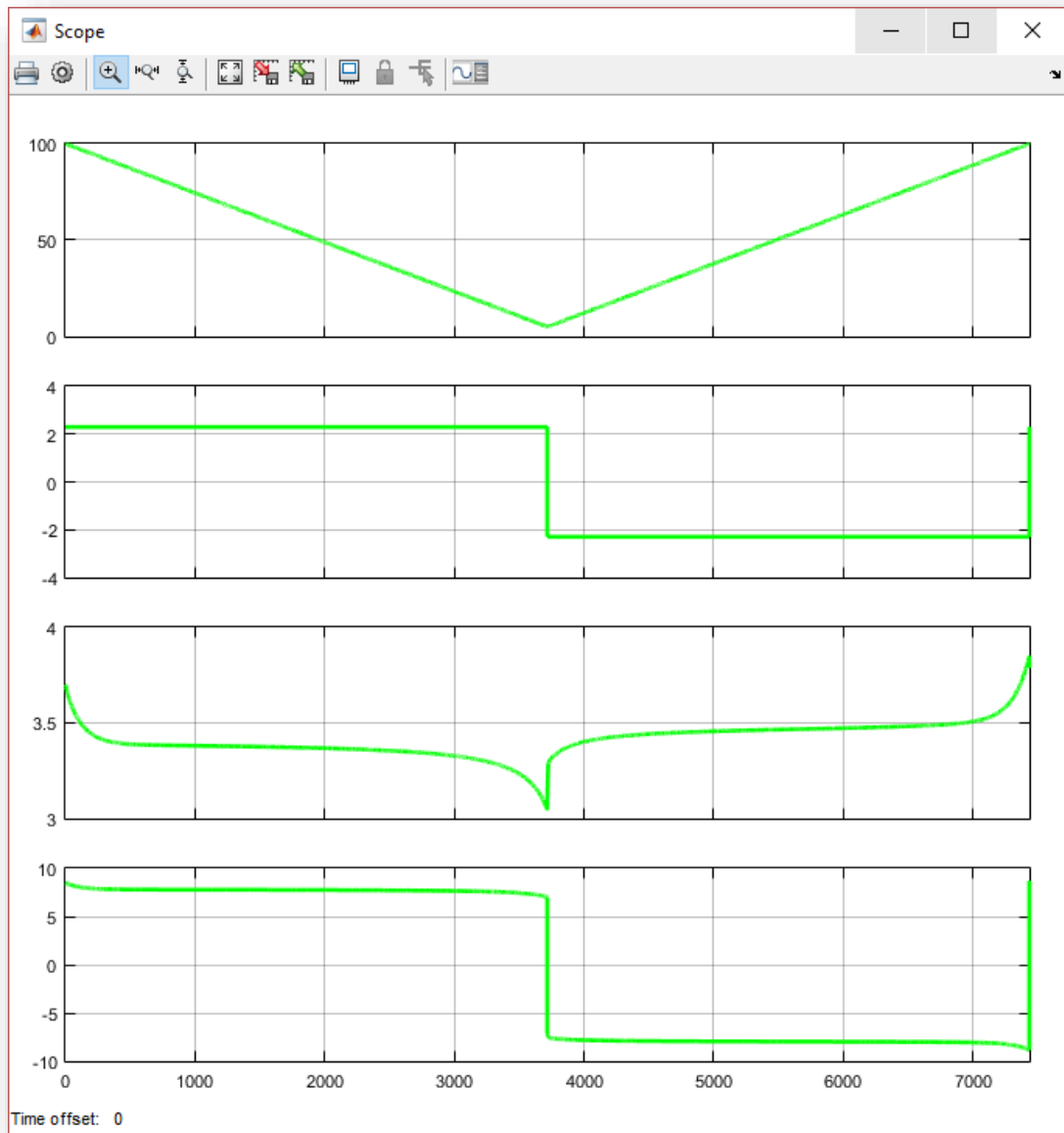


Figura 19 – Modelo del circuito de carga y descarga de una batería

En esta simulación también se monitoriza la potencia instantánea que nos proporciona la batería, se trata de un parámetro muy importante ya que es el que

se utiliza para medir la transferencia de energía a la red, siendo uno de los parámetros a evaluar según aumente la complejidad de las simulaciones, con especial importancia en las simulaciones de los sistemas híbridos a evaluar en las siguientes simulaciones.

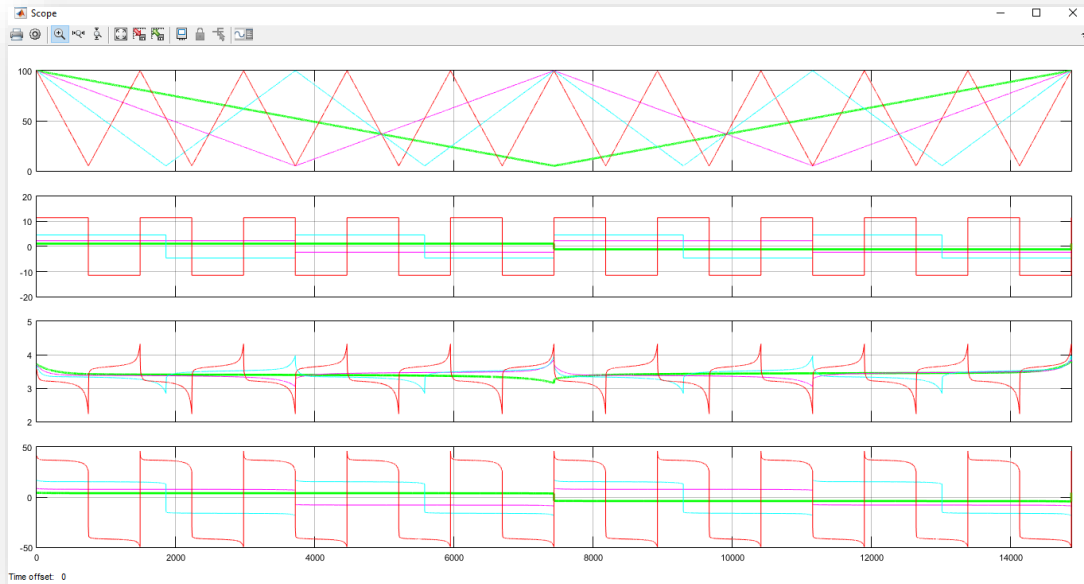


*Figura 20 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la batería en un ciclo de carga y descarga.*

En un primer instante se puede observar que la batería está completamente cargada teniendo un SoC del 100%, indicado en la primera gráfica, se puede ver como la batería se descarga según la capacidad de descarga marcada por su ratio de descarga, disminuyendo la tensión de salida y con una pequeña disminución de la potencia entregada por la batería, la variación de la potencia en la zona lineal de tensión, es decir en su zona de



trabajo es prácticamente despreciable y en su punto de menor rendimiento, cuando se descarga por completo, cambia el sentido de la intensidad y comienza a cargarse, aumentando la tensión y almacenando energía hasta estar completamente cargada.



*Figura 21 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la batería en un ciclo de carga y descarga con distinto ratios de carga-descarga*

En la *Figura 21* aparecen cuatro gráficas distintas, la primera nos indica el SoC o estado de carga de la batería, la segunda el ratio de descarga de las baterías, la tercera la tensión sobre la tensión entre los terminales de la batería y por último la potencia entregada o aceptada por la batería durante su carga o descarga.

En cada una de las gráficas se observa la comparativa de 4 funciones distintas, asociadas al mismo sistema con distintos ratios de carga descarga, la verde tiene un ratio de descarga de  $\frac{1}{2}$  C que es la mitas de la intensidad nominal de salida, es la que marca el final de las simulaciones, la segunda en color magenta tiene un ratio de carga-descarga de 1 C, es decir 2.3 Ah, la gráfica azul se ha calculado para 2 C y por último la gráfica roja aparece a 5C.

Como se observa a menor intensidad de salida o ratio de carga descarga se obtienen curvas más suaves y más estables, se puede observar el estrés que sufre la cuarta batería sobre todo en la tensión durante los ciclos de carga-descarga de la misma.

Estas variaciones dañan la batería reduciendo su calidad de vida y tiempo de vida, sin contar el aumento de ciclos carga descarga.

Este modelo nos ayuda a poder ver los límites en los que se puede trabajar con la batería seleccionada o si se debe elegir otro tipo de batería o hacer una combinación de las mismas.

### 3.3 Simulación de un ciclo de carga y descarga de un sistema completo de 16 celdas

Para la siguiente simulación vamos a crear un sistema en el que se obtiene una batería de 52.8V a partir de las baterías que se han simulado anteriormente de 3.3V, para ello se utilizan 16 baterías colocadas en serie, esto aumenta la tensión nominal del sistema, pero no aumenta la intensidad nominal de descarga.

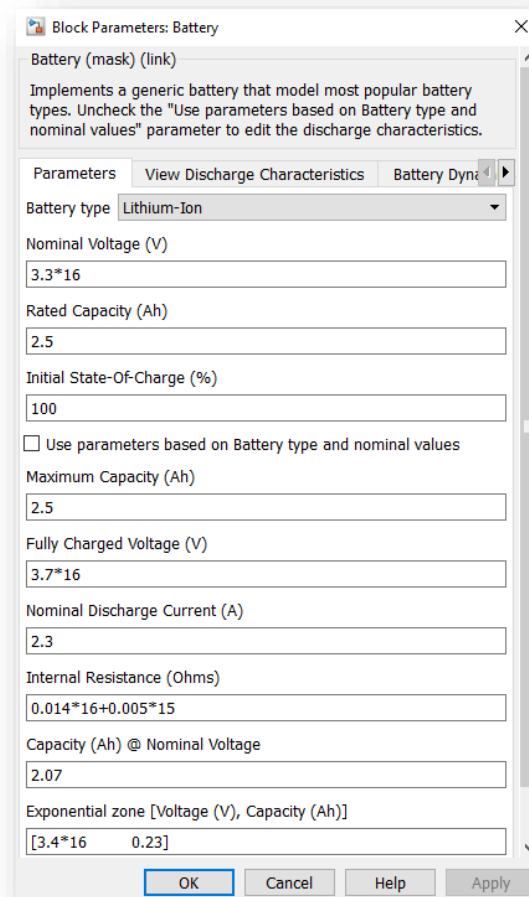
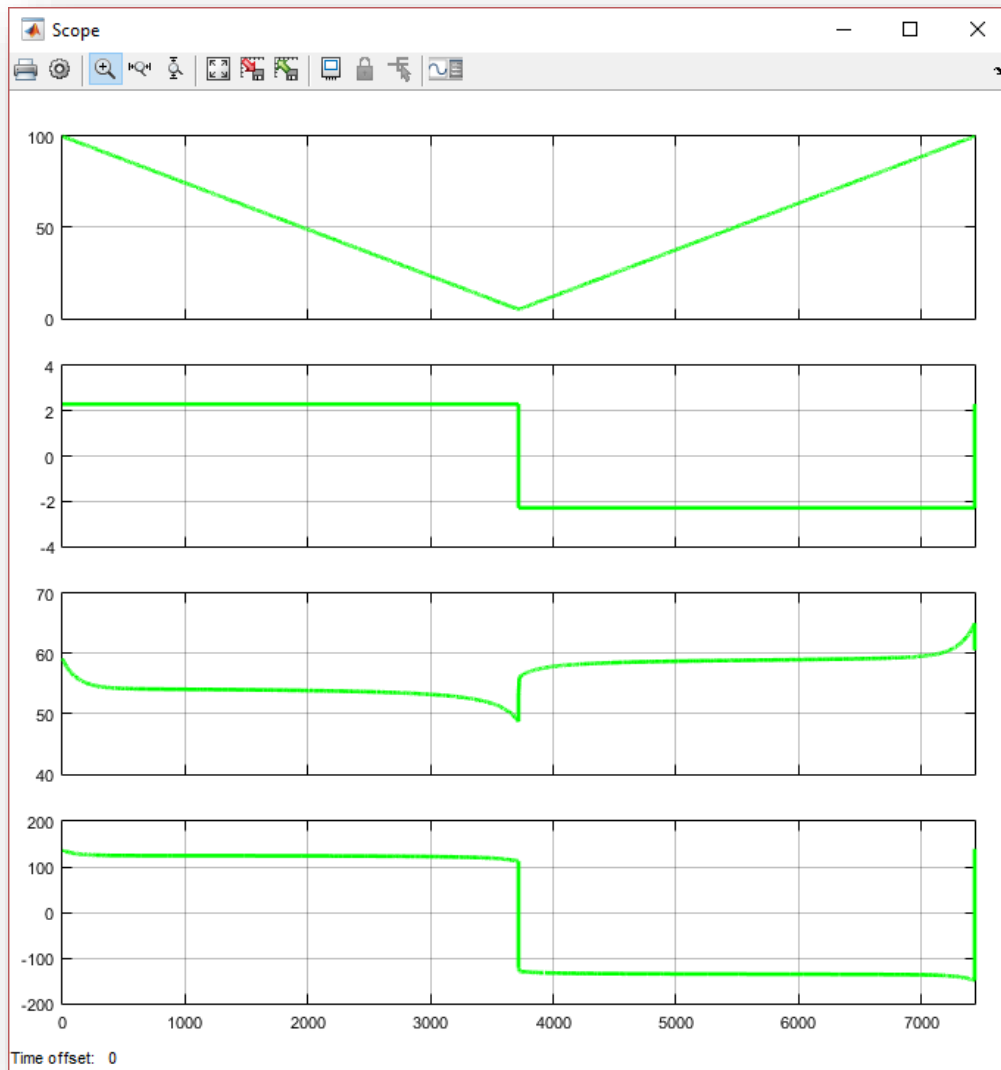


Figura 22 – Parámetros de la batería para la simulación de una agrupación de baterías

La configuración de parámetros es la misma que se tiene en la primera simulación salvo por ciertos cambios, hay que multiplicar por 16 los valores afectados por la colocación en serie de las baterías y tener en cuenta detalles como la resistencia interna de nuestras baterías en serie entre los bornes externos que serán las resistencias internas de cada una de las 16 baterías más las 15 uniones entre las distintas celdas.

El resultado de las simulaciones del sistema de alimentación combinada se observa en la *Figura 23*.



*Figura 23 - Curvas de SoC (Estate of Charge), Intensidad y Tensión en bornes de la agrupación de baterías en un ciclo de carga y descarga*

En estas cuatro gráficas se observa el porcentaje de carga que tiene nuestra batería, comenzando completamente cargada, la descarga se produce con una intensidad saliente de la intensidad nominal de una batería por tratarse de una combinación en serie de las mismas

La tensión es la suma de las tensiones individuales de las distintas baterías, por último, se puede distinguir la potencia instantánea del sistema, manteniéndose prácticamente constante durante la carga y la descarga del sistema.

### 3.4 Simulación y cálculo del rendimiento de una Batería

Empleando el modelo de batería que nos proporciona Simulink, se calcula el rendimiento farádico (Ah) y el rendimiento energético (kWh) de la batería de litio.

El rendimiento farádico de una batería indica la capacidad de energía que es capaz de almacenar la batería y por lo tanto la capacidad que puede proporcionar al descargarse, se mide en Amperios-hora nos indica la duración de nuestra batería en función del régimen de descarga de la misma.

El régimen de descarga está marcado por el sistema a alimentar, por lo que si por ejemplo se tiene una batería de 180Ah con lo que se puede descargar la batería a 18 Amperios en 10 horas o 1,8 Amperios en 100 horas.

El rendimiento energético de una batería nos indica el flujo de energía que es capaz de suministrar medido en Vatio-hora (Wh), para realizar la transformación se debe conocer el rendimiento farádico de la pila y su tensión nominal, por ejemplo, si se tiene una batería de 12 VDC y 180 Ah tiene un rendimiento de 2,16 kWh.

Estos datos son necesarios a la hora de alimentar un sistema, a continuación, se muestran los cálculos realizados con un diagrama de bloques para calcular el rendimiento de una batería sobre las simulaciones de Simulink.

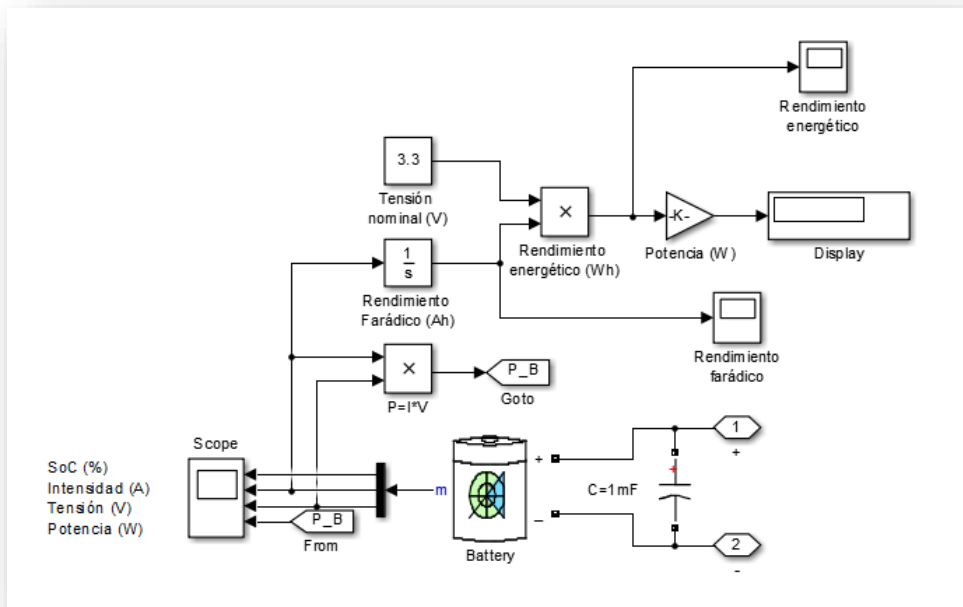


Figura 24 – Esquema de bloques del cálculo del rendimiento de la batería

### 3.5 Comparación con el sistema real

Este apartado demuestra que el modelo de batería proporcionado por Simulink, el modelo que se ha caracterizado en estas simulaciones de baterías ha sido la batería ANR26650ml-B de A123 Systems.

De sus hojas características se han sacado los valores que se utilizan en nuestra simulación. Las gráficas que nos proporcionan nos muestran las rectas de descarga en función de la capacidad, se observa que el comportamiento es el mismo que el conseguido en las simulaciones.

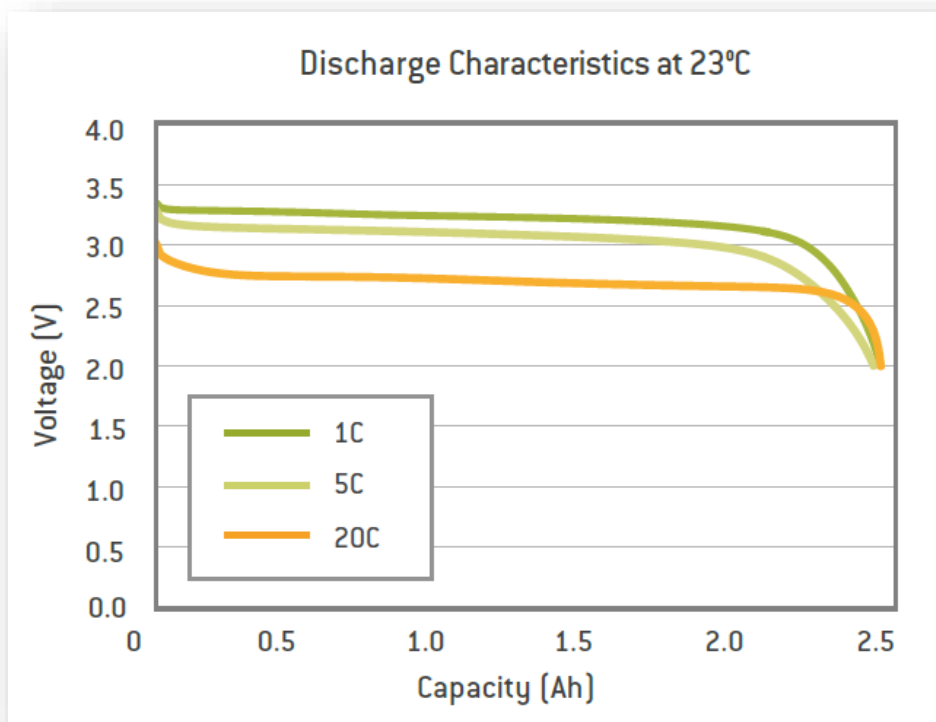


Figura 25 – Curvas de descarga del supercondensador

Las rectas que utilizamos para comparar el comportamiento de nuestro modelo de batería respecto al modelo real son las conseguidas en la simulación de una recta de descarga, en la *Figura 26* se puede observar que las gráficas tienen la misma forma de onda que las que nos provee el fabricante, obtenida de un modelo real.

Se observa que se puede utilizar el modelo de batería que nos proporciona Matlab Simulink en proyectos para poder dimensionar el gasto en baterías en función de la energía utilizada en las simulaciones.

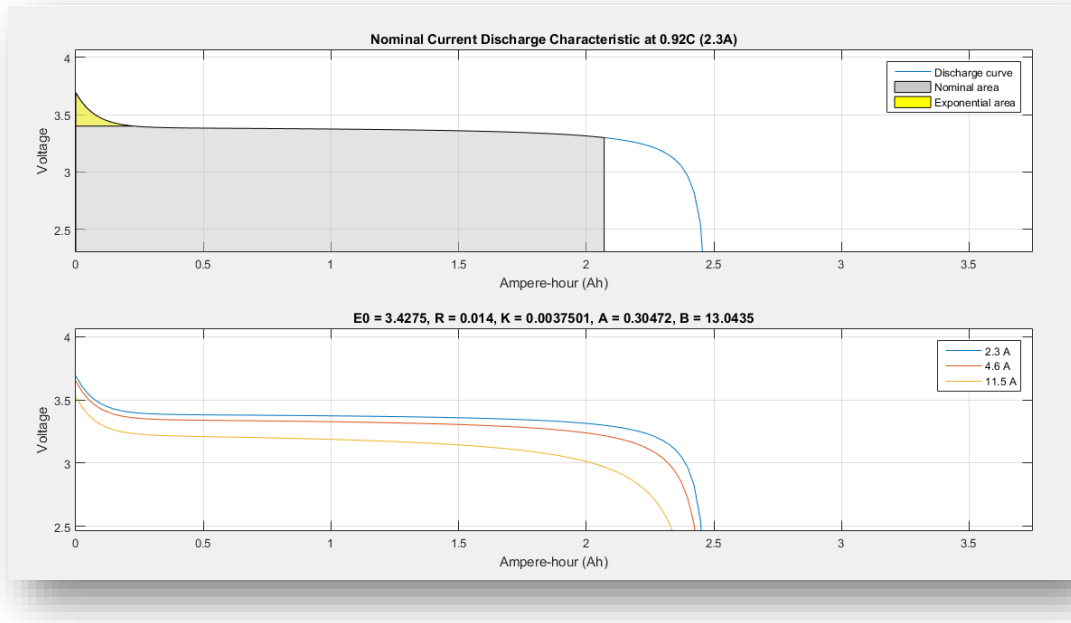


Figura 26 – Rectas de descarga del modelo de batería proporcionado por Simulink





## 4. Simulación de almacenamiento basados supercondensadores

En este apartado se compara el modelo de supercondensador nos es proporcionado por Simulink en la librería Simscape/ SimPowreSystems/ Specialized Technology/ Electric Drives/Extra Sources, para comprender completamente las características de este elemento se profundiza en el hasta llegar a las capas más básicas del mismo.

Se realizarán distintos tipos de simulaciones y se comparará con el modelo teórico de un supercondensador y con las gráficas que se obtienen de las hojas de fabricantes, para realizar las comparaciones se ha elegido el supercondensador BCAP0310 de la marca MAXWELL technologies..

