

# **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## **SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE LEDS DE POTENCIA CON ALMACENAMIENTO EN SUPERCAPACITORES**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

### **MAESTRA EN ELECTRÓNICA OPCIÓN: SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS**

PRESENTA:

**ING. TANIA MARTÍNEZ MANZO**

DIRECTOR:

**DR. MARCO ANTONIO CONTRERAS ORDAZ**

CO-DIRECTOR:

**DR. JESÚS LINARES FLORES**

*Huajuapán de León, Oaxaca a 31 Enero de 2014*



# Dedicatorias

*A mi padre† porque siempre fuiste y  
serás la inspiración que guía mis pasos  
hacia la superación.*

*A mi madre por que siempre has estado  
a mi lado y me has apoyado  
incondicionalmente.*

*A mi hermano Pavel porque “juntos  
somos fuerza”, gracias por apoyarme  
siempre.*

*A mis hermanos Pavel, Jorge e Ivonne  
porque a pesar de la distancia siempre  
recibo su amor y su apoyo.*



# Agradecimientos

En primer lugar doy gracias a Dios, por guiarme por el buen camino y haberme dado fuerza y valor para no rendirme ante las adversidades. Gracias por haberme dado unos padres y hermanos tan amorosos y por todas las personas maravillosas que has puesto en mi camino.

A ti papá por todo el amor que me diste. Con tu ejemplo me enseñaste a luchar siempre, aún en los momentos más difíciles. Porque tu tenacidad superaba cualquier obstáculo y tenías un gran amor por la vida. Gracias por compartir conmigo tantos conocimientos, por creer siempre en mi y por darle fuerza e inspiración a mi días. Te amo.

A mi madre por estar a mi lado en todo momento, apoyarme incondicionalmente y cuidar de mi. Por que siempre me animaste a seguir adelante y me impulsaste a iniciar mi carrera. Te amo.

A mi hermano Pável por estar siempre a mi lado, apoyarme incondicionalmente en todo momento y cuidar de mi. Por quererme tanto y darme la certeza que siempre nos tendremos uno al otro.

A mi hermano Pável Villa porque siempre cuento contigo. Gracias por escucharme, darme ánimos y enseñarme tantas cosas. Por todos los consejos y razonamientos que me han enseñado a madurar.

A mi hermano Jorge por darme ánimos y escucharme siempre. Por todas esas platicas nocturnas y porque a pesar de la distancia y el tiempo el cariño siempre se mantiene.

A mi hermana Ivonne por todo el apoyo y los consejos que me has dado.

A mis amigos Gaby, Yovany, Carlos y Adriana. Ustedes han sido un regalo maravilloso en mi vida. Muchas gracias por estar siempre a mi lado en todo momento, por toda la ayuda que me han brindado y que jamás podre pagarles con nada. Pero sobretodo gracias por preocuparse y cuidar siempre de mi. Los quiero muchisimo y ustedes saben que más que mis amigos son mis hermanos.

Porque siempre encuentras la forma de dibujar una sonrisa en mi rostro y varias carcajadas, te agradezco Ivonne. Eres una gran amiga que siempre estas ahí cuando la necesito. Gracias por todo tu cariño y tu apoyo. Eres una persona maravillosa y una gran compañera.

A mi amigo Carlos González por su amistad y su gran apoyo. Gracias por resolverme todas esas dudas de control.

Porque impulsaste mi camino durante los cursos de la maestría y has sido uno de los mejores compañeros que he tenido. Gracias Nacho por ser un gran amigo y por compartir conmigo todas esas horas de trabajo y desvelos. Extraño las desveladas para entregar proyectos o estudiar para algún examen, y que por lo regular terminaban con un desayuno a las 5 o 6 de la madrugada. Y que decir de las horas de lectura acompañadas de un buen café y una platica profunda de psicología.

A mis amigos Lluvia y José por su amistad y por todos los ánimos que siempre me dieron para seguir adelante.

A mi amigo Christian, porque siempre estas ahí cuando te necesito y sabes las palabras exactas que necesito escuchar. Eres una persona increíble amigo.

Por el gran apoyo que siempre me brindan, por preocuparse por mi y por sus consejos, les doy las gracias a ti Oly y a Doña Mary. Gracias por brindarme su amistad y su cariño.

A mi director de tesis el Dr. Marco Antonio Contreras Ordaz, por confiar en mi para realizar este proyecto, por sus consejos, comprensión y ayuda invaluable.

Al Dr. Jesús Linares Flores por su guía y apoyo para realizar este proyecto. Por todas esas horas dedicadas a este trabajo y por su enseñanza en el aula de clases. Por que gracias a usted me reconcilie con el control.

Al Dr. Agustín por el apoyo que siempre me ha brindado.

A Céles y Carmen por todo el apoyo que me brindaron y por los ánimos que me dieron.

A mi amiga Nelly porque juntas hemos compartido mucho. Muchas gracias por escucharme y darme siempre ánimos, gracias por todo tu apoyo y porque se que siempre estas ahí cuando te necesito.

A mi amigo Villalobos que me has escuchado tantas veces. Gracias por brindarme tu amistad y confiar en mi. Por todas esas platicas y momentos de distracción.

A mi amiga Miriam, porque nuestra amistad ha demostrado que no puede afectarle ni la distancia, ni el tiempo, ya que siempre hallamos la forma de reencontrarnos. Gracias por tus consejos y tu apoyo.

Al profesor Alejandro Ramírez por brindarme su amistad y apoyo. Porque gracias a usted he aprendido muchas cosas.

A mis amigos Miguel y Gris por todo su apoyo, por darme ánimos y por brindarme su amistad.

A mis amigos Alberto Diego, Sra. Mary, Chema, Sra. Lupita, Cony, Javier, Julieta, Luis, Eliza, Yesenia, Juanita por todas esas horas de alegría que me han brindado y todo lo que me han enseñado.

También le dedicó esta tesis a todos los que creyeron en mi, a toda la gente que me apoyó, a mis profesores y a esta institución que me ha formado.

# Resumen

El presente trabajo se enfoca al uso de los supercapacitores como dispositivos únicos de almacenamiento de energía, en una aplicación de larga duración. Normalmente cuando se hace referencia a los dispositivos de almacenamiento, los primeros nombres que vienen a la mente son: baterías y celdas de combustible; sin embargo, estos sistemas tienen serias desventajas que a la larga afectan en el costo y la eficiencia de los sistemas en los que se utilizan. Es por esta razón que en este trabajo de tesis se diseñó un sistema de iluminación para alimentar LEDs de potencia, utilizando una conexión en serie de supercapacitores (banco de supercapacitores) como medio de almacenamiento de energía.

Los supercapacitores poseen moderada densidad de energía y alta densidad de potencia, que los hace adecuados para aplicaciones de alta potencia y corta duración; tales como: vehículos eléctricos, telecomunicaciones, UPS, etc. Este trabajo propone el uso de los supercapacitores en un sistema de iluminación de larga duración, que almacena la energía obtenida de paneles solares. El sistema está compuesto por cuatro elementos principales, un convertidor CD-CD tipo reductor que regula el voltaje para la alimentación del banco de supercapacitores, el banco de supercapacitores, un convertidor CD-CD elevador que regula el voltaje y corriente para la alimentación de los LEDs de potencia y un sistema de control para los dos convertidores de potencia del tipo CD-CD.

Debido a que el sistema es no-lineal y pasivo disipativo, se diseña un controlador por retroalimentación de la salida pasiva del error, esto para regular los niveles de voltaje y corriente en cada uno de los convertidores del tipo CD-CD del sistema de iluminación alimentado por supercapacitores.





# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Los sistemas Fotovoltaicos . . . . .	2
1.2. Estado del Arte . . . . .	3
1.3. Planteamiento del Problema . . . . .	5
1.4. Justificación . . . . .	5
1.5. Hipótesis . . . . .	6
1.6. Objetivos . . . . .	6
1.6.1. Objetivo General . . . . .	6
1.6.2. Objetivos Particulares . . . . .	6
1.7. Metas . . . . .	6
1.8. Estructura del documento . . . . .	7
<b>2. El supercapacitor o EDLC</b>	<b>9</b>
2.1. Antecedentes Históricos . . . . .	10
2.2. Construcción y principio de operación . . . . .	11
2.2.1. Principio de operación . . . . .	13
2.2.2. Materiales de construcción . . . . .	14
2.2.2.1. Electrodo y colectores de corriente . . . . .	14
2.2.2.2. Electrolito . . . . .	15
2.2.2.3. Separador . . . . .	16
2.2.3. Empaquetado . . . . .	16
2.2.4. Clasificación . . . . .	17
2.3. Características operacionales de los EDLCs . . . . .	18
2.4. Modelo Eléctrico del EDLC . . . . .	21
2.5. Curva característica del EDLC . . . . .	23
2.6. Carga del EDLC . . . . .	24
2.7. Banco de Supercapacitores . . . . .	25
2.7.1. Conexión de supercapacitores . . . . .	25

2.7.1.1.	Conexión en serie . . . . .	25
2.7.1.2.	Conexión en paralelo . . . . .	26
2.7.2.	Dimensionamiento del banco de SCs . . . . .	27
2.7.2.1.	Balanceo de voltaje . . . . .	30
2.8.	Aplicaciones . . . . .	31
<b>3.</b>	<b>Análisis y diseño del sistema de iluminación</b>	<b>35</b>
3.1.	Especificaciones del sistema . . . . .	35
3.1.1.	Selección de las topologías para los convertidores CD-CD . . . . .	36
3.2.	Convertidores CD-CD . . . . .	37
3.2.1.	Convertidor CD-CD Reductor . . . . .	38
3.2.1.1.	Diseño y simulación del convertidor . . . . .	39
3.2.2.	Convertidores CD-CD Elevador . . . . .	40
3.2.2.1.	Diseño y simulación del convertidor . . . . .	41
<b>4.</b>	<b>Modelo matemático y diseño del sistema de control</b>	<b>43</b>
4.1.	Modelo en forma promedio del sistema . . . . .	43
4.2.	Sistema de control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error . . . . .	47
4.2.1.	Control basado en pasividad . . . . .	47
4.2.1.1.	Pasividad . . . . .	47
4.2.1.2.	Disipatividad . . . . .	49
4.2.2.	Diseño del controlador por retroalimentación de la salida pasiva . . . . .	51
4.3.	Resultados de simulación . . . . .	58
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
5.1.	Trabajos futuros . . . . .	62
	<b>Apéndices</b>	<b>63</b>
	<b>A. Hoja de datos del supercapacitor BCAP3000 270</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>

# Índice de figuras

2.1. Constitución típica de un SC. . . . .	12
2.2. Acumulación de carga en el SC. . . . .	13
2.3. Circuito equivalente de un supercapacitor . . . . .	14
2.4. Empaquetado cilíndrico de un supercapacitor. . . . .	17
2.5. Modelo del supercapacitor . . . . .	22
2.6. Modelo de las tres ramas RC . . . . .	23
2.7. Modelo de la línea de transmisión . . . . .	23
2.8. Voltaje en las terminales del EDLC . . . . .	24
2.9. Conexión en serie de SCs [29] . . . . .	26
2.10. Conexión en paralelo de supercapacitores [29] . . . . .	26
2.11. Conexión en paralelo-serie de supercapacitores [29] . . . . .	27
2.12. Perfil de descarga en un supercapacitor . . . . .	27
2.13. Supercapacitor BCAP3000 270 . . . . .	28
3.1. Topología del sistema . . . . .	36
3.2. Configuración del convertidor CD-CD tipo reductor . . . . .	38
3.3. Simulación del voltaje de salida del convertidor reductor . . . . .	40
3.4. Configuración del convertidor CD-CD tipo elevador . . . . .	40
3.5. Simulación del voltaje de salida del convertidor elevador . . . . .	42
4.1. Diagrama general del sistema de iluminación. . . . .	44
4.2. Diagrama general acoplado. . . . .	44
4.3. Señales de control $u_1 = 1$ y $u_2 = 1$ . . . . .	45
4.4. Señales de control $u_1 = 0$ y $u_2 = 0$ . . . . .	45
4.5. Elemento pasivo. . . . .	48
4.6. Señales de corriente $i_1$ y voltaje $v_1$ . . . . .	59
4.7. Señales de corriente $i_2$ y voltaje $v_2$ . . . . .	59
4.8. Señales de control . . . . .	60



# Índice de Tablas

2.1. Principales fabricantes de supercapacitores . . . . .	11
3.1. Parámetros del convertidor CD-CD tipo reductor . . . . .	39
3.2. Parámetros del convertidor CD-CD tipo elevador . . . . .	41
4.1. Valores de los elementos para la simulación . . . . .	59



# Capítulo 1

## Introducción

El ritmo acelerado del crecimiento poblacional y el desarrollo de las potencias emergentes, demandan una cantidad cada vez mayor de energía alrededor del mundo, cuya generación recae principalmente en el procesamiento de combustibles fósiles o hidrocarburos que son recursos no renovables. La consecuente escasez de estos combustibles, ha ocasionado un continuo encarecimiento en los costos de producción de la energía eléctrica, además de la elevada contaminación que se produce durante su procesamiento.

Con el fin de disminuir la dependencia hacia los hidrocarburos, investigadores y científicos trabajan para incrementar el aprovechamiento de las energías renovables en la producción de energía eléctrica. Hoy en día, las energías renovables más utilizadas para la generación de energía son: la radiación solar, energía mareomotriz, eólica e hidroeléctrica [5] que son recursos que no corren peligro de agotarse a largo plazo.

La energía solar es una de las fuentes de energía más abundante en la Tierra, y los costos de conversión en energía eléctrica son relativamente más económicos con respecto a los demás recursos [18]. Además al poder ser captada en prácticamente cualquier lugar, ofrece mayor ventaja de explotación y autonomía; por lo tanto, los sistemas fotovoltaicos desarrollados ofrecen a los consumidores la oportunidad de generar electricidad de una forma limpia, autónoma, silenciosa y segura. No obstante, como lo describe Voorden, et al. [56], una desventaja de estos sistemas es que son una fuente intermitente de energía, debido a las variaciones en el nivel de la radiación solar a lo largo del día, razón por la cual es imprescindible el empleo de dispositivos de almacenamiento de energía secundarios que ofrezcan una fuente de generación constante.

Por muchos años se han usado las baterías como medio principal de almacenamiento de energía. Si bien una batería posee gran densidad de energía (las baterías de Li-ion poseen 115 Wh/Kg), su tiempo de vida útil es reducido (de 3 a 5 años), son sensibles a la inversión de polaridad, tienen un desempeño pobre a bajas o altas temperaturas y resisten solo unos pocos miles de ciclos de carga/descarga [16], [44]. Además, los picos de potencia causados por grandes

corrientes hacen que disminuya su tiempo de vida útil, que aunado con el progresivo deterioro debido a sus reacciones químicas internas, hace necesario el mantenimiento o sustitución, lo cual trae consigo un considerable aumento en los costos del sistema.

Una tecnología emergente que se está convirtiendo en un prometedor rival de las baterías y que ofrece mejores características de operación es el supercapacitor (SC) [24], [41]. Los SCs también conocidos como capacitores electroquímicos de doble capa (EDLC) o ultracapacitores, son dispositivos de almacenamiento eléctrico que en comparación con las baterías poseen alta densidad de potencia (W/kg), resistencia en serie equivalente (ESR) muy baja y moderada densidad de energía (Wh/kg).

La principal ventaja de los SCs, como se describe en [3], es su alta velocidad de liberación de energía (altas corrientes), lo cual se traduce en una alta potencia, que supera a las baterías. Los SCs, se proyectan como una buena opción para almacenamiento de energía considerando que las investigaciones recientes prometen elevar sus capacidades de almacenamiento, y tomando en cuenta todas sus ventajas operativas que son: alta densidad de potencia, rápida descarga con altas corrientes, recarga con corrientes y perfiles aleatorios de carga, a prueba contra descargas intensas, varios cientos de miles de ciclos de carga/descarga, resistentes contra inversión de polaridad, ESR ultra bajo, tiempo de vida amplio (de 15 a 20 años), rango de temperatura de operación amplio, bajo peso, a prueba contra shock, vibración, entre otras. Además, los SCs están libres de materiales pesados contaminantes, que los hacen amigables con el medio ambiente.

Debido a su alta densidad de potencia, los SCs se aplican en la actualidad en sistemas híbridos, que reducen las demandas altas de energía en la fuente de almacenamiento principal, que normalmente son baterías o celdas de combustible. Los campos de aplicación principales son: vehículos de tracción eléctrica en el transporte público, mejora de la calidad de la energía, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), telecomunicaciones, equipo médico, herramientas eléctricas y dispositivos electrónicos compactos [37].

## 1.1. Los sistemas Fotovoltaicos

La instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV) se ha incrementado en la actualidad, debido principalmente al aumento en los costos de la producción de la energía eléctrica y a su fácil implementación en zonas rurales de difícil acceso. Una aplicación muy atractiva y de bajo consumo, es la instalación de SFV para alumbrado público. Ya que estos sistemas se pueden instalar en carreteras, parques, estacionamientos, etc., representando un gran ahorro en el consumo de electricidad.

Un SFV para iluminación, está conformado de forma regular por: paneles solares, dispositivos de almacenamiento de energía, un controlador de carga, lámparas, cables y accesorios para la instalación. El principio de funcionamiento de éstos sistemas se puede resumir de la



siguiente manera [6]:

Los paneles solares convierten en electricidad (corriente directa) la luz solar que reciben durante el día, la cual debido a su naturaleza intermitente se debe acumular en dispositivos de almacenamiento de energía para ser utilizada en el momento en que se requiera (normalmente en la noche). Una o varias lámparas toman la electricidad almacenada y la convierten en iluminación, de acuerdo con la demanda del usuario. La electricidad que los paneles envían y la que es proporcionada a las lámparas se hace pasar por el controlador de carga cuya función es proteger a los otros elementos del sistema contra cargas o descargas excesivas, altas corrientes y bajos voltajes, además de proveer la señalización del estado del sistema.

Tradicionalmente se han utilizado por varios años las baterías como medio de almacenamiento de energía, debido principalmente a su bajo costo y su gran densidad de energía; sin embargo, presentan varias desventajas que a largo plazo aumentan el costo de los SFV. Por esta razón en este documento se propone el uso de SCs o EDLCs como dispositivos de almacenamiento para el diseño de un sistema de iluminación.

Se considera que un sistema de iluminación es una aplicación de bajo consumo y con almacenamiento de larga duración, debido a que una lámpara tiene un consumo constante de corriente normalmente bajo, y el periodo de utilización es durante la noche, es decir, en promedio 8 horas. Con el fin de reducir el consumo de energía, se hace uso de LEDs de potencia en lugar de lámparas, que actualmente representan una gran alternativa de iluminación con un bajo consumo de potencia.

El sistema consta de cuatro módulos principales: Un convertidor CD-CD tipo reductor, un banco de SCs, un convertidor CD-CD tipo elevador y un módulo de control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error. El convertidor CD-CD tipo reductor adecua el voltaje de los paneles solares para la carga de los supercapacitores y el convertidor CD-CD tipo elevador adecua el voltaje y la corriente para la alimentación del LED de potencia de 10W. Los dos voltajes y las dos corrientes de ambos convertidores CD-CD son regulados mediante el control multivariable basado en pasividad.

## 1.2. Estado del Arte

El primer SC de éxito comercial se diseñó para aplicaciones de respaldo de energía de corta duración para memorias, debido principalmente a su alta resistencia interna y a su baja densidad de energía. A partir de ese momento los SCs se desarrollaron para aplicaciones de baja potencia; sin embargo, las investigaciones y desarrollos recientes en materiales para electrodos y técnicas de manufactura, han permitido incrementar la densidad de potencia y energía, por lo tanto, los SCs están emergiendo en aplicaciones de alta potencia.

Las aplicaciones actuales de los SCs, están enfocadas a sistemas de almacenamiento de energía de corta duración o en sistemas híbridos con baterías o celdas de combustible que

aprovechan la rápida liberación de corriente de los EDLCs. Algunos ejemplos de estos trabajos se describen a continuación:

Rufer y Barrade [43] proponen el diseño de un sistema de almacenamiento de energía basado en SCs, para almacenar la energía regenerada y posteriormente hacer uso de ésta para cubrir las demandas de potencia pico en un elevador.

En [34] se lleva a cabo el diseño y construcción de un filtro activo de corriente monofásico que provee adicionalmente respaldo de energía ante cortes en la red eléctrica. El sistema está formado por un filtro activo de corriente y un banco de SCs, que funcionan como fuente principal de almacenamiento de energía. La finalidad del sistema es mejorar la calidad de la red eléctrica eliminando los armónicos de corriente y suministrando energía continua.

En [30] Juárez realiza la simulación en el programa Matlab/Simulink de un sistema de recuperación de energía, basado en baterías y SCs, aplicado a un sistema de tracción eléctrica de un vehículo eléctrico. Las baterías se usan como fuente de energía y los SCs como fuente de potencia. Al utilizar SCs para proveer las demandas pico de corriente durante la aceleración del vehículo se reduce el sobredimensionamiento de las baterías; además, es posible almacenar la energía regenerada durante el frenado del vehículo para utilizarse posteriormente en el arranque o aceleración.

