



Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico, análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas

Supercapacitors as a contribution to electrical energy development, comparative analysis using computer simulation tools applied

MÉNDEZ, Erik F. 1; ARROBO, Estalin V. 2 y MOROCHO, Andrés F. 3

Recibido: 17/01/2020 • Aprobado: 31/03/2020 • Publicado 23/04/2020

Contenido

[1. Introducción](#)

[2. Metodología](#)

[3. Resultados](#)

[4. Conclusiones](#)

[Referencias bibliográficas](#)

RESUMEN:

El presente artículo detalla el estudio y análisis de los supercapacitores como aporte innovador al desarrollo de la electrónica y sus aplicaciones en el mundo moderno. Adicional, se pretende esclarecer el principio de funcionamiento de los supercapacitores y detallar todas sus generalidades y particularidades; de igual manera el documento permitirá realizar una comparación entre los supercapacitores y los capacitores convencionales utilizando para el propósito un modelo de suministro de potencia híbrido entre un arreglo de supercapacitores EDLC y una batería convencional, realizado en el software computacional de simulación "Matlab", para así comprender su aporte en el desarrollo de las ramas afines a la electrónica haciendo un énfasis especial en la electrónica de potencia, siendo esta el pilar para el desarrollo de aplicaciones con altos requerimientos energéticos. **Palabras clave:** Supercapacitores; electrónica de potencia; energía; cibernética.

ABSTRACT:

This article details the study and analysis of supercapacitors as an innovative contribution to the development of electronics and its applications in the modern world. Additional is intended to clarify the operating principle of supercapacitors and detail all its generalities and particularities; similarly the document will allow a comparison between supercapacitors and conventional capacitors using for the purpose a model of hybrid power supply between an array of EDLC supercapacitors and a conventional battery, based on the simulation software "Matlab", for To understand its contribution in the development of branches related to electronics with a special emphasis on power electronics, this being the pillar for the development of applications with high energy requirements. **Keywords:** Supercapacitors; power electronics; Energy; cybernetics.

1. Introducción

El almacenamiento de la energía eléctrica ha sido un problema de desarrollo científico e investigativo constante a lo largo de los años, esto ha permitido incursionar en el desarrollo y

reestructuración de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos, fundamentales para el funcionamiento del mundo moderno, cabe destacar que estos dispositivos son aportes esenciales para sus ramas específicas y brindan una alternativa e inclusive una futura renovación de los dispositivos convencionales fabricados en serie en la actualidad. Para comprender de una manera más clara el problema del almacenamiento de la energía eléctrica es necesario enunciar las formas en las que esta puede ser almacenada. Estas son:

- Forma indirecta (Baterías)
- Forma directa (Capacitores, supercapacitores o ultra condensadores)

En referencia a las baterías estas son constituidas de un ánodo y un cátodo, el ánodo se oxida y debido a esto pierde electrones que son cedidos al cátodo el cual recibe estos electrones y se produce una diferencia de potencial formando un circuito eléctrico (Dawes, 1982).

Los capacitores, por el contrario son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electroestáticas. Estos están compuestos en una manera muy general de dos conductores o placas conductoras y un material dieléctrico o pésimo conductor que separa a ambas placas (Kaiser, 1993). Este proceso de almacenar energía se conoce como almacenamiento de energía no farádica (Fernandez, 2011).

El presente artículo se centra en el desarrollo de estos últimos dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Un capacitor convencional funciona en el orden de los milifaradios, un supercapacitor puede almacenar energía en el orden de los faradios e inclusive múltiplos superiores, la característica fundamental de este tipo de dispositivos eléctricos se denota en su capacidad de cargarse y descargarse en el orden de segundos o inclusive en menor tiempo. Esta última característica se hace muy conveniente cuando se trabaja con picos de potencias altas o para compensar la liberación de energía de los mismos en interrupciones de energía que duren poco tiempo (Valdóvinos & Otárola, 2008).

El principio fundamental de este tipo de dispositivos eléctricos y por el cual es tan efectivo y altamente difundido es la concentración de cargas electroestáticas en sus placas para su posterior liberación tal y como se profundizará en temas posteriores del presente documento (Gil Mera, 2012).

1.1. Análisis de la problemática

El constante desarrollo de dispositivos eléctricos y la creciente necesidad humana de un consumo energético cada vez más amigable con el medio ambiente, hace que los supercapacitores se vuelvan fundamentales para la implementación de nuevas tecnologías que permitan el consumo de altas potencias.

Un ejemplo práctico de la implementación de este tipo de dispositivos eléctricos (supercapacitores) es el automóvil eléctrico, las cargas y descargas rápidas de un supercapacitor permite que el auto recobre parte de su autonomía de una forma más rápida. De igual manera se pueden constituir sistemas híbridos entre baterías y capacitores, con la finalidad de mejorar la autonomía de carga de este tipo de vehículos e inclusive potenciar investigaciones para aplicaciones industriales más generalizadas (Yiou, Zang, & Kassakian, 2015, págs. 1-8).