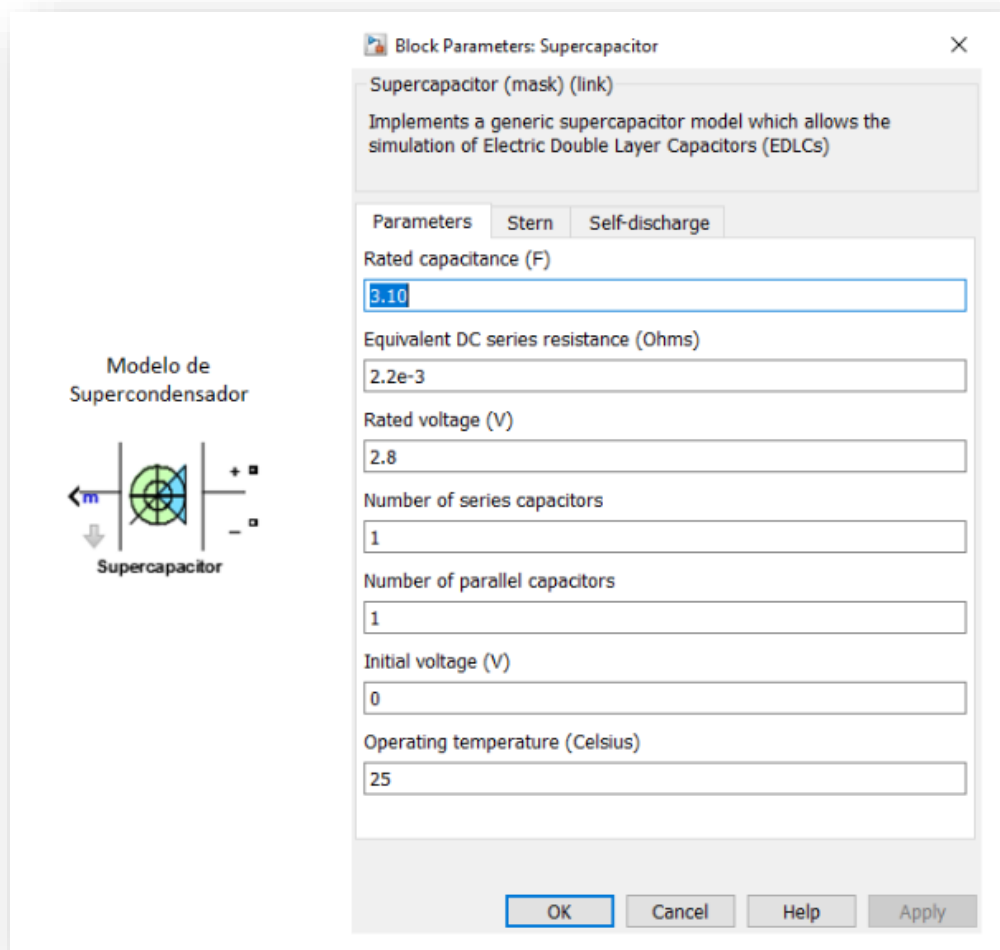


Figura 27 – Modelo de Supercondensador y parámetros internos del modelo

El modelo de Supercondensador que nos proporciona Simulink es un modelo muy completo, a continuación, se proporciona el significado de los parámetros internos del sistema, en la pestaña de parámetros se configuran los parámetros principales del componente

*Rated capacitance (F)*: se trata de la capacidad nominal del elemento, en este apartado indicamos la capacidad del condensador de forma unitaria, es decir, este modelo permite crear estructuras de capacidades de forma que automáticamente halla el valor de la estructura

*Equivalent DC series resistance (Ohms)*: En este parámetro se configura la resistencia interna del componente en función de la tensión continua capaz de soportar en función de la intensidad continua que lo atraviesa, se trata de un campo que no cambia al poner distintos condensadores en paralelo.

*Rated Voltage (V)*: Tensión nominal del conjunto de los supercondensadores que consigue en la estructura, por lo que se tiene que tener en cuenta el valor de tensión nominal de cada supercondensador y el número total de supercondensadores en serie que se tiene en la estructura.

*Number of serie Capacitors*: nos indica el número de condensadores en serie que se utiliza de forma interna en este modelo.

*Number of parallel capacitors*: se trata del número de condensadores en paralelo que compondrán la estructura a simular.

*Initial voltaje (V)*: Tensión con la que se inicia en las simulaciones.

*Operating temperature (Celsius)*: Se trata de la temperatura que debe tener aproximadamente el encapsulado del supercondensador en grados Celsius, normalmente indicamos la temperatura ambiente a la que se trabajará mientras esta se encuentre en el rango de trabajo de nuestro condensador.

La segunda pestaña se configuran los parámetros internos del componente por si se trata de la simulación de un supercondensador de prototipo, si no se conocen las características internas del componente.

*Use predetermined parameters*: este check se utiliza si no se conocen los parámetros internos de nuestro sistema, nos ayuda a comenzar a simular sin toda la información.

*Estimate using test data*: Este check nos configura los parámetros internos de nuestro componente en función de sus parámetros comunes con una herramienta de optimización de Simulink.

*Number of layers*: este parámetro nos indica el número de capas que tiene nuestro componente los valores comunes de los supercondensadores oscilan de

2 a 4, se trata de un dato que nos facilita normalmente el fabricante en el datasheet.

*Molecular radius (m)*: Característica intrínseca del material con el que se ha fabricado el supercondensador, viene proporcionada en el datasheet del elemento.

*Permittivity of electrolyte material (F/m)*: se trata de la permitividad que tiene el material del electrolito que se ha utilizado en la fabricación, este en un dato específico para simulaciones para fabricantes o prototipado.

El segundo apartado son parámetros de Test Data, son datos que nos permiten conocer nuestro supercondensador en función de su relación entrada-salida.

*Charge current (A)*: corriente a la que se ha probado el supercondensador

*Voltage (V)*: tensiones que tiene el supercondensador para 0 20 y 60 segundos en función de la intensidad que lo atraviesa en cada momento.

Por último, en la tercera pestaña se tienen que configurar las características de autodescarga o descarga en circuito abierto del componente, se trata de una progresión que se puede introducir para que se cumpla en el momento en el que el condensador se quede en circuito abierto, es decir que la intensidad que lo atraviese sea nula.

Aparecen los parámetros de descarga con los que se indica la intensidad que había a antes de abrir el circuito y la tensión que tomará en función de los valores temporales que nos indican,

Los parámetros de carga nos indican un ejemplo de las curvas en función de las distintas intensidades de entrada para poder hacer una comparación rápida entre ellas.

Para estudiar este modelo se explica la lógica interna y su composición a través de la exploración de los distintos niveles de abstracción de los que se compone nuestro componente.

Si profundizamos en el modelo de supercondensador se observa que tiene dos entradas y tres salidas, las dos entradas son el borne positivo y el borne negativo que se conectan a la señal de entrada y las tres señales de salida que se tienen son la intensidad que atraviesa el condensador que la hallamos en función de la resistencia interna del condensador y su tensión de salida del

condensador, la tensión actual del mismo que es la diferencia entre el borne positivo y el negativo y el rendimiento del condensador.

Este último dato es un dato proporcionado por el modelo teórico del supercondensador junto a la tensión instantánea de borne negativo, estos datos los consigue a partir del valor de la intensidad de entrada y los datos previos.

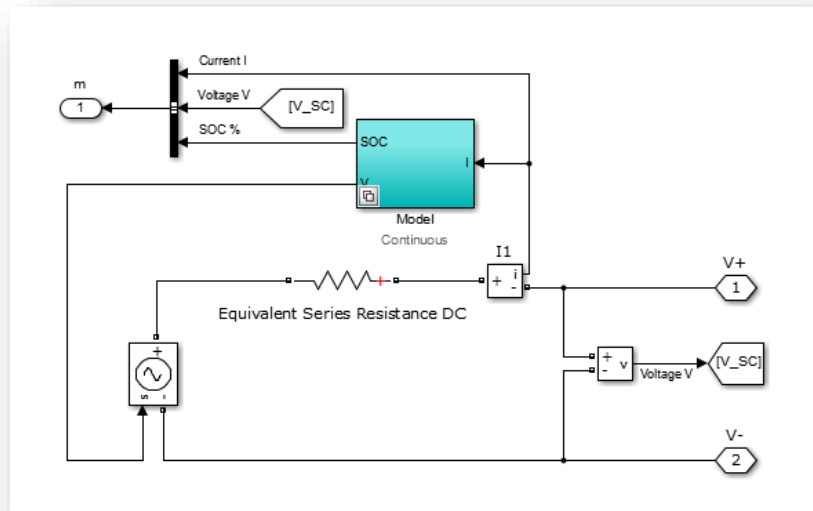


Figura 28 – Modelo matemático simplificado de un Supercondensador

El modelo recreado es el modelo teórico más los cambios producidos por las características internas del supercondensador a simular, también se incluyen los parámetros de descarga del circuito para las condiciones de circuito abierto.

Este último bloque actúa cuando la intensidad de entrada al supercondensador es nula produciendo una descarga en la tensión acumulada en función de los parámetros configurados

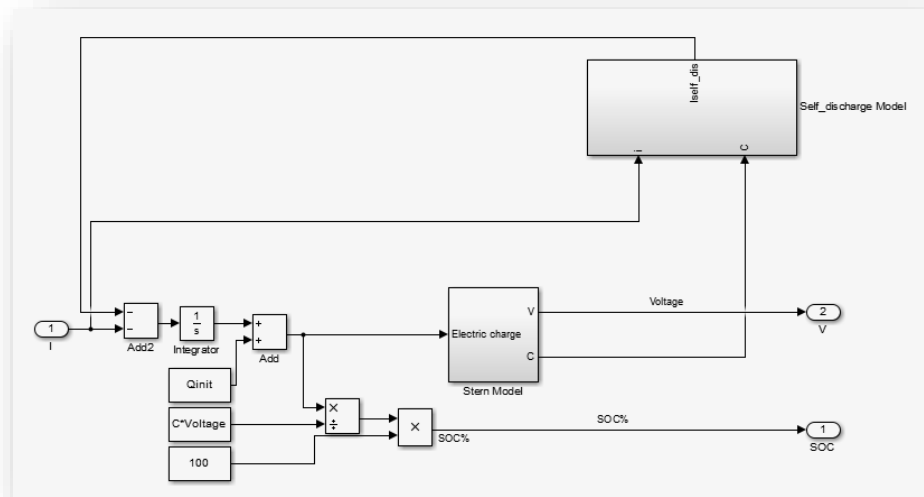


Figura 29 – Modelo matemático de un Supercondensador

En la parte inferior de la imagen anterior aparece el modelo teórico de la fórmula de la tensión del condensador en un condensador siendo  $V(t) = \int_{\Delta t} i(t)/C$

El bloque llamado Stern Model tiene como entradas la carga eléctrica del condensador, siendo esta la suma de la carga inicial más la carga instantánea al ser esta la integral de la intensidad en función del tiempo, las salidas de este módulo son la tensión instantánea y la carga instantánea.

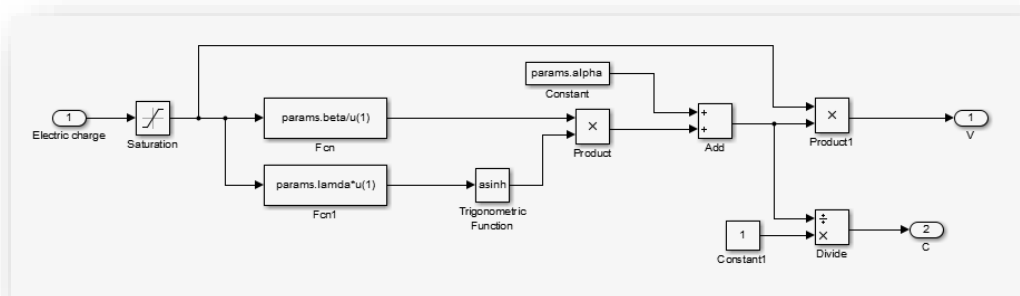


Figura 30 – Modelado matemático de la tensión y carga en función de la carga

La carga actual del supercondensador aparece en función de la carga actual tratada en función de los parámetros internos de nuestro sistema previamente configurados, también la tensión es la carga instantánea dividido entre la carga actual.

$$V = \frac{1}{C} \cdot q = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + \frac{q_0}{C}$$

El bloque de Self\_discharge Model se activa al ser la intensidad del supercondensador cercana a 0 de forma que cuando se encuentra en condiciones de circuito abierto se produce una descarga en función de los parámetros y con una recta específica de descarga de este elemento, las entradas a este bloque nos la intensidad actual de descarga y la carga instantánea, la salida nos indica la intensidad de autodescarga, siendo nulo el valor de esta intensidad en condiciones de circuito cerrado.

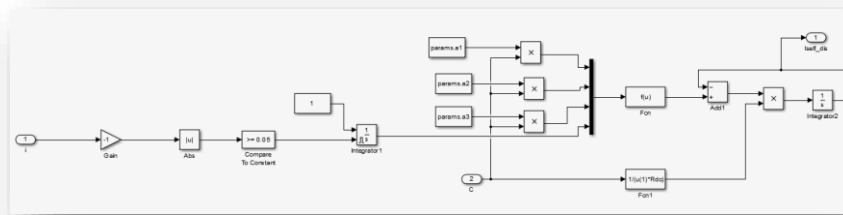


Figura 31 – Modelo matemático de la curva de descarga de función de la variación de la intensidad

## 4.1 Simulación de una recta de descarga

En este apartado se muestran los resultados de una recta de descarga de un supercondensador, para ello vamos a realizar un sencillo circuito en el que se simula el modelo de matlab del supercondensador y el del condensador para comparar el modelo teórico y el real.

El modelo que nos ofrece Simulink nos permite precargar el condensador y con ello simplemente se debe que monitorizar las variables de salida de nuestro componente y comprobar que las rectas se comportan de forma parecida a las del modelo teórico y de las gráficas proporcionadas por el fabricante.

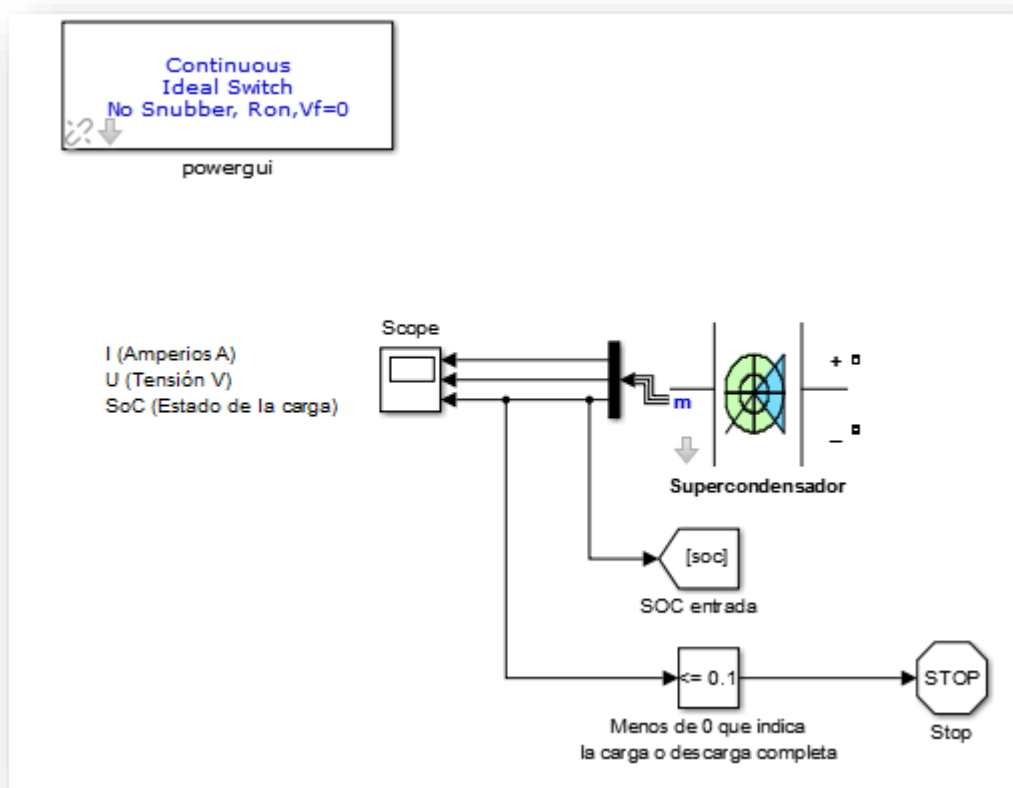
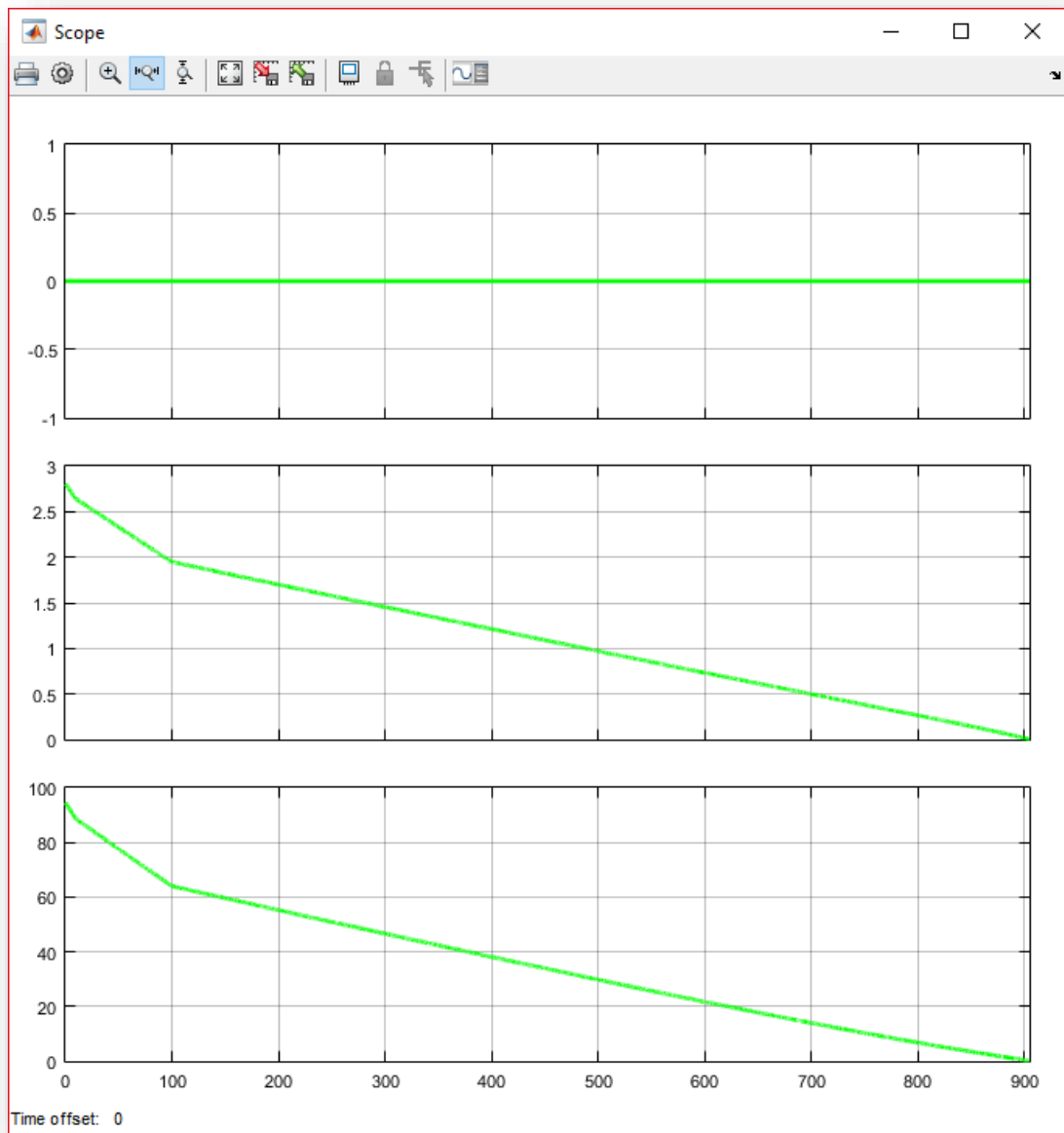


Figura 32 – Circuito de autodescarga de un Supercondensador

Para este circuito se han obtenido las gráficas mostradas en la *Figura 33*, en ella se observa como disminuye la tensión con una recta de descarga parecida a la curva exponencial del modelo teórico, la intensidad que atraviesa el supercondensador durante la descarga son 0A, ya que la descarga se produce por fenómenos internos y no aporta intensidad a través de sus terminales, esta simulación finaliza en cuanto el estado de carga llega al valor 0.1, es decir, totalmente descargado.



*Figura 33 – Curvas de autodescarga de Supercondensador*

Ahora introducimos un modelo completamente teórico del condensador que nos ofrece matlab, para ello se realiza un circuito de descarga a través de una resistencia de mismo valor en el modelo teórico y el real.

Para realizar el modelo teórico se deben conocer los datos que nos proporciona el fabricante, también se tiene que tener en cuenta que para poder compararlo correctamente necesitamos tener tres señales, la intensidad entre los bornes del condensador, la tensión entre bornes y el estado de la carga.



El modelo será un condensador en serie con una resistencia interna y una externa que nos modelara la recta de autodescarga, sin ella el valor de la tensión es constante.

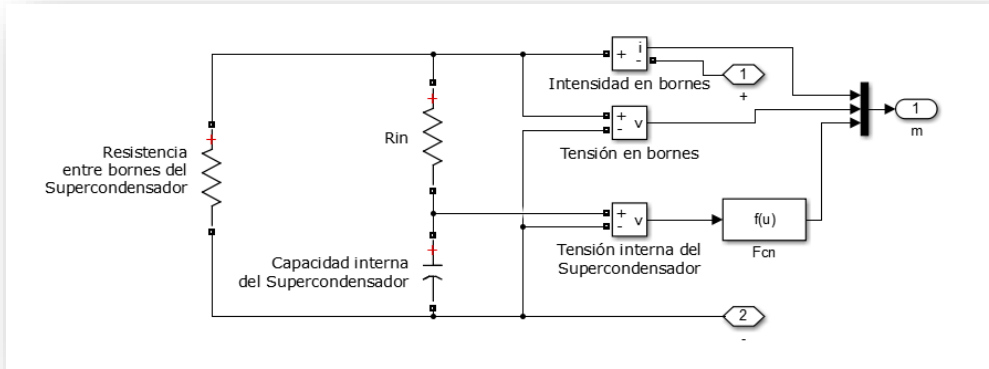


Figura 34 – Modelo teórico del Supercondensador

El bloque de la función realiza el cálculo del estado de la carga a partir de la tensión interna del componente y la tensión nominal del supercondensador que es un elemento constante.