En [13] se realiza el diseño y construcción de un UPS híbrido on-line, que está formado por dos fuentes de energía. Una de ellas es un banco de SCs y la otra un sistema generador de velocidad ajustable alimentado por un bus de CD.

En [50] se presenta un método para utilizar los SC en conjunto con baterías de NiMH en un vehículo eléctrico híbrido con el fin de extender el tiempo de vida de las baterías.

Debido a la moderada densidad de energía de los SCs (10 Wh/Kg) su uso en sistemas de energía renovables está poco extendido, ésta es la razón por la cual en el presente trabajo se realiza un diseño novedoso que busca aprovechar las ventajas de los SCs sobre las baterías en un sistema de almacenamiento de larga duración. En [51], [56] se detallan dos trabajos que hacen uso de los SCs en sistemas de energía renovable.

A diferencia de los trabajos previamente citados, este trabajo propone una ley de control diseñada a partir del modelo dinámico en forma promedio del sistema, el cual consta de los siguientes módulos: módulo de alimentación del panel solar, módulo del convertidor CD-CD tipo reductor para la carga de los SCs, módulo de los SCs para la alimentación del convertidor CD-CD tipo elevador, módulo de carga (lámpara LED). Esta propuesta tiene como objetivo regular la potencia de la lámpara LED a partir de la energía almacenada en los SCs cargados mediante el panel solar.

### 1.3. Planteamiento del Problema

Los costos en la producción de la energía eléctrica han llevado a un continuo incremento en las tarifas de las compañías distribuidoras de energía, razón por la cual algunos usuarios y compañías privadas han comenzado a instalar SFV independientes de la red eléctrica con el fin de reducir sus gastos. En carreteras y lugares remotos de difícil acceso a la red eléctrica, el alumbrado público también ha empezado a instalarse haciendo uso de SFV con baterías como medio principal de almacenamiento, debido principalmente a su alta densidad de energía. Sin embargo, la eficiencia de las baterías es baja; por ejemplo, una batería de plomo ácido puede perder hasta un 30 % de energía durante la carga [34]. Además las baterías poseen un tiempo de vida reducido (3-5 años) y un rango de temperatura de operación limitado que en ocasiones obliga a instalar sistemas de acondicionamiento de temperatura, todo esto a largo plazo incrementa el costo de los SFV.

Los SCs en cambio poseen una eficiencia alta (aprox. 98 %), un tiempo de vida útil que oscila entre los 15-20 años, pueden operar en un amplio rango de temperaturas y poseen un alto número de ciclos de carga y descarga [3], [34]. Con el fin de desarrollar aplicaciones de larga duración para los SCs y obtener SFV más eficientes que aprovechen las características antes mencionadas, este trabajo de tesis propone un sistema de almacenamiento de larga duración mediante el uso de SCs, para cubrir las necesidades de un sistema de iluminación con un LED de potencia, para operar en funcionamiento continuo de 90 min.

### 1.4. Justificación

De acuerdo a la revisión bibliográfica de la literatura sobre la aplicación de los SCs en sistemas de iluminación, no existen proyectos en los que se apliquen SCs en sistemas de ahorro de energía de larga duración, por lo tanto, este proyecto plantea un sistema de iluminación de larga duración, donde no se tenga disponible la red eléctrica convencional. Este tipo de aplicación se encuentra en carreteras, o en espacios públicos en donde no hay forma de alimentar el sistema mediante energía eléctrica convencional.

La ventaja de usar los SCs son: tiempo de vida útil superior a los 15 años (llegando incluso a igualar el tiempo de vida de los paneles solares), amplio número de ciclos de carga/descarga (cientos de miles), rango de temperatura de operación amplio, permiten que los sistemas basados en ellos estén libres de mantenimiento y no se necesiten sistemas independientes para el acondicionamiento de la temperatura, que a largo plazo generan costos adicionales como en el caso de las baterías. Además, permiten obtener un sistema más compacto, eficiente y amigable con el ambiente.

## 1.5. Hipótesis

Debido a las características operacionales de los supercapacitores se puede diseñar un sistema de iluminación basado en LEDs de potencia con almacenamiento de larga duración, sustituyendo el uso de baterías por supercapacitores.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo General

Modelado, análisis, diseño, simulación y control de un sistema de iluminación basado en LEDs de potencia con respaldo de energía en SCs, cargado a través de un panel solar.

### 1.6.2. Objetivos Particulares

- ⇒ Desarrollar una investigación detallada de los SCs.
- ⇒ Caracterización, análisis y modelado de un banco de SCs.
- ⇒ Desarrollo de un sistema de control para el circuito de carga del banco de SCs.
- ⇒ Desarrollo de un sistema de control para el circuito de iluminación basado en el LED de potencia.
- ⇒ Modelado y simulación del sistema de iluminación completo.

## 1.7. Metas

- ⇒ Diseñar y simular un convertidor CD-CD para la carga del banco de SCs.
- ⇒ Diseñar y simular un convertidor CD-CD para la alimentación del LED de potencia.
- ⇒ Diseñar y simular los algoritmos de un sistema de control.
- ⇒ Simular el sistema completo para verificar el desempeño en lazo cerrado del sistema en la regulación de potencia en la carga de salida.

## 1.8. Estructura del documento

Este documento está organizado en seis capítulos, los cuales están distribuidos de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describe el estado del arte sobre los dispositivos de almacenamiento de energía, así como su aplicación a sistemas de iluminación artificial. Se presenta el planteamiento del problema, así como la hipótesis, objetivo y justificación del trabajo de investigación propuesto en este documento.

El capítulo 2 proporciona una investigación detallada de los SCs. Se describe su principio de operación, sus características principales y sus ventajas sobre las baterías en el almacenamiento de energía. Además se revisan dos modelos eléctricos del SC y sus diversos campos de aplicación.

En el capítulo 3 se desarrolla la descripción de los convertidores CD-CD tipo reductor (buck) y elevador (boost). Además se incluye el principio de funcionamiento de cada uno de los convertidores para la aplicación específica del proyecto. Al final del capítulo se presentan las simulaciones correspondientes realizadas en el programa de simulación de circuitos Power Sim (PSIM).

En el capítulo 4 se obtiene el modelo promedio del sistema de iluminación basado en LEDs de potencia alimentados por SCs, los cuales son cargados a través de un panel solar. Se diseña un control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error, para posteriormente obtener sus simulaciones en el programa SIMNON para verificar su desempeño en la regulación de la potencia en la carga (LEDs de potencia).

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones del documento, así como los posibles trabajos futuros.



# Capítulo 2

## El supercapacitor o EDLC

Los dispositivos de almacenamiento de energía (DAE) constituyen una parte crítica de cualquier sistema, ya que influyen directamente en su desempeño, costo, peso y confiabilidad. Debido a esto y a los cambios tecnológicos de los últimos años, se han desarrollado nuevos DAE con mecanismos de almacenamiento diferentes, en un esfuerzo por incrementar su eficiencia, densidad de potencia y densidad de energía. Hoy en día los dispositivos más utilizados son [42]: las baterías, celdas de combustible, *flywheels* o volantes de inercia y sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción.

El rápido desarrollo tecnológico ha permitido incluir más funciones dentro de dispositivos electrónicos portátiles cada vez más pequeños. Ejemplos de éstos son los teléfonos celulares con cámara y flash, computadoras portátiles con mayores prestaciones que aquellas de escritorio, asistentes digitales portátiles, juguetes, herramientas portátiles, etc. Toda esta demanda creciente de funciones, hace necesario que los DAE proporcionen pulsos instantáneos elevados de corriente.

Por otro lado, las aplicaciones industriales, de transporte y los sistemas de generación de energía presentan requerimientos cada vez más altos de potencia y energía. Por esta razón, los ingenieros de diseño, científicos e investigadores están en la búsqueda constante de dispositivos de almacenamiento más eficientes, ligeros, compactos, seguros y con mayor densidad de potencia y energía.

Los capacitores convencionales se ocupaban con anterioridad para aplicaciones donde se requería liberar altas corrientes instantáneas en periodos de tiempo muy cortos; sin embargo, estos capacitores están limitados por la baja densidad de energía. Esta desventaja puede ser cubierta por los SCs, que son dispositivos que están surgiendo como una opción viable en este tipo de aplicaciones.

Los SCs son una tecnología relativamente nueva, que pueden utilizarse en conjunto con otros DAE; y aunque su densidad de energía aun no es comparable con el de las baterías (que actualmente es el dispositivo de almacenamiento más utilizado), los SCs superan varias de las

deficiencias de éstas, tal como se describirá en las secciones siguientes.

Un SC es un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica reversible que tiene la habilidad de almacenar y liberar energía a altas corrientes en periodos de tiempo cortos (alta potencia), posee eficiencia muy alta, ciclo de vida prolongado, un amplio rango de temperatura de operación, y un amplio número de ciclos de carga/descarga. Debido al principio de operación y construcción del SC, también se le denomina capacitor electroquímico de “doble capa” o EDLC por sus siglas en inglés. Este dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica está basado en el principio de operación de los capacitores convencionales, pero con una constitución diferente, que permite incrementar por varios órdenes de magnitud la capacidad de almacenamiento [12].

El SC tiene una densidad de potencia instantánea más alta que las baterías y una densidad de energía más alta que los capacitores dieléctricos convencionales [32]. Por esta razón, se posiciona como una mejor opción para sistemas de respaldo de energía.

## 2.1. Antecedentes Históricos

El desarrollo del SC se describe en [8], [36], [46]. El término “doble capa” fue acuñado en 1853 por el físico alemán Hermann Von Helmholtz para describir la formación de dos capas de carga en la interfaz entre dos metales diferentes. Posteriormente en 1879, definió el modelo de la doble capa ideando una interfaz metal/solución acuosa. En este modelo, la interfaz consiste de una capa de electrones en la superficie de un electrodo, y una monocapa de iones en el electrolito. Después de Helmholtz no hubo grandes avances en el desarrollo del SC, hasta 1957 cuando General Electric Company patentó el primer EDLC, conformado por electrodos porosos de carbón en un electrolito acuoso.

El primer SC para venta fue liberado en noviembre de 1966 por The Standard Oil Company of Ohio (SOHIO). Sin embargo, debido a la baja demanda, vendió la licencia a la compañía Nippon Electric Company (NEC). En 1979 NEC introdujo al mercado el primer producto de éxito comercial, bajo el nombre de “Supercapacitor”, que debido a su alta resistencia interna equivalente (ESR) fue diseñado especialmente para aplicaciones de respaldo de energía para memorias. En el mismo año Panasonic comenzó a fabricar su capacitor de doble capa bajo el nombre de “Goldcap”. Entre 1975 y 1980, la empresa Conway utilizó un principio diferente de almacenamiento llamado pseudocapacitancia, desarrollando un SC especial con electrodos de óxido de rutenio. Y en 1980 ELNA America Inc. desarrolló su dispositivo de doble capa llamado “Dynacap” usando un electrolito orgánico.

El primer capacitor de doble capa de alta potencia fue desarrollado por la empresa PRI (Pinnacle Research Institute) en 1982, incorporando electrodos de metal-óxido y fue diseñado para aplicaciones militares, tales como armas láser y sistemas de orientación de misiles.

Las principales compañías dedicadas a la fabricación de SCs en la actualidad se muestran



Tabla 2.1: Principales fabricantes de supercapacitores

Compañía	Nombre del dispositivo	País	Capacitancia
AVX	Bestcap	USA	0.022-0.56
Cap XX	Super Capacitor	Australia	0.09-2.80
Copper	Power stor	USA	0.47-50
ELNA	Dyna Cap	USA	0.033-100
ESMA	Capacitor modules	Rusia	100-8000
EPCOS	Ultra-capacitor	USA	5-5000
EVANS	Capattery	USA	0.01-1.5
Kold Ban	Kapower	USA	1000
Maxwell	Boostcap	USA	1.6-2600
NEC	Super capacitor	Japón	0.01-6.5
Nesscap	EDLC	Korea del Sur	10-5000
Panasonic	Gold capacitor	Japón	0.1-2000

en la tabla 2.1, donde se aprecian también los rangos de capacitancia alcanzados por sus dispositivos. Algunos fabricantes como Maxwell, NessCap y Epcos ofrecen además paquetes de SCs en serie con circuitos de balanceo de voltaje incluidos, para aplicaciones con altos requerimientos de voltaje.

Como se puede observar, cada fabricante le ha dado un nombre diferente a sus dispositivos. Los nombres comúnmente utilizados para el SC son: capacitor electroquímico de doble capa (EDLC), supercapacitor (término más común en Europa) y ultracapacitor, que es el término más utilizado en EUA. A lo largo del documento se utilizarán de forma indistinta los términos supercapacitor, SC o EDLC.

## 2.2. Construcción y principio de operación

Un capacitor convencional [4], [40] está formado por dos placas de metal (electrodos) separadas por un material dieléctrico aislante. El proceso de almacenamiento de energía se lleva a cabo por el desplazamiento de portadores de carga (típicamente electrones), de una placa de metal a otra. Cuando un voltaje es aplicado a un capacitor, las cargas opuestas se acumulan en la superficie de cada electrodo, manteniéndose separadas por el dieléctrico, de esta forma se produce un campo eléctrico que permite al capacitor almacenar energía.

El valor de la capacitancia estará determinada por el área de las placas multiplicada por la constante dieléctrica del material ( $\epsilon$ ) y dividida por la distancia entre las placas, tal como

se muestra en la formula siguiente:

$$C = \varepsilon * A/d$$

Bajo este principio se observa que para incrementar la capacitancia es necesario aumentar el área de las placas, reducir la distancia entre las placas y/o incrementar la constante dieléctrica utilizando un material diferente.

La innovación en el diseño de los SCs es utilizar un material poroso de carbón para la construcción de los electrodos y sustituir el dieléctrico por un electrolito molecularmente delgado para minimizar la distancia entre los electrodos. Este proceso permite maximizar en gran medida el área de superficie, ya que el carbón activado se comporta como una esponja y permite que los iones en la solución electrolítica puedan adherirse a más área de superficie. Lo anterior da como resultado un dispositivo que supera en varios órdenes de magnitud la capacidad de almacenamiento de los capacitores convencionales, y que además, posee una resistencia interna muy baja (ESR) que permite liberar grandes pulsos de corriente con mínima pérdida en el voltaje de salida.

El SC es construido con dos placas metálicas delgadas denominadas acumuladores de corriente, las cuales son recubiertas con el material del electrodo que normalmente es carbón activado (un material altamente poroso). Una vez formados los electrodos se sumergen en una solución electrolítica altamente conductiva que fluye dentro y alrededor de éstos. Ya que los electrodos son apilados juntos dentro del electrolito se utiliza una membrana aislante (separador) para evitar el contacto entre ellos. Esta membrana aunque es un aislante eléctrico, permite el flujo de los iones del electrólito [2], [54], [9], [32], [17], [20], [25]. La figura 2.1 muestra la constitución típica de un SC.

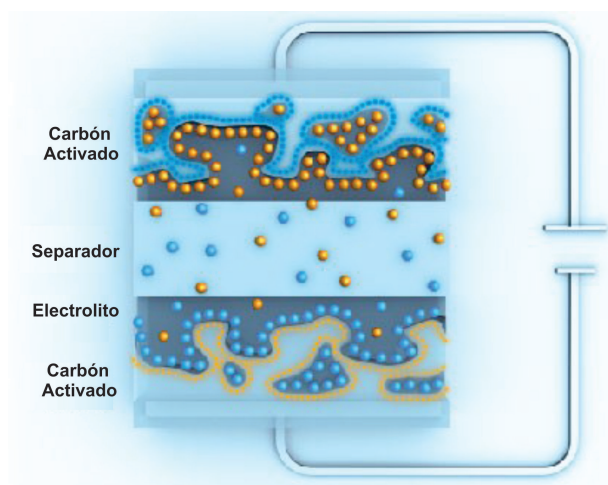


Figura 2.1: Constitución típica de un SC.

La distancia de separación entre las cargas (que en un capacitor convencional es el espesor

del dieléctrico), en un SC es la distancia entre la superficie del electrodo y los iones concentrados al lado de éste. Esta distancia está determinada por el tamaño de los iones y normalmente es del orden de 2 a 5 nm. Como se puede ver, es mucho menor a la que puede ser alcanzada usando materiales dieléctricos convencionales. Razón por la cual los supercapacitores pueden alcanzar densidades de energía mucho más altas.

### 2.2.1. Principio de operación

El principio de operación de los SCs se basa en las propiedades capacitivas obtenidas en la interfaz entre un conductor eléctrico (el electrodo) y un conductor iónico (el electrolito). Cuando se aplica una diferencia de potencial al supercapacitor, los electrones se acumulan en el electrodo conectado a la terminal negativa y atraen iones positivos del electrolito en un intento por balancear la carga. En el otro electrodo se acumulan cargas positivas que a su vez atraen iones negativos del electrolito, mientras la corriente fluye a través de la carga externa. Esta estructura crea dos capacitores como se muestra en la figura 2.2, ya que una fracción de los aniones y cationes están localizados adyacentes a los electrodos. Éste es el efecto conocido como “doble capa” por el cual a los SC se les denomina capacitores electroquímicos de doble capa o EDLC.

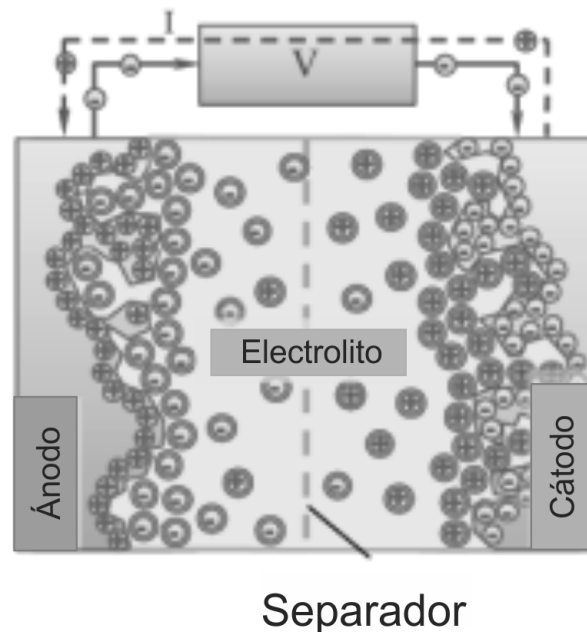


Figura 2.2: Acumulación de carga en el SC.

Debido a la doble capa el dispositivo resultante es una conexión en serie de dos capacitores, como se muestra en la figura 2.3. Los dos capacitores están conectados por la resistencia del electrolito. Esta resistencia es mucho más baja que la resistencia interna de una batería típica,

debido a lo cual los SCs pueden alcanzar densidades de potencia mucho más altas que las baterías.

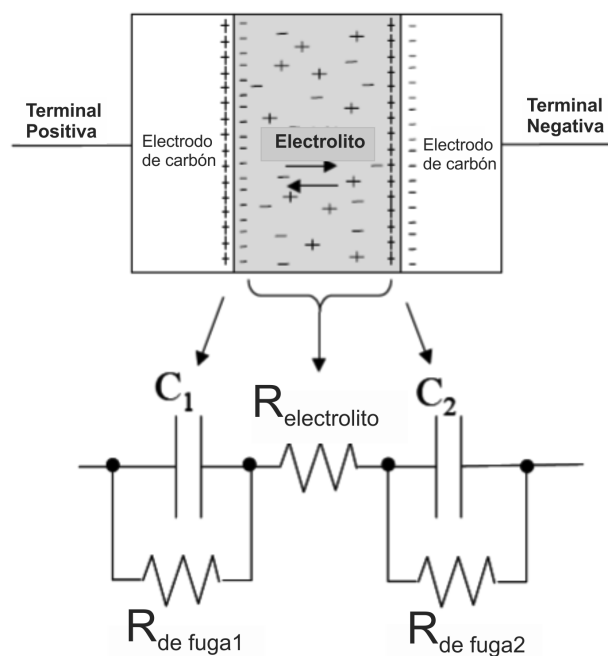


Figura 2.3: Circuito equivalente de un supercapacitor

La energía almacenada en un supercapacitor esta definida por la ecuación [38]:

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

donde  $C$  es la capacitancia den Faradios y  $V$  es el voltaje en volts.

### 2.2.2. Materiales de construcción

El SC está compuesto de tres elementos principales: dos electrodos, el electrolito y el separador. La elección de los materiales para cada uno de estos elementos determina las características operacionales del supercapacitor y todos estan íntimamente relacionados entre sí [26], [36].

Los materiales se escogen de tal forma que son compatibles con el electrolito y además son electroquímicamente inertes a los voltajes aplicados.

#### 2.2.2.1. Electrodos y colectores de corriente

Las propiedades capacitivas y la densidad de energía del SC están determinadas por la selección del material del electrodo. Ya que el almacenamiento en la doble capa es un proceso

de acumulación de carga en la superficie, la distribución y tamaño de los poros en los electrodos son determinantes para obtener una capacitancia más grande. Si el diámetro de los poros es demasiado pequeño no permitirá el acceso de los iones y éstos no contribuirán a la capacitancia de la doble capa. Por lo tanto, el material de ambos debe seleccionarse para ser compatible.