1.2. Tipos de supercapacitores

Existen diferentes tipos de supercapacitores, generalmente se suelen dividir según la composición del material dieléctrico o del conductor usado para su constitución (Halper & Ellenbogen, 2006), entre los principales tipos existen:

- Supercapacitores electroquímicos de doble capa "EDLC"
- Supercapacitores con pseudocapacitancia
- Supercapacitores híbridos

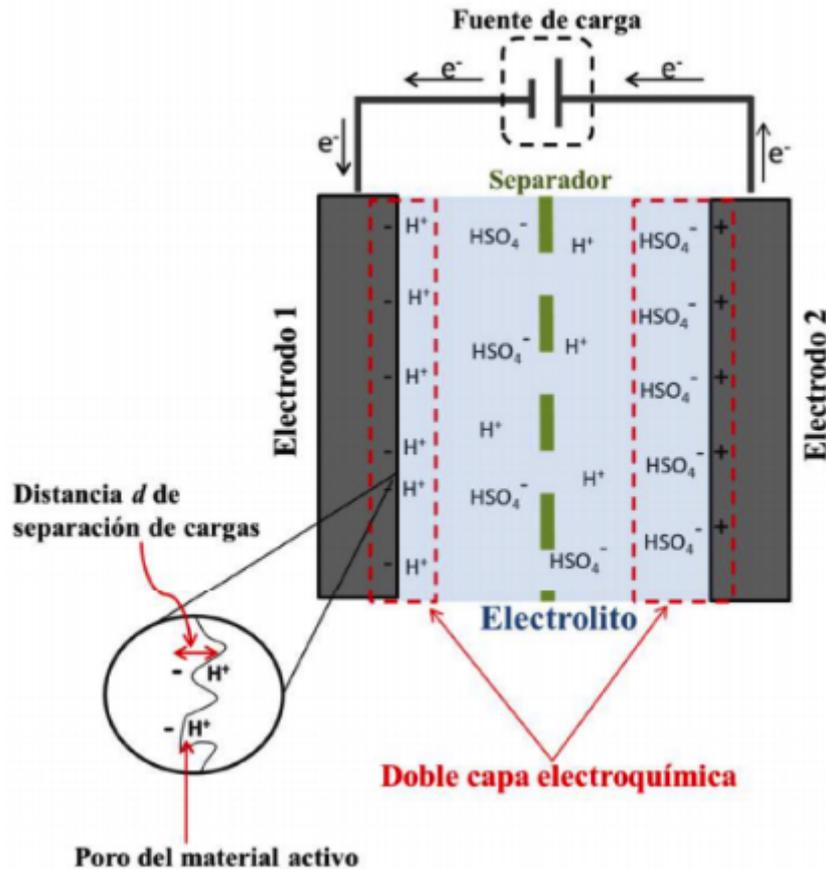
Cada tipo de supercapacitor tiene características específicas, en el presente trabajo investigativo se revisarán los principales tipos; llevando la redacción hacia un matiz práctico, enfocado a la electrónica de potencia.

1.2.1. Supercapacitores Electroquímicos de doble capa "EDLC"

El capacitor electroquímico de doble capa, también conocido como ultracapacitor o supercapacitor, usa sus dos capas de carga cuando se le aplica un voltaje a un electrodo inmerso en una sustancia

electrolítica. Los electrodos en un EDLC (Electrochemical Double-Layer Capacitor) son construidos en carbono altamente poroso, dando como resultado una superficie con una amplia relación de volumen. La Figura 1 muestra el esquema de constitución de un supercapacitor electroquímico de doble capa.

Figura 1
Esquema de un EDLC y su estructura material



Se muestra dos electrodos de carbono, cada uno con una doble capa de interfaz electrolítica de carga. La pequeña separación para las capas electrolíticas y la gran área de superficie producen capacitancias en el orden de los $40\text{-}60\text{F}/\text{cm}^3$. La energía necesaria para entrar en el campo de ruptura, es extremadamente alta, en relación a los capacitores convencionales, se la calcula en V/cm .

Es necesario establecer que el EDLC, no debe ser confundido con un capacitor electrolítico, el capacitor electrolítico cuenta con dos láminas metálicas como electrodos, suele usarse tantalio o aluminio, una de ellas posee una superficie oxidada, separadas por un papel electrolítico húmedo y enrollado de forma tubular. La capa de óxido forma el dieléctrico, la delgadez y el alto voltaje de ruptura entregan valores capacitivos relativos a un capacitor de lámina sólida. Un EDLC posee una capacitancia volumétrica en el orden de 10^6 y 10^8 , comparado con un capacitor electrolítico del mismo tamaño. Sin embargo el voltaje de trabajo de un EDLC está por $10\text{-}2$, comparado con un electrolítico, la densidad energética de un EDCK comercial está por 10^2 y 10^3 , en relación a un electrolítico. Por otro lado el bajo ESR de un EDLC da como resultado un dispositivo con una densidad de energía muy alto.

Un modelo simplificado se muestra en la Figura 2, corresponde al dispositivo comercial 2500 F EDLC, los valores que se muestran fueron dimensionados mediante experimentación, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 1 (Conway, 1999).