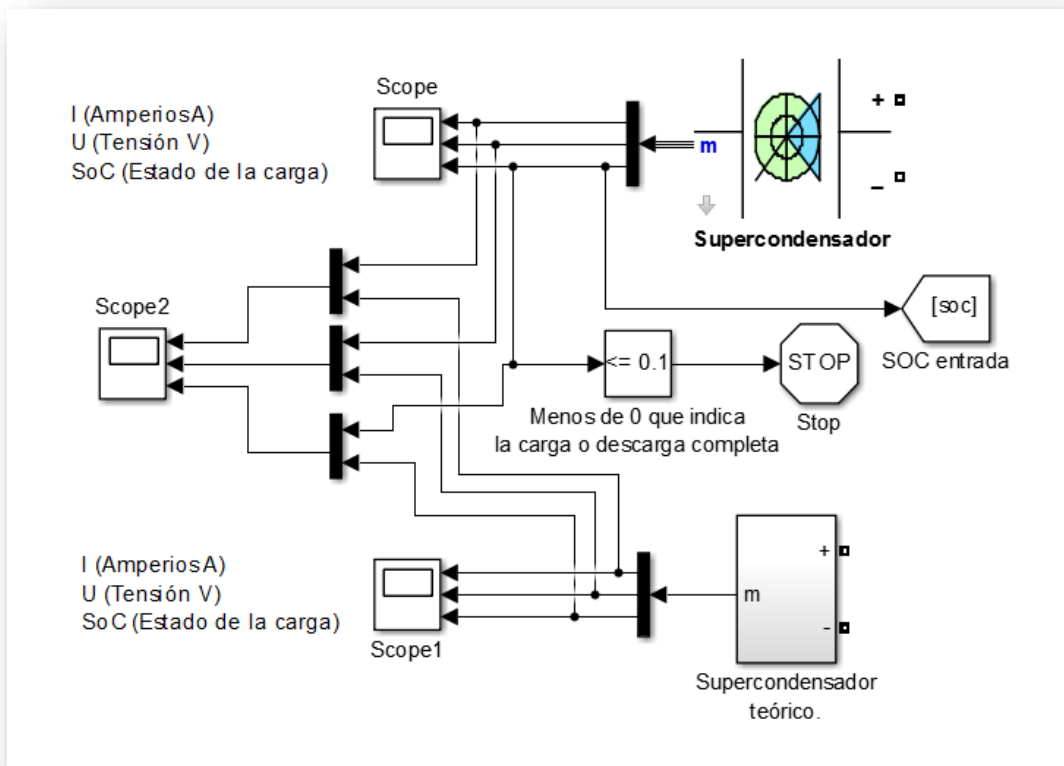
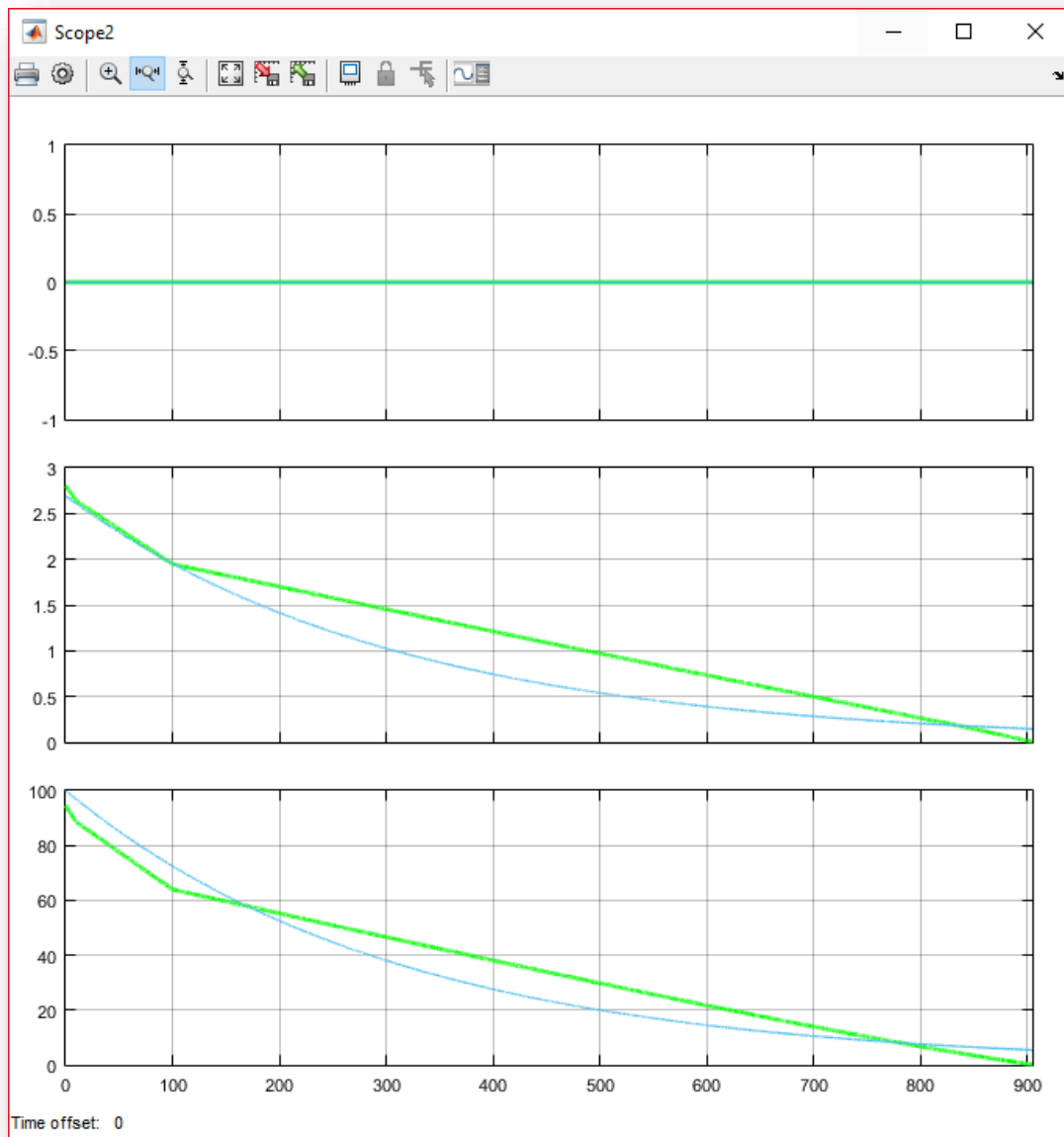


Figura 35 – Circuito de comparación de modelos teórico y real

Las rectas que se obtienen son las mostradas en la *Figura 36*, en ellas se observa que la intensidad de ambos modelos es 0A, y que las rectas de carga descenden hasta llegar a 0 siguiendo un patrón de exponencial decreciente.

En primer momento las gráficas se solapan mostrando que el comportamiento inicial de descarga del modelo real del supercondensador es el mismo que el teórico, pero no continua así durante toda la recta de descarga ya que como vimos en la introducción a este modelo de Simulink el modelo depende de los materiales con los que ha sido creado y esto no lo refleja el modelo teórico.



*Figura 36 – Rectas de descarga real y teórica del Supercondensador*

## 4.2 Simulación de un ciclo de carga-descarga

En este apartado se muestra un ciclo de carga y descarga del modelo real y el teórico de supercondensador, realizando una comparación entre los modelos y observar el comportamiento que nos ofrece el supercondensador.

El circuito creado está compuesto del modelo teórico del supercondensador y el ofrecido por Simulink, el cambio de carga a descarga de produce al llegar a 0 el valor del a tensión entre los bornes del Supercondensador, la intensidad de descarga que se utiliza en este apartado será de  $\pm 41\text{Ah}$  con un relay que hace cambiar de dirección la intensidad que llega a nuestro sistema.

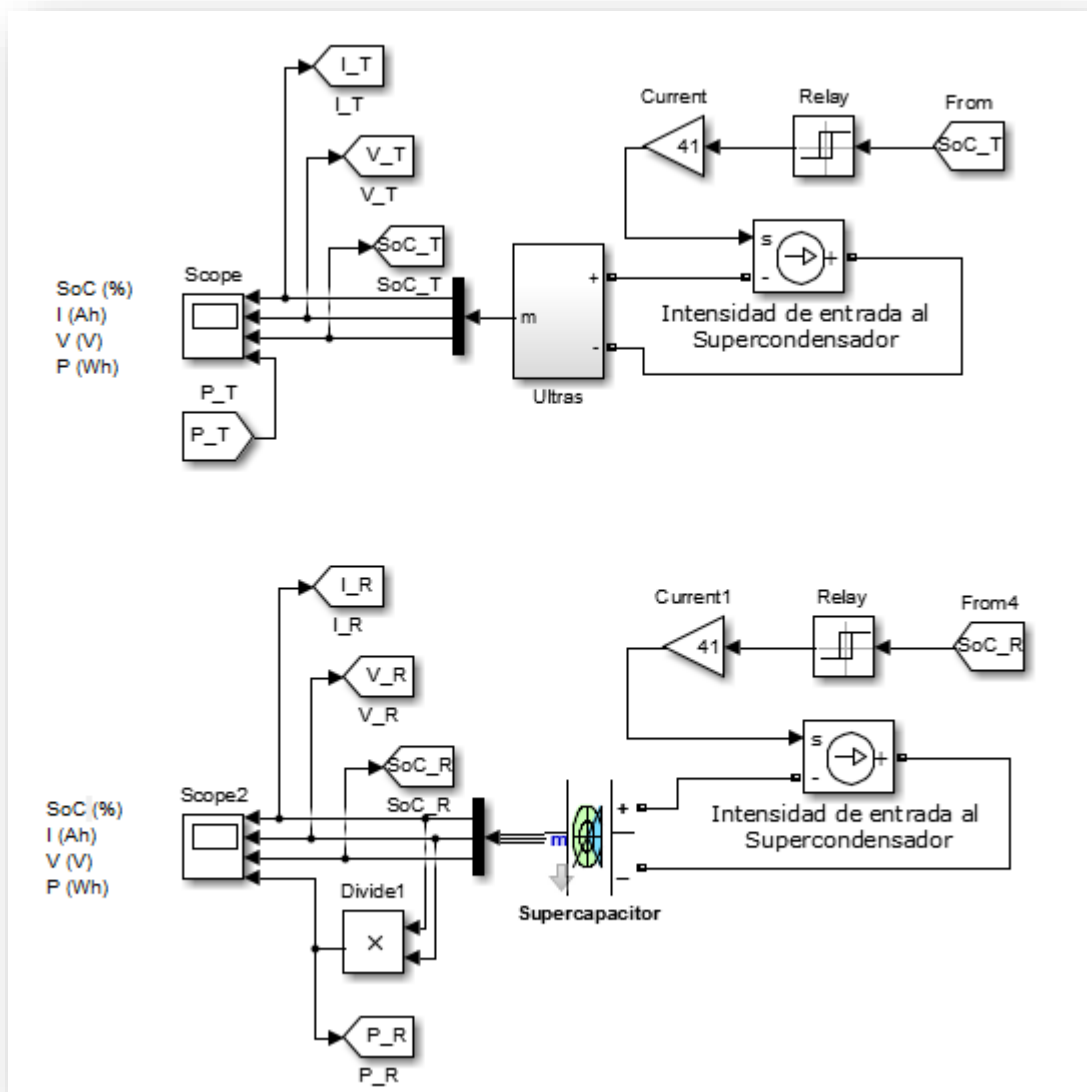


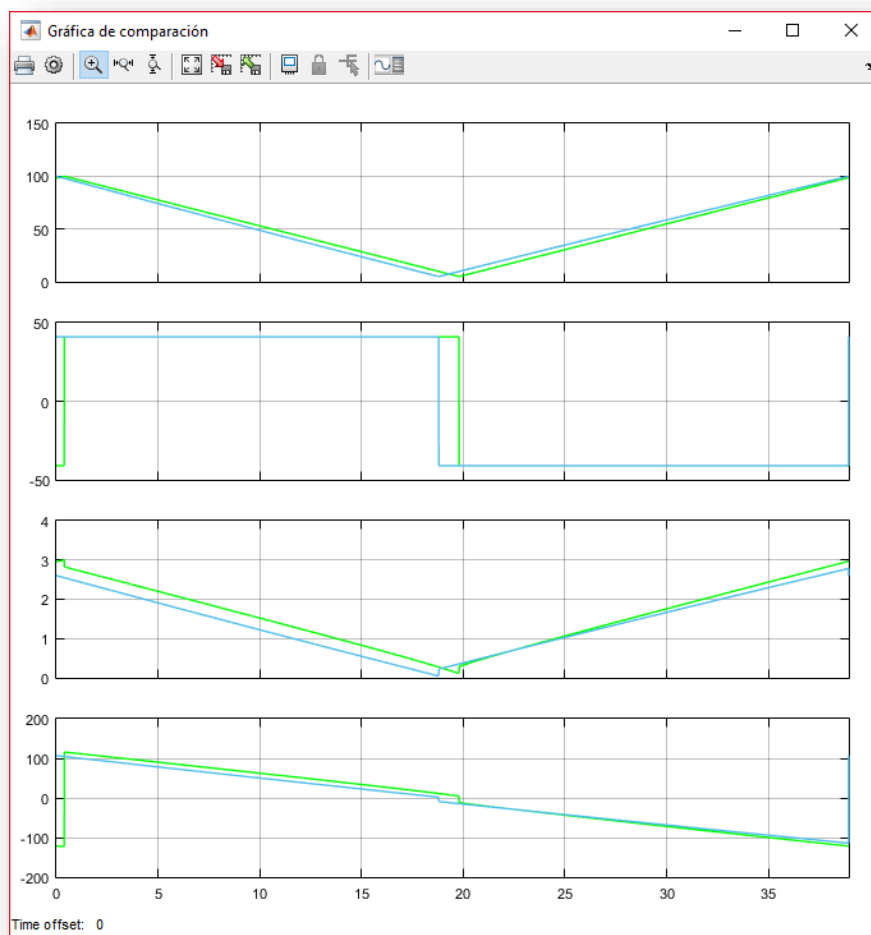
Figura 37 – Circuitos para ciclo de carga y descarga del supercondensador

Se trata de un sistema controlado en función del estado de carga del supercondensador, mientras que el valor del estado de carga no llegue a cero la intensidad de descarga se mantiene positiva hasta descargar completamente el supercondensador.

Al llegar a cero cambia la polaridad y se produce el ciclo de carga, hasta llegar al total de la carga que para la simulación.

En la *Figura 38* se pueden ver las gráficas representativas de los modelos explicados, la gráfica verde es la correspondiente al modelo real, se puede observar que aparece retrasada respecto a la teórica.

Esto se produce por los efectos reales del modelo, se muestran también en el paso de descarga a carga, que hay una variación instantánea de la intensidad producida por la tensión que cae en la resistencia interna manteniéndose constante la tensión interna, se observa también este pico de potencia en la última gráfica.



*Figura 38 – Gráficas de estado de carga, intensidad, tensión y potencia*

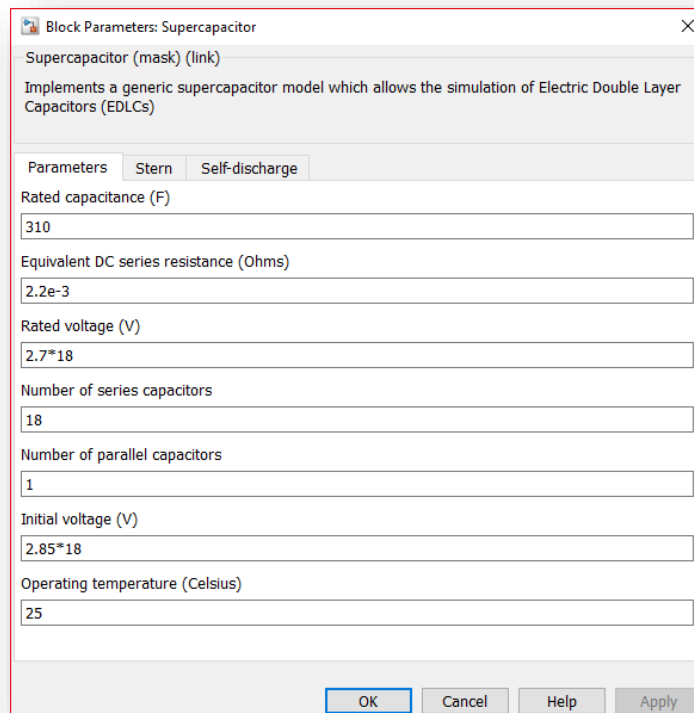
### 4.3 Simulación de un ciclo de carga y descarga para una batería de Supercondensadores

En este apartado se simula un conjunto de supercondensadores, el propósito es entregar y almacenar grandes cantidades de intensidad de corriente de forma eficiente, el modelo que nos ofrece Simulink tiene un apartado que nos permite crear las agrupaciones que se necesitan crear para cada aplicación.

En el modelo aparecen dos apartados dentro de la configuración del modelo para indicar el número de condensadores que se pretende simular en serie y en paralelo, en esta simulación colocan 18 supercondensadores en serie, teniendo una tensión total de entre 48.6V y 51.3V.

El sistema que utilizamos es el descrito en la *Figura 37*, lo comparamos con el modelo teórico de un supercondensador ya que se pretende que el comportamiento sea el mismo que en el modelo, pero con un aumento de los rangos de tensiones entre los bornes del elemento.

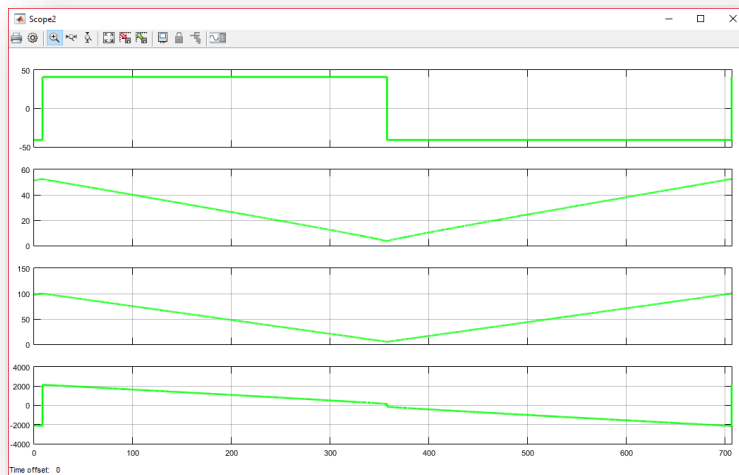
La configuración que utilizamos en este apartado es la mostrada en la *Figura 39*.



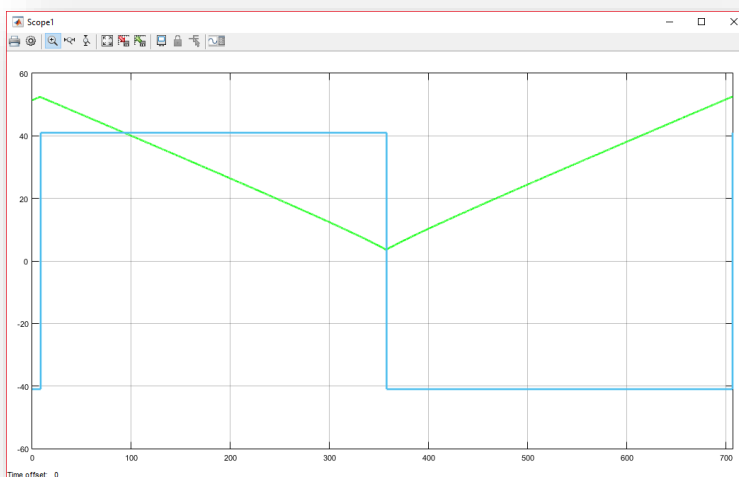
*Figura 39 – Configuración para la batería de 18 Supercondensadores*

Las gráficas que se muestran tienen la misma forma de onda que las obtenidas para un solo supercondensador, pero cambiando las magnitudes de las señales, especialmente la tensión entre bornes de la batería de supercondensadores.

Al haber escogido una estructura en serie de 18 supercondensadores, la tensión soportada entre bornes será 18 veces mayor, manteniéndose la capacidad de suministrar intensidad de corriente constante, en la *Figura 40* observamos las gráficas de intensidad, tensión, potencia y SoC de los elementos, en la *Figura 41* ve observan con más detalle la tensión e intensidad entre bornes.



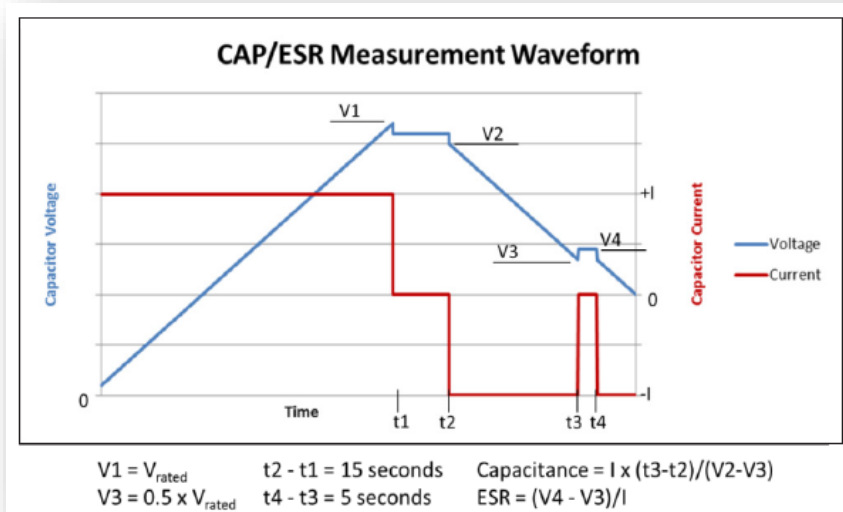
*Figura 40 – Señales sobre el supercondensador*



*Figura 41 – Tensión e intensidad sobre los bornes de la batería de 18 supercondensadores*

## 4.4 Comparación con el sistema real

Para comprobar que el sistema se puede simular se necesita un modelo real, en este apartado se ha escogido el supercondensador BCAP0310 de la empresa Maxwell Technologies, en el datasheet del dispositivo se encuentran las gráficas del elemento, se muestran en la *Figuras 42*.



*Figura 42 – Comportamiento de la señal de tensión respecto a la de intensidad en supercondensador real*

Para realizar la comparativa se ha introducido una señal cuadrada para modelar la intensidad de entrada a los supercondensadores, el circuito utilizado es el mostrado en la *Figura 44*.

Se puede observar que la comparativa también la realizamos sobre el modelo matemático para comprobar que el funcionamiento es el correcto, la señal de entrada al sistema se muestra en la *Figura 43*.

Las señales obtenidas en el modelo matemático se muestran en la *Figura 45*, y en la *Figura 46* las señales del modelo proporcionado por Simulink.

Se observa que las señales que aparecen en las figuras son similares a las proporcionadas por el fabricante, por lo que el modelo se puede utilizar perfectamente para una simulación real de baterías.

Se puede distinguir una mayor pendiente en la autodescarga del modelo matemático que en el proporcionado por Simulink por lo que será este último más real al ser más parecido a las gráficas del fabricante.