Los materiales utilizados para los electrodos son:

- ⇒ **Carbón activado:** Desde que comenzó el desarrollo del SC, este material ha sido utilizado. Hoy en día, es una opción atractiva debido a la combinación única de propiedades químicas y físicas: alta conductividad, gran área superficial, buena resistencia a la corrosión, estabilidad a altas temperaturas, estructura de poros controlada, procesabilidad y compatibilidad en materiales compuestos. Además, es de bajo costo y existe una amplia investigación debido a su uso a través de los años.

Al utilizar carbón activado se incrementa el área de superficie del SC en varios órdenes de magnitud con respecto a los capacitores convencionales, lo cual resulta en un incremento significativo de la capacitancia y la densidad de energía.

Los electrodos de carbón pueden tomar varias formas: polvo, fibras, espumas, tejidos compuestos y aerogeles. Actualmente, se están realizando investigaciones que han sugerido utilizar nanotubos de carbón y grafeno para incrementar la densidad de energía, aprovechando su distribución más uniforme y dimensiones, sin embargo, aun están en proceso de pruebas.

- ⇒ **Óxidos de metal:** Los óxidos de metal presentan una alternativa atractiva ya que se pueden lograr altas capacitancias y además es un material que posee baja resistencia, sin embargo, su costo es elevado, por lo cual son utilizados solo en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial.

Los tipos de óxidos utilizados hoy en día son: óxido de rutenio, óxido de níquel, óxido de cobalto y óxido de manganeso.

- ⇒ **Polímeros conductores:** Con este material de igual forma se pueden lograr altas capacitancias, sin embargo, tienen la desventaja de sufrir dilatación y contracción, que puede derivar en degradación de los electrodos durante el ciclado.

Normalmente los colectores de corriente y el casco son de aluminio.

#### 2.2.2.2. Electrolito

Varias características operacionales dependen del tipo de electrolito:

- ⇒ **Voltaje máximo de operación:** Este voltaje está limitado por el voltaje de ruptura (voltaje máximo que puede soportar el electrolito sin que se produzcan daños) del electrolito.

- ⇒ **Densidad de energía:** La densidad de energía depende del voltaje máximo de operación.
- ⇒ **Densidad de potencia:** La densidad de potencia depende de la ESR, que a su vez depende de la conductividad del electrolito.

Se utilizan dos tipos de electrolito en los SCs: orgánico y acuoso.

El electrolito orgánico es el más empleado en los dispositivos comerciales, debido a que ofrece un voltaje más alto de operación: de 2 V a 3 V. Sin embargo, su resistividad es más alta que la de los electrolitos acuosos. Ejemplos de soluciones electrólíticas de este tipo son: acetonitrilo y carbonato de propileno.

El electrolito acuoso ofrece un voltaje de ruptura más bajo, típicamente de 1 volt, a cambio de una mejor conductividad. Los electrolitos de este tipo son: hidróxido de potasio y ácido sulfúrico.

Al utilizar los supercapacitores se debe tener cuidado de no exceder el voltaje de las celdas por un periodo prolongado de tiempo, ya que esto puede provocar la electrólisis del electrolito y por lo tanto el desprendimiento de gas.

La cantidad de energía almacenada es una función de la superficie del electrodo, el tamaño de los iones y el nivel de voltaje de descomposición del electrolito. En los electrodos, los colectores de corriente con alta conductividad aseguran la interfaz entre los electrodos y las conexiones del supercapacitor.

### 2.2.2.3. Separador

El separador previene el contacto eléctrico entre los dos electrodos, pero es permeable permitiendo que la transferencia de carga iónica tome lugar. De acuerdo al tipo de electrolito usado se selecciona el material para el separador. Para electrolitos orgánicos, se utilizan polímeros o papel. Y para electrolitos acuosos, se utilizan separadores de cerámica o fibra de vidrio. Para un mejor desempeño del EDLC el separador debe tener alta resistencia eléctrica, alta conductancia iónica y un mínimo espesor.

En [36], [41], [45], se puede encontrar mayor información sobre los materiales utilizados en los SC.

### 2.2.3. Empaquetado

La mayoría de fabricantes han adoptado un método de empaquetado cilíndrico [41], como se muestra en la figura 2.4. Por este método los electrodos se forman de partículas de carbón activado y son depositados en láminas de aluminio, las cuales se colocan en una configuración muy similar a las de un capacitor electrolítico convencional. Los electrodos tienen extensiones que son soldadas a las terminales para habilitar el paso de corriente al exterior.

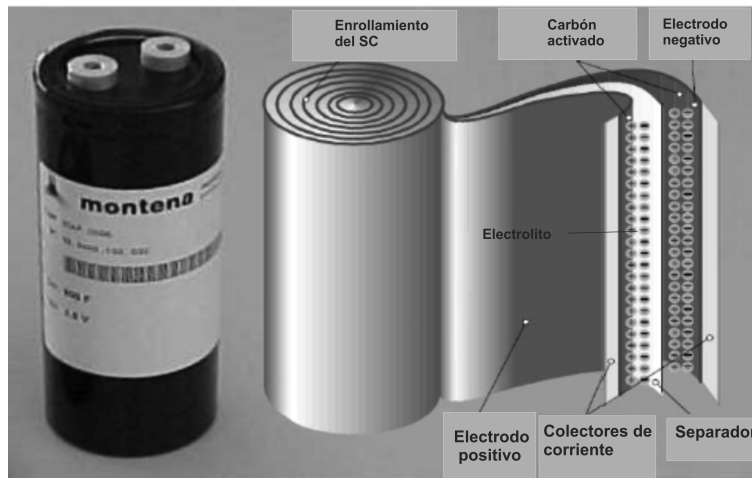


Figura 2.4: Empaquetado cilíndrico de un supercapacitor.

#### 2.2.4. Clasificación

De acuerdo a [21] los SCs pueden ser clasificados en tres tipos, basándose en su mecanismo de almacenamiento:

- ⇒ **Capacitor electroquímico de doble capa (EDLC):** Está compuesto de dos electrodos de carbón activado sumergidos en un electrolito. El proceso de acumulación de carga es electrostático (no-farádico) en cada lado de la interfaz electrodo/electrolito formándose una doble capa eléctrica. En este proceso no hay transferencia de carga a través de la interfaz.
- ⇒ **Pseudo-capacitor o supercapacitor redox:** La capacitancia exhibida por este dispositivo es llamada pseudocapacitancia. Los pseudocapacitores son cargados farádicamente a través de la transferencia de carga entre el electrodo y el electrolito, por medio de electroabsorción, reacciones de reducción y oxidación y procesos de intercalación. Estos procesos permiten a los pseudocapacitores alcanzar capacitancias más grandes y densidades de energía mayores. Los electrodos están formados de: polímeros conductores y óxidos de metal.
- ⇒ **Sistemas híbridos:** Los sistemas híbridos utilizan los procesos farádicos y no-farádicos con el objetivo de aprovechar las ventajas de ambos.

Existen otras clasificaciones que se pueden consultar en [26], [38], [46].

El sistema desarrollado en esta tesis utiliza los parámetros de un SC modelo BCAP3000 P270 K05 de la marca Maxwell. Este dispositivo pertenece a la serie K2 de los ultracapacitores

de Maxwell y es un SC de tipo EDLC. Por lo tanto, las secciones siguientes están enfocadas en este tipo de dispositivos.

### 2.3. Características operacionales de los EDLCs

Aunque la elección de un DAE para una aplicación específica está basada principalmente en su densidad de potencia, densidad de energía y voltaje de operación; existen otras características operacionales que también son de suma importancia, ya que influyen directamente en la eficiencia y costo de las aplicaciones. En esta sección se describen las características que posicionan al SC como una mejor opción como medio de almacenamiento, sobre los dispositivos actuales y principalmente sobre las baterías.

La información que se presenta a continuación es un compendio extraído de: [1], [3], [22], [23].

**Eficiencia muy alta:** La eficiencia de carga o eficiencia de Coulomb es la relación entre la energía extraída de un DAE durante la descarga en comparación con la energía utilizada durante la carga para restaurar la capacidad original. Mientras que las baterías poseen una eficiencia del 70 % al 85 %, los SCs poseen una eficiencia del 98 % bajo condiciones normales y para casos de corrientes pulsadas altas es de 90 %. Además, se debe tomar en cuenta que la eficiencia de las baterías se reduce de acuerdo a la temperatura de operación, envejecimiento, y estado de descarga.

**Alta capacidad de corriente:** Los SC poseen una ESR muy baja (en el orden de miliohms), por lo cual son capaces de liberar y absorber corrientes altas.

**Alta densidad de potencia:** Cuando se utilizan baterías electroquímicas como medio de almacenamiento, es frecuente que sea necesario sobredimensionarlas para cubrir los picos de corriente de carga, que son usualmente mucho más grandes que las corrientes promedio de carga, esto incrementa el costo del sistema. La densidad de potencia de las baterías está en el rango de 20-200W/Kg, en cambio los SCs alcanzan densidades de 1-10KW/Kg.

**Alta velocidad de carga/descarga:** Esta es una característica que depende del punto anterior, los SCs pueden ser cargados o descargados a la misma velocidad, en rangos de tiempo que van desde los 0.3 a los 30 segundos. A diferencia de la baterías que necesitan varias horas para ser cargadas.

La constante de tiempo típica de los EDLCs es de aproximadamente 1 s. Una constante de tiempo refleja el tiempo necesario para alcanzar el 63.2 % de la carga completa o descargar al 36.8 % de la carga total.



A una velocidad de descarga rápida, la alta resistencia interna de las baterías conduce a una significativa disipación de potencia reduciendo la densidad de energía efectiva. Otro factor que limita la velocidad de descarga son las reacciones químicas en la batería.

**Rango de voltaje amplio:** El SC puede ser cargado o descargado a cualquier voltaje entre 0 V y su voltaje nominal. En cambio las baterías no permiten descargas profundas, que van más allá del 80 % de su capacidad, ya que esto puede dañarlas seriamente y reducir su capacidad de carga.

La descarga total del SC facilita el mantenimiento del sistema en el cual está instalado, sin riesgos de choque eléctrico. Además, cuando se desea almacenar un SC, éste debe ser totalmente descargado para que no afecte a su tiempo de vida útil. Si un SC queda inactivo por demasiado tiempo no sufre daños, en cambio las baterías sufren daños en su química interna que las vuelve inservibles.

**Rango amplio de temperatura:** Debido a que en un EDLC no se producen reacciones químicas, éste puede operar sobre un rango amplio de temperatura, que va desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $65^{\circ}\text{C}$ . También permite en casos extremos mantenerse cargado a una temperatura de  $85^{\circ}\text{C}$ . En contraste la temperatura óptima de funcionamiento de la batería es de  $20$  a  $25^{\circ}\text{C}$ , ya que a mayores temperaturas se reduce su vida útil o es necesario instalar un sistema de acondicionamiento de temperatura.

**Monitoreo de estado:** Este término se refiere al monitoreo del estado de carga y el estado de salud del dispositivo. En un SC la energía almacenada está en función de la capacitancia y voltaje, y ya que la capacitancia es constante, una simple medición de voltaje a circuito abierto define el estado de carga.

El estado de salud se puede determinar por medio del cálculo de la capacitancia y la ESR mediante una medición de descarga a corriente constante. En cambio, para determinar estos parámetros en las baterías se requieren métodos sofisticados de adquisición de datos, algoritmos complejos e integración de datos de larga duración.

**Número elevado de ciclos de carga/descarga:** Dado que el mecanismo de almacenamiento de los SCs es altamente reversible y no involucra reacciones químicas, este es capaz de realizar cientos o miles de ciclos completos con mínimos cambios en su desempeño. Se han registrado pruebas en las cuales los SCs soportan más de 500,000 ciclos de carga/descarga sin sufrir daños o decrementos en su funcionalidad [21].

Además, pueden ser microciclados (menos del 5 % de su energía total) o completamente ciclados (más del 80 % de su energía total) sin cambios. Pueden ser frecuentemente ciclados como en los vehículos eléctricos o cargados y descargados unas pocas ocasiones como en los UPS.

Esto es un claro contraste con las baterías que solo poseen de 1000 a 3000 ciclos de carga/descarga y no permiten descargas profundas.

**Vida operativa prolongada:** El mecanismo de almacenamiento de un supercapacitor es bastante estable, por lo cual soporta una operación continua de muchos años con mínimo cambio en su desempeño. El tiempo de vida útil de los EDLCs se encuentra en el rango de los 15 a 20 años. Esto representa una enorme ventaja en comparación con las baterías que necesitan ser reemplazadas cada 3 ó 7 años, lo que reduce costos por mantenimiento de cualquier sistema.

**Amigables con el medio ambiente:** Los EDLCs están libres de materiales pesados contaminantes.

**Muy baja ESR** Esta característica permite liberar corrientes altas con mínima caída en el voltaje de salida. Usualmente la ESR consiste de la resistencia del electrodo y la resistencia del electrolito.

**Extensión de vida para otros dispositivos:** Formando sistemas híbridos de SC con otros dispositivos se liberan a estos de corrientes excesivas o transitorios, prolongando por lo tanto su vida útil.

**Integración sencilla:** Los SC pueden ser conectados fácilmente en serie o paralelo. Cuando se conectan en paralelo, no requieren dispositivos adicionales. Y cuando se conectan en serie, solo requieren circuitos de balanceo de voltaje.

### Libres de mantenimiento

**Sin polaridad:** A diferencia de las baterías el ánodo y el cátodo en un EDLC están compuestos del mismo material, así que teóricamente no tienen verdadera polaridad.

Para su fabricación y propósitos de consistencia, las terminales de un SC están marcadas con polaridad. Y es recomendable mantener la polaridad, pero si por alguna razón ésta se cambia, no ocurrirá ninguna falla catastrófica. Sin embargo, si el SC ha sido condicionado para cargarse en una cierta dirección y se cambia, la vida puede ser reducida debido a esto.

Las baterías son sensibles a la inversión de polaridad.

**Libre instalación:** Algunos tipos de baterías se deben colocar en una posición determinada para evitar riesgo de derrame. En cambio este problema no tiene importancia con los SC.

**Volumen y peso reducido:** Los SC son más livianos que las baterías, y se producen en varias dimensiones dependiendo de la aplicación. Es posible encontrar SC con dimensiones

de 8 mm x 11 mm x 0.9 mm y peso de 0.08 gramos, hasta dispositivos con capacitancias de hasta 8000F y dimensiones cercanas a una lata de refresco.

**Baja autodescarga:** Los supercapacitores tienen corrientes de fuga muy pequeñas.

**Altas capacitancias:** En comparación con los capacitores convencionales cuyas capacitancias están en el rango de microfaradios, los SCs pueden alcanzar capacitancias de hasta 5000F o más. Hay dispositivos que pueden alcanzar hasta 8000F.

Las desventajas de los supercapacitores son:

**Densidad de energía baja** La densidad de energía es la cantidad de energía almacenada por unidad de masa. La densidad de energía de los SCs comerciales se encuentra en el rango de 1 a 10 Wh/Kg. En cambio, para las baterías está en el rango 20 a 100 Wh/Kg.

**Voltajes de operación bajo:** Comercialmente existen dispositivos con voltaje nominal de hasta 3.3 V, sin embargo, este es un voltaje muy reducido para la mayoría de aplicaciones. Una forma de superar esta desventaja es realizar conexiones en serie de las celdas para obtener un voltaje mayor.

**Costo elevado** Aunque los SC son de costo elevado, estos no requieren mantenimiento y su vida útil es mayor que el de las baterías, por lo tanto, a largo plazo la diferencia en costo se reduce.

## 2.4. Modelo Eléctrico del EDLC

El primer modelo que describe el almacenamiento de carga en la doble capa fue desarrollado por Hermann Von Helmholtz en 1879, posteriormente otros científicos contribuyeron a mejorar el modelo para lograr una mayor exactitud. Los modelos subsecuentes son [36]: el modelo Gouy-Chapman (1900's), el modelo Stern (1924) y el modelo Grahame (1947).

En años recientes se han realizado diversos trabajos sobre el modelado del EDLC [12], [46], [47], [54], [60], debido principalmente a la rápida extensión de su uso en aplicaciones de corta duración. Sin embargo, ya que el SC es una tecnología relativamente nueva, aun no existe un modelo estandarizado.

Los modelos desarrollados hasta ahora se pueden agrupar en tres grupos básicos: modelo matemático, modelo de circuito eléctrico y modelo de circuito no-eléctrico. Cada enfoque tiene sus propias ventajas y desventajas. Los modelos matemáticos y los de circuito no-eléctrico requieren cálculos complicados, identificación de varios parámetros experimentalmente y no tienen un significado físico explícito; por lo cual, no pueden ser fácilmente incorporados dentro

de un diagrama de circuito. Por otro lado, los modelos de circuito eléctrico son más utilizados y de mayor interés para el desarrollo de sistemas eléctricos y electrónicos.

Los tres modelos de circuito eléctrico más referenciados en la literatura son:

**Modelo RC:** Es el modelo más usado. Su ventaja radica en su simplicidad, que permite fácilmente incorporarlo dentro de un circuito y el proceso de simulación es computacionalmente sencillo.

Como se puede apreciar en la figura 2.5, el modelo está conformado por 4 elementos ideales [59]: un resistor ESR, un inductor L, un capacitor C y un resistor en paralelo EPR. El resistor ESR modela las pérdidas de energía durante la carga y descarga del SC, mientras que EPR modela las pérdidas de energía por la autodescarga y frecuentemente es referida como la resistencia de corriente de fuga. El inductor L resulta principalmente de la construcción física del capacitor y es usualmente muy pequeño, por lo cual es frecuentemente despreciado, pero se debe considerar en aplicaciones de alta frecuencia.

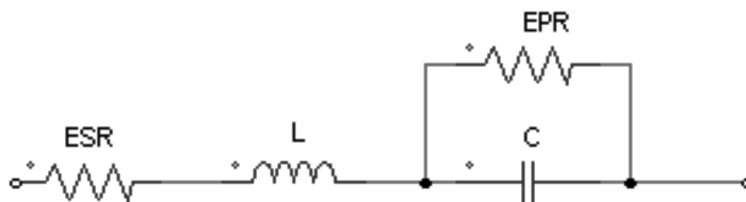


Figura 2.5: Modelo del supercapacitor

Los parámetros del modelo RC se pueden obtener de manera práctica mediante el método de Spyker [46], el cual consiste en cargar el capacitor a su voltaje nominal, dejar pasar un periodo de tiempo y después medir el voltaje de las terminales para obtener la caída de voltaje. Con estos datos se utiliza la siguiente fórmula para obtener el valor de EPR:

$$EPR = -\frac{t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)C}$$

En esta ecuación  $t$  es el tiempo,  $V_1$  el voltaje inicial,  $V_2$  el voltaje final y  $C$  la capacitancia nominal.

Para el cálculo de ESR se ignora EPR y se considera que el circuito solo está formado por ESR y el capacitor. Así ESR se puede calcular mediante la ecuación:

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

**Modelo de las tres ramas** En [60] los autores desarrollan un modelo formado por 3 ramas RC. Este modelo que se muestra en la figura 2.6 refleja la distribución de carga interna.

Cada rama RC tiene una constante de tiempo diferente. La rama que contiene a  $R_i$  denota la rama inmediata, que domina el comportamiento en el orden de unos pocos segundos. La segunda rama (rama intermedia) influye el comportamiento en minutos. Y por último la tercera o rama de larga duración gobierna la respuesta a largo plazo del circuito después de más de 10 minutos.

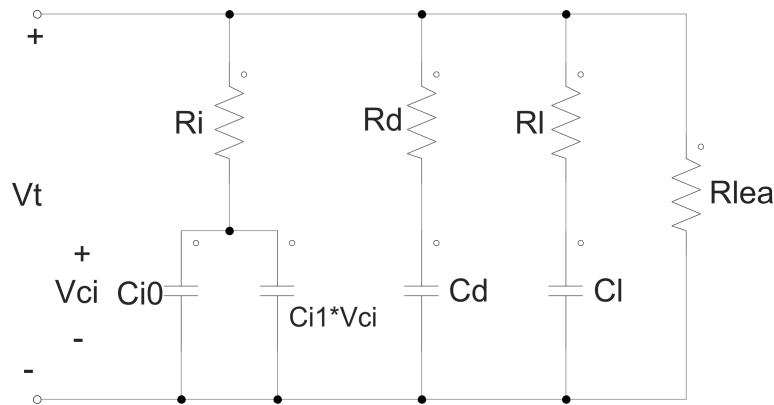


Figura 2.6: Modelo de las tres ramas RC

**Modelo de la línea de transmisión RC** Este modelo simula la estructura física del EDLC y las características electromagnéticas. El número de ramas RC, afectará la precisión del modelo. En la figura 2.7 solo se muestran 3 ramas.