Figura 2
Modelo simplificado de un EDLC

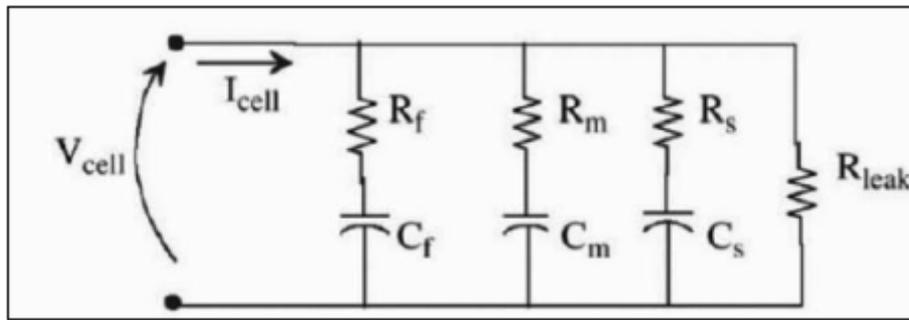


Tabla 1
Valores del Modelo Simplificado

Rama Rápida		Rama Intermedia		Rama Lenta		Pérdida	
R _f	0.68 mΩ	R _m	0.8 mΩ	R _l	2.9 mΩ	R _p	3 kΩ
C _f	2600 F	C _m	250 F	C _l	560 F		
t _f	1.768 s	t _m	200 s	t _l	1624 s		

1.2.2. Supercapacitores con pseudocapacitancia

A diferencia de los EDLC's que almacenan cargas electrostáticamente, los pseudocapacitores o supercapacitores con pseudocapacitancia almacenan cargas de forma faradaica a través de la transferencia de carga entre un electrodo y un electrolito (Halper & Ellenbogen, 2006). Existen dos materiales por los que se componen los electrodos que en su propósito sub-clasifica a este grupo de supercapacitores, estos son:

- Electrodo de materiales polímeros conductores
- Electrodo compuesto de Metal-óxidos

Supercapacitores basados en materiales polímeros

Los supercapacitores que disponen de materiales polímeros conductores disponen de las siguientes características:

- Pseudocapacitancia alta
- Bajo coste
- Buena conductividad eléctrica

El funcionamiento de los mismos se produce gracias a que después del proceso de carga del capacitor, también llamado proceso de "dopado", los polímeros del capacitor se vuelven electrónicamente conductores (Mangostino, Arbizzani, & Francesca, 2001). Cabe destacar que la finalidad principal de un supercapacitor de este tipo, es la de entregar energía específica en un periodo de tiempo (Potencia) muy corto generalmente en el orden de los segundos o menos.

Supercapacitores basados en compuestos metal-óxidos

Debido a la alta conductividad que tiene este tipo de compuestos, este prototipo de supercapacitor puede generar una pseudocapacitancia en el proceso de cargado. Un ejemplo práctico de un metal-óxido es el óxido de Rutilio. Su capacitancia es muy alta en comparación a otros materiales, esto es debido a que presenta una estructura anómala con protones que se intercalan entre sus enlaces, esto brinda la característica singular del presente material de estudio.

La densidad de almacenamiento de energía de este tipo de material es muy elevada, muy similar a un EDLC (Halper & Ellenbogen, 2006).

1.2.3. Supercapacitores híbridos

Estudios en los años recientes, han podido demostrar una alternativa a los EDLC's convencionales y para los pseudocapacitores implementando sistemas híbridos, usan un sistema que combina procesos no Farádicos y Farádicos para almacenar carga, un EDLC híbrido puede almacenar cantidades de energía mucho mayores al de un EDLC típico, sin la necesidad de sacrificar la

estabilidad y el ciclo de accesibilidad, ambos consisten en las mayores limitaciones de los pseudocapacitores.

Las combinaciones de los materiales con los que se han realizado varias pruebas son: dióxido de rutenio (RuO₂), óxido de cobalto (Co₃O₄), óxido de níquel (NiO), óxido de vanadio (V₂O₅), hidróxido de níquel (Ni(OH)₂), óxido de manganeso (MnO₂); siendo el óxido de manganeso (MnO₂) el que mejores cualidades presenta, a más de ser un material abundante en la tierra, es muy amigable con el planeta (El-Kady, y otros, 2015). Entre los sistemas que lo usan se encuentran las baterías, que implementado a este sistema híbrido consigue de manera considerable mejorar la eficiencia.

1.3. Aplicaciones de los supercapacitores

Debido a las ventajas que presentan los supercapacitores, con la disponibilidad de manejar altos valores de voltaje, corriente y temperatura, cargarse y descargarse en ciclos cortos y relativamente largos y una disponibilidad adicional de mantenimiento óptimo de una manera sencilla, en adición a todo lo mencionado y como representación práctica de las cualidades antes mencionadas se indican las aplicaciones más generalizadas de los supercapacitores, estas son:

- Desarrollo de convertidores integrando supercapacitores aplicando los principios de la electrónica de potencia para el fin antes mencionado.
 - Desarrollo de sistemas que permitan disponer de un back-up de energía integrando el uso de supercapacitores.
 - Desarrollo de un sistema que permita mejorar la autonomía de carga con la integración de supercapacitores para mejorar los tiempos de carga del sistema antes mencionado.
-

2. Metodología

2.1. Análisis del Rendimiento de Supercapacitores EDLC, mediante un Modelo Híbrido Supercapacitor-Batería

Para el análisis del rendimiento energético de los supercapacitores como elementos pasivos eléctricos, se propone el análisis de un modelo híbrido entre un supercapacitor EDLC y una batería de litio convencional, con la integración de convertidores DC-DC y con un bloque limitador de potencia para la batería convencional, en aras de evaluar la aportación de la potencia transitoria dada por el bloque de supercapacitores EDLC, y así precisar el rendimiento de este tipo de componentes eléctricos, el desarrollo del modelo será mediante el software de simulación "Matlab", a través del componente "Simulink". Del presente modelo se pretende analizar lo siguiente:

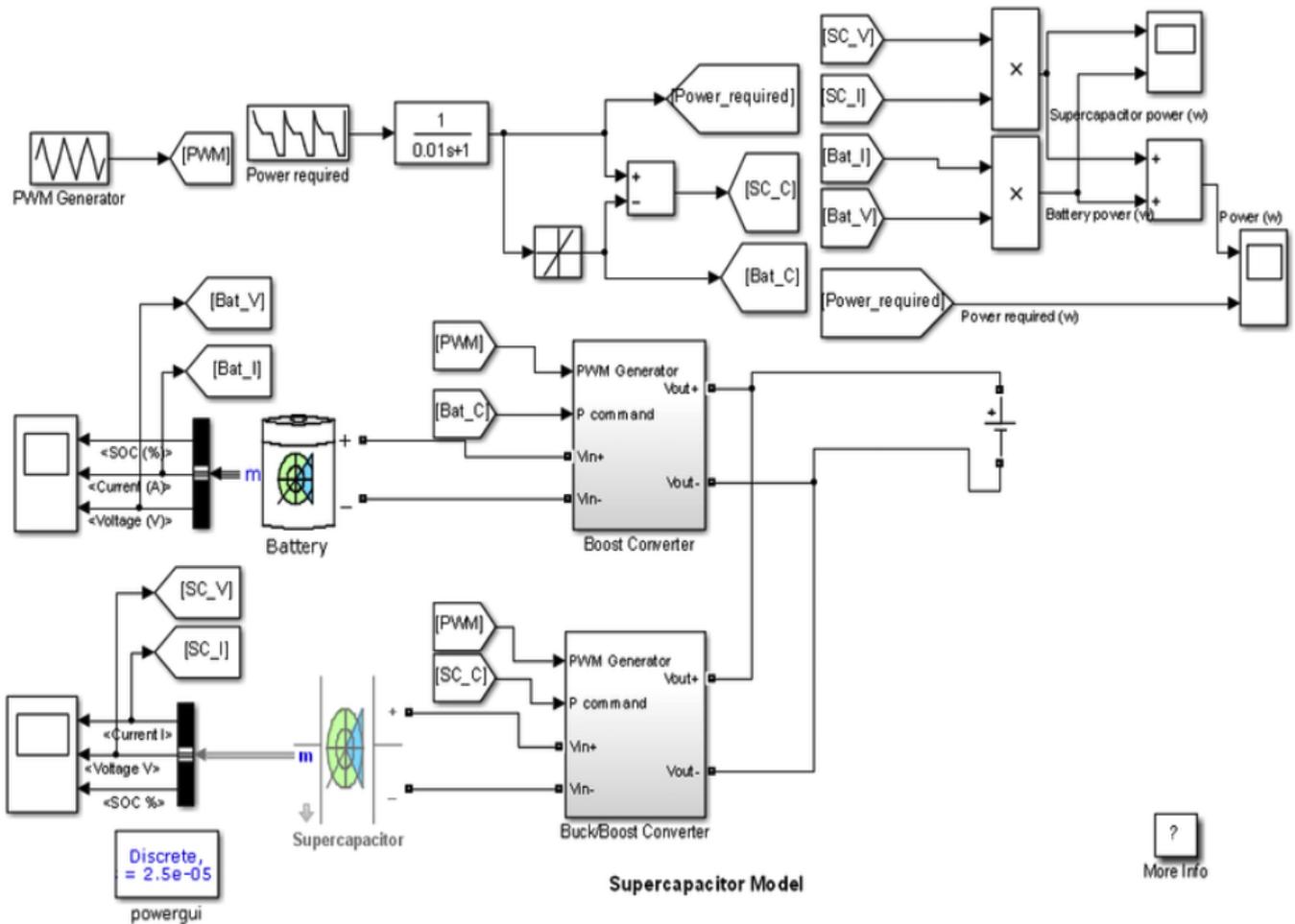
- Análisis de las generalidades del modelo propuesto para evaluar el rendimiento de los supercapacitores (valores, rangos, etc.)
 - Análisis de los componentes del modelo propuesto (batería, supercapacitor EDLC, convertidores DC-DC, entre otros)
 - Relación entre la potencia requerida y la potencia obtenida mediante el modelo híbrido propuesto, integrando el bloque de supercapacitores EDLC
-

3. Resultados

3.1 Análisis de las generalidades del modelo híbrido propuesto para evaluar el rendimiento del supercapacitor EDLC

En la Figura 3 se presenta el modelo híbrido compuesto entre un bloque de supercapacitores EDLC (Electrochemical Double-Layer Capacitor) y una batería de Ion de Litio que integran un sistema que pretende cubrir la demanda de potencia impuesta por un perfil de carga en función del tiempo, para este propósito se utilizan dos convertidores DC-DC, tales como el "Boost Converter", para la conversión (elevación) del voltaje de la batería convencional del sistema y un "Buck-Boost Converter" para la elevación del voltaje de salida del supercapacitor EDLC. Para el presente modelo se consideró atenuar los transitorios (picos) de potencia dados por la batería convencional en respuesta a la necesidad dada por el perfil de carga, con esto se pretende evidenciar la eficiencia y analizar el rendimiento del supercapacitor, ya que este componente será el encargado de suministrar la potencia transitoria al bus (circuito) de corriente continua.

Figura 3
Modelo híbrido (Supercapacitor EDLC-Batería Convencional)



3.2. Análisis de los componentes del modelo propuesto (batería, supercapacitor EDLC, conversores DC-DC, entre otros)

En el siguiente apartado se presentan las generalidades de los componentes del modelo híbrido, tales como la batería, supercapacitor EDLC, conversores "Boost Converter", y "Buck-Boost Converter", entre los componentes esenciales del modelo presentado.