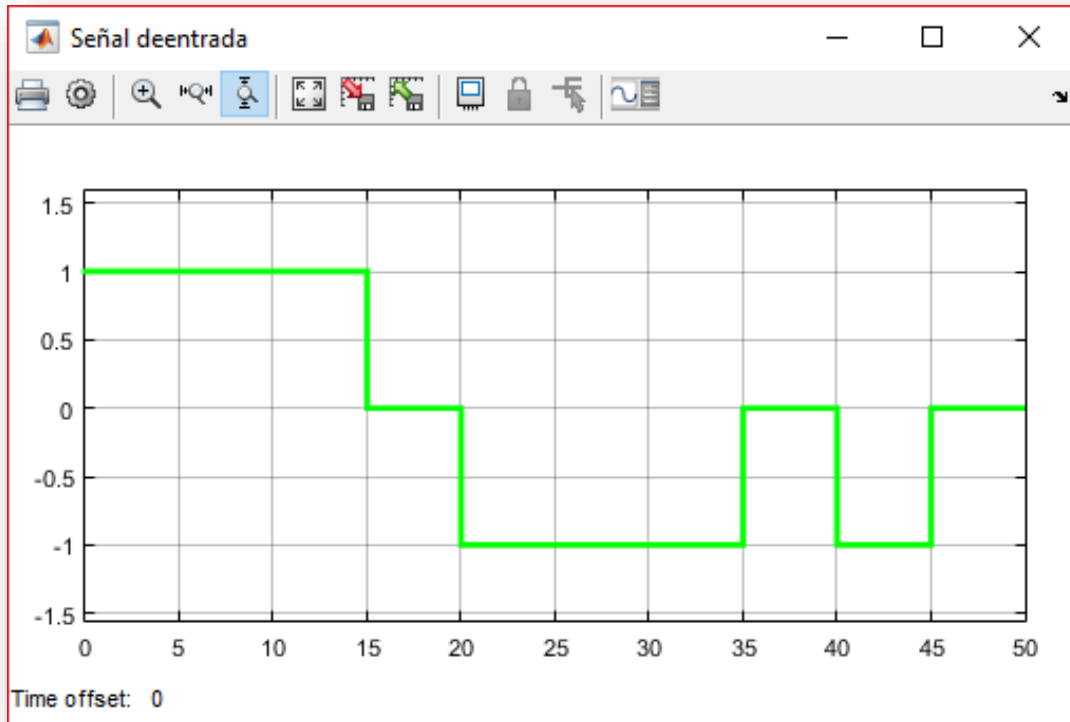


Figura 43 – Señal de entrada

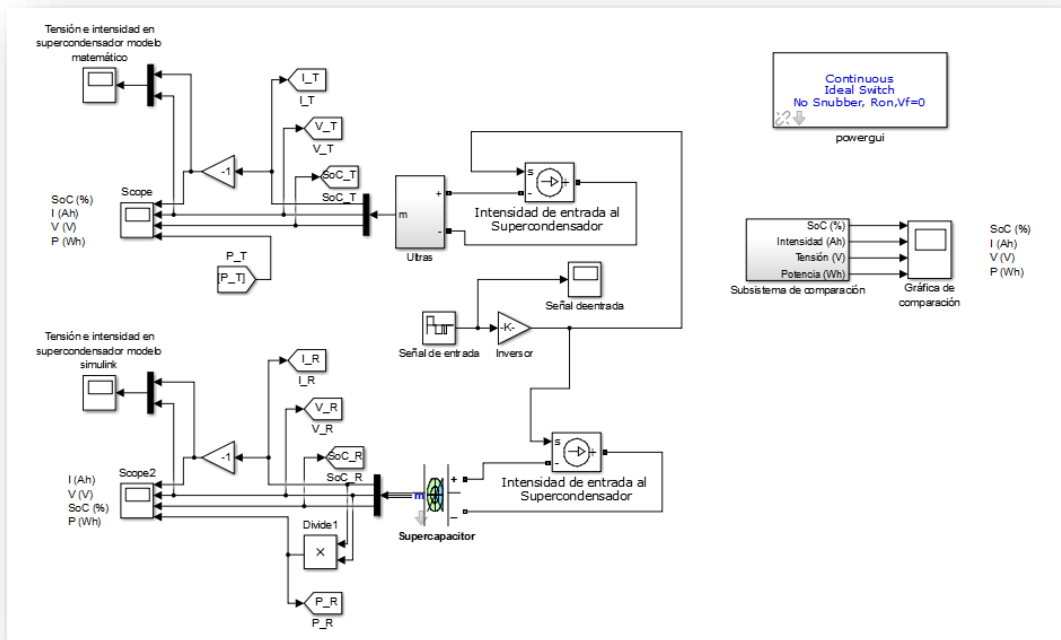


Figura 44 – Sistema de comparación de supercondensadores



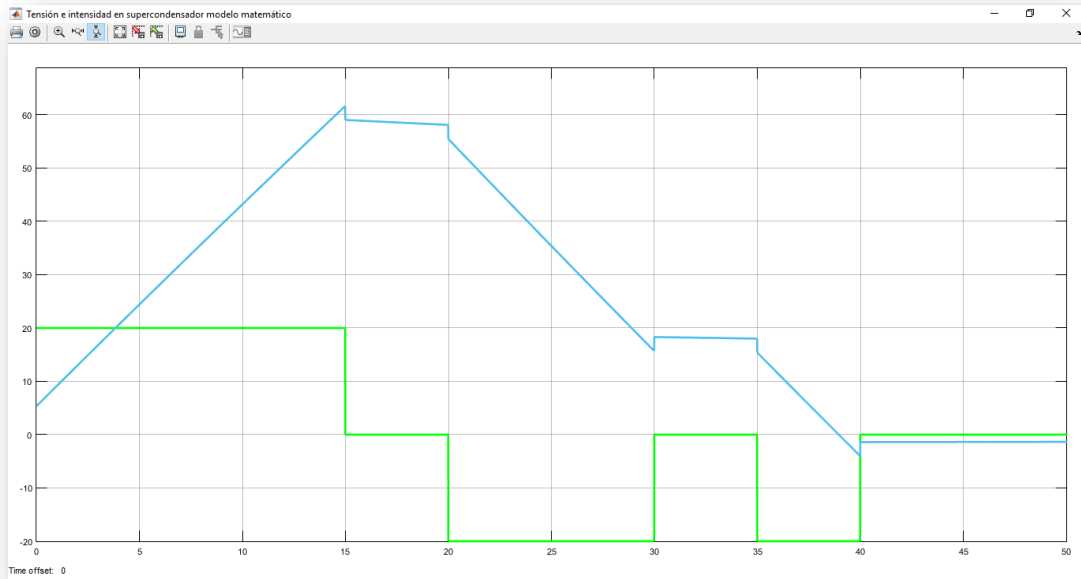


Figura 45 – Tensión e Intensidad en el modelo matemático de supercondensador

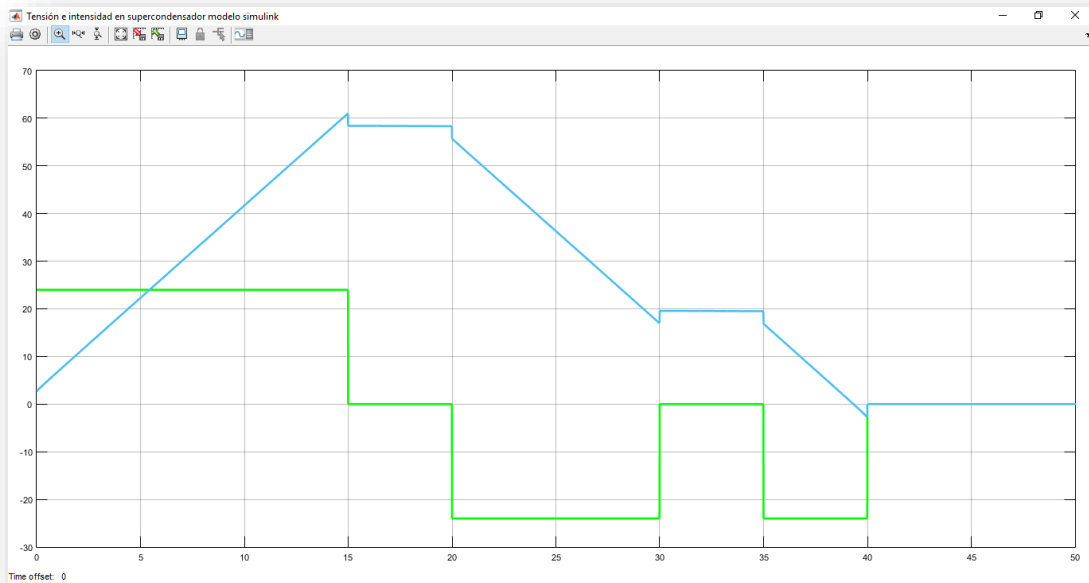


Figura 46 - Tensión e Intensidad en el modelo Simulink de supercondensador

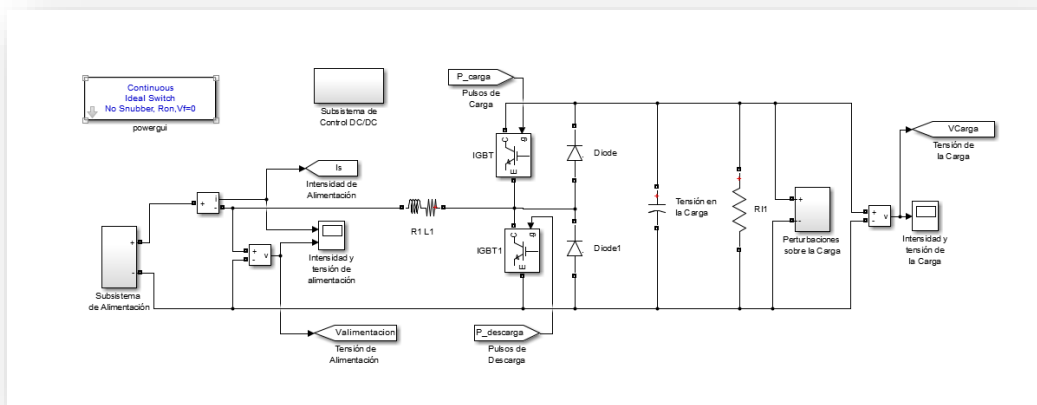


## 5. Diseño del sistema de control para el DC/DC.

En este apartado vamos a realizar dos simulaciones de transferencia y control de energía a través de un convertidor DC-DC controlando la tensión en la carga.

Se estresa este sistema con una carga a la a la cual se le aplican variaciones de intensidad para variar su tensión, y poder observar las diferencias entre la alimentación con una batería y con un sistema híbrido entre baterías y supercondensadores.

Para poder realizar estas simulaciones primero realizamos un estudio matemático de nuestro sistema para poder luego aplicar unas correctas técnicas de control sobre la carga y conseguir un control correcto, para el sistema se utiliza un control DC-DC con el modelo que mostramos en la *Figura 47*.



*Figura 47 – Sistema Elevador DC/DC alimentado por baterías*

En el modelo se observa un subsistema de alimentación formado en un primer modelo por una batería y un condensador, este subsistema será el que se necesite modificar, cambiando el condensador por una batería de supercondensadores y viendo así la relación entre los modelos y las mejoras producidas sobre la alimentación.

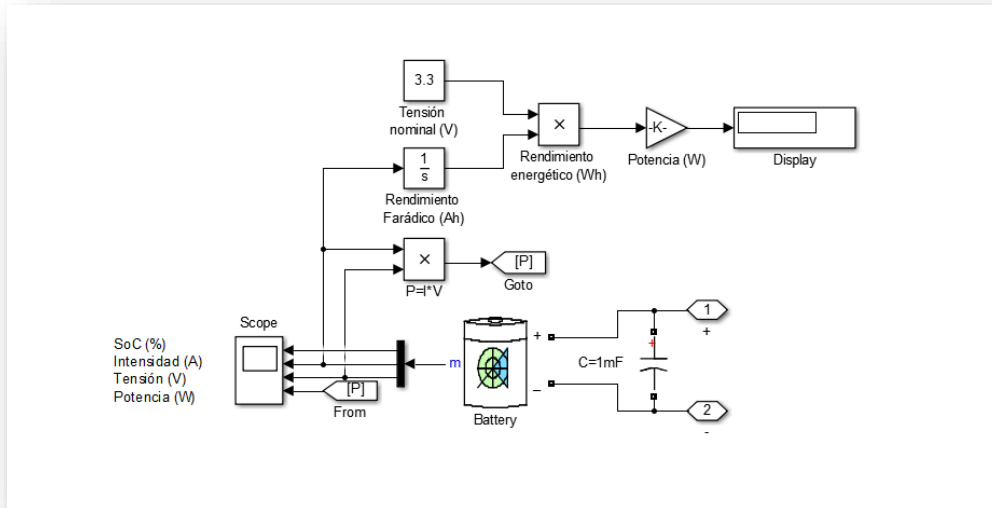


Figura 48 – Subsistema de Alimentación

El subsistema de la alimentación está conectado a una inductancia real que llega a un convertidor DC/DC, formado por dos IGBT con su correspondiente diodo en anti-paralelo, se crean dos ramas, cada una tiene por cometido la regulación de la transferencia de energía de la fuente a la para regular la tensión sobre la carga, las señales que controlan este aspecto vienen desde el módulo de control del DC/DC.

Se ha escogido este modelo ya que se trata de un sistema bidireccional de direccionamiento de energía, de forma que se pueda mantener una tensión constante en la carga en función de la dirección en la que circule el total de la intensidad de corriente por los IGBT's en un periodo.

Los IGBT's están controlados por una señal cuadrada que nos permite actuar en un modo de transferencia constante de intensidad, de forma que variando el ciclo de trabajo de la señal que controla los IGBT's pudiendo dirigir el total de la intensidad en un periodo controlando la dirección de la energía en el sistema.

Los IGBT's del sistema trabajan en modo Elevador en modo de conducción continua a partir de una señal cuadrada que los hará conmutar entre corte y conducción del valor de una señal PWM.

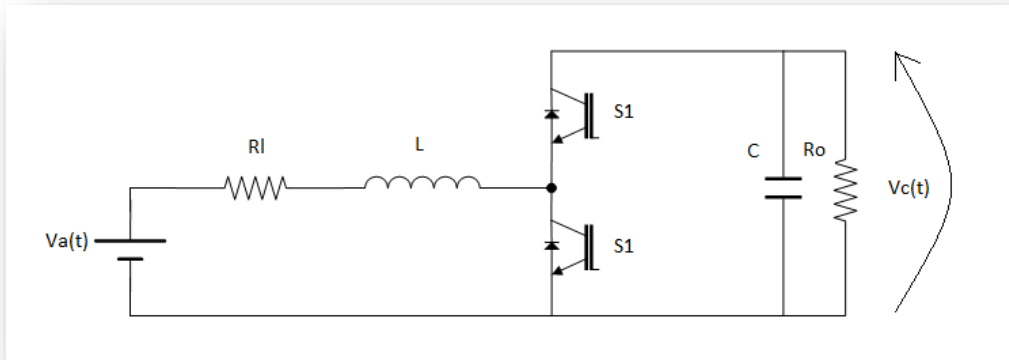


Figura 49 – Modelo de Elevador

En este modo se controla el tiempo de encendido y apagado del IGBT S1 y S2, manteniendo S2 apagado y conduciendo el diodo en anti paralelo, habitualmente incorporado en el propio encapsulado del IGBT.

En este modo se trabaja con el ciclo de trabajo de la señal D, la forma de onda tiene un rizado en la intensidad de la bobina, siendo siempre mayor que 0A en media a lo largo de un ciclo de  $S(t)$ , es importante tener en cuenta que la intensidad que circula por la inductancia y la corriente que circula hacia la carga por el diodo son claramente distintas.

Por lo que para el control necesitamos tener en cuenta la intensidad con pendiente más abrupta que es la que va hacia la carga, es necesario tener en cuenta el modo de conducción de los IGBT's para sacar el modelo de la planta y poder hallar un correcto punto de trabajo a la hora de linealizar el modelo.

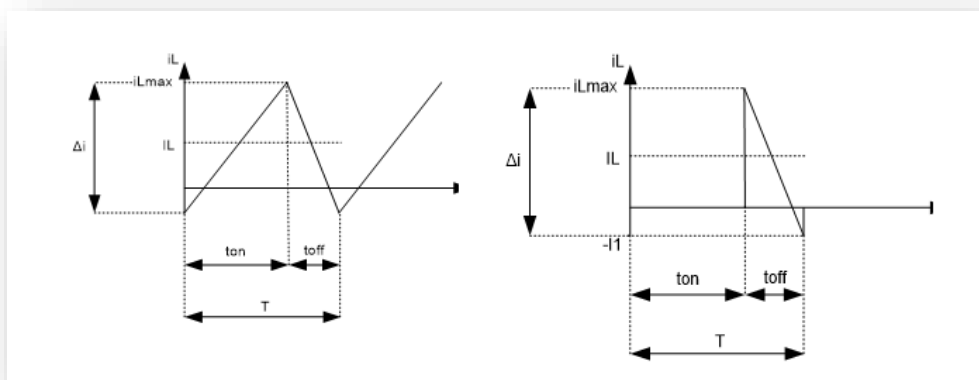


Figura 50 – Intensidad a través de la Inductancia (Izquierda) e Intensidad a través de la Carga en relación con la que atraviesa la inductancia (Derecha).

En la carga se tiene un condensador en paralelo a una resistencia de alta resistencia, para poder crear perturbaciones en la carga se han incluido un

subsistema que actúa provocando una perturbación sobre la carga de forma externa a nuestro sistema.

Está compuesto de una fuente de corriente que nos permite crear variaciones sobre la intensidad requerida por la carga y con esto una variación de la tensión sobre la carga, esto nos permite probar el control del DC/DC de forma controlada.

Nos permite observar el efecto en la alimentación en función de los requerimientos de la carga y así crear un estrés real sobre la alimentación.

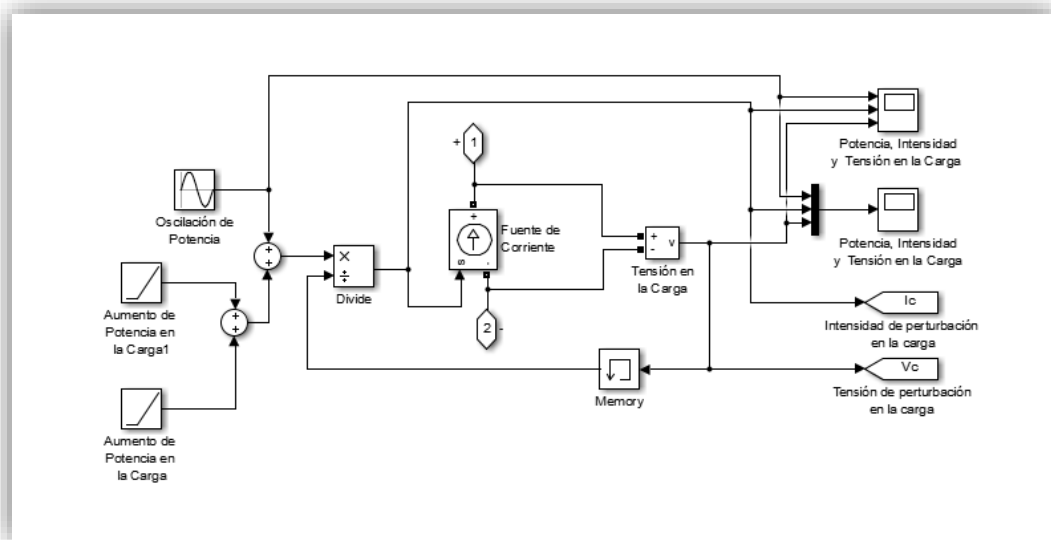


Figura 51 – Subsistema de Perturbación de la intensidad sobre la carga

## 5.1 Modelado de ecuaciones la planta del sistema.

Comenzamos el estudio teórico de nuestro sistema obteniendo el modelo de la planta del sistema que se pretende controlar, para ello se hace un estudio sobre las magnitudes que aparecen en nuestro sistema.

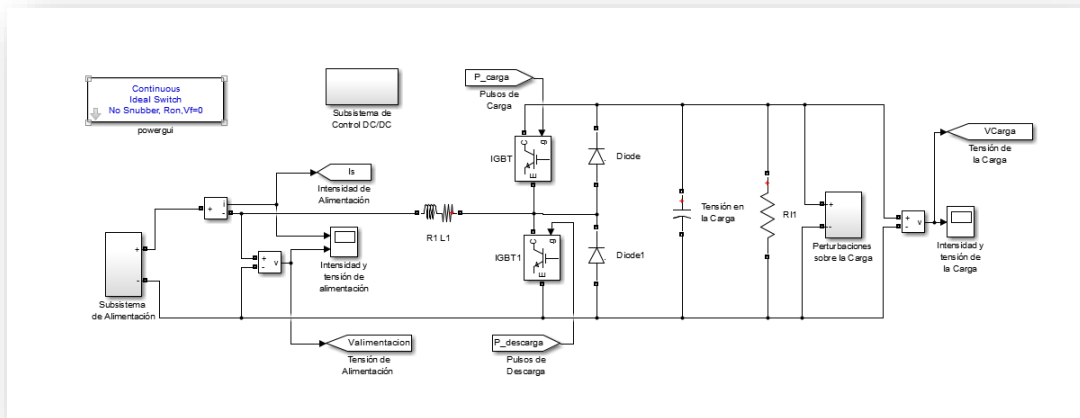


Figura 52 – Sistema Elevador DC/DC Controlado

Dentro del modelo de nuestro sistema se observan distintos modelos, en función del valor de la señal de control que actúa sobre los IGBT's, esta señal será una señal cuadrada que nos permitirá activar uno u otro en función del momento del ciclo de trabajo en el que se encuentre el sistema, de forma que siempre tengamos un IGBT en conducción.

Si la señal desactiva el  $IGBT_1$  cortándolo y separando eléctricamente el circuito, se produce una conducción de la intensidad a través de la inductancia haciendo que almacene energía, manteniendo separada la carga sobre la que se produce una pequeña variación de tensión en la carga producida por el efecto de autodescarga del condensador, mientras el  $IGBT_1$  permanece cortado conduciendo su diodo en anti-paralelo, el modelo que estudiamos es el mostrado a continuación.

En la Figura 52 se muestra el modelo teórico de nuestro sistema, se trata de un modelo simplificado, la notación se ha cambiado para adaptarla al sistema real de estudio, a lo largo de este apartado se demuestra que el bloque de alimentación no interviene en la linealización del sistema, por lo que lo sustituimos por la variable  $V_a(t) = e(t)$  manteniéndose la notación en el resto de elementos.

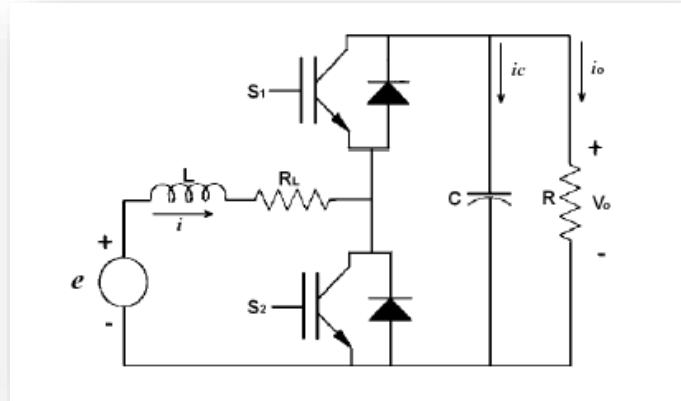


Figura 53 – Modelo teórico convertidor Boost bidireccional en corriente

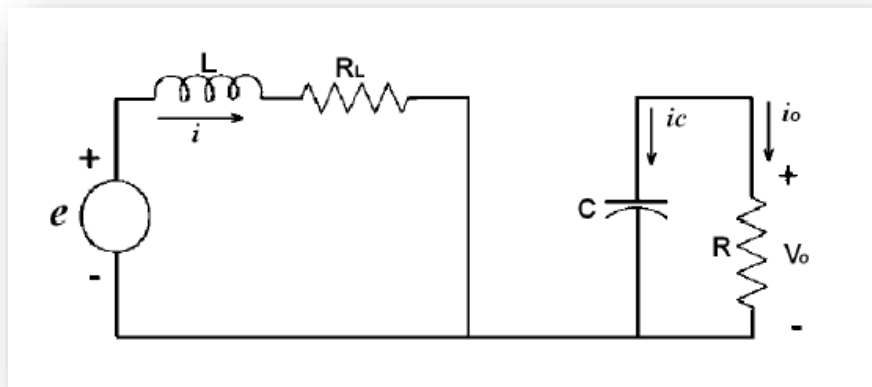


Figura 54 – Modelo teórico simplificado de convertidor Boost, S1 corte S2 activo  $u(t)=0$

Ecuaciones para  $u(t) = 0$ :

$$i_g(t) = i_l(t) + i_a(t) \quad (1)$$

$$V_g(t) = R_g * i_g(t) + V_a(t) \quad (2)$$

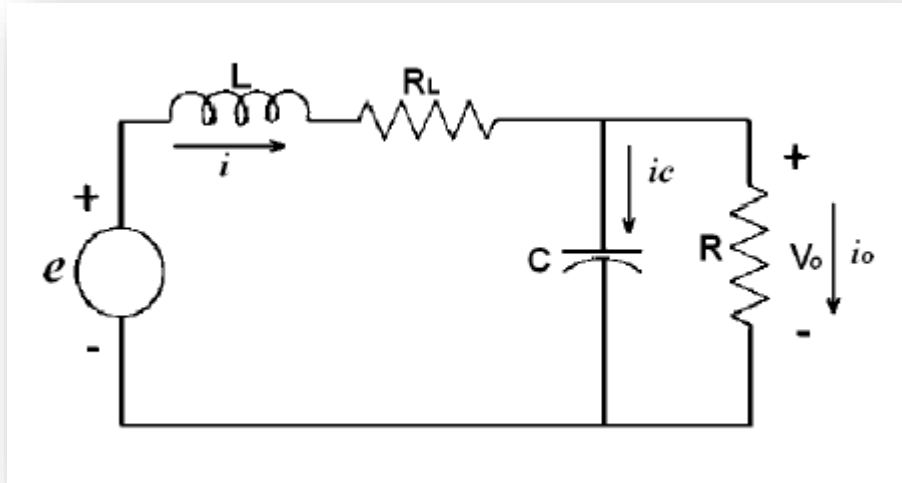
$$C * \frac{\partial V_a(t)}{\partial t} = i_a(t) \quad (3)$$

$$V_a(t) = L * \frac{\partial i_l(t)}{\partial t} + R_l * i_l(t) \quad (4)$$

$$i_l(t) = -(i_c(t) + i_o(t)) = -\left( C * \frac{\partial V_c(t)}{\partial t} + \frac{V_c(t)}{R_o} \right) \quad (5)$$



Cuando la señal  $u(t) = 1$  se activa el  $IGBT_1$  pasando de corte a conducción, en ese instante se desactiva el  $IGBT_2$  pasando a conducir el diodo  $D_2$  en anti-paralelo, el modelo resultante es el mostrado en la *Figura 55*.