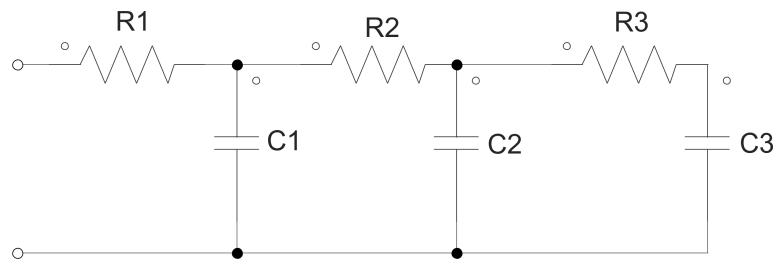


Figura 2.7: Modelo de la línea de transmisión

## 2.5. Curva característica del EDLC

Para comprender el comportamiento del voltaje en las terminales del SC, en la figura 2.8 se muestra la curva característica del supercapacitor en un ciclo completo de carga/descarga. En la gráfica se observa que el voltaje aumenta desde 0 V hasta alcanzar el voltaje nominal del SC durante la carga en un tiempo  $t_1$ , posteriormente se mantiene cargado el SC para observar los efectos de la autodescarga hasta un tiempo  $t_2$ , observándose una ligera disminución en el voltaje. Del tiempo  $t_2$  a  $t_3$  se descarga el SC a la misma velocidad de carga. Una vez que el

SC esta completamente descargado se puede observar una redistribución de carga del tiempo  $t_3$  a  $t_4$ .

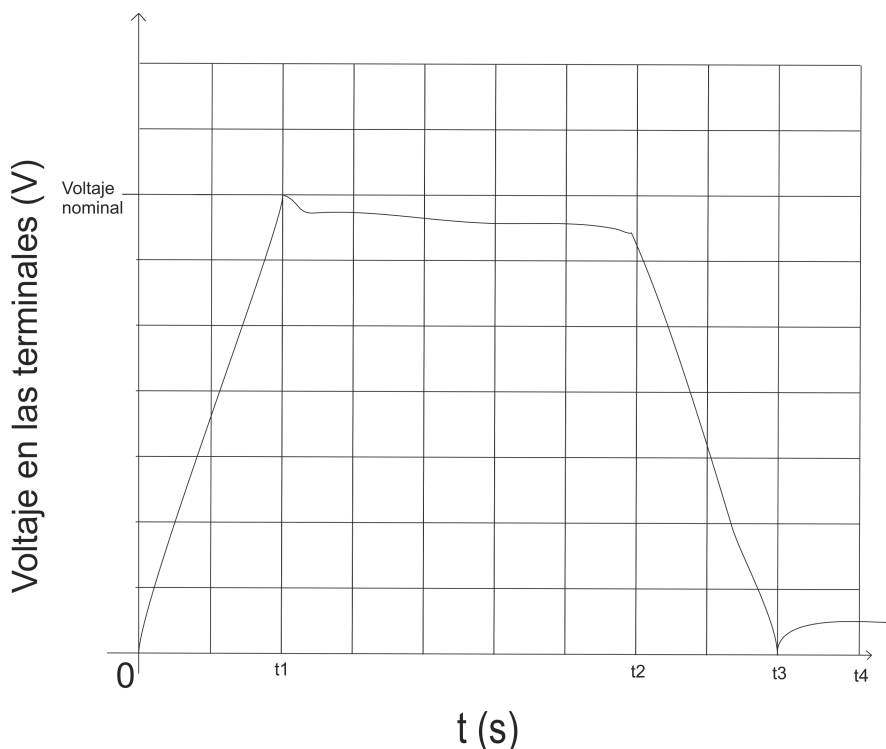


Figura 2.8: Voltaje en las terminales del EDLC

## 2.6. Carga del EDLC

Los SCs pueden ser cargados con fuentes de CD, mientras que el voltaje de alimentación sea menor o igual que el voltaje nominal. Sin embargo, se debe considerar que cuando se conecta un SC totalmente descargado a una fuente, la fuente observará un cortocircuito, y con la finalidad de protegerse, no entregará corriente al SC. La mayoría de las fuentes de bajo costo presentan este problema, por lo cual se debe hacer uso de un convertidor CD-CD o una fuente de corriente constante.

Un convertidor a corriente constante CD-CD es la forma más simple de cargado. Ya sea utilizando una topología reductor o elevador, lo cual depende de la aplicación. La selección debe estar basada en la eficiencia, costo y tiempo de carga. Y se debe considerar además que el voltaje de operación afecta el tiempo de vida útil del SC. Una recomendación muy común en las hojas de datos es fijar el voltaje de operación a 0.1 V por debajo del voltaje nominal, con el fin de doblar el tiempo de vida del SC.

Los métodos de carga utilizados para los SC se dividen en dos tipos [17], [30], [41], [52],

[53]: carga a corriente constante y carga a potencia constante.

Cuando la carga de los SCs se efectúa a corriente constante, su voltaje incrementa de manera lineal, entonces el tiempo de carga dependerá del nivel de la corriente con la que se produzca la carga, teniendo estos dos parámetros una relación inversamente proporcional. La manera más sencilla para realizar este tipo de carga es por medio de un simple convertidor de corriente constante CD-CD. Sin embargo, se debe tener en cuenta para el diseño de este dispositivo que la máxima corriente no exceda el límite mencionado en la hoja de datos.

La carga a potencia constante es más rápida que la carga a corriente constante, por lo cual este método se emplea sobretodo en aplicaciones en la que es sumamente importante que el tiempo de carga sea muy corto. A pesar de que es más rápida la carga a potencia constante, la carga a corriente constante resulta ser más eficiente [30]. En este método si la potencia es constante, el voltaje en el supercapacitor varía por la carga al igual que la corriente. La carga a potencia constante es muy útil en sistemas de frenado, donde la potencia constante es extraída desde el impulso del vehículo y transferida al SC.

Basándose en la eficiencia, simplicidad y costo del método de carga a corriente constante, en el diseño del sistema de iluminación descrito en este documento se optó por un convertidor reductor CD-CD como sistema de carga para el arreglo en serie de supercapacitores. Este arreglo en serie de SCs se denominará en lo sucesivo como banco de supercapacitores y su análisis, dimensionamiento, conexión y diseño se describen en la sección siguiente. El análisis y diseño del sistema de carga se detalla en el capítulo 3.

## 2.7. Banco de Supercapacitores

El voltaje nominal de las celdas de SCs está limitado por el voltaje de descomposición del electrolito, por lo cual el máximo voltaje que pueden alcanzar actualmente es de 3.3V. Ésto puede significar una desventaja, ya que la mayoría de las aplicaciones requieren voltajes más elevados. La solución a este problema es formar arreglos de celdas de supercapacitores en serie o paralelo con el fin de cumplir con los requerimientos de una aplicación dada. A este arreglo se le suele denominar banco de supercapacitores.

### 2.7.1. Conexión de supercapacitores

#### 2.7.1.1. Conexión en serie

Cuando en una aplicación se requiere un voltaje más elevado que el voltaje nominal de un SC para alimentar una carga, se debe realizar una conexión de los supercapacitores en serie, conectando la terminal negativa de un supercapacitor con la terminal positiva del siguiente, tal y como se muestra en la figura 2.9.

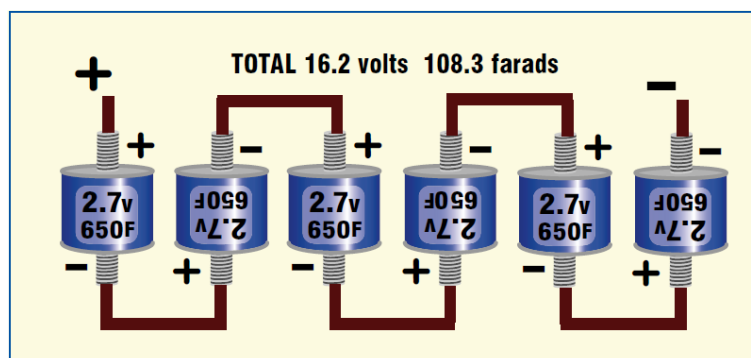


Figura 2.9: Conexión en serie de SCs [29]

En esta configuración, el voltaje de salida del banco es la suma de cada una de las celdas individuales. En el ejemplo de la figura 2.9 el voltaje nominal de cada celda es 2.7 V al sumar los voltajes de las 6 celdas, se obtiene el voltaje total del banco que es 16.2 V.

El precio que se tiene que pagar por obtener un voltaje mayor es la disminución de la capacitancia total del banco. Este valor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Como se observa en la figura 2.9 el valor de la capacitancia total del banco es menor al valor de las celdas individuales.

### 2.7.1.2. Conexión en paralelo

En la conexión en paralelo la capacitancia de las celdas individuales se suma, sin embargo, el voltaje total del banco es el voltaje nominal de una celda, como se muestra en la figura 2.10.

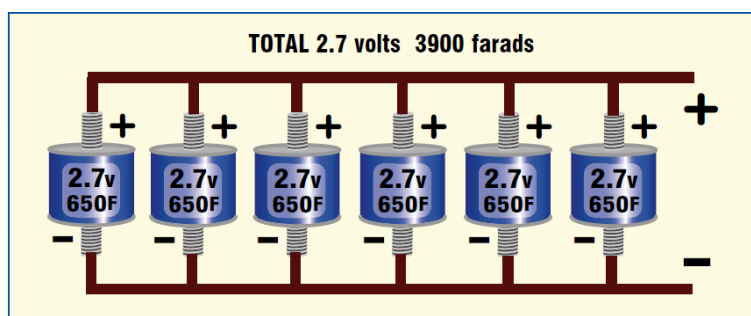


Figura 2.10: Conexión en paralelo de supercapacitores [29]

Es posible realizar conexiones paralelo-serie de supercapacitores como se muestra en la figura 2.11, en aplicaciones que requieran un voltaje elevado y una capacitancia mayor que la obtenida en un arreglo únicamente en serie.



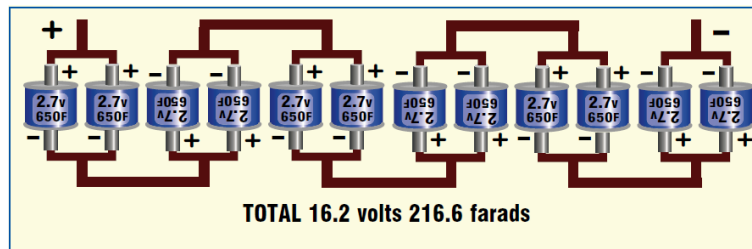


Figura 2.11: Conexión en paralelo-serie de supercapacitores [29]

### 2.7.2. Dimensionamiento del banco de SCs

El perfil de descarga de un supercapacitor (voltaje vs tiempo) que se muestra en la figura 2.12, está conformado por dos componentes: una componente capacitiva y una componente resistiva. La componente resistiva representa el cambio de voltaje debido a la resistencia en serie equivalente (ESR) del supercapacitor. La componente capacitiva representa el cambio de voltaje debido al cambio de la energía dentro del supercapacitor.

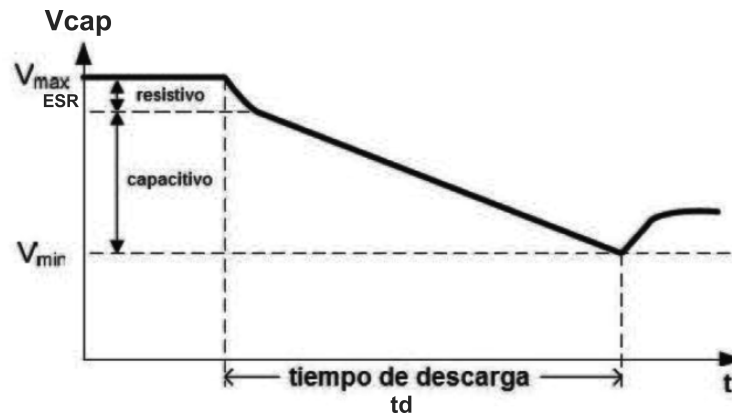


Figura 2.12: Perfil de descarga en un supercapacitor

Las variables que se indican en la figura son las siguientes:

- ⇒  $V_{\text{máx}}$ : Voltaje máximo.
- ⇒  $V_{\text{mín}}$ : Voltaje mínimo.
- ⇒ ESR: caída de voltaje debido a la resistencia interna.
- ⇒  $t_d$ : tiempo de descarga.

El comportamiento capacitivo se describe mediante la ecuación:

$$I_d = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

donde:

- ⇒  $\Delta V$  es el cambio en el voltaje durante la descarga en el supercapacitor. Se determina conociendo el voltaje máximo ( $V_{max}$ ) y el voltaje mínimo admisible del sistema ( $V_{min}$ ).  $V_{max}$  será el voltaje de operación típico al inicio de la descarga. En algunos casos este será el voltaje máximo del sistema ( $V_{max}$ ), pero en otros casos no. También, se debe ser cuidadoso al determinar el voltaje mínimo admisible del sistema que es usado, y no simplemente el voltaje más bajo al cual el sistema actualmente opera. Con frecuencia, la especificación del voltaje mínimo no está limitada por el sistema, sino por algún componente que puede ser remplazado por el ultracapacitor.  $\Delta V$  es la diferencia de  $V_{max}$  y  $V_{min}$ .
- ⇒  $I_d$  es la corriente durante la descarga del capacitor. Este cálculo asume una corriente constante durante la descarga.
- ⇒  $\Delta t$  es la duración (en segundos) del pulso de descarga.
- ⇒  $C$  es la capacitancia del sistema completo en su punto de operación. Este valor se basará en el número de capacitores individuales en serie o paralelo. Para supercapacitores en paralelo, la capacitancia es aditiva. Para supercapacitores en serie, la capacitancia es aditiva en  $1/\text{capacitancia}$ .

La caída de voltaje debido a la componente resistiva se determina mediante:

$$dV_{ESR} = I_d * ESR$$

El supercapacitor empleado para el desarrollo del proyecto es un dispositivo de la marca Maxwell con una capacitancia de 3000F serie K2, modelo BCAP3000 P270, el cual se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13: Supercapacitor BCAP3000 270

En el Apéndice A se anexa la hoja de datos con la especificación del dispositivo. Las características técnicas relevantes utilizadas para el dimensionamiento del banco de supercapacitores son las siguientes:

- ⇒ Capacitancia nominal: 3000F
- ⇒ Máxima  $ESR_{CD}$  inicial: 0.29mΩ
- ⇒ Voltaje nominal: 2.7 V
- ⇒ Máxima corriente de fuga: 5.2 mA
- ⇒ Energía almacenada: 3.04 Wh
- ⇒ Máxima corriente continua ( $\Delta T: 15^{\circ}C$ ): 130  $A_{RMS}$

Para obtener el dimensionamiento del banco de supercapacitores, se utiliza la ecuación básica de corriente promedio en el capacitor:

La aplicación está restringida por los siguiente parámetros:

- ⇒ Corriente necesaria para mantener la luminosidad del led de potencia:  $I_d=700mA$ .
- ⇒  $V_{max}$ : 14.16 V
- ⇒  $P=10W$

A continuación se muestran los cálculos realizados para el dimensionamiento del banco de supercapacitores:

Es preciso mencionar que el proyecto se encuentra limitado por recursos económicos, razón por la cual solo se pudieron adquirir 4 supercapacitores BCAP3000 270, que serán colocados en serie con el fin de aumentar el voltaje total del banco y cumplir con las exigencias de la aplicación.

Al conectar en serie los 4 supercapacitores se obtiene un voltaje de 10.4 V. Este voltaje determina el  $V_{max}$ .

El voltaje mínimo ( $V_{min}$ ) se establece como:

$$V_{\text{mín}} = \frac{V_{max}}{2}$$

$V_{min}$  se propone de esta manera debido a que cuando el voltaje del supercapacitor llega a  $\frac{V_{max}}{2}$  ya se ha liberado el 75 % de la energía. Además esta suposición es una recomendación de las hojas técnicas del fabricante. Por lo tanto  $V_{min}=5.2$  V.

Es necesario considerar también la caída de voltaje debido a la resistencia interna equivalente (ESR), por lo tanto, la caída total de voltaje se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta V = I_d * ESR + \frac{I_d * dt}{C}$$

En el proyecto se requiere cubrir un tiempo de descarga mínimo de 1 hora, equivalente a 3600 s.

Despejando  $dt$  en la ecuación anterior se busca comprobar que el arreglo de 4 supercapacitores BCAP300 270 en serie cumplen con las necesidades. Por lo tanto, primero se calcula la capacitancia total del banco:

$$C_{total} = \frac{C_{individual}}{4} = \frac{3000F}{4} = 750F$$

Despejando  $dt$  de la ecuación de  $\Delta V$ , para calcular el tiempo de descarga.

$$dt = \frac{(\Delta V - Id * ESR)C_{total}}{Id} = \frac{(5,2V - 0,7A * 0,29m\Omega)750F}{0,7} = 5,571s$$

Este tiempo convertido a horas proporciona un tiempo de: 1.54 horas, que supera el tiempo mínimo requerido.

### 2.7.2.1. Balanceo de voltaje

Los supercapacitores poseen un voltaje de operación bajo (2 V a 3.3 V). Por esta razón en la mayoría de aplicaciones es necesario realizar una conexión en serie de varios dispositivos para cubrir los requerimientos de voltaje necesarios. Si los componentes fueran ideales, en un arreglo en serie el voltaje debería dividirse igualmente entre todas las celdas; sin embargo, de forma práctica los supercapacitores apilados en serie conducen a una distribución desigual del voltaje.

Esta variación se origina a causa de que la capacitancia y la resistencia de fuga de cada celda no son exactamente las mismas, debido a las variaciones originadas desde la fabricación (5-10 %) y por otros factores, tales como: influencia de la temperatura y envejecimiento de la celda.

En un arreglo de SCs en serie si las celdas tienen una variación en capacitancia, las celdas con capacitancia más grande serán cargadas a voltajes más bajos, y las celdas con capacitancias más pequeñas serán cargadas a voltajes más altos. Esto es porque cada celda conduce la misma corriente, y el voltaje es una función de la corriente y la capacitancia, como se describió en la sección anterior.

Con respecto a la resistencia de fuga, cuando el arreglo de SCs se mantiene a un voltaje fijo, después de un periodo de tiempo, la variación de voltaje ocurre por la autodescarga desigual entre las celdas. Todos estos factores pueden conducir al sobrevoltaje de algunas de los SCs al sobrepasar su voltaje nominal.

Con el fin de evitar fallas en las celdas o disminución de su tiempo de vida, debido al sobrevoltaje, en la implementación práctica se utilizan circuitos de balanceo de voltaje que garantizan la correcta operación de cada celda.

Los circuitos de balanceo de voltaje se dividen en dos tipos: balanceo pasivo y balanceo activo.

El balanceo pasivo es más apropiado en aplicaciones con ciclo de trabajo bajo, tales como un sistema de respaldo de energía. En los sistemas de balanceo pasivo se utilizan resistores de desviación colocados en paralelo con cada celda. Los beneficios de este método de balanceo son la simplicidad y el bajo costo. Las desventajas son la respuesta lenta y las pérdidas altas.

El balanceo activo se requiere en aplicaciones de alto ciclo de trabajo y donde se requieren bajas pérdidas. Un circuito de balanceo activo se comporta no linealmente y trabaja forzando a las celdas a tener un voltaje igual. Este es el balanceo más efectivo. Los circuitos de balanceo activo pueden ser bastante simples o complejos. Sus beneficios son: rapidez, precisión de la distribución de voltaje y mínimas pérdidas. La desventaja es el costo más alto.

En [17], [10], [15] se pueden encontrar diferentes circuitos de balanceo.

## 2.8. Aplicaciones

En sus inicios los SCs se emplearon únicamente para respaldo de alimentación de memorias, debido a que poseían baja densidad de energía y potencia, y resistencia interna muy alta. Sin embargo, las investigaciones recientes han logrado mejorar sus características operacionales y ahora son una excelente opción para muchas aplicaciones.

A continuación se detallan las aplicaciones más comunes hoy en día. Esta información es una recopilación extraída de: [37], [46], [36], [32], [17], [45], [31]:

**Vehículos eléctricos:** La idea de usar SCs para aplicaciones de este tipo es muy atractiva, ya que poseen una alta eficiencia energética, alta densidad de potencia, rápida velocidad de carga y gran número de ciclos de carga/descarga. La configuración común es en sistemas híbridos de SCs con baterías, donde el SC es responsable de la demanda pico de potencia y la batería de los requerimientos constantes de energía, actuando como fuente principal. Esto ayuda a alargar el tiempo de vida de la baterías ya que minimiza el estrés por las altas demandas de potencia. Además, se utilizan a los SC para el arranque de la combustión interna y la recuperación de la energía regenerada durante el frenado.

Los usos más comunes de estos sistemas híbridos son en los vehículos eléctricos de transporte público [50], [28].

**Respaldo de energía de corta duración:** En esta aplicación se incluye a todos aquellos sistemas que requieren respaldo de alimentación en el orden de 60 segundos, ya sea para reponerse de simples fluctuaciones de la alimentación, realizar un apagado programado o transferir a una fuente secundaria.