En la Figura 4 se exponen las generalidades de la batería convencional utilizada, con un voltaje nominal de 26.4 voltios, una capacidad de carga de 6.6 A-h, una carga inicial del 100% y una respuesta de 30 segundos en función del tiempo.

Figura 4
Detalle de la batería utilizada para el modelo

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Temperature effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge

Type:
Lithium-Ion

Temperature
 Simulate temperature effects

Nominal voltage (V)
26.4

Rated capacity (Ah)
6.6

Initial state-of-charge (%)
100

Battery response time (s)
30

Figura 5
Detalle del supercapacitor utilizado para el modelo

Supercapacitor (mask) (link)

Implements a generic supercapacitor model which allows the simulation of Electric Double Layer Capacitors (EDLCs)

Parameters Stern Self-discharge

Rated capacitance (F)

500

Equivalent DC series resistance (Ohms)

2.1e-3

Rated voltage (V)

16

Number of series capacitors

6

Number of parallel capacitors

1

Initial voltage (V)

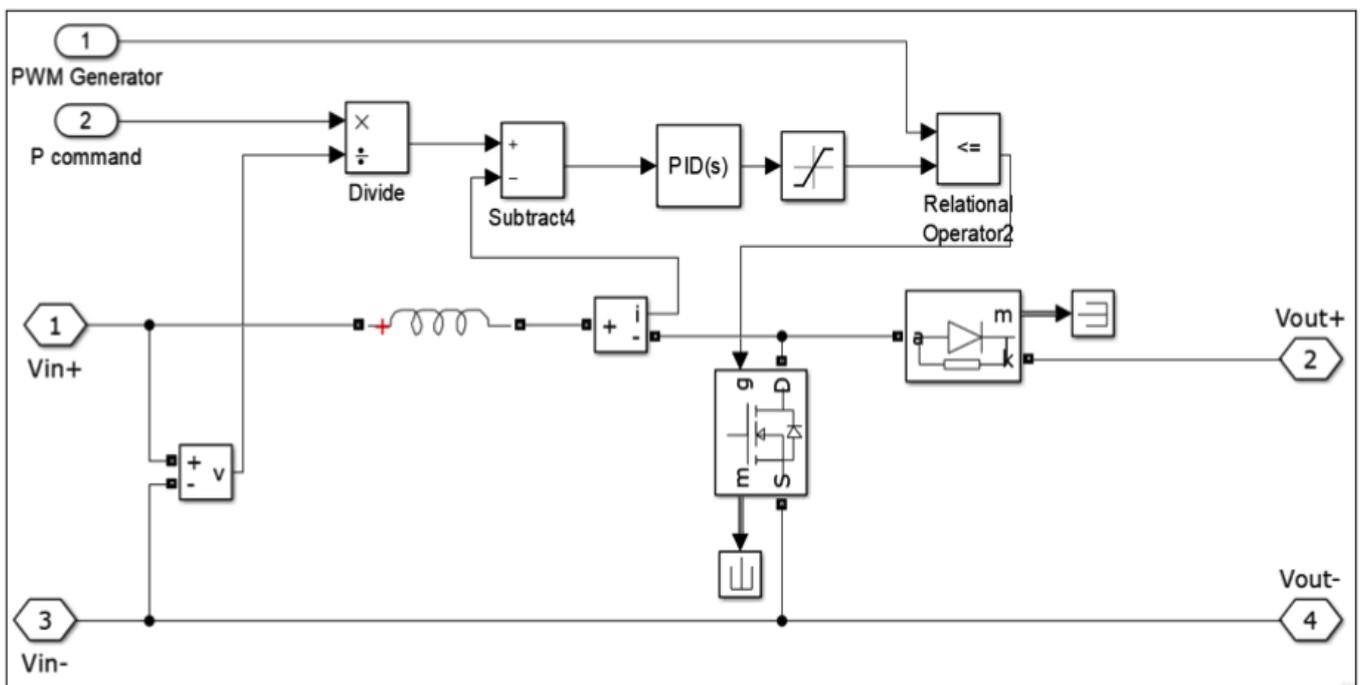
16

Operating temperature (Celsius)