*Figura 55 - Modelo teórico simplificado de convertidor Boost, S1 corte S2 activo  $u(t)=1$*

Ecuaciones para  $u(t) = 1$ :

$$i_g(t) = i_l(t) + i_a(t) \quad (1)$$

$$V_g(t) = R_g * i_g(t) + V_a(t) \quad (2)$$

$$C * \frac{\partial V_a(t)}{\partial t} = i_a(t) \quad (3)$$

$$V_a(t) = L * \frac{\partial i_l(t)}{\partial t} + R_l * i_l(t) + V_c(t) \quad (6)$$

$$i_c(t) = -i_o(t) \rightarrow C * \frac{\partial V_c(t)}{\partial t} = -\frac{V_c(t)}{R_o} \rightarrow V_c(t) = -CR_o * \frac{\partial V_c(t)}{\partial t} = (7)$$

Como se puede observar las relaciones antes de la tensión de alimentación  $V_a(t)$  permanecen constantes ante la variación de la señal  $u(t)$  por lo que se mantienen estas ecuaciones constantes, serán utilizadas para la comparación del estrés de la batería en función del condensador en la alimentación y la batería de Supercondensadores que se colocan más adelante.

Ecuaciones Generales del Sistema:

$$i_g(t) = i_l(t) + i_a(t) \quad (1)$$

$$V_g(t) = R_g * i_g(t) + V_a(t) \quad (2)$$

$$C * \frac{\partial V_a(t)}{\partial t} = i_a(t) \quad (3)$$

$$V_a(t) = L * \frac{\partial i_l(t)}{\partial t} + R_l * i_l(t) + u(t) * V_c(t) \quad (8)$$

$$V_c(t) = -CR_o * \frac{\partial V_c(t)}{\partial t} - u(t) * R_o i_o(t) \quad (9)$$

Si la señal  $u(t)$  la modelamos con el ciclo de trabajo se puede llegar a la conclusión en que va a estar a 1 un tiempo  $t_{on}/T$  que es el ciclo de trabajo  $D$  ya que se tendrá en cuenta que utilizamos el **modo de conducción continua MCC**, teniendo en cuenta este modelo es representado por las siguientes ecuaciones del sistema general.

Al simplificar las ecuaciones resultan las ecuaciones que vamos a utilizar para diseñar un correcto controlador de nuestro sistema.

Ecuaciones Generales del Sistema:

$$i_g(t) = i_l(t) + i_a(t) \quad (1)$$

$$V_g(t) = R_g * i_g(t) + V_a(t) \quad (2)$$

$$C * \frac{\partial V_a(t)}{\partial t} = i_a(t) \quad (3)$$

$$V_a(t) = L * \frac{\partial i_l(t)}{\partial t} + R_l * i_l(t) + d(t) * V_c(t) \quad (10)$$

$$V_c(t) = -CR_o * \frac{\partial V_c(t)}{\partial t} - d(t) * R_o i_o(t) \quad (11)$$

## 5.2 Linealización de las ecuaciones de la planta

Para realizar nuestro controlador se debe hallar el modelo de la planta, para ello se utiliza la transformada de Laplace, hay que tener en cuenta que el uso de la transformada de Laplace está restringido a modelo Lineales, por lo que necesitamos tratar nuestra planta como un modelo lineal.

El efecto de  $u(t)$  evita que lo sea, por lo que necesitamos hacer un estudio previo de nuestro sistema para ver cuál sería el punto de trabajo y a partir del punto calculado, obtener las ecuaciones en pequeña señal del sistema que serán lineales en torno a ese punto.

El punto de trabajo se estudia para el modelo estático de la planta por lo que se trata de un modelo en el que no hay ningún tipo de variación en las señales, a partir de esta suposición y las ecuaciones (10) y (11) se obtienen las ecuaciones estáticas de la planta.

Ecuaciones estáticas del sistema:

$$0 = V_A - R_L * I_L - D * V_O \quad (12)$$

$$0 = DI_L - I_O \rightarrow D = \frac{I_O}{I_L} \quad (13)$$

$$(13) \rightarrow (12) \rightarrow 0 = V_A - R_L * I_L - \frac{I_O}{I_L} * V_O \rightarrow 0 = -R_L I_L^2 + I_L V_A - I_O V_O \quad (14)$$

$$I_L = \frac{V_A \pm \sqrt{V_A^2 - 4R_L I_O V_O}}{2R_L} \quad (15)$$

De la ecuación (15) utilizo el resultado de la raíz que tiene la intensidad a revés de la inductancia menor, para evitar en todo lo posible perder energía y así disminuir las pérdidas, una vez se halla el punto de trabajo del sistema hallamos las ecuaciones en pequeña señal de nuestro sistema.

Necesitamos el modelo de las ecuaciones que van a producir variaciones, de forma que las modelamos con su valor continuo más la variación de la señal, estas señales serán las referidas a la intensidad por la inductancia ( $i_l(t)$ ), el ciclo de trabajo ( $d(t)$ ), la tensión en la carga ( $v_c(t)$ ) y la intensidad en la carga ( $i_o(t)$ ).

Ecuaciones promediadas para pequeña señal:

$$\langle i_l(t) \rangle = I_L + \widehat{i_l(t)} \quad (16)$$

$$\langle d(t) \rangle = D + \widehat{d(t)} \quad (17)$$

$$\langle v_c(t) \rangle = V_C + \widehat{v_c(t)} \quad (18)$$

$$\langle i_o(t) \rangle = I_O + \widehat{i_o(t)} \quad (19)$$

Aplicando las ecuaciones promediadas al modelo de ecuaciones de la planta resultan las siguientes ecuaciones:

$$v_a(t) = L * \frac{\partial \langle i_l(t) \rangle}{\partial t} + R_l \langle i_l(t) \rangle + \langle d(t) \rangle \langle v_c(t) \rangle \quad (20)$$

$$\langle v_c(t) \rangle = -CR_o * \frac{\partial \langle v_c(t) \rangle}{\partial t} - \langle d(t) \rangle \langle i_o(t) \rangle R_o \quad (21)$$

$$v_a(t) = L * \frac{\partial (I_L + \widehat{i_l(t)})}{\partial t} + R_l (I_L + \widehat{i_l(t)}) + (D + \widehat{d(t)}) (V_C + \widehat{v_c(t)}) \quad (22)$$

$$(V_C + \widehat{v_c(t)}) = -CR_o * \frac{\partial (V_C + \widehat{v_c(t)})}{\partial t} - (D + \widehat{d(t)}) \langle i_o(t) \rangle R_o \quad (23)$$

De estas ecuaciones se mantienen los términos que varían en el tiempo, despreciando los términos cuadráticos y los términos de continua obteniendo el modelo en pequeña señal del sistema.

*Ecuaciones en pequeña señal de la planta:*

$$L \frac{\partial \langle i_l(t) \rangle}{\partial t} = -R_l i_l(t) - D v_c(t) - V_C d(t) \quad (24)$$

$$C \frac{\partial \langle v_c(t) \rangle}{\partial t} = D i_l(t) + I_L d(t) - i_o(t) \quad (25)$$

Aplicamos la transformada de Laplace a las ecuaciones de nuestro sistema, para diferenciar entre valores tratamos las constantes como letras minúsculas y las señales como letras mayúsculas.

*Ecuaciones de Laplace de la planta:*

$$sLI_L(s) = -r_l I_L(s) - dV_C(s) - v_c D(s) \quad (26)$$

$$scV_C(s) = dI_L(s) + i_l D(s) - I_o(s) \quad (27)$$

## 5.3 Obtención de los modelos de planta

En esta planta se tienen distintos tipos de señales con las que trabajar y que pueden producir variaciones o perturbaciones, en función de la variable que se pretende controlar escogiendo la más conveniente.

Es aconsejable conocer las distintas relaciones del sistema para poder controlarlo mejor y poder hacer múltiples controles para controlar totalmente una variable.

$$\circ V_o(s) = H_1(s)D(s) + H_2(s)I_o(s)$$

En estas ecuaciones se relaciona la tensión en la carga con el ciclo de trabajo de los *IGBT's* y la intensidad que se produce en la carga, para ello partimos de las ecuaciones (26) y (27), despejando la intensidad a través de la inductancia de la ecuación (26), y sustituyéndola en la otra se obtienen los siguientes sistemas.

$$I_L(s) = \frac{-dV_c(s) - v_c D(s)}{sl + r_l} \quad (28)$$

$$scV_c(s) = d \left( \frac{-dV_c(s) - v_c D(s)}{sl + r_l} \right) + i_l D(s) - I_o(s) \quad (29)$$

$$V_c(s) = \left( \frac{sl i_l + (i_l r_l - d v_c)}{s^2 cl + s c r_l + d^2} \right) D(s) + \left( \frac{-(sl + r_l)}{s^2 cl + s c r_l + d^2} \right) I_o(s) \quad (30)$$

La ecuación (30) nos permite modelar el comportamiento de la tensión de salida en función del ciclo de trabajo y de la intensidad que atraviesa la carga, la primera parte de esta ecuación nos sirve para poder controlar la tensión de salida respecto a una tensión de referencia fija

Se puede observar que si se hace variar la intensidad a través de la carga se produce una perturbación sobre la tensión de salida, lo que hará variar el ciclo de trabajo para compensarlo.

$$\circ I_l(s) = G_1(s)D(s) + G_2(s)I_o(s)$$

En estas ecuaciones se relaciona la intensidad de corriente a través de la inductancia con el ciclo de trabajo de los *IGBT's* y la intensidad que atraviesa la carga, para ello partimos de las ecuaciones (26) y (27), despejando la tensión en la carga a través de la inductancia de la ecuación (27), y sustituyéndola en la otra se obtienen los siguientes sistemas.

$$V_c(s) = \frac{dI_L(s) + i_l D(s) + I_o(s)}{sc} \quad (31)$$

$$sI_L(s) = -r_l I_L(s) - d \left( \frac{dI_L(s) + i_l D(s) + I_o(s)}{sc} \right) - v_c D(s) \quad (32)$$

$$I_L(s) = \left( \frac{-di_l - scv_c}{s^2cl + scr_l + d^2} \right) D(s) + \left( \frac{d}{s^2cl + scr_l + d^2} \right) I_o(s) \quad (33)$$

La ecuación (33) nos permite modelar el comportamiento de la intensidad sobre la inductancia en función del ciclo de trabajo y de la intensidad que atraviesa la carga.

La primera parte de esta ecuación nos sirve para poder controlar la intensidad en la inductancia respecto al ciclo de trabajo de los IGBT's, se puede observar que al variar la intensidad a través de la carga se produce una perturbación sobre la intensidad en la inductancia, lo que hará variar el ciclo de trabajo para compensarlo.

$$\circ V_o(s) = M_1(s)I_L(s) + M_2(s)I_o(s)$$

En estas ecuaciones se relaciona tensión sobre la carga con el ciclo de trabajo de los IGBT's y la intensidad que atraviesa la carga, para ello partimos de las ecuaciones (26) y (27), despejando el ciclo de trabajo de la ecuación (27), y sustituyéndola en la (28) se hallan los siguientes sistemas.

$$D(s) = \frac{scV_c(s) - dI_L(s) - I_o(s)}{i_l} \quad (34)$$

$$sI_L(s) = -r_l I_L(s) - dV_c(s) - v_c \left( \frac{scV_c(s) - dI_L(s) - I_o(s)}{i_l} \right) \quad (35)$$

$$V_o(s) = \left( \frac{-(sli_l + dv_c - i_l r_l)}{di_l + scv_c} \right) I_L(s) + \left( \frac{-v_c}{di_l + scv_c} \right) I_o(s) \quad (36)$$

○ Condiciones necesarias

Para poder utilizar estas ecuaciones es necesario cumplir las ecuaciones del punto de trabajo (15), en función de los valores que aparecen en nuestro sistema

Primero hallamos la intensidad máxima de corriente que tiene que recorrer nuestra carga y junto con los valores seleccionados se obtienen los sistemas con los valores numéricos del sistema.

$$(15) \rightarrow \sqrt{V_A^2 - 4R_L I_o V_o} > 0 \rightarrow I_o < \frac{V_A^2}{4R_L V_o} = 69.696A$$

Se escoge una intensidad de corriente por la carga que no produzca grandes pérdidas, en este caso se ha escogido 1 A, sabiendo que los datos escogidos para la realización de nuestro sistema y relacionados con el ciclo de trabajo son los indicados a continuación:

- Tensión de alimentación,  $V_A = 52.8V$
- Tensión de salida,  $V_O = 100V$
- Intensidad de corriente en la carga,  $I_O = 1A$
- Intensidad de corriente en la inductancia,  $I_L = 1.9007A$
- Capacidad de la carga  $c = 23mF$
- Resistencia de la carga  $r_o = 4k\Omega$
- Inductancia  $l = 10mH$
- Resistencia de la inductancia real  $r_l = 0.1\Omega$
- Ciclo de trabajo  $D = 52.612\%$

Con estos datos conseguimos las ecuaciones (37), (38) y (39) que representan los modelos de sistema que relacionan unas magnitudes con otras.

$$V_C(s) = \left( \frac{1.9007 \cdot 10^{-2}s - 52.42193}{s^2 2.3 \cdot 10^{-4} + s 2.3 \cdot 10^{-3} + 0.2768} \right) D(s) + \left( \frac{-(s0.01 + 0.1)}{s^2 2.3 \cdot 10^{-4} + s 2.3 \cdot 10^{-3} + 0.2768} \right) I_O(s) \quad (37)$$

$$I_L(s) = \left( \frac{-(s2.3 + 1)}{s^2 2.3 \cdot 10^{-4} + s 2.3 \cdot 10^{-3} + 0.2768} \right) D(s) + \left( \frac{0.52612}{s^2 2.3 \cdot 10^{-4} + s 2.3 \cdot 10^{-3} + 0.2768} \right) I_O(s) \quad (38)$$

$$V_O(s) = \left( \frac{-1.9007 \cdot 10^{-2}s + 52.42193}{s2.3 + 1} \right) I_L(s) + \left( \frac{-100}{s2.3 + 1} \right) I_O(s) \quad (39)$$

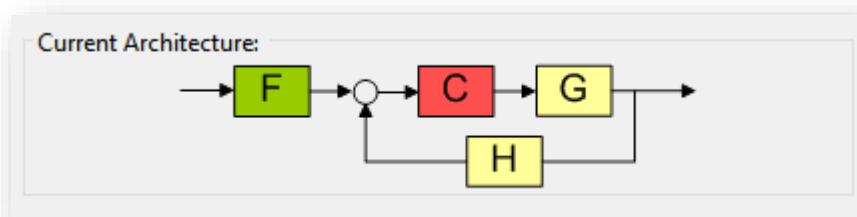
## 5.4 Diseño del controlador

Para la realización de las simulaciones se diseña un controlador que nos mantenga la tensión estable en la carga y ver cuál es, ante una misma perturbación en la intensidad de salida de la carga, la variación de la tensión de la alimentación y la intensidad y el efecto producido por los supercondensadores.

Este sistema se puede controlar con un lazo de realimentación simple, es decir, a partir de la tensión medida en la carga se puede variar el ciclo de trabajo para poder mantenerla.

Hay que tener en cuenta que pueden aparecer perturbaciones en la tensión de salida en función de la intensidad en la carga, para el control se utiliza un controlador Proporcional Integral.

Un controlador PI o controlador proporcional Integral es un sistema de control basado en la realimentación, trata de calcular la desviación a partir de una señal de entrada, que normalmente es la diferencia entre la señal real y la señal deseada.



*Figura 56 – Estructura de control*

Consiste en dos parámetros, un parámetro proporcional  $k_p$  y  $k_i$ . Hay distintas estructuras de composición de este controlador, en este sistema se ha utilizado es la suma directa de la señal que aporta cada una de las ramas del controlador como se muestra en la *Figura 57*.



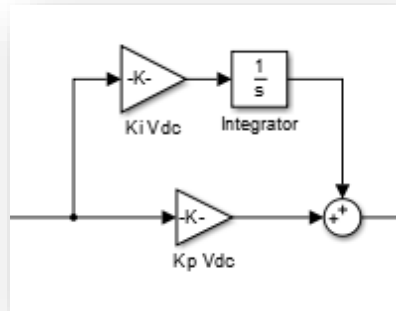


Figura 57 – Estructura interna del controlador PID

La señal proporcional consiste en el producto de la señal de error de entrada al controlador por una constante, nos disminuye el error en estado estacionario aproximándolo a cero, en función del valor se tiene un comportamiento.

Normalmente a mayor es el valor de la constante menor es la sobreoscilación producida en la señal a controlar, por lo que se debe tener en cuenta que no es válido cualquier valor ya que puede llegar a producirse un sistema inestable ya que la constante proporcional nos indica la ganancia de nuestro controlador.

La señal de integración tiene como propósito disminuir el error en estado estacionario, provocado por la señal proporcional, consiste entre el producto de una constante por la señal de error integrada que le aporta la función del promediado, el propósito es eliminar el error en estado estacionario, la constante integral nos indica la velocidad con la que se promedia la acción proporcional

El controlador PI se utiliza para la compensación de sistemas, para compensar una planta se debe comprender su funcionamiento en función de los ceros y polos que nos proporcionan sus funciones de transferencia.

Con el controlador se pretende anular los efectos que producen la inestabilidad en el sistema como los polos del sistema en un lugar que produce inestabilidad para que al unir los sistemas se compensen.

Para el diseño de los controladores creamos un modelo de Simulink en el que crean las distintas funciones de transferencia que se han desarrollado en el apartado anterior, y con el script adjunto como anexo al trabajo, hallamos los sistemas que se deben que utilizar y controlar.

En este apartado se pretende controlar una señal de tensión de salida en función del ciclo de trabajo, por lo que se utiliza la primera relación de la ecuación (37), para el diseño del controlador se pueden utilizar diversos métodos, para el primer diseño he utilizado la herramienta Sisotool que en función del modelo de

planta introducido nos permite ver las características del mismo, como los polos, ceros y ganancia de forma directa y diseñar la estructura que más nos convenga y sus controladores.

Si se desea hacer una rápida aproximación al modelo del controlador Simulink ofrece el módulo PID Controller, que nos permite en función de la estructura de sistema que tengamos realizar un auto-tune de las variables del controlador para poder realizar un control sobre la planta a la que se ha conectado.

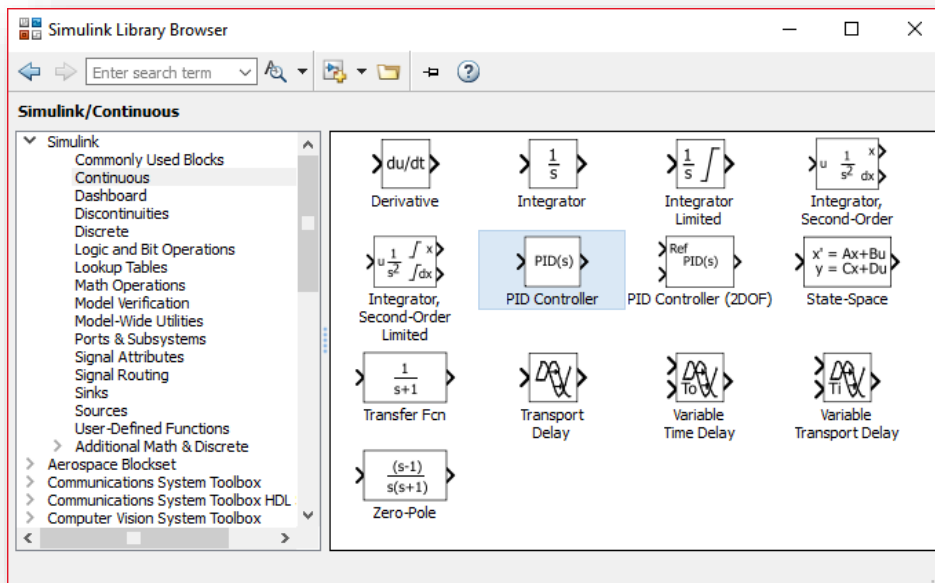


Figura 58 – Módulo PID Controller

El modelo de nuestro sistema para realizar la aproximación al controlador de la planta es el mostrado en la Figura 59.

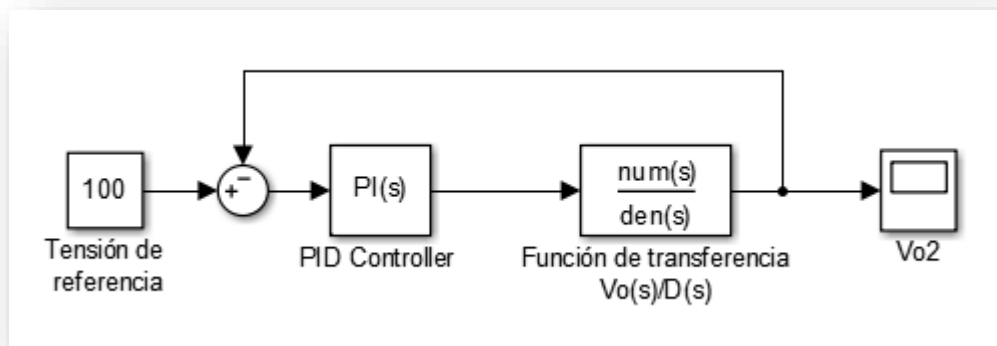


Figura 59 – Modelo de control de la planta en función de la tensión de salida y el ciclo de trabajo

En este módulo aparecen definidas como variables la robustez del sistema y la velocidad con la que se pretende eliminar el error.

La función de transferencia que se utiliza en el modelo, relaciona la salida de tensión en la carga con la entrada referida al ciclo de trabajo.

La configuración que se ha realizado ha sido para un controlador PI con la respuesta temporal mostrada en la *Figura 61*.