Los SCs actúan como fuente de alimentación para periodos cortos de tiempo, y existe

una fuente de alimentación secundaria para mantenerlos cargados. Ejemplos de estos sistemas son: respaldo de memoria, apagado del sistema, o notificaciones de eventos en sistemas computacionales, sistemas de informes automáticos de interrupción de la energía, sistemas embebidos basados en microcontroladores, redes de comunicación, centros de datos y plantas de operación.

**Calidad de la energía:** En instalaciones con frecuentes fluctuaciones de voltaje, se utilizan sistemas de compensación que se encargan de inyectar o absorber potencia a la línea de distribución con el fin de compensar las fluctuaciones de voltaje. Los SCs son adecuados como dispositivos de almacenamiento de energía en estos sistemas, ya que pueden administrar o absorber dicha potencia en cortos periodos de tiempo.

**Suministro de energía para dispositivos portátiles:** En este tipo de aplicaciones existen dos usos principales para los SCs:

El primero es el respaldo de energía temporal en dispositivos electrónicos para funciones tales como: ajustes de la BIOS, ajustes de configuración de teléfono y cámara, y alimentación de emergencia de corto periodo cuando una fuente primaria es insuficiente o falla.

El segundo uso es en el abastecimiento de picos de potencia. En estas aplicaciones, los SCs son usados en conjunto con baterías para sistemas que requieren, ya sea descargas de baja potencia constantes para función continua o un pulso de potencia para cargas pico. Así los SCs ayudan a extender el tiempo de vida de las baterías y reducir su tamaño. Ejemplos de estas aplicaciones son: escáneres portátiles para lectura de códigos de barra, cámaras digitales, teléfonos celulares, computadoras portátiles, VCRs, asistentes personales digitales y otros dispositivos.

**Accionamientos de velocidad ajustable:** En aplicaciones industriales, los variadores de velocidad son comunmente usados debido a su eficiencia; sin embargo, normalmente sufren fluctuaciones de voltaje e interrupciones. Un DAE es necesario para actuar como respaldo de energía para superar estas condiciones, ya que el tiempo de inactividad de una máquina que es parte de un proceso continuo puede equivaler a pérdidas monetarias. Los SCs se han empezado a utilizar como DAE en los sistemas de variación de velocidad.

**Sistemas híbridos con baterías en generación de energía renovable:** En los sistemas fotovoltaicos y eólicos [56], la energía obtenida es de carácter intermitente, debido a la variación en la radiación solar y en la velocidad del viento. Por esta razón se requieren en ambos sistemas dispositivos de almacenamiento de energía para regular la salida de voltaje o almacenar la energía para su posterior utilización. Los sistemas de almacenamiento de energía híbridos permiten absorber las potencias altas provocadas por ráfagas de viento o disminuir la carga en las baterías en sistemas fotovoltaicos.

Otra ventaja en este tipo de sistemas es que las baterías tienen que ser remplazadas cada 3 ó 7 años debido a que el ciclado continuo tiene un efecto perjudicial en su funcionamiento. Pero los supercapacitores poseen mayor número de ciclos de carga/descarga y únicamente necesitan ser remplazados cada 20 años, el cual es el tiempo de vida de los paneles solares. Los costos, por lo tanto, son reducidos por la eliminación de los requerimientos de mantenimiento frecuente. Además, la eficiencia energética es mayor en los SCs.

**Puente de potencia:** Los supercapacitores son utilizados como fuentes de energía temporal en muchas aplicaciones donde la alimentación inmediata no está disponible. Esto incluye sistemas UPS [13], que utilizan generadores o celdas de combustible como fuente principal de alimentación. Todos estos sistemas requieren un tiempo corto de inicio para llegar a su pleno funcionamiento y puedan conmutar a la carga, por lo cual se generarán interrupciones de alimentación momentáneas. Los sistemas con SCs son utilizados para proporcionar la energía durante el tiempo de transición hasta que la fuente de potencia de respaldo primario esté disponible para tomar la carga.

**Sistemas híbridos batería/supercapacitor con corrientes pulsadas altas:** Dado que los SCs tienen una resistencia interna muy baja son capaces de liberar corrientes extremadamente altas, por lo cual se colocan en paralelo con las baterías para nivelar la carga y extender su tiempo de vida. El SC amortigua a la batería de los picos de corriente altos experimentados en la aplicación. Esta metodología es empleada para dispositivos tales como cámaras digitales y sistemas de propulsión híbridos.

**Alimentación principal:** Los SCs son perfectamente adecuados para ser usados como fuente principal de alimentación para aplicaciones que requieren moderada energía por periodos cortos de tiempo y están limitadas a recargas breves después de su uso. Tales aplicaciones incluyen juguetes, linternas de emergencia, luz ambiental, alimentación de access point, herramientas portátiles, etc.

**Ingeniería industrial:** Se han aplicado los SCs en sistemas tales como elevadores [43] y sistemas de transporte con el fin de reducir los picos de potencia en la red y para incrementar el ahorro de energía.

**Escáner:** En una aplicación típica de escáner, los SCs proporcionan las funciones de potencia pulsada necesaria para la activación de los sistemas láser que leen la información del código de barra mientras que las baterías proporcionan la baja potencia para almacenamiento de memoria y funciones básicas. Ya que las baterías no suministran la energía para las funciones pico de alimentación, se puede reducir su tamaño, haciendo al escáner más fácilmente portable.





# Capítulo 3

## Análisis y diseño del sistema de iluminación

### 3.1. Especificaciones del sistema

Para realizar el análisis y diseño de los componentes que integran el sistema de iluminación se requiere primero conocer las especificaciones de alimentación y carga. En este proyecto las especificaciones se derivan de los requerimientos de dos componentes: el LED de potencia y los paneles solares.

El LED de potencia define los requerimientos de la potencia de salida del sistema y el dimensionamiento del banco de SCs.

Los paneles solares por otro lado definen las especificaciones de entrada del sistema. Las especificaciones que debe cumplir el sistema son:

- ⇒ Tiempo de almacenamiento: 1.5 horas.
- ⇒ Regulación del voltaje de entrada: Los paneles solares proporcionan un voltaje de entrada de CD variable de 12 V a 17 V [48], dependiendo de la radiación solar; sin embargo, se requiere un voltaje constante de 10.4 V para cargar el banco de SCs.
- ⇒ Regulación del voltaje de salida: El LED de potencia requiere un voltaje de alimentación de 14 V, con una variación máxima de  $\pm 0.16$  V [33].
- ⇒ Corriente de salida: Con el fin de obtener la máxima luminosidad del LED, se requiere una corriente constante de 700mA [33].

Tomando en cuenta los requerimientos anteriores se diseña la topología mostrada en la figura 3.1 para el sistema de iluminación propuesto.

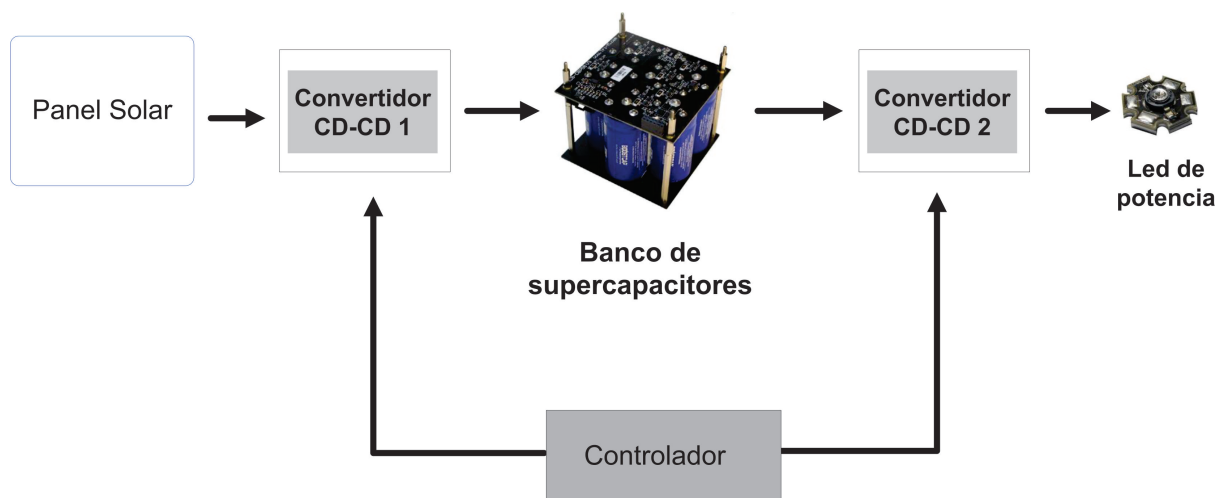


Figura 3.1: Topología del sistema

Como se observa en la figura 3.1 el sistema de iluminación propuesto requiere del diseño de dos convertidores de potencia del tipo CD-CD y un sistema de control que cumpla con las siguientes especificaciones:

**Convertidor CD-CD 1:** Como se sabe la amplitud del voltaje de CD que suministran los paneles solares es variante y se encuentra entre 12V a 17V, esto porque depende de la irradiancia solar que en ese momento se tenga en la superficie del panel. Es por ello que se utiliza un convertidor reductor para fijar un voltaje de 10.4V a su salida, este convertidor sirve como interface entre el panel solar y el banco de supercapacitores. Además, debe proporcionar una corriente constante de 4 A.

**Convertidor CD-CD 2:** La función principal del segundo convertidor CD-CD tipo elevador es proporcionar un voltaje de 14V, el cual es mayor al voltaje de alimentación recibido a través del banco de supercapacitores, además de fijar una corriente nominal de 700mA.

**Sistema de control:** La finalidad del sistema de control basado en pasividad es mantener los niveles de potencia entrada/salida pre-establecidos por las especificaciones anteriormente descritas.

En este capítulo se detalla el diseño de los dos convertidores CD-CD propuestos para el sistema de iluminación a través del LED de potencia, mientras que el análisis y diseño del control multivariable basado en pasividad se tratará a detalle en el capítulo siguiente.

### 3.1.1. Selección de las topologías para los convertidores CD-CD

Considerando los aspectos de simplicidad del sistema, reducción de costo, reducción de peso y eficiencia alta se utilizan topologías básicas para los convertidores. Las topologías básicas se caracterizan por una alta eficiencia y están compuestas de pocos elementos.

La topología adecuada para el convertidor CD-CD 1 es un convertidor tipo reductor. Para el convertidor CD-CD 2 se elige la topología elevadora de voltaje.

## 3.2. Convertidores CD-CD

Los convertidores CD-CD son dispositivos de electrónica de potencia que permiten obtener a partir de una fuente de voltaje de CD, otro valor de voltaje constante mayor o menor [11], [55].

La función de estos convertidores es de gran importancia, ya que son los encargados de generar un voltaje y/o corriente con características específicas a partir de una fuente de energía primaria, asegurando que las cargas útiles estén correctamente alimentadas de acuerdo a sus necesidades. Además poseen una alta eficiencia, ya que en condiciones ideales la potencia entregada por la fuente es igual a la potencia suministrada a la carga. Aunque se debe considerar que con elementos reales se producirán pérdidas en cada uno de los semiconductores que componen al convertidor.

Para mejorar los requerimientos de la respuesta se adiciona en la mayoría de los casos un lazo de control, el cual actúa directamente sobre el elemento conmutador modificando su tiempo de conducción, consiguiendo mayor estabilidad frente a perturbaciones.

Estos convertidores también reciben el nombre de convertidores conmutados por el uso de un interruptor controlado. Y el nivel de voltaje a la salida puede ser reducido o elevado de acuerdo a la topología que se utilice. Las tres topologías básicas son [27]:

- ⇒ Convertidor CD-CD reductor
- ⇒ Convertidor CD-CD elevador
- ⇒ Convertidor CD-CD reductor-elevador

Cada una de estas configuraciones está formada por cuatro elementos básicos: bobina (L), capacitor (C), diodo e interruptor controlado. El funcionamiento y características de cada configuración dependen de la ubicación de estos cuatro elementos. Los componentes reactivos, tales como los inductores y los condensadores funcionan como elementos de almacenamiento de energía, y como elementos de filtro para atenuar las componentes armónicas de corriente.

Los convertidores CD-CD también se pueden clasificar de acuerdo a su modo de funcionamiento, dependiendo de la continuidad o no de la corriente que circula por el inductor. De esta manera cuando la corriente sea siempre mayor que cero durante el periodo de conmutación, el convertidor trabajará en modo continuo, y en modo discontinuo si durante algún instante la corriente en el inductor es cero.

Las fuentes de alimentación que se pueden utilizar en estos convertidores son: baterías, celdas de combustible, paneles solares, generadores eólicos y la red eléctrica rectificadas. La

carga es de tensión continua citando como aplicaciones desde la alimentación de tarjetas microprocesadoras y DSPs que se encuentran en equipos informáticos y de telecomunicaciones hasta buses de alimentación en sistemas a bordo (satélites de comunicaciones, automóviles, aviones).

### 3.2.1. Convertidor CD-CD Reductor

El convertidor CD-CD tipo reductor siempre producirá un voltaje de salida  $V_o$  menor o igual al voltaje de entrada  $V_s$  [27].

La configuración de los elementos en este tipo de convertidor se muestra en la figura 3.2.

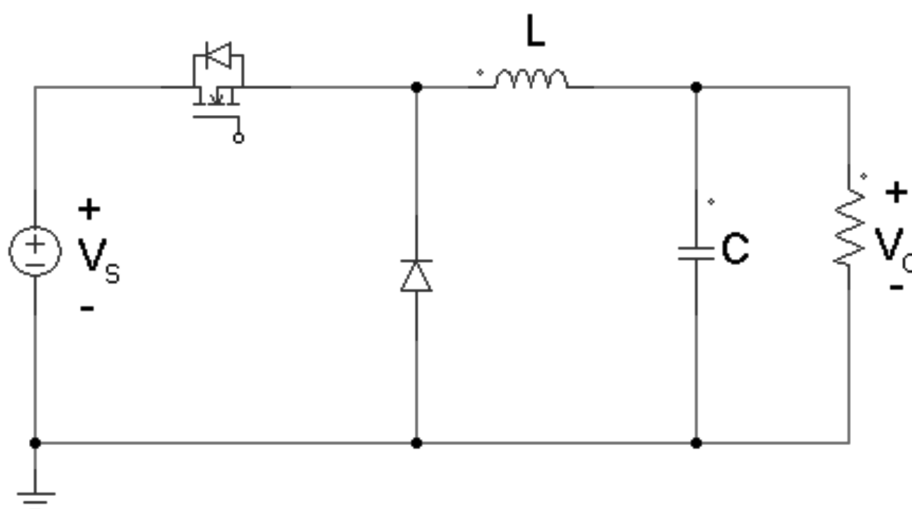


Figura 3.2: Configuración del convertidor CD-CD tipo reductor

El convertidor CD-CD tipo reductor trabaja en dos modos de conducción: modo de conducción continuo y modo de conducción discontinuo. En este proyecto se realiza el diseño de los convertidores operando en el modo de conducción continuo o régimen permanente, en el cual la corriente en la bobina siempre es positiva.

Las ecuaciones utilizadas para el diseño del convertidor CD-CD tipo reductor se detallan a continuación [27]:

El primer paso es determinar el ciclo de trabajo  $D$  que se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$D = \frac{V_o}{V_s}$$

Posteriormente se realiza el cálculo del valor de la inductancia mínima que mantiene el régimen permanente, donde  $f$  es la frecuencia de conmutación:

$$L_{\text{mín}} = \frac{(1 - D) R}{2f}$$

Tabla 3.1: Parámetros del convertidor CD-CD tipo reductor

Definición	Parámetro
Voltaje de entrada máximo	$V_{s_{\text{máx}}} = 17V$
Voltaje de entrada mínimo	$V_{s_{\text{mín}}} = 12V$
Voltaje de salida del convertidor	$V_o = 10,4V$
Frecuencia de conmutación	$f = 100KHz$
Resistencia de carga	$R_{\text{lím}} = 65\Omega$
Tensión de rizado pico a pico en la salida	$\Delta V_o = 0,2V$

Por último se obtiene el valor del capacitor, donde  $\Delta V_o$  es la variación pico a pico del voltaje de salida:

$$C = \frac{(1 - D) V_o}{8L_{\text{mín}}f^2\Delta V_o}$$

### 3.2.1.1. Diseño y simulación del convertidor

Los parámetros de diseño del convertidor se muestran en la tabla 3.1.

Estos parámetros determinan los valores de los componentes del convertidor. Debido a que existen dos valores para el voltaje de entrada, se calculan dos ciclos de trabajo:

$$D_{\text{mín}} = \frac{V_o}{V_{s_{\text{máx}}}} = 0,612$$

$$D_{\text{máx}} = \frac{V_o}{V_{s_{\text{mín}}}} = 0,867$$

Al realizar el cálculo del inductor y el capacitor, se selecciona el valor del ciclo de trabajo que proporcione la inductancia mínima y la capacitancia máxima, como se muestra a continuación:

$$L_{\text{mín}} = \frac{(1 - D_{\text{máx}}) R_{\text{lím}}}{2f} = 43,333 \times 10^{-6}H$$

$$C = \frac{(1 - D_{\text{mín}}) V_o}{8L_{\text{mín}}f^2\Delta V_o} = 5,824x \times 10^{-6}F$$

En la figura 3.3 se muestra la respuesta del voltaje de salida del convertidor reductor obtenido en simulación con los valores especificados, con el fin de reducir el amortiguamiento, se utilizó un inductor de 1mH en la simulación.

En la figura se observa mediante cursores que el voltaje se estabiliza en 10.4 V en 5ms.

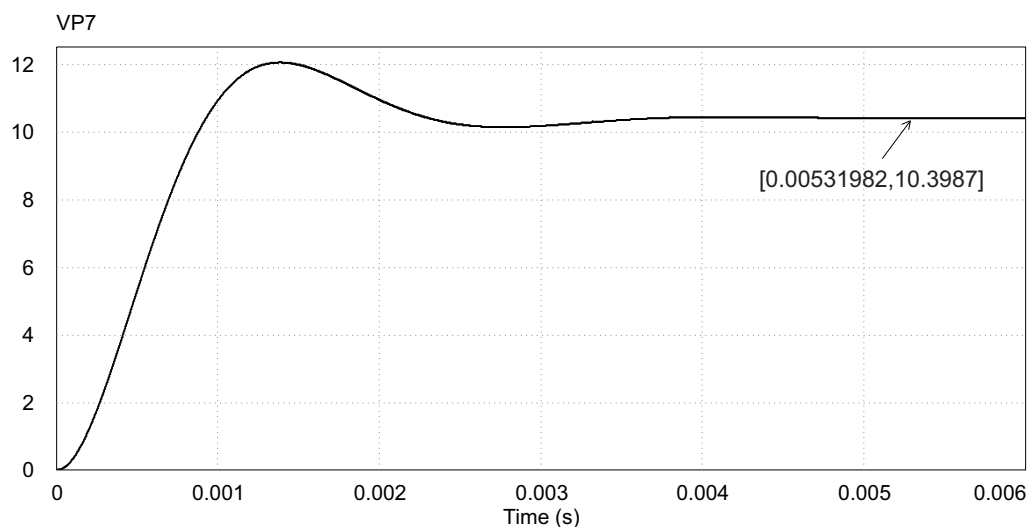


Figura 3.3: Simulación del voltaje de salida del convertidor reductor

### 3.2.2. Convertidores CD-CD Elevador

El convertidor CD-CD tipo elevador siempre producirá un voltaje de salida  $V_o$  mayor al voltaje de entrada  $V_s$  [27].

La configuración de este convertidor se muestra en la figura 3.4.

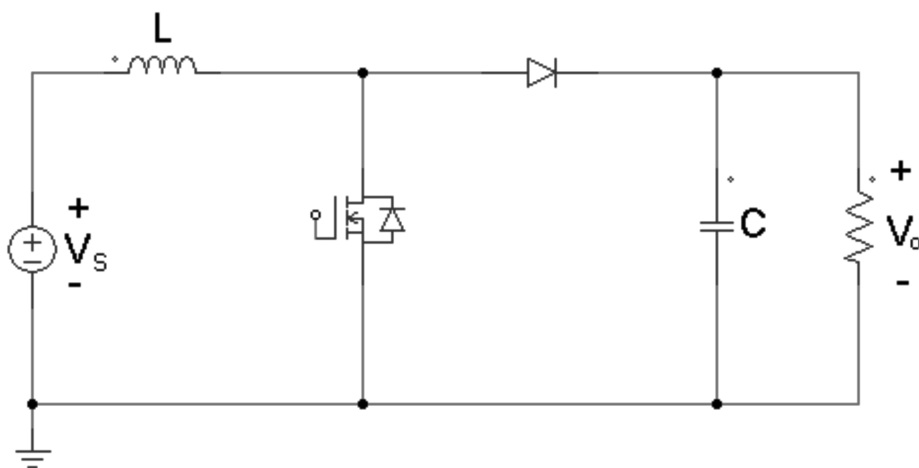


Figura 3.4: Configuración del convertidor CD-CD tipo elevador

El convertidor CD-CD tipo elevador también trabaja en dos modos de conducción: modo de conducción continuo y modo de conducción discontinuo. En este proyecto se realiza el diseño de los convertidores operando en el modo de conducción continuo.