25

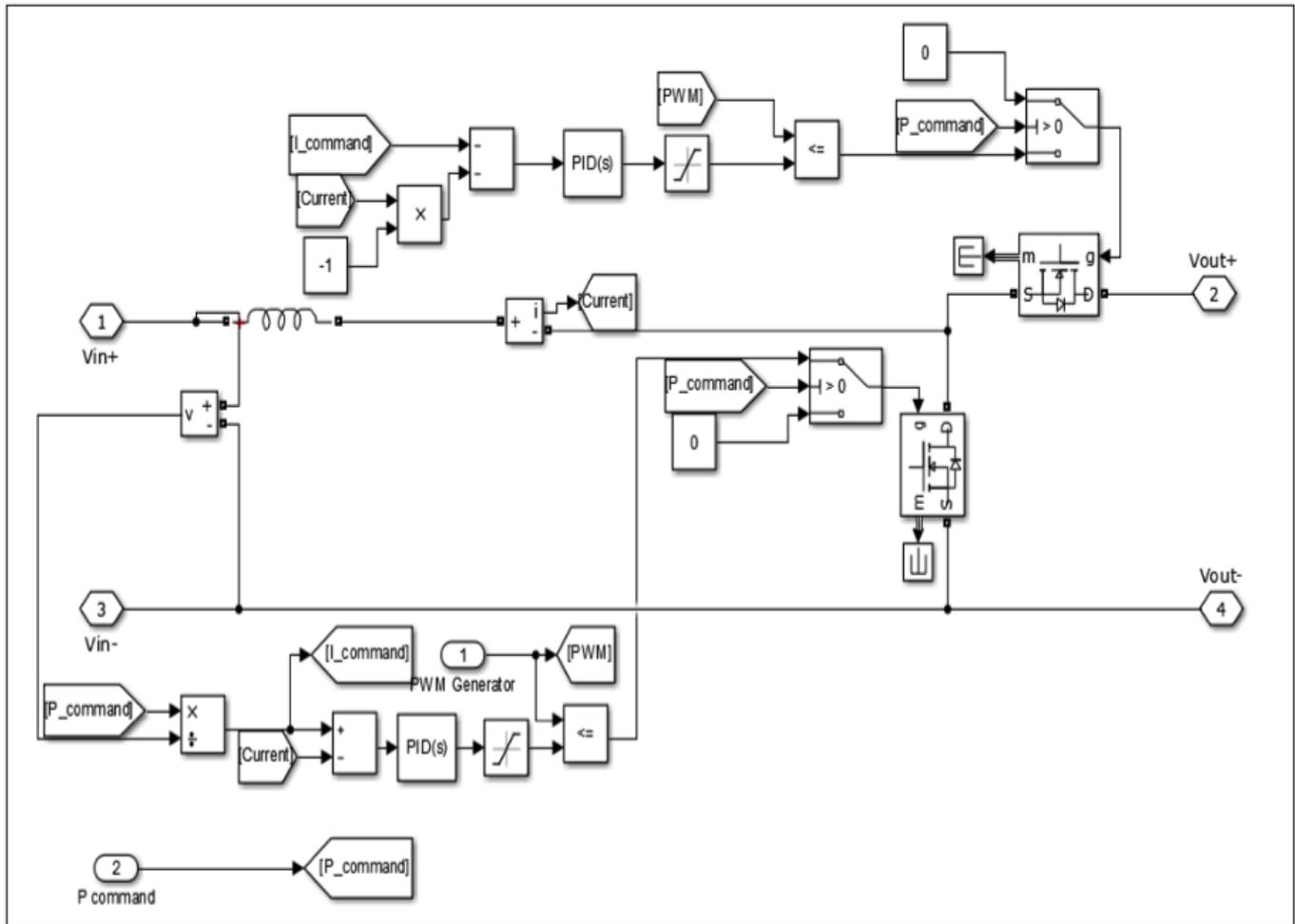
La Figura 5 expone las generalidades del modelo de supercapacitores EDLC utilizado, con una capacitancia de 500 faradios, un voltaje nominal de 16 voltios, con 6 capacitores en serie y un capacitor en paralelo, el modelo funciona a una temperatura de 25° Celsius, como temperatura nominal de trabajo.

Figura 6
Detalle conversor DC-DC
"Boost Converter"



Este modelo permite disponer de una señal en corriente continua superior. La señal inicial en el presente modelo de esta fuente de alimentación conmutada está compuesto de un transistor MOSFET y un diodo semiconductor que permite generar una conversión del voltaje de entrada, a una señal de mayor amplitud.

Figura 7
Detalle del convertor DC-DC
"Boost Converter"