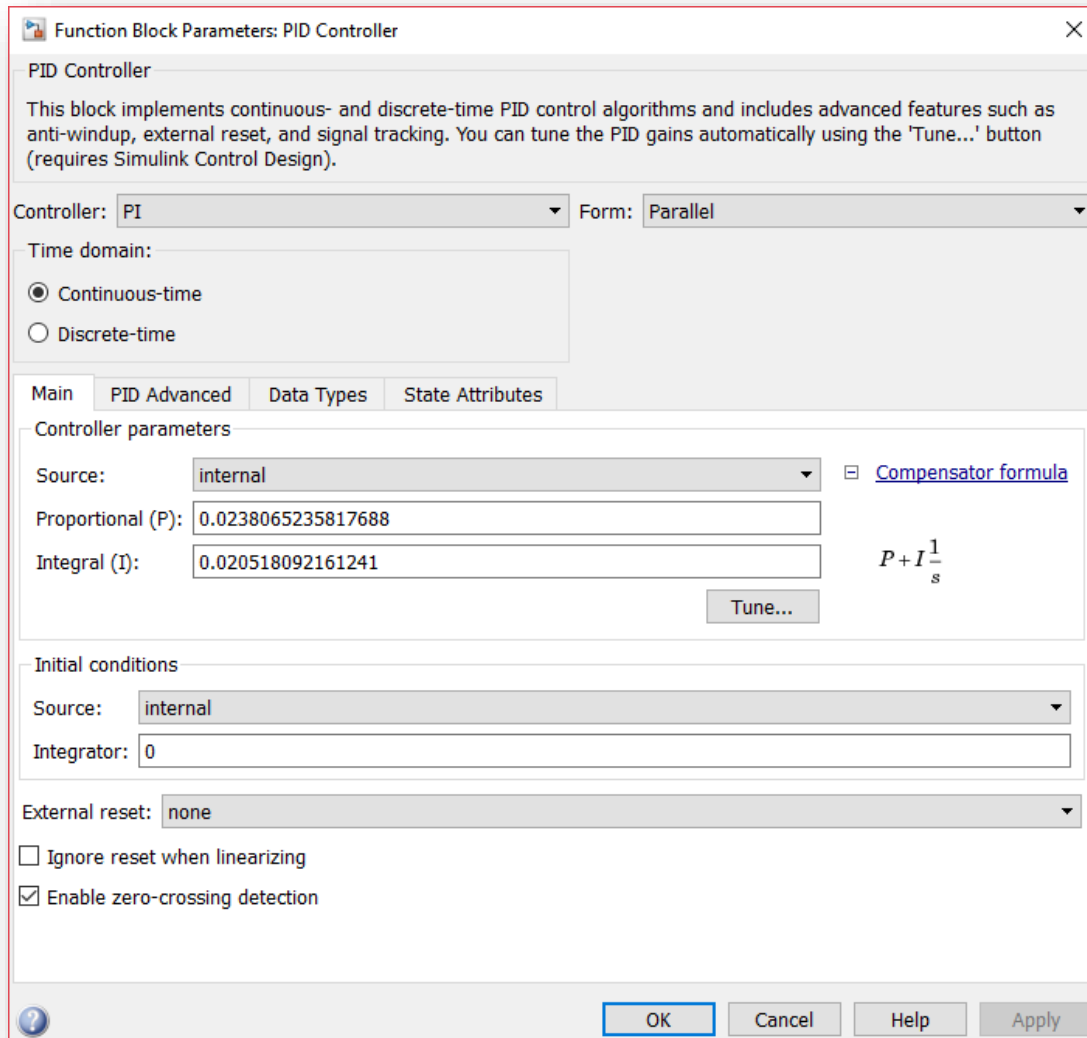


Figura 60 – Pantalla de configuración del bloque PID Controller

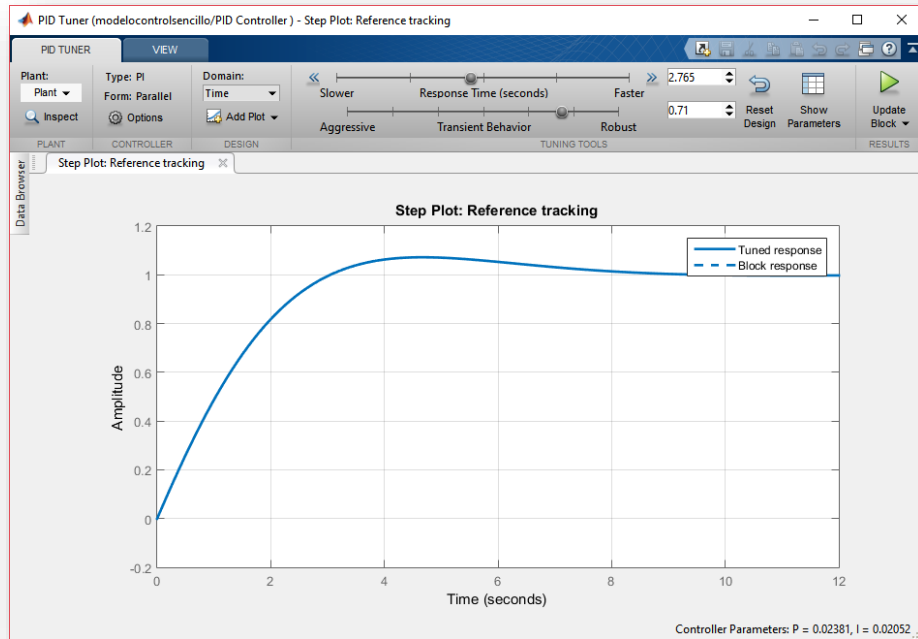


Figura 61 – Imagen de la respuesta temporal de la combinación del controlador en serie a la planta del sistema

Para comprobar que la respuesta del sistema es la esperada realizamos una simulación sobre el modelo de sistema *Figura 59* para ver el correcto funcionamiento sobre el modelo de planta.

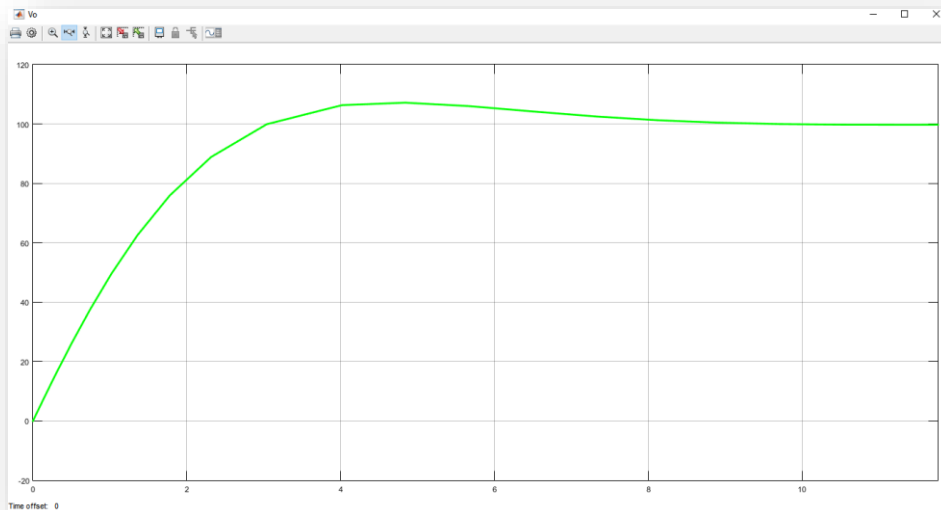
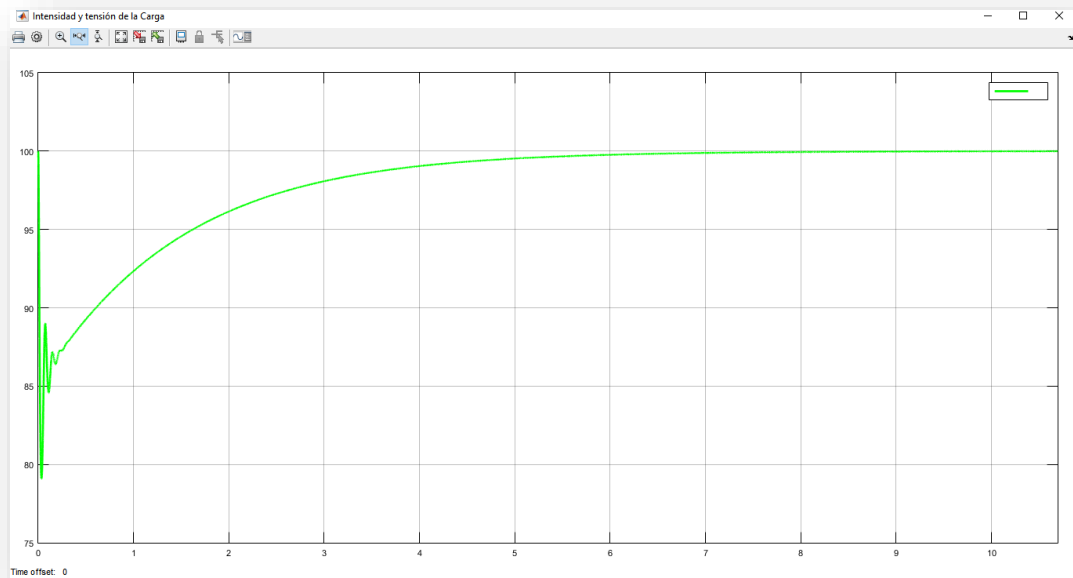


Figura 62 – Respuesta temporal del modelo de sistema

Una vez se ha comprobado que el comportamiento es el correcto la aplicamos al subsistema de control del modelo real de nuestra planta.

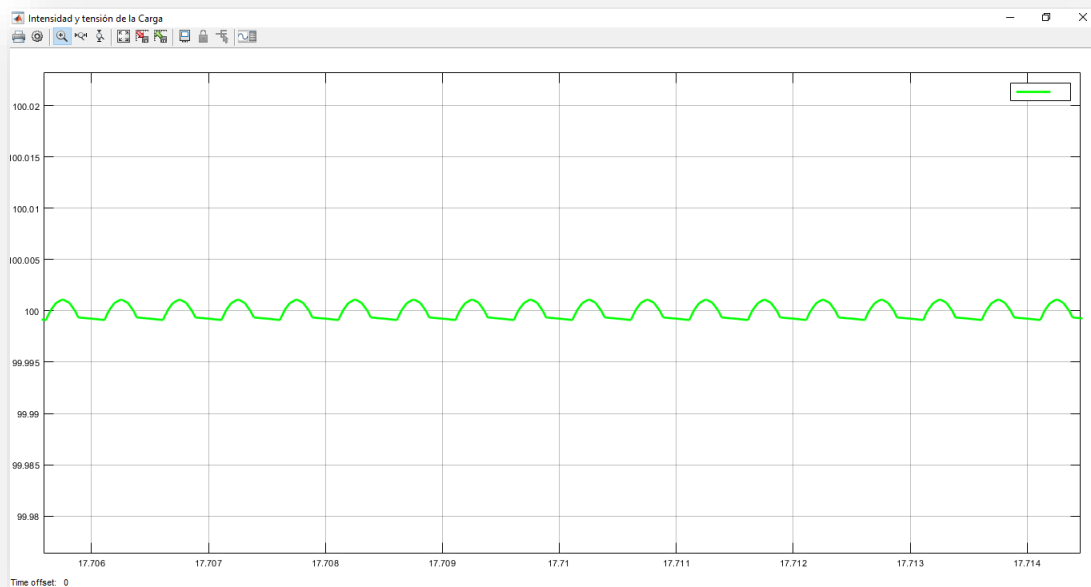
Primero comprobando que el funcionamiento es correcto sin ningún tipo de perturbación en la carga, el resultado que se consigue es el mostrado en la *Figura 63*, se muestra que en un inicio hay una fluctuación hasta que el sistema se regula manteniendo la tensión en el valor requerido.



*Figura 63 – Respuesta temporal de la tensión sobre la carga en el sistema real*

Por último, se comprueba que las perturbaciones no desestabilizan el sistema, por lo que se comprueba que el modelo es completamente correcto añadiendo las perturbaciones a la carga

El resultado correcto, con una tensión de salida estable respecto a la tensión de referencia marcada, es el mostrado en la *Figura 64*, este resultado será el que se utilice en los siguientes apartados.



*Figura 64 – Rizado de tensión estable en la carga*

## 5.5 Diseño de la perturbación sobre la carga

El sistema está diseñado para permitir la bidireccionalidad de energía, comenzamos creando una perturbación en la carga.

Como se puede ver en los modelos de ecuaciones anteriores produciendo una variación en la carga, se observa un mantenimiento del control en la tensión de la carga y una variación del ciclo de trabajo.

Se producirá una variación en la intensidad de corriente solicitada al bloque de alimentación y con ello una variación sobre la tensión de alimentación, en función de la intensidad se producirá una carga o descarga del bloque de alimentación.

La perturbación la provocamos con una fuente de Intensidad de corriente y un sistema que nos la variará en función del tiempo, el sistema elegido es el mostrado en la Figura 65.

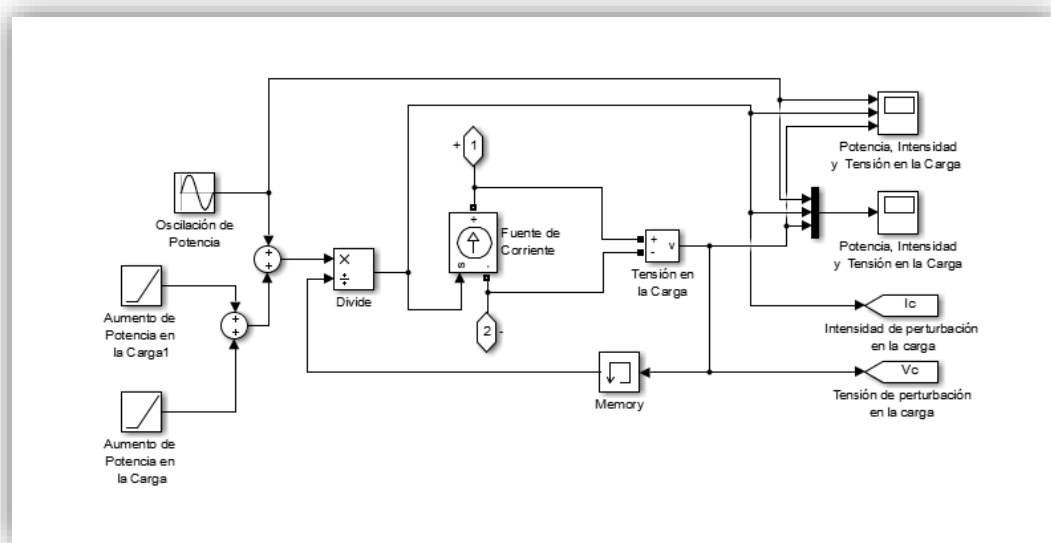


Figura 65 – Subsistema de perturbación en la carga

El sistema está compuesto de la suma de una señal oscilante y la suma de dos señales rampa, la señal rampa resultante, que representa la acción de descarga y carga del bloque de alimentación.

Comienza en un  $t = 15s$  para dar tiempo a que el sistema se adapte y se pueda observar el control de la tensión en la carga, comienza con un offset de 500W disminuyendo la intensidad durante 5 segundos hasta llegar a los -500W con un offset negativo para simular una necesidad de potencia en la carga, siendo suministrada desde el subsistema de alimentación.

En instante  $t = 20s$  comienza a crecer con la misma pendiente en sentido contrario modelando un flujo de energía desde la carga a la alimentación.

Al ser la recta “Aumento de Potencia en la Carga” una recta con pendiente positiva pasará por cero y continuará en aumento simulando un exceso de potencia en la carga, cambiando la direccionalidad de la energía del circuito desde la carga hacia el sistema de baterías.

Esto provoca una carga del sistema de alimentación, la oscilación de la perturbación potencia será una señal sinusoidal con una amplitud de 200W y una frecuencia de  $4\pi$  (rad/s).

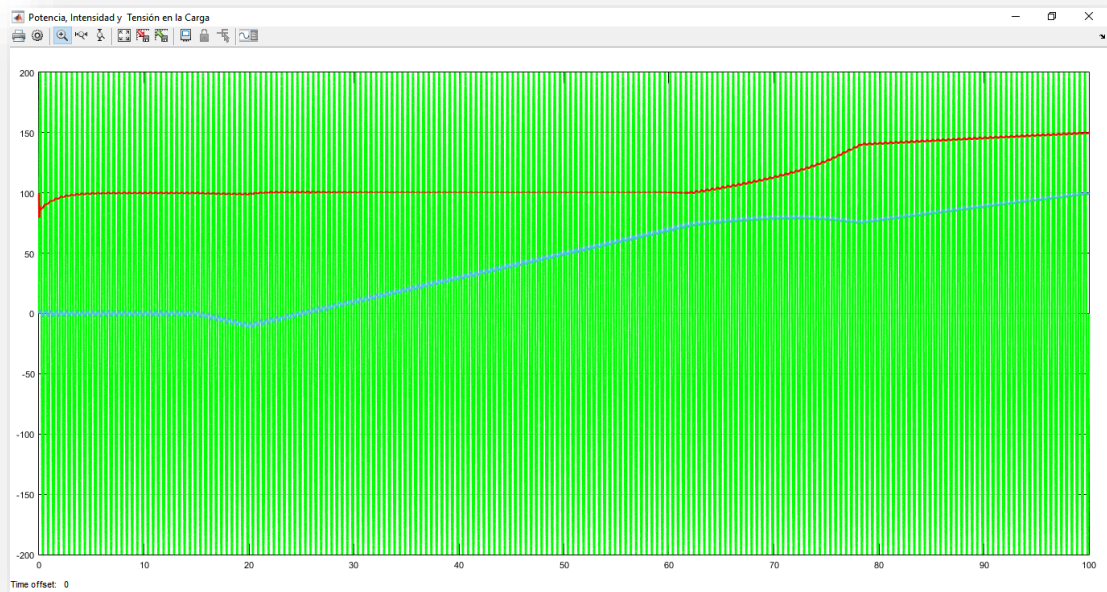


Figura 66 – Señal de perturbación en Potencia (verde), Intensidad(azul) y Tensión (rojo) sobre la carga



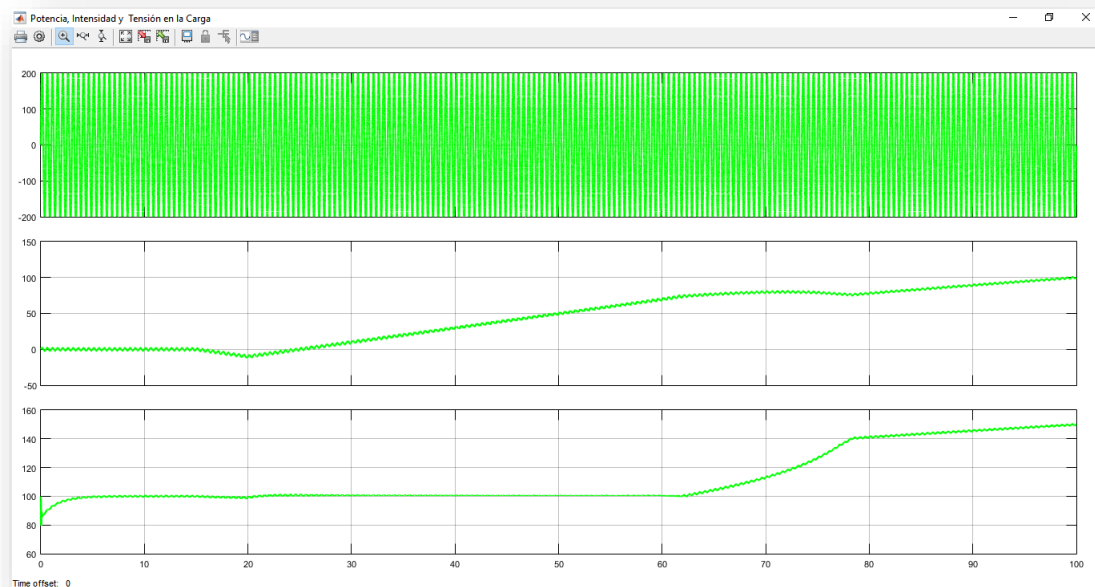


Figura 67 – Señal de perturbación en Potencia, Intensidad y Tensión sobre la carga.



## 6. Comparativa de sistemas de almacenamiento basados en una tecnología e híbridos.

En este apartado se comparan los efectos producidos sobre las baterías del módulo de alimentación en un sistema híbrido en el que incluimos en paralelo al bloque de alimentación una batería de supercondensadores, para actuar durante los picos necesidad de intensidad de corriente del sistema diseñado.

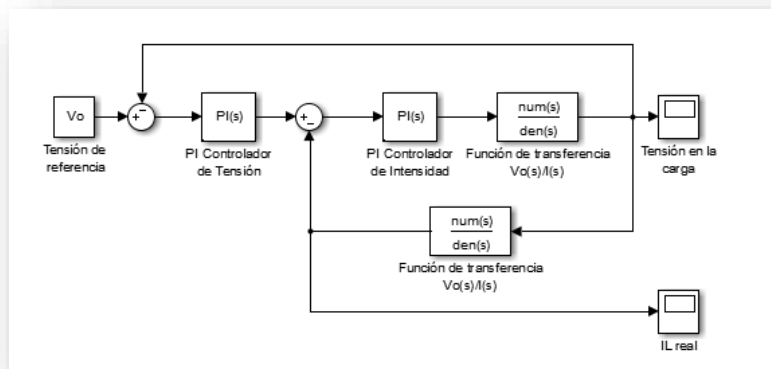
En este apartado se ha añadido un bloque que contiene el subsistema de supercondensadores replicando el control que se produce sobre la nueva rama generada, las ecuaciones de planta se mantienen ya que los valores de los elementos creados en la nueva rama tienen el mismo valor que los del apartado anterior.

Para este apartado es conveniente realizar un control con doble lazo de realimentación, uno externo y más rápido que nos controle la tensión de salida y uno más lento sobre la intensidad de corriente a través de la inductancia.

El bloque de alimentación basado en baterías se centrará en conseguir mantener la tensión de salida constante, por lo que utilizamos el doble lazo al que se hace referencia en el apartado anterior para controlar la tensión sobre la carga estable y el lazo de corriente controlando la intensidad que suministra la batería.

Esta intensidad está controlada para evitar picos que puedan dañar las baterías, por lo que obviamos las perturbaciones a la carga incluyendo un filtro paso bajo en la señal que medimos de intensidad en la carga.

El modelo lineal que se ha utilizado para realizar el control es el mostrado en la *Figura 68*, el modelo implementado se muestra en la *Figura 69*.



*Figura 68 – Modelo lineal de cálculo de control de tensión*

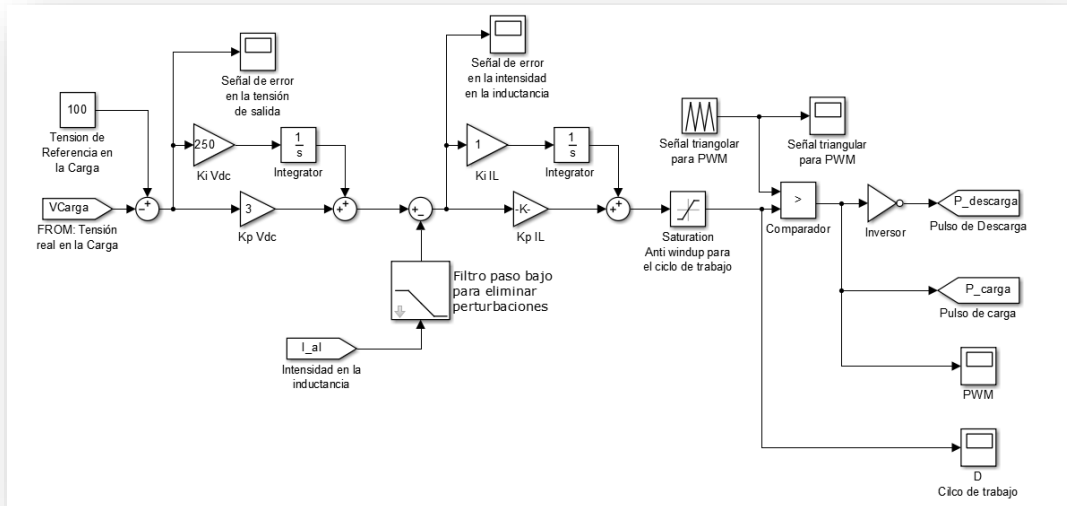


Figura 69 – Sistema de control de tensión para el módulo de baterías

El bloque de alimentación basado en supercondensadores tiene la capacidad de contrarrestar las perturbaciones de corriente sobre la carga, al estar compuesto de elementos capaces de transferir una gran cantidad de corriente.

El control sobre este subsistema se realizará solo con el lazo de realimentación de corriente, la medida de intensidad sobre la carga filtrada con un filtro paso alto para que la señal de entrada a la carga esté referenciada a las perturbaciones y no actué ante la intensidad continua.

La medida de intensidad sobre los condensadores se filtra con un filtro paso bajo, que aporta estabilidad a la señal de referencia, el modelo de control es de un lazo simple con la misma dinámica que el de las baterías.

El modelo del control realizado para el control de la intensidad en el subsistema de alimentación de supercondensadores es el mostrado en la Figura 70.

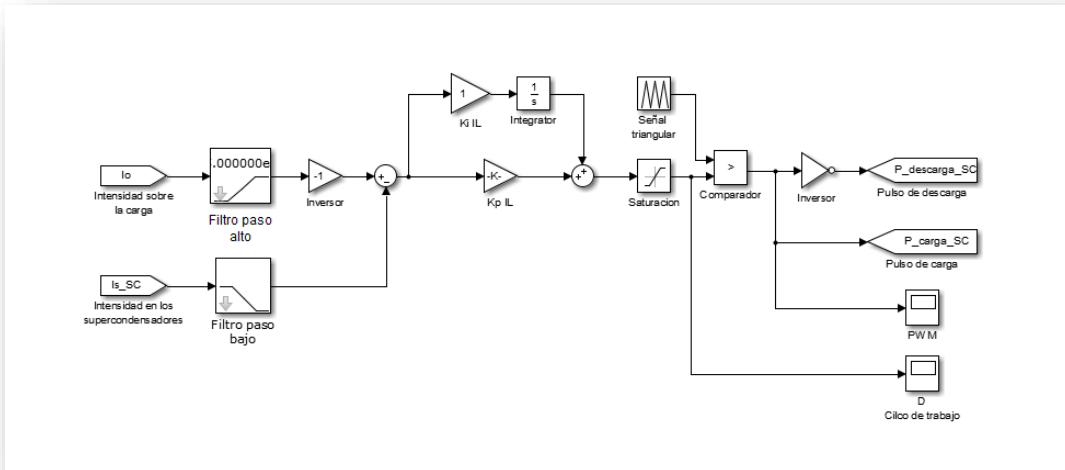


Figura 70 – Sistema de control de la intensidad en Supercondensadores

El sistema está replicado, como se ha indicado antes, ya que son controles independientes el realizado para mantener la tensión sobre la carga y la compensación de las perturbaciones, el sistema completo es el mostrado en la Figura 71.