Las ecuaciones utilizadas para el diseño del convertidor CD-CD tipo elevador se detallan a continuación:

Tabla 3.2: Parámetros del convertidor CD-CD tipo elevador

Definición	Parámetro
Voltaje de entrada máximo	$V_{s_{\text{máx}}} = 10,4V$
Voltaje de entrada mínimo	$V_{s_{\text{mín}}} = 5,2V$
Voltaje de salida del convertidor	$V_0 = 14V$
Frecuencia de conmutación	$f = 100KHz$
Tensión de rizado pico a pico en la salida	$\Delta V_0 = 0,32V$
Rizado pico a pico de corriente	$\Delta i_l = 7 \times 10^{-3}A$

El primer paso es determinar el ciclo de trabajo  $D$  que se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o}$$

Posteriormente se realiza el cálculo de la inductancia mínima para mantener el régimen permanente, donde  $f$  es la frecuencia de conmutación:

$$L_{\text{mín}} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f}$$

Por último se obtiene el valor del capacitor, donde  $\Delta V_o$  es la variación pico a pico del voltaje de salida:

$$C = \frac{DV_o}{Rf\Delta V_o}$$

### 3.2.2.1. Diseño y simulación del convertidor

Los parámetros para el diseño del convertidor se muestran en la tabla 3.2.

El valor de la resistencia de carga, se calcula utilizando la potencia del LED:

$$R_c = \frac{V_0^2}{P_0} = 20\Omega$$

Debido a que existen dos valores para el voltaje de entrada, se calculan dos ciclos de trabajo:

$$D_{\text{máx}} = 1 - \frac{V_{s_{\text{mín}}}}{V_o} = 0,629$$

$$D_{\text{mín}} = 1 - \frac{V_{s_{\text{máx}}}}{V_o} = 0,257$$

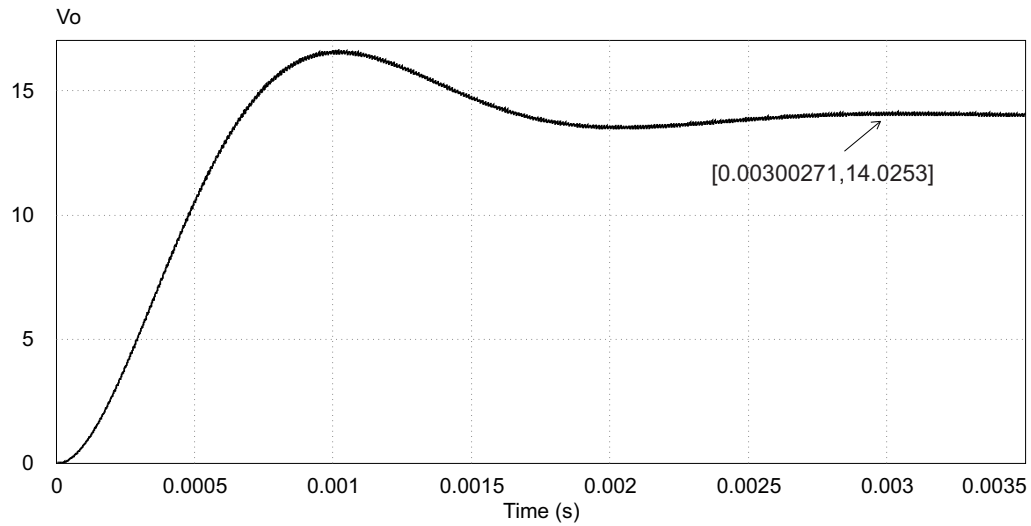


Figura 3.5: Simulación del voltaje de salida del convertidor elevador

Al realizar el cálculo del inductor y el capacitor, se selecciona el valor del ciclo de trabajo que proporcione la inductancia mínima y la capacitancia máxima, como se muestra a continuación:

$$L_{\text{mín}} = \frac{V_{s\text{mín}} D_{\text{máx}}}{f \Delta i_l} = 3,82 \times 10^{-3} H$$

$$C = \frac{D_{\text{máx}} V_0}{R_C f \Delta V_0} = 13,75 \times 10^{-6} F$$

Con la finalidad de comprobar el diseño del convertidor elevador, se realiza una prueba en simulación de la respuesta del voltaje en lazo abierto. La figura 3.5 muestra la gráfica de esta respuesta en donde se observa que el voltaje se estabiliza en 14V en 3ms.



# Capítulo 4

## Modelo matemático y diseño del sistema de control

En este capítulo se obtiene el modelo matemático del sistema de iluminación y se lleva a cabo el análisis y diseño del sistema de control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error.

La primera sección del capítulo presenta el modelo matemático en forma promedio del sistema de iluminación mediante LEDs de potencia con todos sus elementos acoplados. En la segunda sección se detalla la teoría correspondiente al controlador por retroalimentación de la salida pasiva del error y se realiza el análisis y diseño del controlador para el sistema de iluminación basado en el almacenamiento de la energía usando supercapacitores. Por último, la tercera sección muestra los resultados obtenidos a nivel simulación mediante el programa SIMNON versión 3.0 de la firma SSPA Maritime Consulting <http://www.mpassociates.gr/software/catalog/sci/simnon/simnon.html>, esto con la finalidad de demostrar la validez y aplicabilidad de la propuesta del sistema de iluminación basado en el almacenamiento de la energía vía supercapacitores.

### 4.1. Modelo en forma promedio del sistema

El sistema de iluminación basado en LEDs de potencia y alimentado por supercapacitores está conformado por los siguientes módulos:

- ⇒ Módulo de alimentación del panel solar
- ⇒ Módulo del convertidor CD-CD tipo reductor para la carga de los SCs
- ⇒ Módulo del banco de supercapacitores para el almacenamiento de energía

⇒ **Módulo del convertidor CD-CD tipo elevador para la regulación de la alimentación del LED de potencia**

En la figura 4.1 se muestra el diagrama general del sistema de iluminación con todos los módulos acoplados. Como se puede observar, en este diagrama se coloca un capacitor entre las terminales del panel solar, esto es con el fin de que el panel solar pueda emplearse como una fuente de voltaje como se referencía en [14].

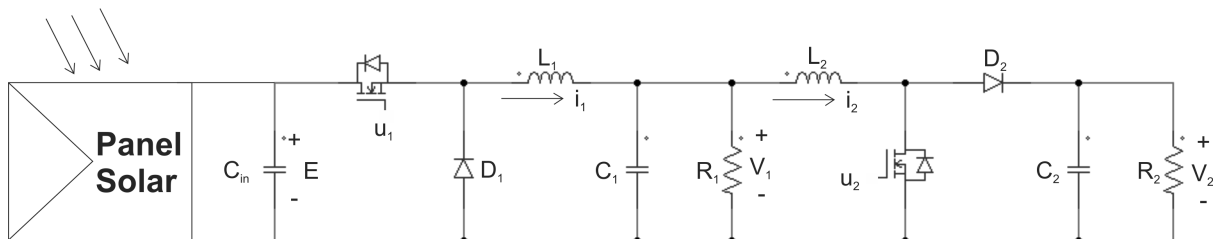


Figura 4.1: Diagrama general del sistema de iluminación.

Con el fin de facilitar el análisis e identificar claramente el comportamiento del circuito, en la figura 4.2 se redibuja el diagrama sustituyendo los transistores de potencia MOSFET por interruptores de un polo y dos posiciones. Además se sustituye el panel solar por una fuente de voltaje de CD representada por  $E$ .

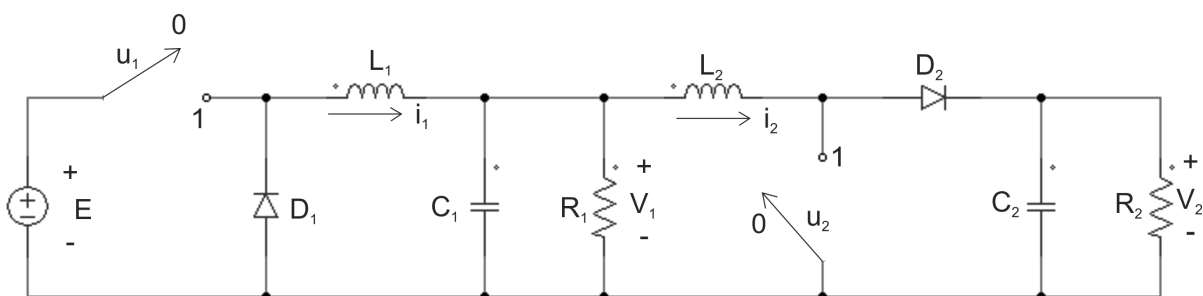


Figura 4.2: Diagrama general acoplado.

El banco de supercapacitores está representado mediante el capacitor  $C_1$ . Con el fin de simplificar el circuito del sistema se desprecia la resistencia en serie equivalente total (ESR total) del banco, debido a que posee un valor resistivo muy bajo:  $1.16m\Omega$ .

Para realizar el modelado del circuito se debe estudiar el comportamiento por separado cuando los interruptores se encuentran en modo de conducción y corte.

El circuito equivalente con los interruptores en conducción, es decir, colocando los interruptores de la figura 4.2 en las posiciones  $u_1 = 1$  y  $u_2 = 1$ , ambos interruptores se cierran y  $D_1$  y  $D_2$  se polarizan inversamente (circuito abierto) dando como resultado el circuito mostrado en la figura 4.3.

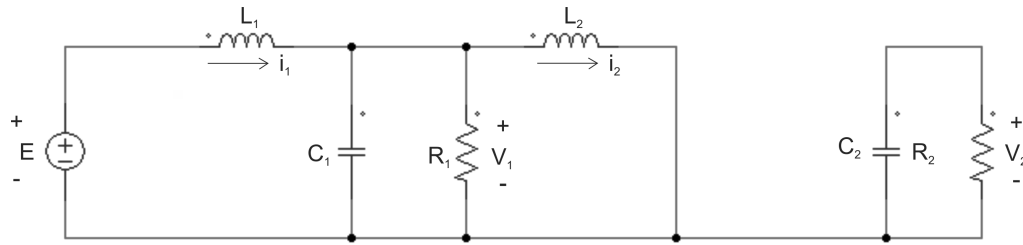


Figura 4.3: Señales de control  $u_1 = 1$  y  $u_2 = 1$ .

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) en el circuito de la figura 4.3 se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + v_1 - E = 0 \quad (4.1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} - v_1 = 0 \quad (4.2)$$

Por otro lado al utilizar la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) en el mismo circuito se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales que complementan el análisis para la obtención del modelo promedio:

$$i_1 = C_1 \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_1}{R_1} + i_2 \quad (4.3)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2} \quad (4.4)$$

Al cambiar la posición de los interruptores a  $u_1 = 0$  y  $u_2 = 0$  en el circuito de la figura , es decir cuando los transistores se encuentran en corte, se obtiene el circuito equivalente mostrado en la figura 4.4. En este estado ambos interruptores se abren y  $D_1$  y  $D_2$  se polarizan directamente (circuito cerrado).

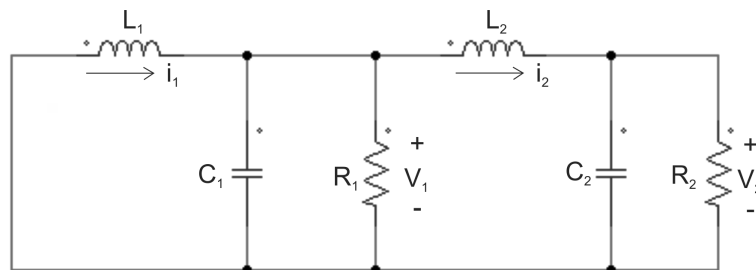


Figura 4.4: Señales de control  $u_1 = 0$  y  $u_2 = 0$ .

Nuevamente se aplica la LVK y la LCK y se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + v_1 = 0 \quad (4.5)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + v_2 - v_1 = 0 \quad (4.6)$$

$$i_1 = C_1 \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_1}{R_1} + i_2 \quad (4.7)$$

$$i_2 = C_2 \frac{dv_2}{dt} + \frac{v_2}{R_2} \quad (4.8)$$

Al considerar las ecuaciones (4.1) y (4.5), se observa que sólo se diferencian en un término correspondiente al voltaje de entrada  $E$ . De la misma forma los pares de ecuaciones (4.2)-(4.6) y (4.4)-(4.8) difieren solo en un término; basándose en esto, es posible unificar el sistema adicionando los parámetros de control  $u_1$  y  $u_2$  que representan la posición de los interruptores. Con estos parámetros las ocho ecuaciones (4.1) a (4.8) se unifican y se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del sistema, representado mediante las siguientes ecuaciones de estado:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = -v_1 + Eu_1 \quad (4.9)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_1 - \frac{v_1}{R_1} - i_2 \quad (4.10)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = v_1 - v_2(1 - u_2) \quad (4.11)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2} + i_2(1 - u_2) \quad (4.12)$$

Donde  $u_1, u_2 \in \{0, 1\}$ . Las ecuaciones representan el modelo matemático del sistema de la figura 4.2 en su forma discontinua en el tiempo, si se considera un valor promedio en las entradas de control en cada periodo de conmutación del interruptor, se tiene que las entradas de control promedio son:  $u_{av1}, u_{av2} \in [0, 1]$ , por lo tanto, las ecuaciones diferenciales del modelo en forma promedio del sistema son dadas por:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = -v_1 + Eu_{av1} \quad (4.13)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_1 - \frac{v_1}{R_1} - i_2 \quad (4.14)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = v_1 - v_2(1 - u_{av2}) \quad (4.15)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2} + i_2(1 - u_{av2}) \quad (4.16)$$

Este modelo en forma promedio no lineal de más de una entrada y más de una salida, que describe el comportamiento dinámico del sistema de iluminación propuesto. Será utilizado para diseñar el controlador multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error en la siguiente sección.

## 4.2. Sistema de control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error

Antes de realizar el diseño del sistema de control, primero se presenta una revisión de los conceptos importantes relacionados con la teoría de pasividad. En la siguiente subsección se describe el concepto de pasividad y su aplicación en la teoría de control, además se define el concepto de disipatividad, usado para comprobar la pasividad de un sistema.

### 4.2.1. Control basado en pasividad

La pasividad es una propiedad fundamental de muchos sistemas físicos, los cuales pueden ser aproximadamente definidos en términos de disipación y transformación de energía [35]. Este concepto se aplica actualmente en el análisis de estabilidad de sistemas no-lineales y en el diseño de sistemas de control, en diferentes ramas, como por ejemplo: control no lineal y control óptimo.

Básicamente el concepto de pasividad muestra de manera intuitiva, que un sistema pasivo no puede entregar más energía de la que está recibiendo [19], por lo que la diferencia entre dichas energías es la energía disipada. La pasividad es una propiedad inherente de entrada-salida ya que se refiere al balance de energía de un sistema, cuando se estimula por una entrada externa para generar alguna salida. La interpretación de pasividad por medio de energías, está íntimamente relacionada con la física del sistema, y en particular con sus propiedades de energía [58].

Por lo tanto el control basado en pasividad se fundamenta en conceptos de energía y consiste en encontrar, para un sistema dinámico, una relación donde la planta almacene menos energía que la que absorbe, a través de su interconexión con el controlador [7].

#### 4.2.1.1. Pasividad

Para comprender el concepto de pasividad se parte de la definición de potencia y energía para los circuitos eléctricos. La potencia está definida como la razón de cambio con la que se absorbe o consume energía, expresándose mediante la siguiente ecuación:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (4.17)$$

donde  $p(t)$  es la potencia y  $w(t)$  es la energía.

De la ecuación (4.17) se desprende la expresión para la energía:

$$w(t) = \int_0^t p(t) dt \quad (4.18)$$

Si se considera un circuito eléctrico representado como una caja negra, tal como se muestra en la figura 4.5, donde el voltaje a través de las terminales de alimentación se denota como  $v$  y la corriente que sale de la fuente de alimentación hacia la caja se denota por  $i$ . Tomando en consideración que la dirección de la corriente y la polaridad del voltaje son arbitrarias. La potencia del circuito es:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (4.19)$$

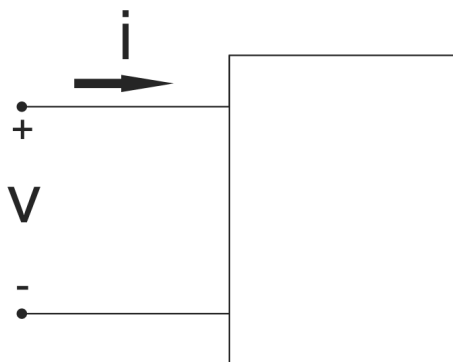


Figura 4.5: Elemento pasivo.

Por lo tanto, la energía consumida por el circuito en un tiempo  $t$  es:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t v(t)i(t) dt = \underbrace{\int_{-\infty}^0 v(t)i(t) dt}_1 + \underbrace{\int_0^t v(t)i(t) dt}_2 \quad (4.20)$$

Basándonos en la convención de los signos se define el comportamiento energético de un circuito mediante las siguientes reglas [14]:

- ⇒ Si  $w(t) > 0$ , entonces el circuito representado por la caja negra consume energía.
- ⇒ Si  $w(t) < 0$ , entonces el circuito representado por la caja negra suministra energía.

De acuerdo a la teoría de circuitos eléctricos, los elementos *que no generan su propia energía se denominan pasivos*. Por lo tanto el circuito se define como elemento pasivo si

$$\int_{-\infty}^t v(t)i(t)dt \geq 0 \quad (4.21)$$

Entonces la energía que absorbe el circuito es positiva. En el caso contrario el dispositivo entrega energía y se dice que es activo. De aquí se deriva que los elementos en un circuito eléctrico como inductores, capacitores y resistencias satisfacen esta condición, por lo tanto se denominan elementos pasivos.

La aplicación del concepto de pasividad implica la existencia de tres funciones de energía [57]: la función de almacenamiento (que representa la energía almacenada en el sistema), una función de suministro (que es la energía externa recibida por el sistema) y una función de disipación (que representa la energía total disipada por el sistema en algún intervalo de tiempo).

#### 4.2.1.2. Disipatividad

Considerando un sistema no lineal afín representado en su forma general de espacio de estados:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (4.22)$$

$$y = h(x) \quad (4.23)$$

donde

$x \rightarrow$  Variable de estado tal que  $x \in X \subset \mathfrak{R}^n$

$u \rightarrow$  Entrada de control tal que  $u \in U \subset \mathfrak{R}$

$y \rightarrow$  Función escalar de salida tal que  $y \in Y \subset \mathfrak{R}$

La función de abastecimiento está definida como  $s(u, y) : U \times Y \rightarrow \mathfrak{R}$ . Se dice que el sistema no lineal representado por (4.22) y (4.23) es disipativo con respecto a la función de abastecimiento  $s(u, y)$ , si existe una función  $\phi : X \rightarrow \mathfrak{R}^+$  llamada función de almacenamiento, tal que para todo  $x_0 \in X$  y para todas las funciones de entrada  $u \in U$  se cumple la siguiente relación:

$$\phi(x(t_1)) \leq \phi(x(t_0)) + \int_{t_0}^{t_1} s(u(t), y(t))dt \quad (4.24)$$

con  $x(t_0) = x_0$  y  $x(t_1)$  es la variable de estado resultante en el tiempo  $t_1$  de la solución del sistema (4.22), (4.23) tomando como condición inicial a  $x_0$  y como entrada de control a la

función  $u(t)$ . Si  $\phi$  es diferenciable con respecto al tiempo entonces se tiene:

$$\dot{\phi} \leq s(u, h(x, u)) \quad (4.25)$$

con  $h(x, u)$  como la salida del sistema.

Para probar si el sistema no lineal obtenido en la sección 4.1, cumple con la ecuación (4.24). Bastará con demostrar que es disipativo con respecto a la función de abastecimiento  $s(u, y)$ .