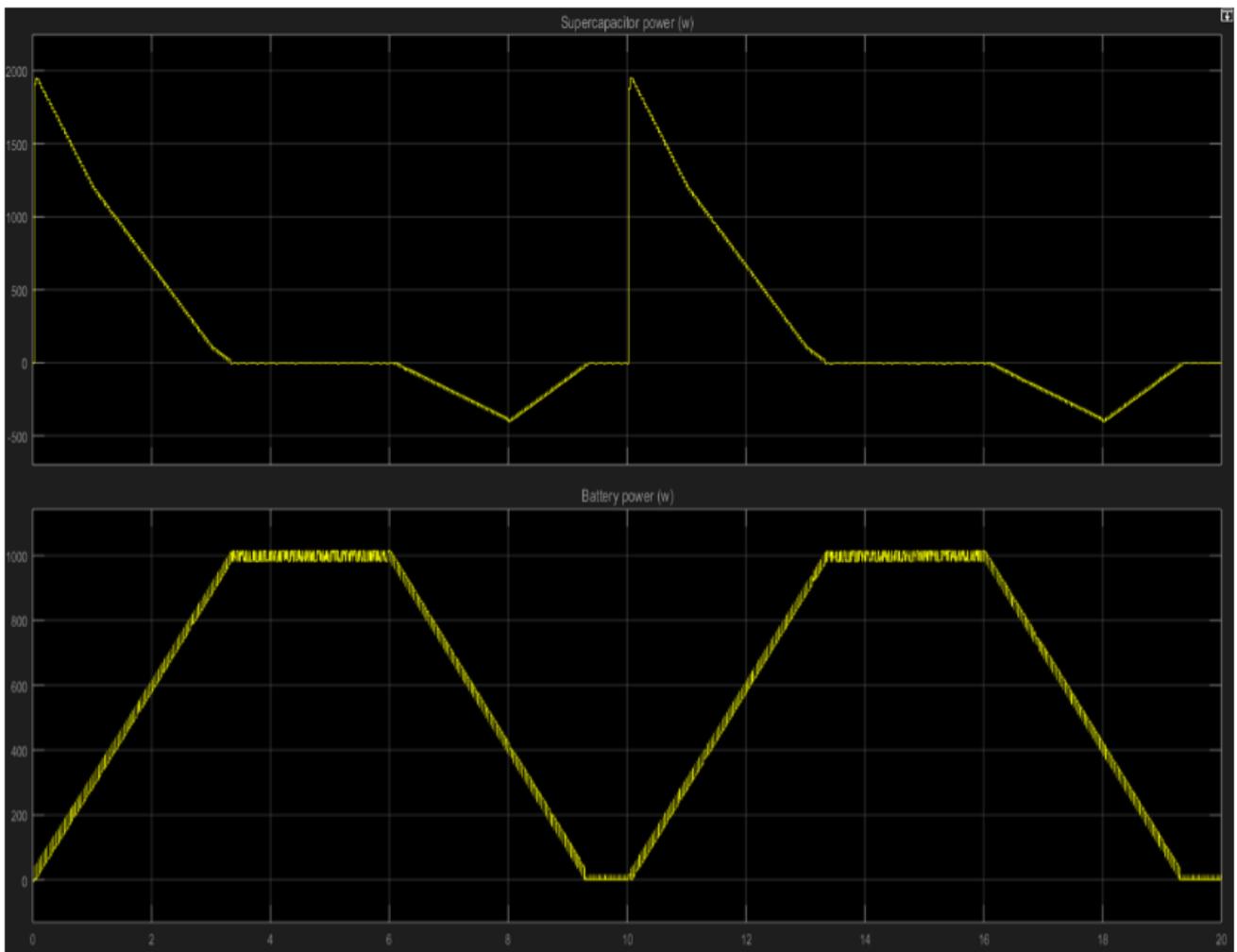


Como se muestra en la Figura 7 el convertor DC-DC presenta la siguiente particularidad, el voltaje además de ser en una magnitud superior o inferior al inicial, su salida mantiene la polaridad inicial de la señal de entrada, en este caso el voltaje es fácilmente ajustable regulando los ciclos de trabajo.

3.3. Relación entre la potencia requerida y la potencia obtenida mediante el modelo híbrido propuesto, integrando el supercapacitor EDLC

Las curvas de potencia en función del tiempo de los componentes principales del modelo (bloque de supercapacitores EDLC- baterías convencionales) son:

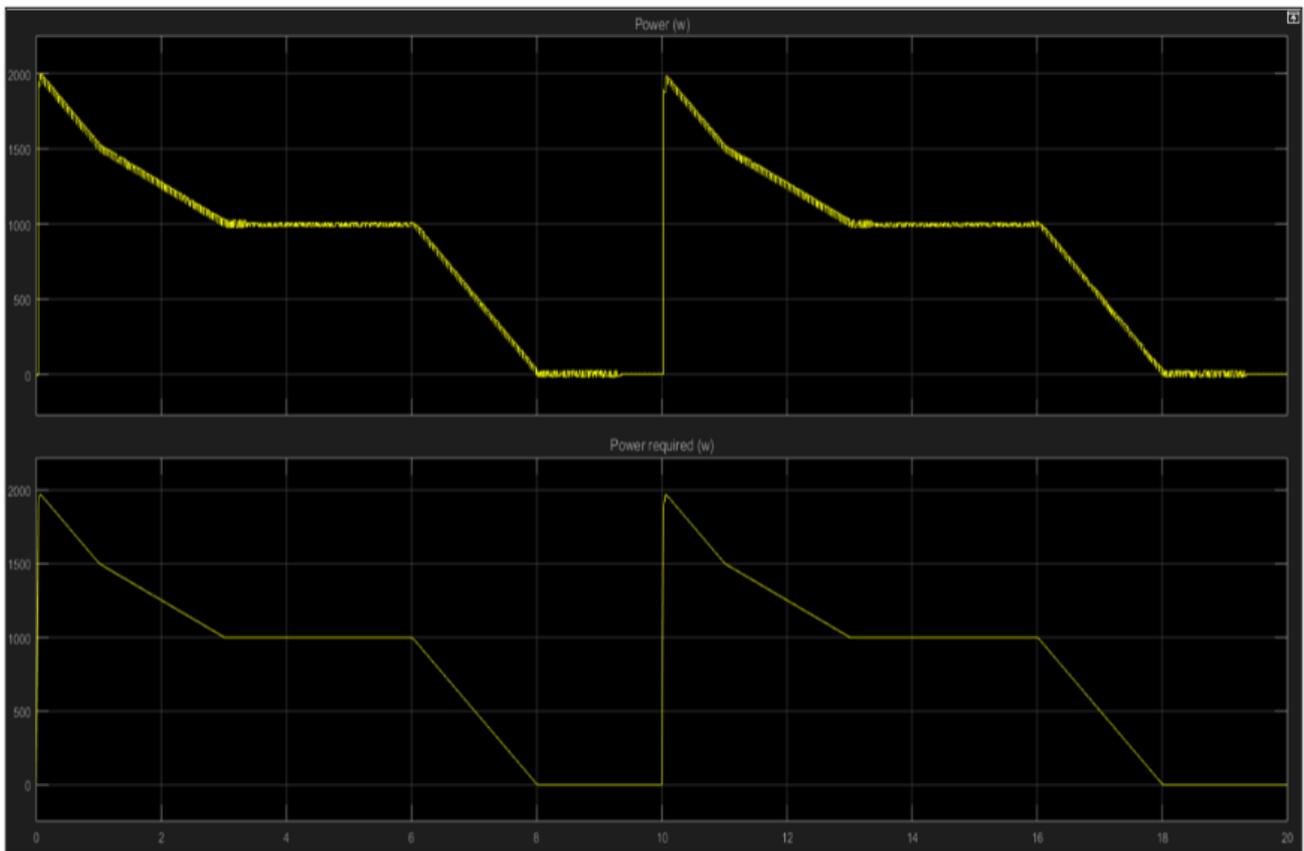
Figura 8
Curva de potencia de
"Supercapacitores EDLC-Batería de Ion de Litio"