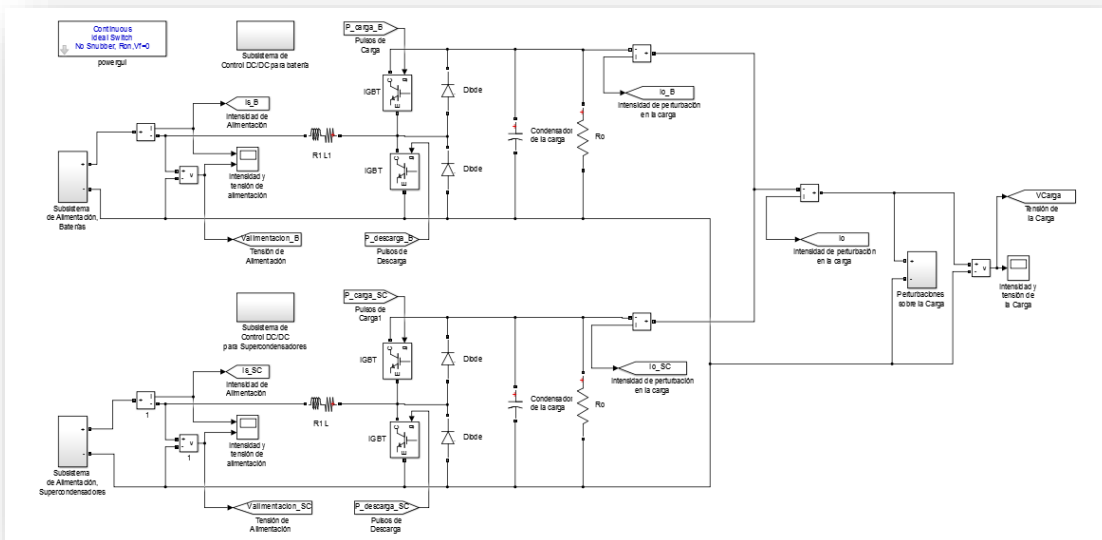


Figura 71 – Sistema de Control de la tensión y control de perturbaciones

Las señales de perturbación serán las mismas que las que se han utilizado en el apartado 5 de este trabajo, la comparación se realizará en función de los bloques, comparando la variación de las señales sobre los bloques de alimentación, los ciclos de trabajo que controlan los sistemas y las variaciones sobre la carga.

Para la realización del sistema práctico hay que tener en cuenta que a mayor sea la pendiente de los filtros en las señales de referencia en los controles mayor será el control y menor el efecto de la perturbación sobre la carga.

## 6.1 Efectos en la alimentación

Se obtienen las gráficas que nos muestran el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía, para ello desde los modelos que se han creado en el apartado anterior sacamos a Matlab las gráficas donde las comparamos y mostramos, se pretende demostrar que la alimentación híbrida complementa la alimentación sencilla de forma que las perturbaciones afectan a la carga en menor medida.

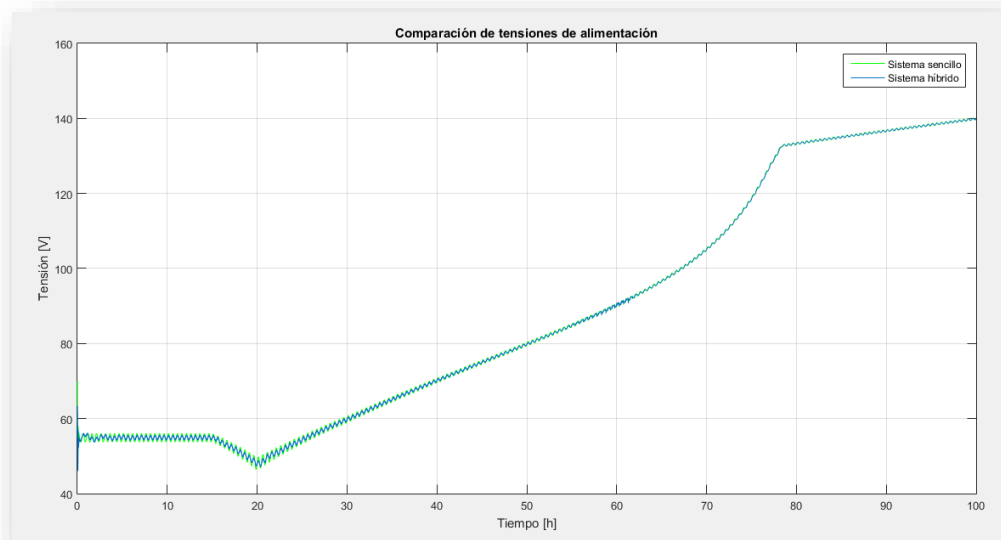


Figura 72 – Efecto de la perturbación sobre las tensiones de alimentación

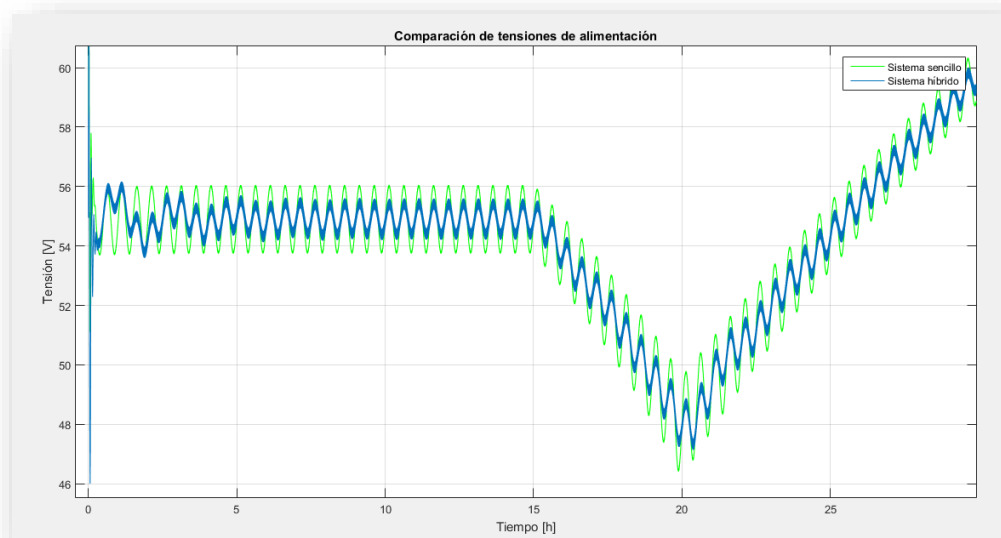


Figura 73 – Efecto de la perturbación sobre las tensiones de alimentación

En las Figuras 72 y 73 se muestra que las variaciones sobre las tensiones de alimentación disminuyen con el sistema de alimentación híbrida, esta fluctuación no es un parámetro deseable en la carga ya que si la variación es lo suficiente grande puede disminuir el tiempo de vida de las baterías.

Se puede observar que la bidireccionalidad de energía se mantiene, en un principio se produce la descarga de las baterías y luego al cambiar la perturbación aumenta la tensión en las baterías, que es el efecto deseado en el sistema diseñado

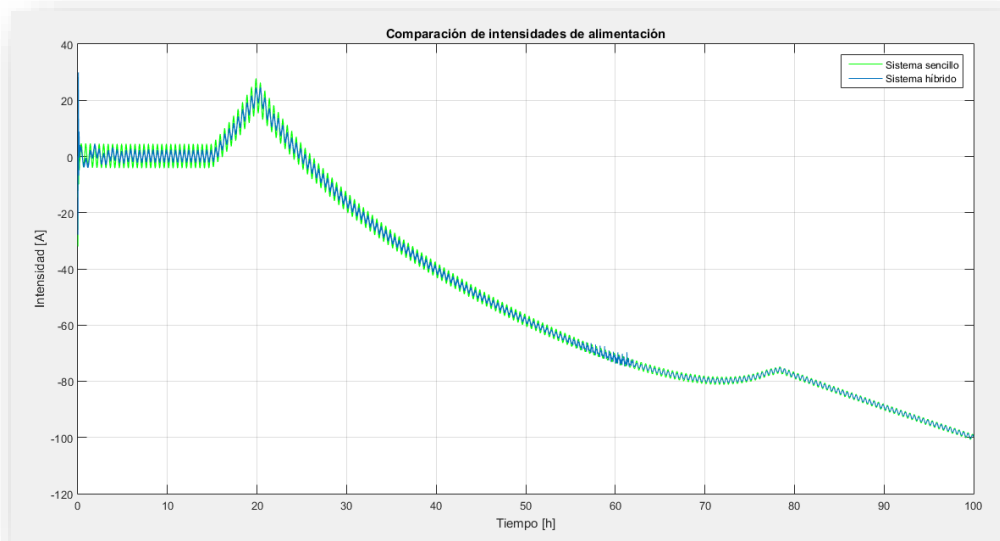


Figura 74 – Efecto de la perturbación sobre las intensidades de alimentación

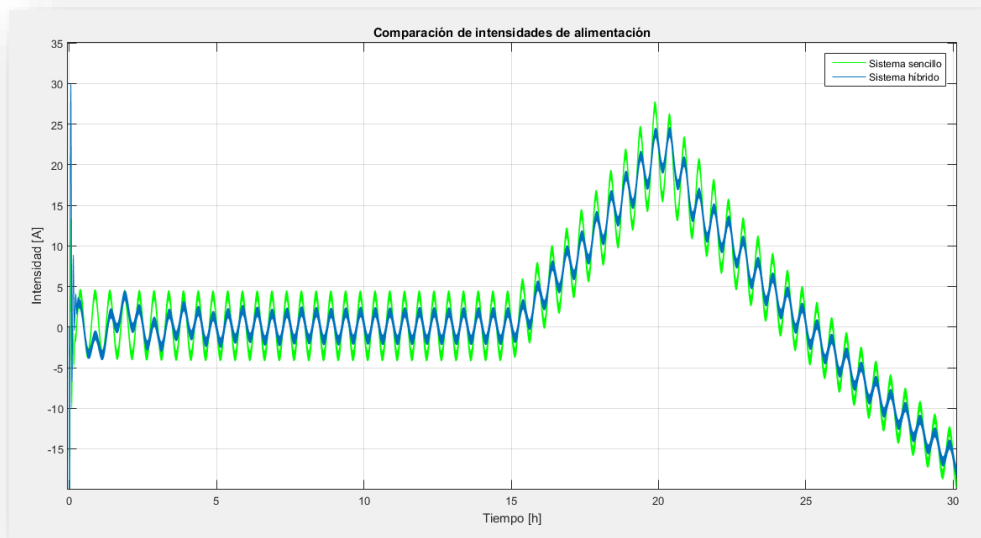


Figura 75 – Efecto de la perturbación sobre las intensidades de alimentación



La comparación de la variación de la intensidad en los sistemas diseñados se hace a partir de las Figuras 74 y 75, en ellas se puede ver la reacción de los sistemas a la perturbación sobre la carga

Se distingue que la oscilación de la carga es mayor en los sistemas de alimentación única, también se observa la bidireccionalidad de la energía por el valor de la intensidad de corriente que produce la descarga y carga de las baterías.

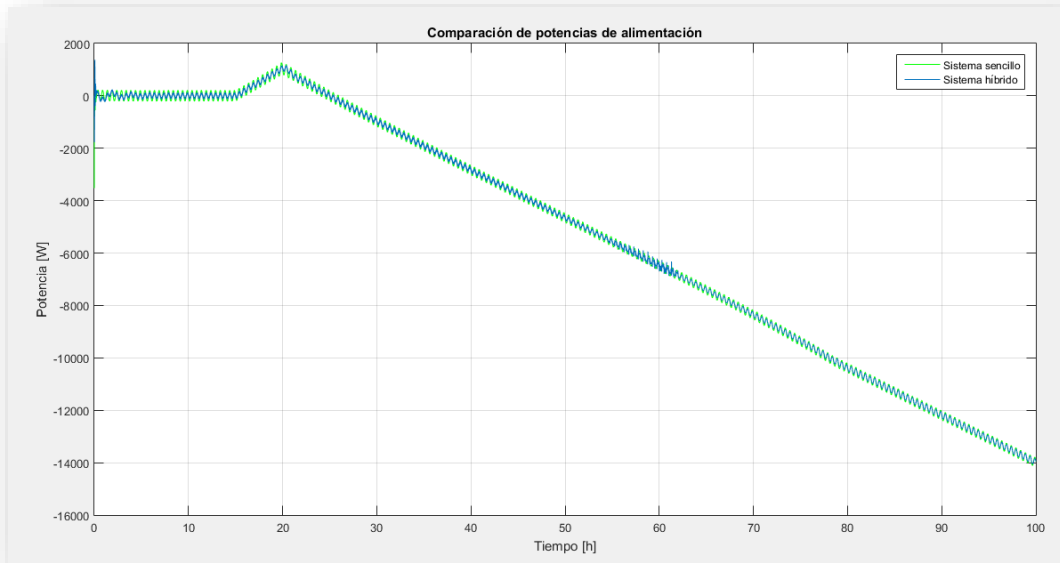


Figura 76 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación

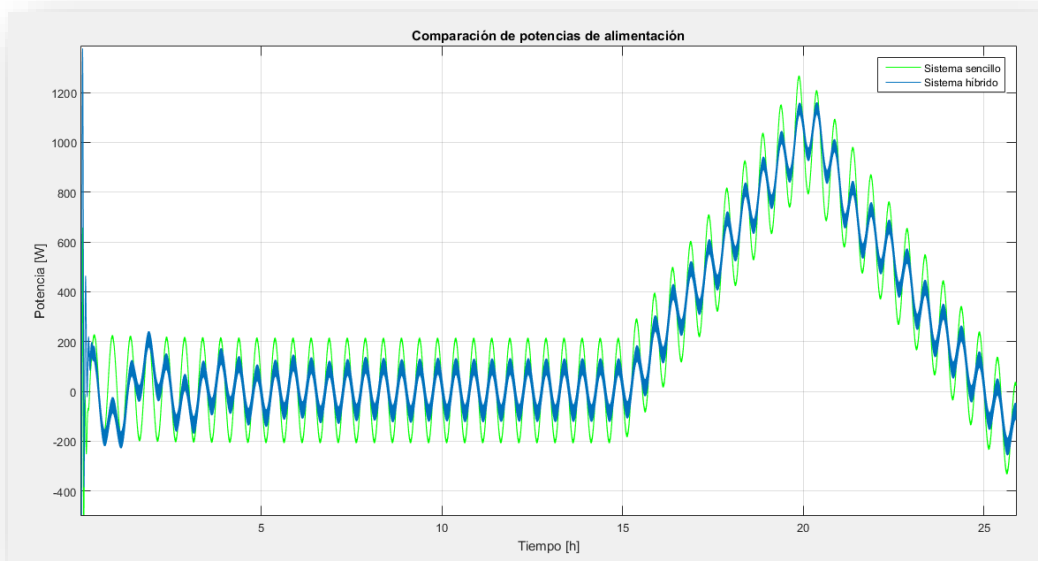
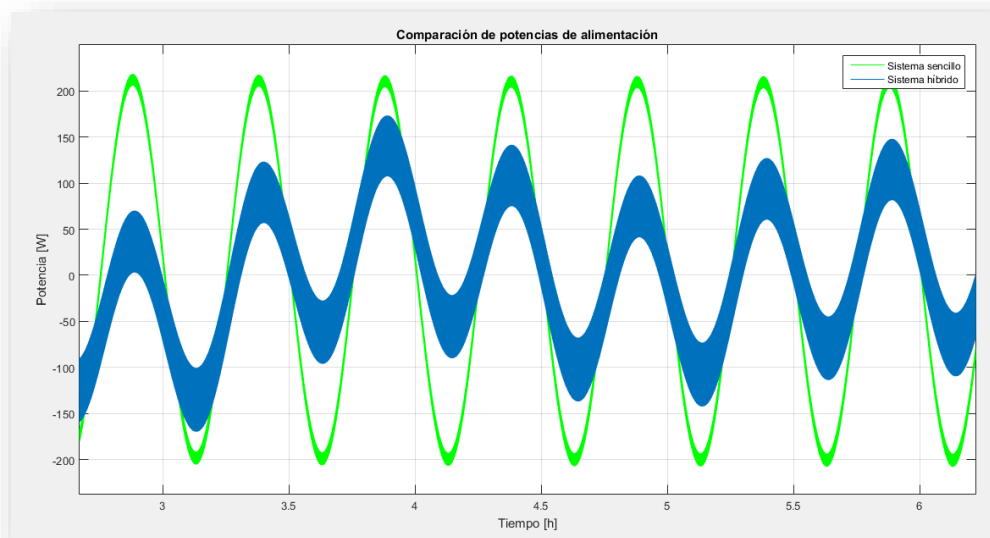


Figura 77 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación



*Figura 78 – Efecto de la perturbación sobre las potencias de alimentación*

En las Figuras 76, 77 y 78 se puede observar la variación de la potencia suministrada por el sistema de almacenamiento de energía basado en baterías.

En estas figuras aparece la variación de la potencia, como se observa en la Figura 78 la variación de la potencia por la perturbación que aparece en la carga es mucho menor que la producida sobre los sistemas de alimentación única.

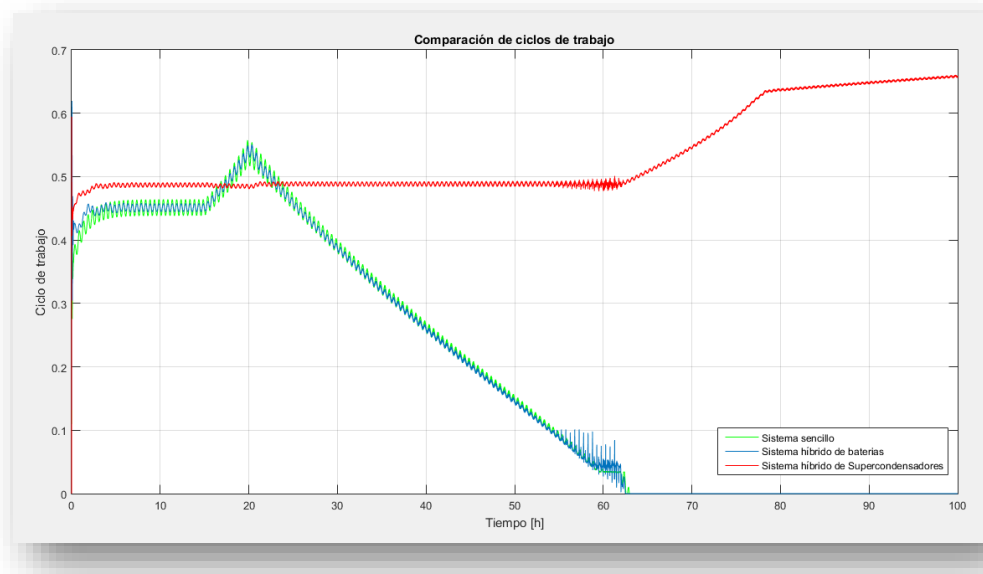
La Figura 77 muestra el proceso de suministro y absorción de potencia hacia la carga por el sistema de almacenamiento de energía.

## 6.2 Efecto sobre el ciclo de trabajo

La *Figura 79* se observa la independencia del ciclo de trabajo en el sistema híbrido entre el control realizado de las baterías y el control de la perturbación realizada sobre los supercondensadores.

El ciclo de trabajo en color rojo mostrado en la figura permanece prácticamente constante, ya que se encarga de la neutralización de la perturbación que provocamos en la carga por la señal oscilatoria que hemos creado.

Esta señal de perturbación permanece constante a lo largo de la simulación, ese es el motivo de la continuidad del ciclo de trabajo en el control del sistema de alimentación basado en supercondensadores, la variación se produce en el punto en el que las baterías no son capaces de almacenar más energía.



*Figura 79 – Efecto de la perturbación sobre el ciclo de trabajo*

La *Figura 80* muestra la variación de los ciclos de trabajo, se puede observar que el ciclo de trabajo del sistema basado en supercondensadores se mantiene prácticamente constante a lo largo de la simulación, se pueden observar pequeños cambios en los puntos en los que la energía cambia de dirección.

También se observa como el sistema de almacenamiento de energía basado en baterías si varía para almacenar y suministrar la energía que mantiene la tensión en la carga.

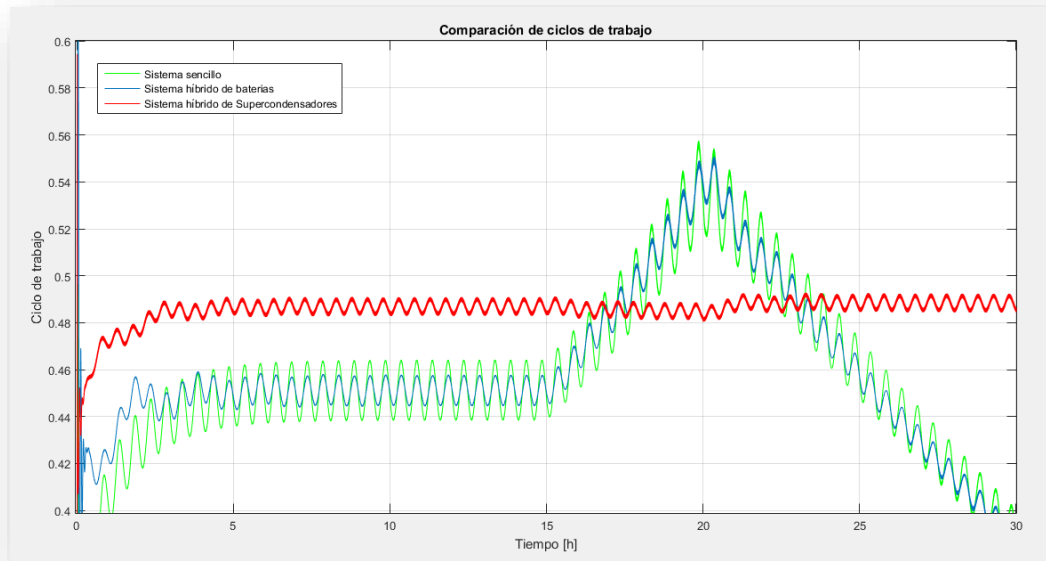


Figura 80 – Efecto de la perturbación sobre el ciclo de trabajo

### 6.3 Efecto sobre la carga

La comparación de los efectos producidos por estos sistemas en la tensión sobre carga se realiza a partir de las Figuras 81, 82 y 83, en la Figura 81 se puede ver la mayor continuidad de la tensión en la tensión sobre la carga a parte de una mayor velocidad en la estabilización de la tensión sobre la carga.

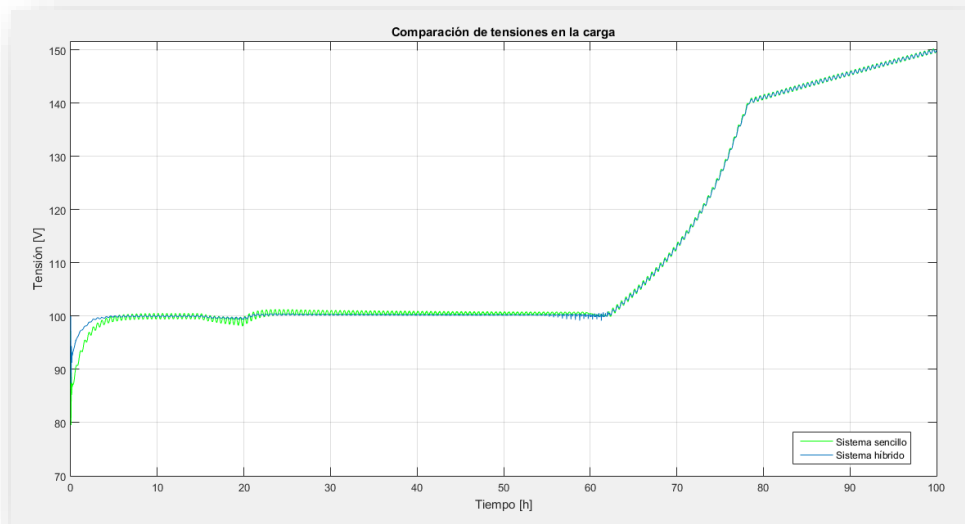


Figura 81 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga.