El modelo obtenido en la sección 4.1 está representado por:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = -v_1 + Eu_{av1} \quad (4.26)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_1 - \frac{v_1}{R_1} - i_2 \quad (4.27)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = v_1 - v_2(1 - u_{av2}) \quad (4.28)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2} + i_2(1 - u_{av2}) \quad (4.29)$$

Y la función de energía del sistema o función de almacenamiento está dada por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{1}{2}L_1i_1^2 + \frac{1}{2}Cv_1^2 + \frac{1}{2}L_2i_2^2 + \frac{1}{2}C_2v_2^2 \quad (4.30)$$

Del concepto de disipatividad se demuestra que un sistema es pasivo disipativo si se cumple que la potencia de salida del sistema es menor que la potencia de entrada del mismo ( $P_{out} < P_{in}$ ), por lo tanto derivando la ecuación (4.30) con respecto al tiempo tenemos que la potencia de salida está dada por:

$$\frac{d\phi}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} i_1 + C_1 \frac{dv_1}{dt} v_1 + L_2 \frac{di_2}{dt} i_2 + C_2 \frac{dv_2}{dt} v_2 \quad (4.31)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones del modelo (4.26) a (4.29) en la ecuación (4.31) se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= (-v_1 + Eu_{av1})i_1 + (i_1 - \frac{v_1}{R_1} - i_2(1 - u_{av2}))v_1 + (v_1 - v_2(1 - u_{av2}))i_2 \\ &\quad + (-\frac{v_2}{R_2} + i_2(1 - u_{av2}))v_2 \end{aligned} \quad (4.32)$$

Desarrollando la ecuación (4.32) y eliminando términos se obtiene la ecuación de la potencia total del sistema:

$$\frac{d\phi}{dt} = P_{out} = Eu_{av1}i_1 - \frac{v_1^2}{R_1} - i_2(1 - u_{av2})v_1 + v_1i_2 - \frac{v_2^2}{R_2} \quad (4.33)$$



Ya que la potencia de entrada esta dada por  $P_{in} = Eu_{av1}$ , entonces se tiene que:

$$Eu_{av1}i_1 - \frac{v_1^2}{R_1} - i_2(1 - u_{av2})v_1 + v_1i_2 - \frac{v_2^2}{R_2} < Eu_{av1}i_1 \quad (4.34)$$

Se puede ver que considerando que la corriente y el voltaje siempre son positivos (que nunca cambian de signo), y en el peor de los casos cuando  $u_{av2}$  es 1, aún los demás términos son lo suficientemente negativos para eliminar el término  $v_1i_2$ . La ecuación (4.34) muestra que la potencia de salida es menor que la potencia de entrada del sistema, con lo cual queda demostrado que el sistema es pasivo disipativo, ya que cumple con la desigualdad (4.25).

### 4.2.2. Diseño del controlador por retroalimentación de la salida pasiva

Para realizar el diseño del controlador por retroalimentación de la salida pasiva, se considera el modelo promedio del sistema obtenido en la sección 4,1 y representado por las ecuaciones:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = -v_1 + Eu_{av1} \quad (4.35)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_1 - \frac{v_1}{R_1} - i_2 \quad (4.36)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = v_1 - v_2(1 - u_{av2}) \quad (4.37)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2} + i_2(1 - u_{av2}) \quad (4.38)$$

donde:

$E$  → Voltaje suministrado por el panel fotovoltaico

$i_1$  → Corriente en el inductor  $L_1$  del convertidor CD-CD reductor

$i_2$  → Corriente en el inductor  $L_2$  del convertidor CD-CD elevador

$v_1$  → Voltaje en el capacitor  $C_1$  del convertidor CD-CD reductor

$v_2$  → Voltaje en el capacitor  $C_1$  del convertidor CD-CD elevador

$u_{av1}$  → Entrada de control promedio en el convertidor CD-CD reductor

$u_{av2}$  → Entrada de control promedio en el convertidor CD-CD elevador

El sistema anterior debe ser descrito utilizando una notación matricial y utilizando una representación en su forma pasiva, de la siguiente manera:

$$A\dot{x} = (J(u_{av}) - R)x + Bu_{av} + \varepsilon(t) \quad (4.39)$$

donde:

$A \rightarrow$  Matriz simétrica constante definida positiva  
 $x \rightarrow$  Vector de estados n-dimensional  
 $J(u_{av}) \rightarrow$  Matriz antisimétrica dependiente de  $u_{av}$   
 $R \rightarrow$  Matriz simétrica constante semidefinida positiva  
 $B \rightarrow$  Matriz constante de entrada de control  
 $u_{av} \rightarrow$  Vector de la entrada de control promedio  
 $\varepsilon(t) \rightarrow$  Vector de entrada de alimentación

La matriz  $J(u_{av})$  para toda  $u_{av}$  tiene la siguiente forma:

$$J(u_{av}) = J_o + \sum_{i=1}^m J_i u_{iav} \quad (4.40)$$

La matriz  $J_o$  se compone de términos que no dependen de las variables de entrada de control, las matrices  $J_i$  con  $i = 1, 2, \dots, m$  son antisimétricas constantes, mientras que  $B$  es una matriz constante de  $n \times m$  en términos de vectores columna n-dimensional, la matriz  $B$  esta dada por  $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]$ . El vector  $u_{av}$  se supone que es m-dimensional donde cada componente de  $u_{iav}$  toma valores en un intervalo cerrado de  $[0, 1]$  del eje real. La matriz  $R$  representa el campo disipativo del sistema, mientras que la matriz  $J(u_{av})$  representa el campo conservativo del sistema. Los canales de entrada de control se representan con la matriz constante  $B$ , en tanto que, el vector  $\varepsilon(t)$  representa las fuentes de entrada externas como son las baterías o las líneas de voltaje de cd.

La forma matricial del sistema en su forma pasiva se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(1-u_2) \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & (1-u_2) & 0 & C_2 \end{pmatrix}}_{J(u_{av})} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} - \\
 \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_2} \end{pmatrix}}_R \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_B \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\varepsilon(t)} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

Debido a que la matriz  $J(u_{av})$  es una matriz antisimétrica se debe de cumplir que  $J^T(u_{av}) = -J(u_{av})$ , tal como se muestra a continuación:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & (1-u_2) \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -(1-u_2) & 0 & C_2 \end{pmatrix}}_{J^T(u_{av})} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & (1-u_2) \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -(1-u_2) & 0 & C_2 \end{pmatrix}}_{-J(u_{av})}$$

y  $R$  debe ser una matriz semidefinida positiva, que debe cumplir con  $R^T = R \geq 0$ .

Con el fin de realizar la regulación del sistema, es necesario obtener los puntos de equilibrio o variables de referencia. Basándonos en el modelo promedio del sistema (4.35) a (4.38) se diseña el modelo de referencia, el cual esta dado por:

$$L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} = -\bar{v}_1 + E\bar{u}_{av1} \quad (4.41)$$

$$C_1 \frac{d\bar{v}_1}{dt} = \bar{i}_1 - \frac{\bar{v}_1}{R_1} - \bar{i}_2 \quad (4.42)$$

$$L_2 \frac{d\bar{i}_2}{dt} = \bar{v}_1 - \bar{v}_2(1 - \bar{u}_{av2}) \quad (4.43)$$

$$C_2 \frac{d\bar{v}_2}{dt} = -\frac{\bar{v}_2}{R_2} + \bar{i}_2(1 - \bar{u}_{av2}) \quad (4.44)$$

Empezamos por igualar el lado izquierdo de la ecuación (4.41) a cero, con lo cual se obtiene el valor de referencia para  $\bar{u}_{1av}$

$$\begin{aligned} 0 &= -\bar{v}_1 + E\bar{u}_{1av} \\ E\bar{u}_{1av} &= \bar{v}_1 \\ \bar{u}_{1av} &= \frac{\bar{v}_1}{E} \end{aligned} \quad (4.45)$$

Se repite el mismo procedimiento en la ecuación (4.43) y se obtiene el valor de referencia de  $\bar{u}_{2av}$ :

$$\begin{aligned} 0 &= -\bar{v}_1 - \bar{v}_2(1 - \bar{u}_{2av}) \\ \bar{v}_2(1 - \bar{u}_{2av}) &= \bar{v}_1 \\ (1 - \bar{u}_{2av}) &= \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} \\ -\bar{u}_{2av} &= \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} - 1 \\ -\bar{u}_{2av} &= \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2}{\bar{v}_2} \\ \bar{u}_{2av} &= \frac{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}{\bar{v}_2} \end{aligned} \quad (4.46)$$

En este procedimiento se obtiene también el valor de:

$$(1 - \bar{u}_{2av}) = \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} \quad (4.47)$$

El valor de referencia para  $\bar{i}$  se obtiene al igualar a cero el lado izquierdo de la ecuación (4.44) y utilizando la ecuación (4.47). El procedimiento se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\bar{v}_2}{R_2} + \bar{i}_2(1 - \bar{u}_{2av}) \\ \bar{i}_2(1 - \bar{u}_{2av}) &= \frac{\bar{v}_2}{R_2} \\ (1 - \bar{u}_{2av}) &= \frac{\bar{v}_2}{\bar{i}_2 R_2} \end{aligned}$$

Sustituyendo la ecuación (4.47):

$$\begin{aligned} \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} &= \frac{\bar{v}_2}{\bar{i}_2 R_2} \\ \bar{i}_2 &= \frac{\bar{v}_2^2}{\bar{v}_1 R_2} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Finalmente utilizando la ecuación (4.42) e igualando el lado izquierdo a cero, se obtiene el valor de  $\bar{i}_1$ :

$$\begin{aligned} 0 &= \bar{i}_1 - \frac{\bar{v}_1}{R_1} - \bar{i}_2 \\ -\bar{i}_1 &= -\frac{\bar{v}_1}{R_1} - \bar{i}_2 \\ \bar{i}_1 &= \frac{\bar{v}_1}{R_1} + \frac{\bar{v}_2^2}{\bar{v}_1 R_2} \end{aligned} \quad (4.49)$$

A continuación se resumen los valores de las variables de referencia en el punto de equilibrio que intervienen en el control:

$$\bar{v}_1 = v_{d1} \quad (4.50)$$

$$\bar{v}_2 = v_{d2} \quad (4.51)$$

$$\bar{u}_{1av} = \frac{\bar{v}_1}{E} \quad (4.52)$$

$$\bar{u}_{2av} = \frac{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}{\bar{v}_2} \quad (4.53)$$

$$\bar{i}_1 = \frac{\bar{v}_1}{R_1} + \frac{\bar{v}_2^2}{\bar{v}_1 R_2} \quad (4.54)$$

$$\bar{i}_2 = \frac{\bar{v}_2^2}{\bar{v}_1 R_2} \quad (4.55)$$

El controlador tiene dos propósitos:

- ⇒ Regular el voltaje de salida del convertidor CD-CD reductor  $v_1$  al voltaje nominal del banco de supercapacitores  $vd_1 = 10.4V$ .
- ⇒ Regular la corriente  $\bar{i}_2 = 700mA$  y el voltaje  $\bar{v}_2 = 14V$ , los cuales son los valores nominales de referencia deseados para alimentar el LED de potencia seleccionado.

Poniendo el modelo de referencia (4.41)-(4.44) en su forma pasiva [14], [49]:

$$\dot{A}\bar{x} = (J(\bar{u}_{av}) - R)\bar{x} + B\bar{u}_{av} + \varepsilon(t) \quad (4.56)$$

El vector de estados del modelo de referencia queda por lo tanto definido de la siguiente forma:

$$x^T = \left( \bar{i}_1 \quad \bar{i}_2 \quad \bar{v}_1 \quad \bar{v}_2 \right)$$

Ahora para calcular la dinámica del error del sistema se realiza la resta de la ecuación (4.39) con la ecuación (4.56), de la cual se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} A\dot{e} &= A\dot{x} - \dot{A}\bar{x} \\ &= J(u_{av})x - Rx + Bu_{av} - J(\bar{u}_{av})\bar{x} - R\bar{x} - B\bar{u}_{av} \\ &= J(u_{av})x - J(\bar{u}_{av})\bar{x} - R(x - \bar{x}) + B(u_{av} - \bar{u}_{av}) \end{aligned} \quad (4.57)$$

Se define el vector de error  $e = x - \bar{x}$  y el error de la entrada de control promedio como  $e_u = u_{av} - \bar{u}_{av}$ . Además se suma y resta  $J(u_{av})\bar{x}$  y se tiene:

$$\begin{aligned} A\dot{e} &= J(u_{av})x - J(\bar{u}_{av})\bar{x} - Re + Be_u + J(u_{av})\bar{x} - J(u_{av})\bar{x} \\ &= J(u_{av})(x - \bar{x}) - J(\bar{u}_{av})\bar{x} - Re + Be_u + J(u_{av})\bar{x} \\ &= J(u_{av})e - Re + Be_u + [J(u_{av}) - J(\bar{u}_{av})]\bar{x} \end{aligned} \quad (4.58)$$

El término  $J(u_{av})\bar{x} - J(\bar{u}_{av})\bar{x}$  se puede reducir haciendo una aproximación por serie de Taylor con respecto a la entrada de control promedio  $u_{av}$ .

$$\begin{aligned} J(u_{av}) &= J(\bar{u}_{av}) + \frac{\partial J(u_{av})}{\partial u_{av}} \Big|_{u_{av}=\bar{u}_{av}} (u_{av} - \bar{u}_{av}) \\ J(u_{av}) &= J(\bar{u}_{av}) + \underbrace{\frac{\partial J(u_{av})}{\partial u_{av}} \Big|_{u_{av}=\bar{u}_{av}} e_u}_{:=J} \end{aligned} \quad (4.59)$$

Sustituyendo (4.59) en (4.58) se obtiene la siguiente ecuación:

$$A\dot{e} = J(u_{av})e - Re + Be_u + J\bar{x} \quad (4.60)$$

De acuerdo con la linealidad de la ecuación (4.40),  $J$  se puede escribir de la siguiente manera:

$$J = \sum_{i=1}^m J_i(u_{i,av} - \bar{u}_{i,av}) = \sum_{i=1}^m J_i e_{i,u} \quad (4.61)$$

Sustituyendo la ecuación (4.61) en (4.60) se tiene que:

$$\begin{aligned} A\dot{e} &= J(u_{av})e - Re + Be_{i,u} + \sum_{i=1}^m J_i e_{i,u} \bar{x} \\ &= J(u_{av})e - Re + \underbrace{[B + (J_1 \bar{x}, \dots, J_m \bar{x})]}_{:=\bar{B}} e_u \\ &= J(u_{av})e - Re + \bar{B}e_u \end{aligned} \quad (4.62)$$

La ecuación (4.62) describe la dinámica del modelo exacto del error de regulación en lazo abierto. Se propone la función candidata de Lyapunov del error de regulación como [14], [39]:

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T A e \quad (4.63)$$

Derivando la ecuación (4.63) con respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{V}(e) = e^T A \dot{e} \quad (4.64)$$

**Propiedad 1** La matriz conservativa  $J(u_{av})$  satisface [14]:

$$e^T J(u_{av})e = 0 \quad \forall u_{av} \in R, e \in R^n$$

Haciendo uso de la propiedad 1 y sustituyendo la ecuación (4.62) en (4.64), se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= e^T J(u_{av})e - e^T Re + e^T \bar{B}e_u \\ &= e^T Re + e^T \bar{B}e_u \end{aligned} \quad (4.65)$$

La entrada de control puede expresarse de la siguiente manera, para un controlador lineal por retroalimentación en lazo cerrado:

$$e_u = u_{av} - \bar{u}_{av} = \Gamma \bar{B}e \quad (4.66)$$

Despejando  $u_{av}$  se obtiene la ley de control:

$$u_{av} = \bar{u}_{av} - \Gamma \bar{B}^T e \quad (4.67)$$

Para obtener la ley de control para el sistema, primero se obtiene la matriz  $\bar{B}$  que esta conformada de la siguiente forma:

$$\bar{B} = \left[ \frac{\partial J(u_1)}{\partial u_1} \bar{x} + B_1, \frac{\partial J(u_2)}{\partial u_2} \bar{x} + B_2 \right] \quad (4.68)$$

Obteniendo cada elemento de la matriz se tiene:

$$\frac{\partial J(u_1)}{\partial u_1} \bar{x} + B_1 = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

$$\frac{\partial J(u_2)}{\partial u_2} \bar{x} + B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{v}_2 \\ 0 \\ -\bar{i}_2 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

La matriz  $\bar{B}$  resultante es:

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & \bar{v}_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\bar{i}_2 \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Sustituyendo  $\bar{B}$  en la ecuación (4.67) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} u_{1av} \\ u_{2av} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{1av} \\ \bar{u}_{2av} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{v}_2 & 0 & -\bar{i}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

$$\begin{bmatrix} u_{1av} \\ u_{2av} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{1av} \\ \bar{u}_{2av} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{v}_2 & 0 & -\bar{i}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 - \bar{i}_1 \\ i_2 - \bar{i}_2 \\ v_1 - \bar{v}_1 \\ v_2 - \bar{v}_2 \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

Al realizar las operaciones matriciales se obtiene la ley de control multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error:

$$u_{1av} = \bar{u}_{1av} - \Gamma_1 E(i_1 - \bar{i}_1) \quad (4.74)$$

$$u_{2av} = \bar{u}_{2av} + \Gamma_2 \bar{i}_2 (v_2 - \bar{v}_2) - \Gamma_2 \bar{v}_2 (i_2 - \bar{i}_2) \quad (4.75)$$

donde  $\bar{u}_{1av}$  y  $\bar{u}_{2av}$  son las entradas de control de pre-alimentación, mientras que  $\Gamma_1$  y  $\Gamma_2$  son las ganancias de cada uno de los controladores. Estas ganancias son escogidas de forma heurística en el intervalo abierto  $0 < \Gamma_1 < 1$  y  $0 < \Gamma_2 < 1$ . Estos dos controladores dados en (4.74) y (4.75) se utilizan para obtener el desempeño en lazo cerrado del sistema propuesto. Los resultados de simulación se presentan en la siguiente sección.

### 4.3. Resultados de simulación

Consideraciones generales de la ley de control:

- ⇒ Las corrientes  $i_1, i_2$  y voltajes  $v_1, v_2$  de los convertidores son medidos.
- ⇒ La corriente  $\bar{i}_1$  se calcula para cargar el banco de supercapacitores.
- ⇒ El voltaje  $\bar{v}_1$  se calcula al valor nominal que se requiere para cargar al banco de supercapacitores.
- ⇒ El voltaje entregado por el panel solar solarex SX-50 esta alrededor de su valor nominal.
- ⇒ La corriente  $i_2$  y  $v_2$  se calcularon de acuerdo a la demanda del LED de potencia LZ4-00CW10.

La simulación para observar el desempeño del controlador en lazo cerrado del sistema se realiza en el programa de simulación SIMNON, versión 3.0 de la firma SSPA Maritime Consulting, utilizando los valores de los elementos listados en la tabla 4.1.

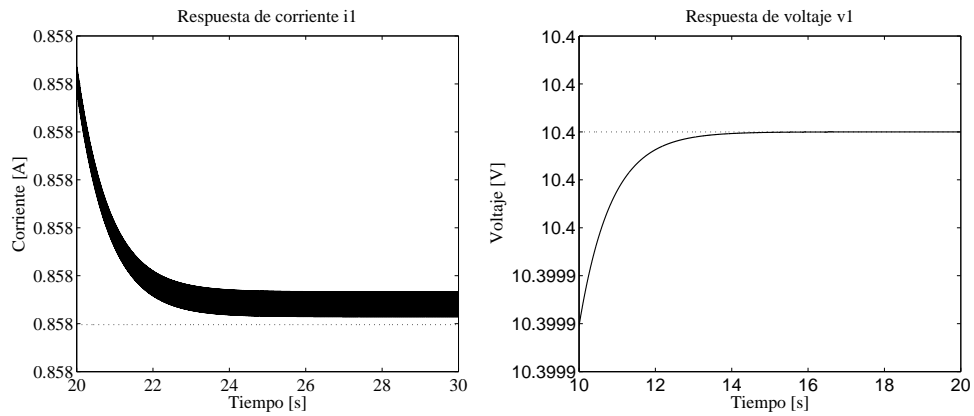
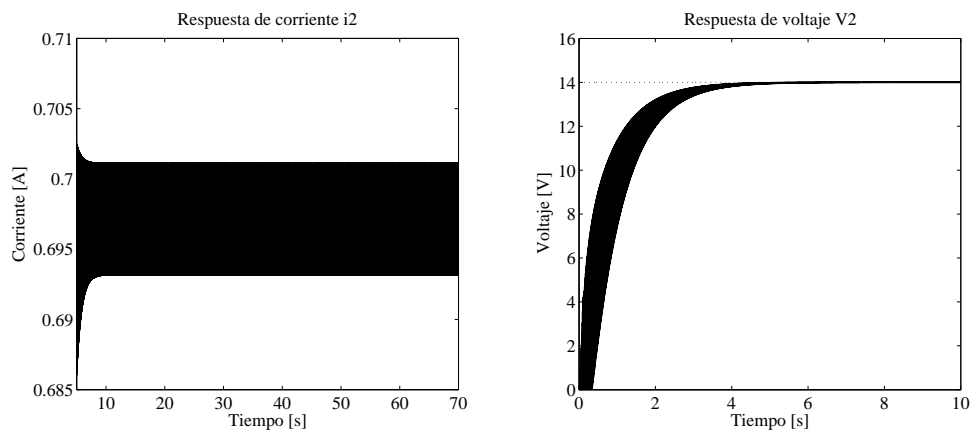
En la figura 4.6 y 4.7 se muestran las respuestas de las variables de corriente y voltaje del sistema aplicando la ley de control. Las variables de referencia en las gráficas se representan por las líneas punteadas y las variables reales del sistema son las señales con líneas sólidas.