En la Figura 8 se evidencia la evolución del flujo de potencia en función del tiempo, con un tiempo máximo establecido de simulación de 20 segundos, para la presente aportación se atenuó la potencia transitoria de la batería en relación a la potencia requerida propuesta para el presente ejercicio, esta atenuación fue posible mediante uno de los bloques del modelo propuesto, con esto se pretende evidenciar el efecto del supercapacitor ante este tipo de transitorios de potencia y su salida en el circuito de corriente continua propuesto mediante los convertidores DC-DC, mediante lo mencionado se pretende evaluar el rendimiento y funcionamiento, ante un perfil de carga definido y poder definir si el modelo propuesto cumple con las necesidades de carga pertinentes.

Figura 9

Curva de potencia requerida vs potencia obtenida del modelo híbrido



Mediante la Figura 9 se evidencia la eficiencia y el rendimiento de los supercapacitores, ante los transitorios (picos) de potencia propuestos por el perfil de carga para el presente ejercicio. Además de lo mencionado se puede constatar que el modelo híbrido, teniendo como agente principal al arreglo de supercapacitores EDLC, se adapta de una forma óptima y supe las necesidades energéticas (potencia) para el presente caso de estudio considerando los altos niveles de capacitancia de los mismos, se destaca también que la batería y el arreglo de supercapacitores del modelo se encuentran en paralelo, con la consideración especial de disponer una potencia de salida de la batería atenuada, para evidenciar el efecto supercapacitivo en el bus de D.C.

4. Conclusiones

Dada la presente investigación se concluye que los supercapacitores compuestos de materiales polímeros son en extremo viables para el desarrollo de las ciencias aplicadas a la ingeniería, debido a que disponen de una buena conductividad, una pseudocapacitancia alta y un costo relativamente menor, teniendo en cuenta sus prestaciones en comparación de otros supercapacitores.

Los supercapacitores se pueden agrupar en sistemas híbridos que permiten mejorar la autonomía a la hora de realizar procesos de carga de energía (eléctrica), esto es en extremo ventajoso, adicional a ello y con la integración de materiales polímeros que cada vez abaratan más sus costos de manufactura, podría generar una alternativa a la problemática mundial de almacenamiento de energía, optimizando tiempos, dinero y mejorando el rendimiento.

La principal diferencia entre los supercapacitores electrolíticos de doble capa y los supercapacitores compuestos de materiales polímeros radica en que el primer tipo opera almacenando cargas de forma electroestática, donde este es más parecido a los capacitores convencionales, en cambio el segundo tipo de supercapacitor opera con el principio faradaico, utilizando tanto el electrodo como el electrolito para almacenar carga, este principio se conoce como pseudocapacitancia.

Referencias bibliográficas

Conway, B. (1999). *Electrochemical Supercapacitors*. Ontario: Springer US.

Dawes, C. (1982). *Electricidad Industrial*. Barcelona: Reverté.

El-Kady, M.-F., Ihns, M., Ling, M., Hwang, J. Y., Mousavi, M., Channel, A., & Kaner, R. (2015). Engineering three-dimensional hybrid supercapacitors and microsupercapacitors for high-

performance integrated energy storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 4233–4238.

Fernandez, P. S. (2011). *Materiales carbonosos de distinta índole para el almacenamiento y la conversión electroquímica de energía*. La Plata: Universidad Nacional de la Plata.

Gil Mera, I. (2012). *Diseño de un Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido Basado en Baterías y Supercondensadores para su Integración en Microredes Eléctricas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

Halper, S. M., & Ellenbogen, J. C. (2006). *Supercapacitors: A Brief Overview*. McLean, Virginia: Mitre.

Kaiser, C. J. (1993). *The Capacitor Handbook*. New York: Olathe.

Mangostino, M., Arbizzani, C., & Francesca, S. (2001). Polymerbased supercapacitors. *Journal of Power Sources* n°9798, 821-815.

Valdóvinos, F., & Otárola, R. (29 de Septiembre de 2008). Almacenamiento de Energía: Desarrollos Tecnológicos y Costos. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Yiou, H., Zang, R., & Kassakian, J. (2015). An energy-based method for the assessment of battery and battery-ultracapacitor energy storage systems in pulse-load applications. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 02139* (págs. 2412 - 2419). Cambridge: IEEE.

1. Profesor Investigador Titular. Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDES, Ambato , Ecuador us.erikmendez@uniandes.edu.ec

2. Profesor Titular Auxiliar. Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDES, Ambato , Ecuador us.estalinarrobo@uniandes.edu.ec

3. Docente – Investigador. Facultad de Computación y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador andres.morocho@espoch.edu.ec

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 41 (Nº xx) Año 2020

[\[Índice\]](#)

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](#)]

revistaESPACIOS.com



This work is under a Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International License