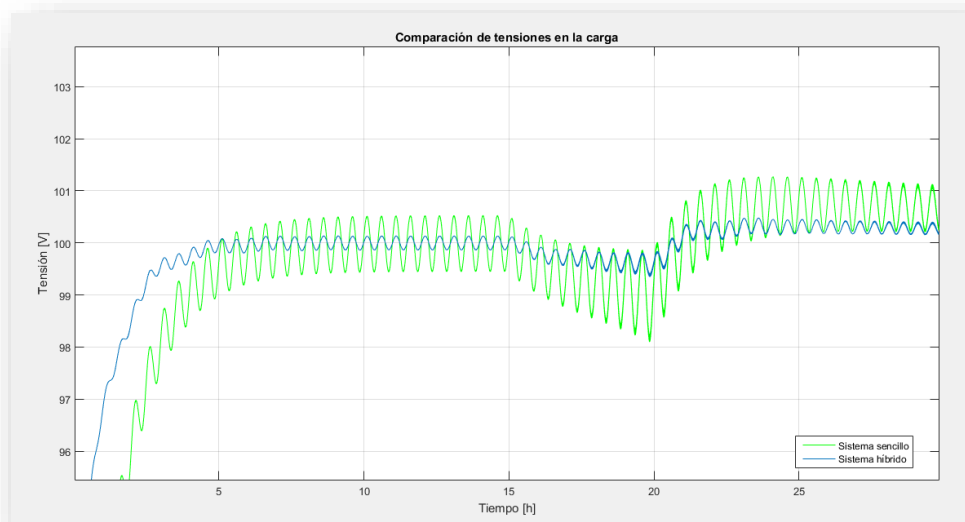


Figura 82 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga

Las Figuras 82 y 83 nos muestran con mayor precisión la variación que producen las perturbaciones y el efecto de carga y descarga del sistema basado en baterías.

Se puede observar que el sistema de alimentación híbrida produce una mayor estabilidad de la tensión y con ello la absorción de perturbaciones producido por el sistema basado en supercondensadores.

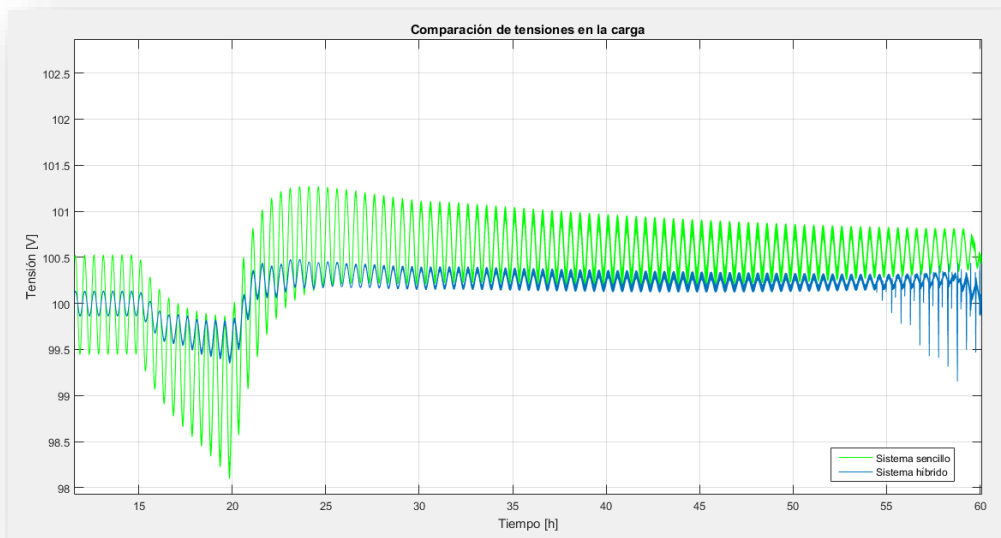


Figura 83 – Efecto de la perturbación sobre la tensión en la carga

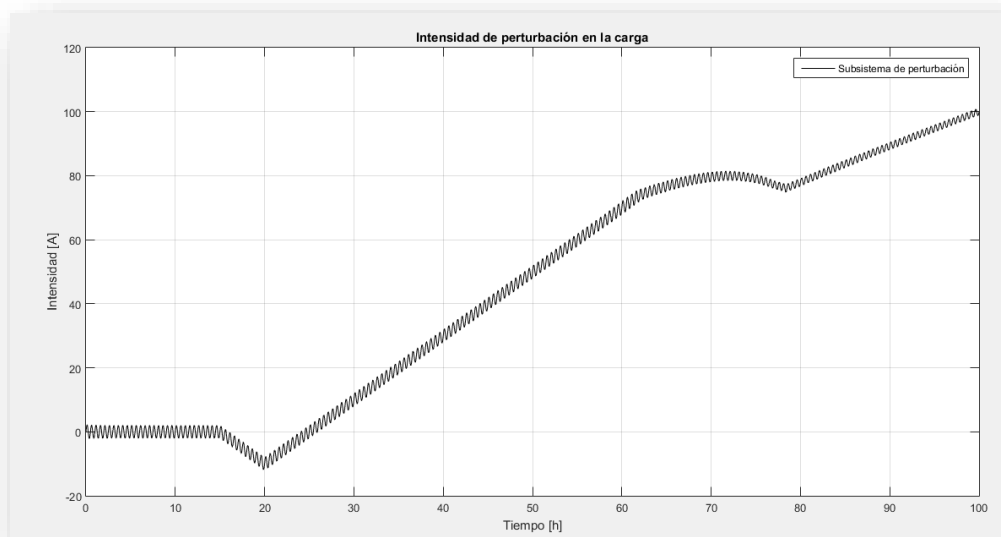
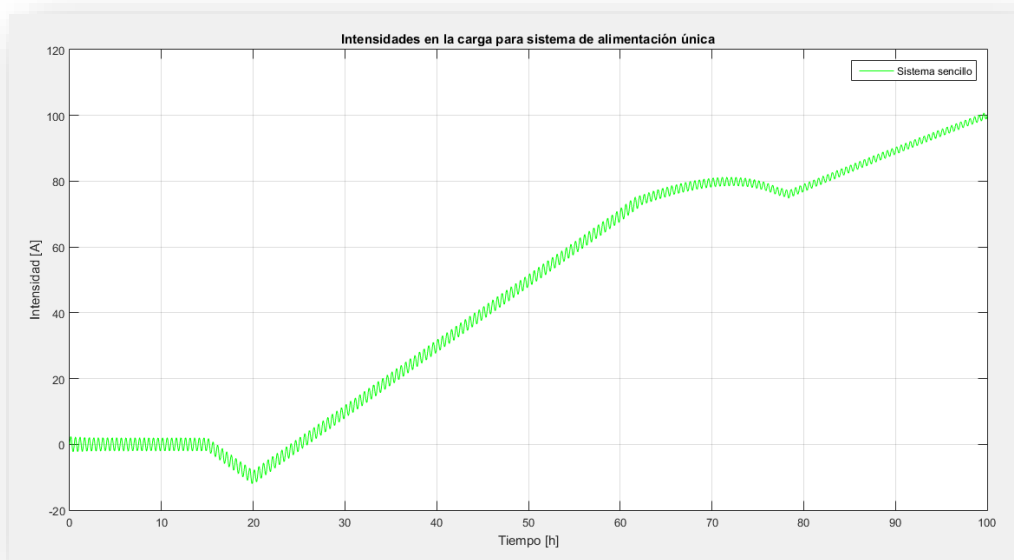
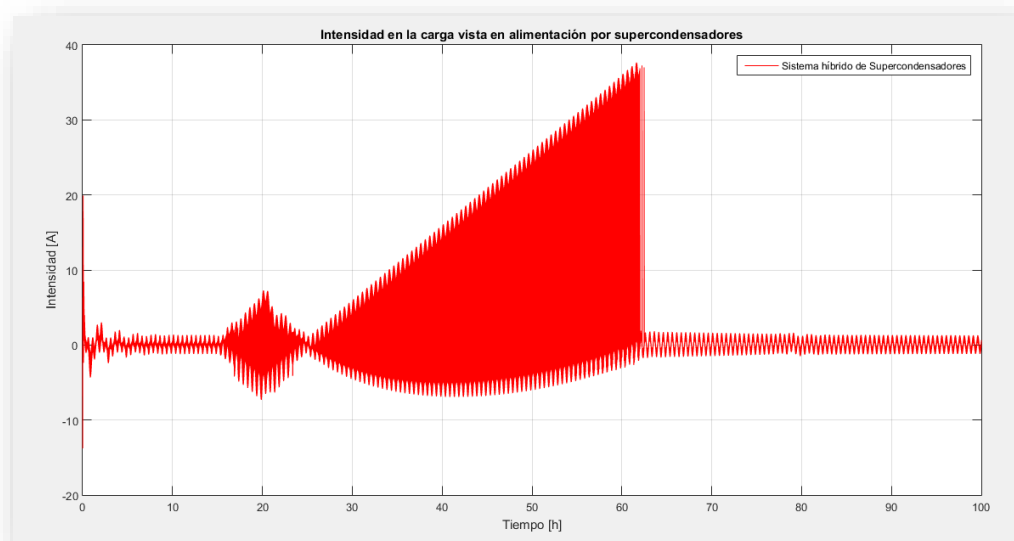


Figura 84 – Intensidad de perturbación sobre la carga

La *Figura 84* nos muestra la intensidad que hemos provocado en la carga, en la *Figura 85* se puede observar que el sistema único tiene que reaccionar de la misma forma de la perturbación para poder mantener el efecto estable sobre la carga, no siendo así en los sistemas híbridos, que reparten la intensidad que recibe cada sistema.



*Figura 85 – Intensidad de perturbación sobre la carga*



*Figura 86 – Intensidad de perturbación sobre la carga*

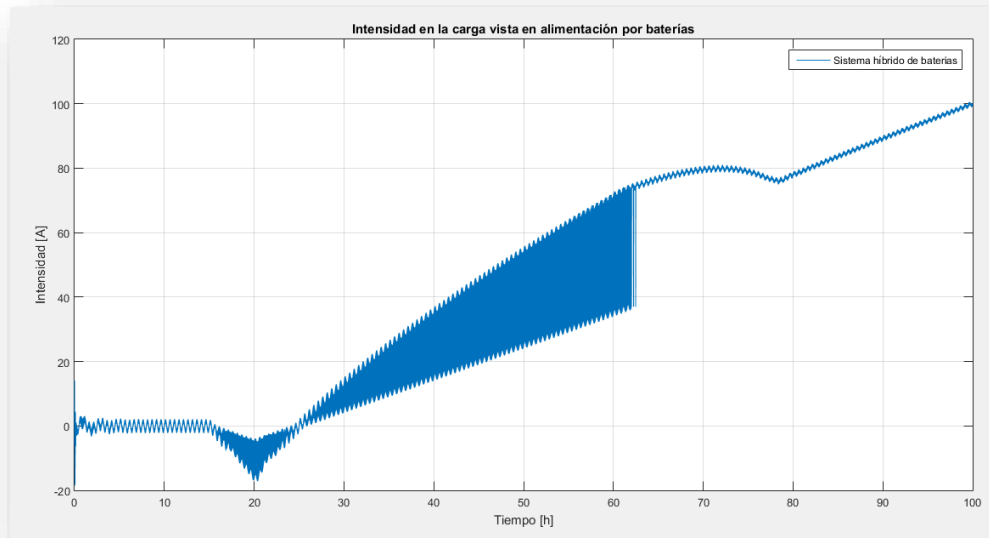


Figura 87 – Intensidad de perturbación sobre la carga

Las Figuras 86 y 87 nos muestran la repartición de la intensidad sobre los distintos sistemas de alimentación del sistema de alimentación híbrido, en la Figura 6.35 se observa que la intensidad de la variación se almacena o transfiere al sistema de supercondensadores.

En la Figura 87 muestra la intensidad sobre la carga del subsistema de baterías con una intensidad total con menos variación.

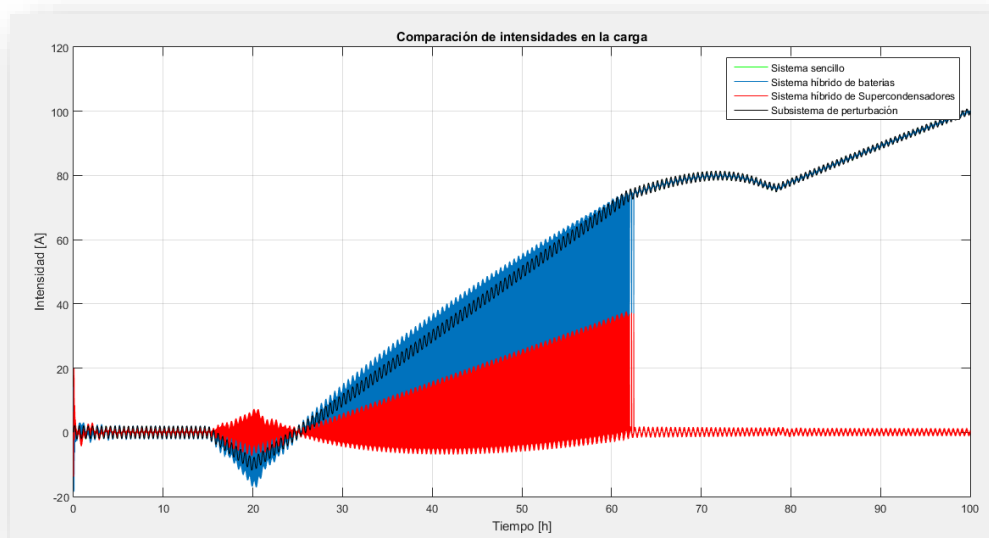


Figura 88 – Intensidad de perturbación sobre la carga



La *Figura 88* nos muestra la repartición de intensidades del sistema híbrido complementados para compensar la perturbación y repartirse las variaciones de intensidad sobre la carga, este sistema mejor según aumentamos la pendiente del filtro que utilizamos para filtrar la señal de referencia para los sistemas de control.

También se puede optimizar variando la velocidad de los sistemas de control, en función de la aplicación para la que se diseñe o las necesidades y límites del sistema



## 7. Conclusiones

A lo largo del trabajo se han realizado simulaciones que nos permiten observar el funcionamiento de las baterías y los supercondensadores, observando que son elementos de almacenamiento de energía eléctrica que se complementan en ciertos aspectos, como en la capacidad de transferencia de energía y el estrés que le producen las variaciones rápidas en la intensidad de corriente.

En este trabajo se pretenden demostrar que los modelos actuales que nos proporciona Simulink de baterías y supercondensadores son correctos y simulan perfectamente los sistemas reales que se pueden encontrar en el mercado, por lo que son mejores que cualquier sistema teórico utilizado.

En las simulaciones y comparaciones con los modelos reales se ha observado que los modelos proporcionados por Simulink son los que más se aproximan a los modelos reales utilizados por los fabricantes, con ello se puede simular cualquier proyecto de baterías o supercondensadores de forma real sin necesidad de gráficas de componentes reales y sin necesidad de realizar inversiones para conocer los modelos, todo a partir de los datos numéricos de los datasheet.

Este efecto se puede comprobar en las simulaciones del apartado en el que se realiza la comparativa de los sistemas de alimentación sencilla y de alimentación híbrida, en estas simulaciones se puede observar la mejora de las características de la batería a corto plazo, respecto a las perturbaciones que se han introducido en el modelo de carga con perturbación gracias a los supercondensadores y el mantenimiento en la tensión de los supercondensadores a largo plazo, las mejoras que se pueden conseguir en este sistema depende de los propósitos de la aplicación para la cual se diseñan los sistemas de control.

El sistema se puede optimizar con la variación de las características de los sistemas de control para aumentar la estabilidad en la carga o para aumentar la estabilidad sobre la alimentación, en este trabajo se ha optado por un sistema intermedio para observar los efectos a lo largo de todos los elementos del sistema.

También se ha podido observar que gracias a la unión de estos elementos se pueden cubrir una gran cantidad de potencias por lo que son sistemas fáciles de adaptar a diversas aplicaciones, también se pueden adaptar en función de la velocidad de la variación de a intensidad que se necesite.







## Anexo

### Script - 1

En este anexo se incluye el Script de Matlab llamado “CargalIncialDeValores.m” en el que se hace una precarga de los valores de los componentes y valores de Magnitudes que se han utilizado para realizar esta práctica, también se incluye cada uno de los sistemas en función de las ecuaciones (37) (38) y (39).

```
% Carga de datos Inicial
Va = 52.8;
Vo = 100;
Ro = 4000;
Rl = 0.1;
C = 23e-3;
L = 10e-3;
Io = 1;
Il = 1.9007;
D = Io/Il;

% Primer sistema      Vo(s)= H11(s)D(s) + H12(s)Io(s)
NUM11 = [L*Il (Il*Rl-D*Vo)];
DEN11 = [C*L C*Rl D^2];
H11 = tf(NUM11,DEN11);

NUM12 = [-L -Rl];
DEN12 = [C*L C*Rl D^2];
H12 = tf(NUM12,DEN12);

[Z11,P11,K11] = tf2zpk(NUM11,DEN11);
[Z12,P12,K12] = tf2zpk(NUM12,DEN12);

% Segundo sistema    Il(s)= H21(s)D(s) + H22(s)Io(s)
NUM21 = [-C*Vo -D*Il];
DEN21 = [C*L C*Rl D^2];
H21 = tf(NUM21,DEN21);

NUM22 = D;
DEN22 = [C*L C*Rl D^2];
H22 = tf(NUM22,DEN22);

[Z21,P21,K21] = tf2zpk(NUM21,DEN21);
[Z22,P22,K22] = tf2zpk(NUM22,DEN22);

% Tercer sistema     Vo(s)= H31(s)Il(s) + H32(s)Io(s)
NUM31 = [-L*Il (-Il*Rl+D*Vo)];
DEN31 = [C*Vo D*Il];
H31 = tf(NUM31,DEN31);

NUM32 = -Vo;
DEN32 = [C*Vo D*Il];
H32 = tf(NUM32,DEN32);

[Z31,P31,K31] = tf2zpk(NUM31,DEN31);
[Z32,P32,K32] = tf2zpk(NUM32,DEN32);
```

## Script – 2

En este anexo se incluye el Script de Matlab llamado “FigurasDeComparacion.m” en el que se hace una precarga de los valores obtenidos en los resultados de las simulaciones del sistema de alimentación única y el sistema de alimentación híbrida, las gráficas han sido utilizadas en el apartado de comparación de los sistemas.

```
% Gráficas de tensión en alimentación
load('AlimentacionSH1.mat')
load('AlimentacionSH3.mat')
figure(1)
plot(AlimentacionSH1.Time,AlimentacionSH1.Data(:,1),'g')
hold
grid
plot(AlimentacionSH3.Time,AlimentacionSH3.Data(:,1))
title('Comparación de tensiones de alimentación')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Tensión [V]')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido')

% Gráficas de intensidad en alimentación
figure(2)
plot(AlimentacionSH1.Time,AlimentacionSH1.Data(:,2),'g')
hold
grid
plot(AlimentacionSH3.Time,AlimentacionSH3.Data(:,2))
title('Comparación de intensidades de alimentación')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido')

% Gráficas de Potencia en alimentación

figure(3)
plot(AlimentacionSH1.Time,AlimentacionSH1.Data(:,3),'g')
hold
grid
plot(AlimentacionSH3.Time,AlimentacionSH3.Data(:,3))
title('Comparación de potencias de alimentación')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Potencia [W]')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido')

% Gráficas de Ciclos de trabajo
load('Ciclo_trabajoSH1.mat')
load('Ciclo_trabajoSH3.mat')
figure(4)
plot(Ciclo_trabajoSH1.Time,Ciclo_trabajoSH1.Data(:,1),'g')
hold
grid
plot(Ciclo_trabajoSH3.Time,Ciclo_trabajoSH3.Data(:,1))
plot(Ciclo_trabajoSH3.Time,Ciclo_trabajoSH3.Data(:,2),'r')
title('Comparación de ciclos de trabajo')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Ciclo de trabajo')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido de baterias','Sistema híbrido de Supercondensadores')
```



```
% Gráficas de Tensiones en la carga
load('CargaSH1.mat')
load('CargaSH3.mat')
figure(5)
plot(CargaSH1.Time,CargaSH1.Data(:,1),'g')
hold
grid
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,1))
title('Comparación de tensiones en la carga')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Tensión [V]')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido')

% Gráficas de intensidades en la carga
figure(6)
plot(CargaSH1.Time,CargaSH1.Data(:,2),'g')
hold
grid
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,2))
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,3),'r')
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,4),'k')
title('Comparación de intensidades en la carga')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Sistema sencillo','Sistema híbrido de baterias','Sistema
híbrido de Supercondensadores','Subsistema de perturbación')

% Intensidad en la carga para el sistema de alimentación única
figure(7)
plot(CargaSH1.Time,CargaSH1.Data(:,2),'g')
hold
grid
title('Intensidades en la carga para sistema de alimentación única')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Sistema sencillo')

% Intensidad en la carga para el sistema de alimentación híbrida en
% baterías
figure(8)
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,2))
hold
grid
title('Intensidad en la carga vista en alimentación por baterías')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Sistema híbrido de baterias')

% Intensidad en la carga para el sistema de alimentación híbrida en
% supercondensadores
figure(9)
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,3),'r')
hold
grid
title('Intensidad en la carga vista en alimentación por
supercondensadores')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Sistema híbrido de Supercondensadores')
```

```
% Intensidad en la carga para el subsistema de perturbación
figure(10)
plot(CargaSH3.Time,CargaSH3.Data(:,4),'k')
hold
grid
title('Intensidad de perturbación en la carga')
xlabel('Tiempo [h]')
ylabel('Intensidad [A]')
legend('Subsistema de perturbación')
```





## Bibliografía

[1] D. Adolfo Ausín Herrero, **“CONVERTIDORES CC/CC EN LA INTERCONEXIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO CON SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA”**, trabajo de fin de master, departamento de electrónica, Universidad de Alcalá.

[2] P. KUNDUR, **“POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL”**, McGraw-Hill, Inc.

[3] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, **“VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWRE SYSTEM”**, IEEE PRESS, 2010, WILEY.

[4] MATS ALAKÜLA, **“POWER ELECTRONIC CONTROL”**, LUND UNIVERSITY, 2002

[5] JUAN MANUEL GONZALEZ ROMO, **“AUTONIMIA EN SISTEMAS DE ALIMENTACION”**, trabajo de fin de master, Universidad de Sevilla.

[6] Hard **“ELECTRONICA DE POTENCIA”**. España. Pearson (2001)

[7] Ogata, **“INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA”** Naucalpan de Juarez: Prentice Hall. (1998)

[8] Freddy Fernando Valderrama, Henry Moreno, Hector Manuel Vega, **“ANÁLISIS SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DC/DC TIPO BOOST”**. (2011)



## Presupuesto

En esta parte del proyecto se hará una estimación del coste total que supone la ejecución del mismo. En los apartados siguientes aparecen los gastos agrupados según su origen, y en el último apartado se detalla el presupuesto total.

### 1 Costes de equipamiento

- Equipamiento hardware utilizado:

PC Asus 500€

- Recursos software utilizados:

Windows 10 (Incluido en la compra del PC)

Matlab 2015 (2.000€)

Simulink (3000€)

Office (359€)

Presupuesto total en equipamiento: 5859€

### 2 Costes de mano de obra

- Documentación.

50h 30e/hora 1.500€

- Diseño de sistemas

100h 30e/hora 3000€

- Desarrollo SW

200h 30e/hora 6.000€

Presupuesto total en mano de obra: 10.500€

### 3 Costes total del presupuesto

Presupuesto total en mano de obra: 16.359€