En la figura 4.6 se observa que el voltaje del convertidor CD-CD reductor  $v_1$  alcanza su valor nominal de referencia  $\bar{v}_1$  en 14 s. Las variables de interés para la regulación del voltaje y corriente de alimentación del LED de potencia  $i_2$  y  $v_2$  se estabilizan en un tiempo de 5 s y 4 s respectivamente, como se muestra en la figura 4.7. Estas gráficas muestran un buen



Tabla 4.1: Valores de los elementos para la simulación

Elemento	Valor
Voltaje de entrada E	12V
Inductor $L_1$	$150\mu F$
Capacitor $C_1$	$750F$
Resistor $R_1$	$65\Omega$
Inductor $L_2$	$3E^{-3}H$
Capacitor $C_2$	$150\mu F$
Resistor $R_2$	$27\Omega$

Figura 4.6: Señales de corriente  $i_1$  y voltaje  $v_1$ Figura 4.7: Señales de corriente  $i_2$  y voltaje  $v_2$ 

desempeño en la regulación de los voltajes y corrientes requeridos para la aplicación final, la cual debe tener en su salida un voltaje nominal de 14V a una demanda de corriente de 700mA.

La carga del banco de supercapacitores se realiza con 10.4V a 4A, esto con la finalidad de cargarlos en el menor tiempo a lo que puede entregar en potencia el panel solar.

Las señales de control muestran un funcionamiento simultáneo para regular los voltajes y corrientes requeridos por las cargas, ver figura 4.8.

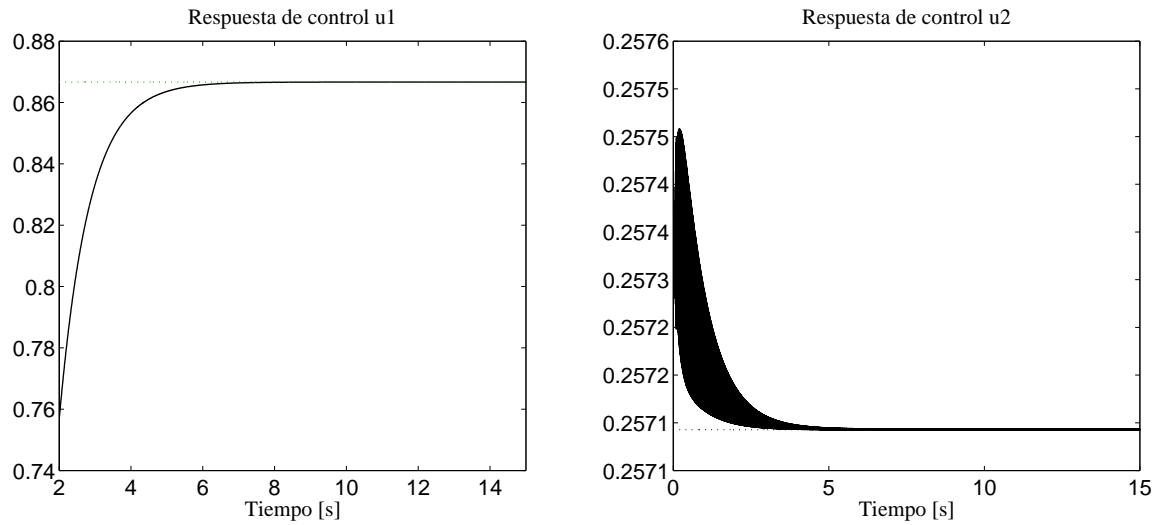


Figura 4.8: Señales de control

# Capítulo 5

## Conclusiones

El uso de supercapacitores en aplicaciones de alta potencia es relativamente nuevo, debido a que anteriormente estos dispositivos contaban con una limitada densidad de potencia y una limitada densidad de energía; sin embargo, las investigaciones recientes han permitido obtener dispositivos con densidades de potencia mayores que las baterías y densidades de energía mayores a las de los capacitores convencionales. Por esta razón el campo de aplicación de los supercapacitores ha ido en incremento.

Actualmente estos dispositivos se utilizan principalmente en sistemas híbridos junto con otros sistemas de almacenamiento de energía, tales como, las baterías y celdas de combustible. Las aplicaciones principales están enfocadas en el almacenamiento de energía de corta duración (máximo 60 s), por esta razón en el presente trabajo de investigación se realizó el análisis, diseño y simulación de un sistema de iluminación mediante LEDs de potencia con almacenamiento en supercapacitores. Proponiéndose con ésto una aplicación de almacenamiento de energía de larga duración.

Las conclusiones que se obtienen del desarrollo de este proyecto se describen a continuación:

- ⇒ El estudio del estado del arte referente a las aplicaciones de los supercapacitores, demostró que estos dispositivos son utilizados principalmente en sistemas híbridos y/o sistemas de almacenamiento de corta duración, como en el caso de vehículos eléctricos y sistemas UPS. Por ello se planteó el análisis, diseño y simulación de un sistema de iluminación mediante LEDs de potencia que requiere el almacenamiento de energía para un periodo de larga duración. Este sistema está planteado para un bajo consumo de energía con el fin de prolongar el tiempo de almacenamiento.
- ⇒ La investigación del estado del arte de los supercapacitores permitió conocer a fondo el funcionamiento de estos dispositivos y las ventajas de sus características operacionales sobre otros dispositivos de almacenamiento de energía. Como resultado se obtuvo un

estudio condensado, que se presenta como referencia para posteriores proyectos.

- ⇒ En el documento se presenta un método para dimensionar bancos de supercapacitores tomando en cuenta los requerimientos de voltaje, corriente y tiempo de carga/descarga requeridos por la aplicación.
- ⇒ Mediante el sistema de iluminación propuesto se propone el uso de supercapacitores como medio único de almacenamiento en sistemas de energía renovable, en éste caso sistemas fotovoltaicos. El uso de supercapacitores reduce el costo a largo plazo, debido a que no requieren mantenimiento, poseen un tiempo de vida útil entre los 15 a 20 años, tienen un rango de operación amplio de temperatura que evita el uso de sistemas de acondicionamiento y poseen un gran número de ciclos de carga/descarga.
- ⇒ La información referente a circuitos de carga para supercapacitores es escasa, por lo cual en este documento se propone el análisis y diseño de un convertidor CD-CD tipo reductor para la carga de supercapacitores en sistemas fotovoltaicos.
- ⇒ En el presente trabajo se utilizó un controlador multivariable por retroalimentación de la salida pasiva del error. Esta propuesta de control permite un mejor manejo de la energía del sistema. Debido a la constante de tiempo del supercapacitor la simulación se realizó en el programa SIMNON, versión 3.0 de la firma SSPA Maritime Consulting.

## 5.1. Trabajos futuros

De la experiencia obtenida en el desarrollo del presente trabajo se proponen los siguientes trabajos futuros:

- ⇒ Implementación del convertidores CD-CD reductor para la carga del banco de supercapacitores.
- ⇒ Construcción del banco de supercapacitores con conexiones de aluminio adecuadas.
- ⇒ Implementación del sistema de iluminación mediante LEDs de potencia con almacenamiento en supercapacitores.
- ⇒ Implementación del controlador en una plataforma FPGA.
- ⇒ El sistema propuesto en este documento es de bajo consumo energético, sin embargo, en un trabajo futuro se puede escalar a un sistema de mayor consumo con un arreglo mayor de LEDs de potencia.

# Apéndice



# Apéndice A

Hoja de datos del supercapacitor  
BCAP3000 270

**BCAP0650 P270**  
**BCAP1200 P270**  
**BCAP1500 P270**  
**BCAP2000 P270**  
**BCAP3000 P270**



**FEATURES AND BENEFITS**

- Ultra-low internal resistance
- Highest power performance available
- Lowest RC time constant
- 2.7 V operating voltage
- Over 1,000,000 duty cycles
- Proprietary material science and packaging technology
- Threaded terminal or weldable post versions

**APPLICATIONS**

- Automotive subsystems
- Back-up power
- Grid stabilization
- Hybrid drive trains
- Rail system power
- Transportation
- Utility vehicles

**PRODUCT SPECIFICATIONS**

CAPACITANCE	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Nominal capacitance	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Tolerance capacitance	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%
VOLTAGE					
Rated voltage	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC
Surge voltage	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC
Maximum operating voltage	N/A				
RESISTANCE					
ESR, DC Max., room temperature	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
ESR, 1kHz (Max.)	0.6 mΩ	0.44 mΩ	0.35 mΩ	0.26 mΩ	0.24 mΩ
TEMPERATURE					
Operating temperature range Stored uncharged	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C
Storage temperature range Cell case temperature	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C
POWER					
Pd	6,800 W/kg	5,800 W/kg	6,600 W/kg	6,900 W/kg	5,900 W/kg
Pmax	18,900 W/kg	15,900 W/kg	18,500 W/kg	19,400 W/kg	14,800 W/kg
ENERGY					
E <sub>max</sub>	4.11 Wh/kg	4.67 Wh/kg	5.42 Wh/kg	5.63 Wh/kg	5.96 Wh/kg



**BCAP0650 P270**  
**BCAP1200 P270**  
**BCAP1500 P270**  
**BCAP2000 P270**  
**BCAP3000 P270**



**PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)**

DC LIFESPAN	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
<b>Endurance</b> At rated voltage and 65°C.	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours
<b>Capacitance change</b> % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
<b>Internal resistance change</b> % of rated value	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%
<b>Life test</b> At rated voltage and 25°C.	10 years	10 years	10 years	10 years	10 years
<b>Capacitance change</b> % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
<b>Internal resistance change</b> % of rated value	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
<b>CYCLE LIFE</b>					
<b>Cycles</b> Between specified voltage and half rated voltage under constant current at 25°C.	1 million	1 million	1 million	1 million	1 million
<b>Capacitance change</b> % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
<b>Internal resistance change</b> % of rated value	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
<b>SHELF LIFE</b>					
<b>Shelf Life</b> Uncharged over storage temperature	2 years	2 years	2 years	2 years	2 years
<b>Capacitance change</b> % of rated value	10% decrease	10% decrease	10% decrease	10% decrease	10% decrease
<b>ESR change</b> % of rated value	50% increase	50% increase	50% increase	50% increase	50% increase
<b>CURRENT</b>					
<b>Maximum continuous current</b>	62 A	81 A	97 A	123 A	147 A
<b>Maximum peak current, 1 sec</b>	575 A	955 A	1,185 A	1,585 A	2,165 A
<b>Leakage current, I<sub>LC</sub></b> After 72 hours. Initial leakage current can be higher.	1.5 mA	2.7 mA	3.0 mA	4.2 mA	5.2 mA
<b>CONNECTION</b>					
<b>Terminal</b>	Threaded or Weldable				
<b>SIZE</b>					
<b>Dimensions (L x W x H) (mm)</b>	See drawings				
<b>Weight</b>	0.16kg	0.26kg	0.28kg	0.36kg	0.51kg

**BCAP0650 P270**  
**BCAP1200 P270**  
**BCAP1500 P270**  
**BCAP2000 P270**  
**BCAP3000 P270**



**PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)**

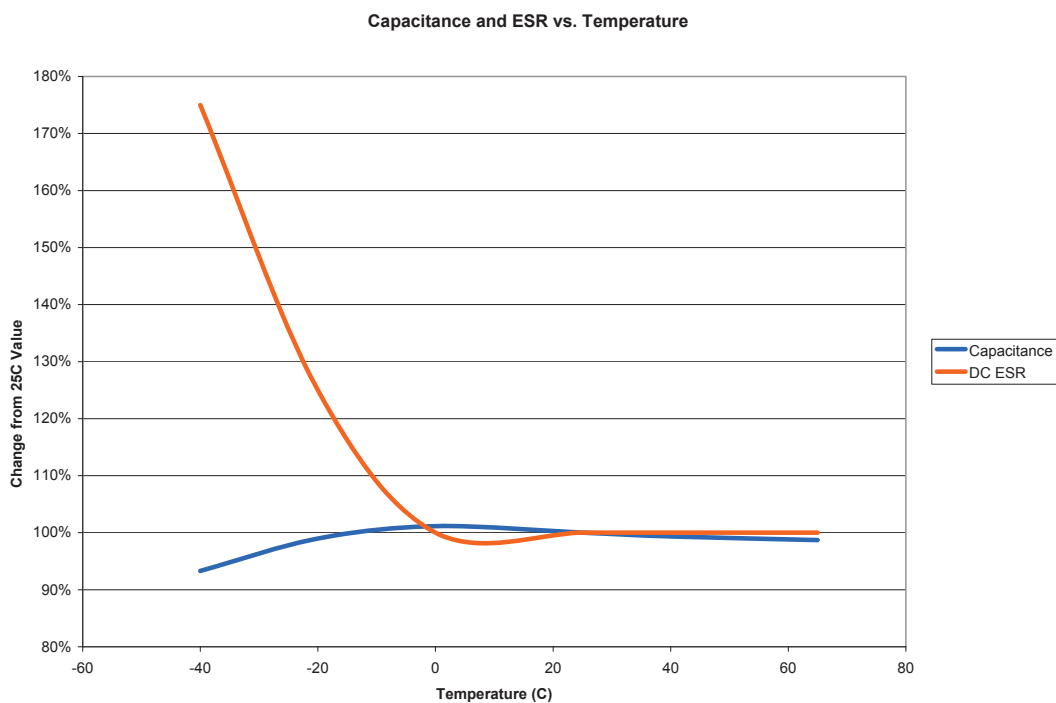
**RATINGS AND SAFETY**

Vibration resistance	For all: ISO 16750, SAE J2380				
Short circuit current (Isc) <b>CAUTION:</b> Current possible with short circuit from rated voltage Do not use as an operating current.	3,350 A	4,650 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A

**TYPICAL CHARACTERISTICS**

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Thermal resistance (Rth)	6.5°C/W	5.3°C/W	4.5°C/W	3.8°C/W	3.2°C/W
--------------------------	---------	---------	---------	---------	---------



**ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION**

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239, available at [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com).

Unless specified, all specifications are at 25°C

I<sub>c</sub> = leakage current after 72 hours at 25°C

I<sub>sc</sub> (short circuit current) =  $\frac{V_{RATED}}{ESR}$

R<sub>th</sub> = thermal resistance

$$E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times mass}$$

$$P_d = \frac{0.12V^2}{R(DC) \times mass}$$

$$P_{max} = \frac{V^2}{\frac{4R(1kHz)}{mass}}$$

$$\text{Maximum Peak Current (1 sec)} = \frac{\frac{1}{2} V}{ESR(DC) + \frac{1}{C}}$$

**BCAP0650 P270**  
**BCAP1200 P270**  
**BCAP1500 P270**  
**BCAP2000 P270**  
**BCAP3000 P270**



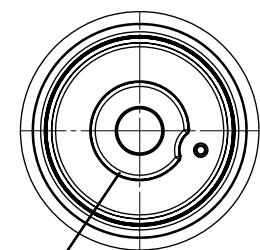
### MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity.  
 Maximum torque for M12 screw terminals is 14Nm.  
 Cells are designed to be connected into series or parallel strings.  
 Clean terminals before mounting.

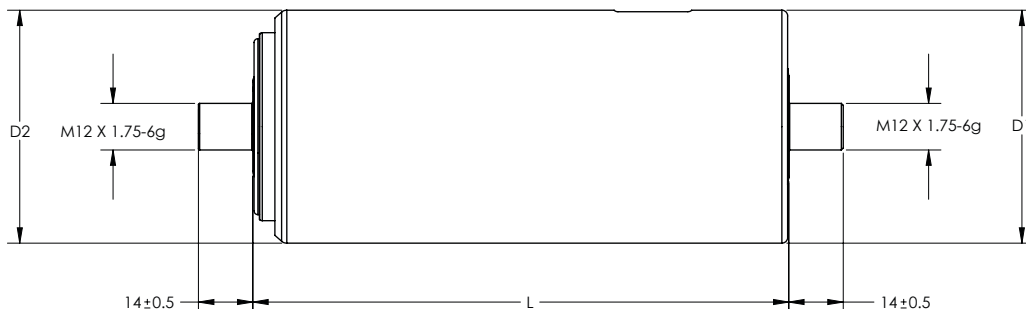
### MARKINGS

Capacitors are marked with the following information - Rated capacitance and rated voltage as well as energy/ power type indication in the product naming. Serial number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking.

### DIMENSIONS



022.9

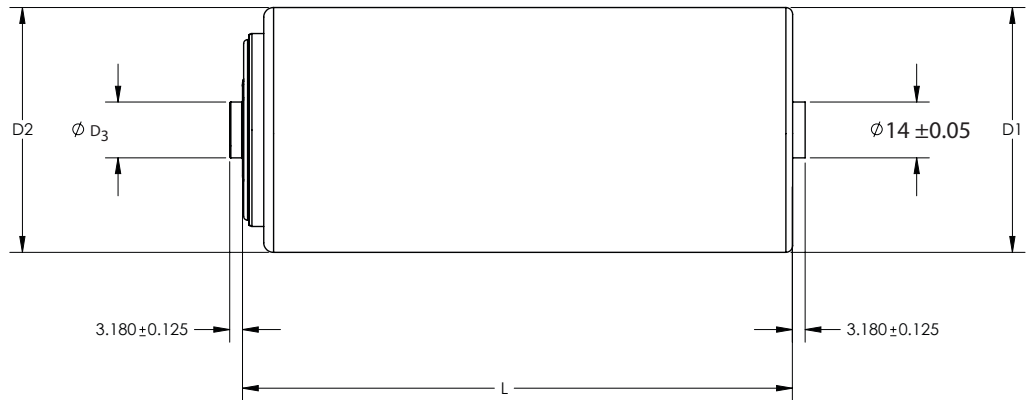
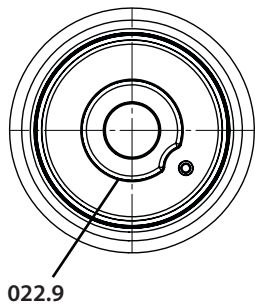


Part Number	Volume	L (±0.3mm)	D <sub>1</sub> (±0.2mm)	D <sub>2</sub> (±0.7mm)
BCAP0650 P270 K04 02	0.211 L	51.5 mm (±0.5mm)	60.4mm	60.7mm
BCAP1200 P270 K04 02	0.294 L	74 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP1500 P270 K04 02	0.325 L	85 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP2000 P270 K04 02	0.373 L	102 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP3000 P270 K04 02	0.475 L	138 mm	60.4mm	60.7mm

**BCAP0650 P270**  
**BCAP1200 P270**  
**BCAP1500 P270**  
**BCAP2000 P270**  
**BCAP3000 P270**



**DIMENSIONS (cont.)**



Part Number	Volume	L (±0.3mm)	D <sub>1</sub> (±0.2mm)	D <sub>2</sub> (±0.7mm)	D <sub>3</sub> (±0.05mm)
BCAP0650 P270 K05 02	0.15 L	51.5 mm (±0.5mm)	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP1200 P270 K05 02	0.233 L	74 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP1500 P270 K05 02	0.264 L	85 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP2000 P270 K05 02	0.312 L	102 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP3000 P270 K05 02	0.414 L	138 mm	60.4mm	60.7mm	14mm

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

**Maxwell Technologies, Inc.**  
**Worldwide Headquarters**  
 9244 Balboa Avenue  
 San Diego, CA 92123  
 USA  
 Tel: +1 858 503 3300  
 US Free Call: +1 877 511 4324  
 Fax: +1 858 503 3301

**Maxwell Technologies SA**  
 CH-1728 Rossens  
 Switzerland  
 Tel: +41 (0)26 411 85 00  
 Fax: +41 (0)26 411 85 05

**Maxwell Technologies, GmbH**  
 Brucker Strasse 21  
 D-82205 Gilching  
 Germany  
 T: +49 (0)8105 24 16 10  
 F: +49 (0)8105 24 16 19

**Maxwell Technologies, Inc.**  
**Shanghai Representative Office**  
 #13, CR Times Square  
 500 Zhangyang Road, Pudong  
 Shanghai 200122, P.R. China  
 Tel: +86 21 5836 5733  
 Fax: +86 21 5836 5620

Online: [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) • Email: [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com)

# Bibliografía

- [1] Design considerations for ultracapacitors. Technical report, Maxwell Technologies, 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123, USA.
- [2] Technical guide of electrical double layer capacitor. Technical report, muRata.
- [3] Top 10 reasons for using ultracapacitors in your system designs. Technical report, Maxwell Technologies, 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123, USA.
- [4] Ultracapacitors and their applications. [www.all-papers.blogspot.com](http://www.all-papers.blogspot.com).
- [5] El mundo sustentable de las energías renovables. White paper, Finder Componentes LTDA, San Isidro, Buenos Aires Argentina, Septiembre 2011.
- [6] J. Agredano D., G. Munguía, J. M. Huacruz V., y R. Flores H. Especificación técnica para sistemas fotovoltaicos de iluminación doméstica rural. Technical report, UENC-IIE, Cuernavaca, Morelos, Junio 1998.
- [7] M. I. Arteaga Orozco. Control no lineal de convertidores conmutados cc/cc: Análisis de prestaciones y verificación experimental. Master's thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Noviembre 2006.
- [8] S. Atcitty. *Electrochemical Capacitor Characterization for Electric Utility Applications*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia U.S.A, Noviembre 2006.
- [9] P. P. Barker. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, 1:316–320, Julio 2002.
- [10] P. Barrade. Series connection of supercapacitors: Comparative study of solutions for the active equalization of the voltages. *Ben Gurion University*, pages 1–6, 2011.
- [11] D. U. Campos Delgado. Experimentos en teoría de control: Convertidores cd-cd. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.

- [12] Y. cheng Zhang, L. Wei, X. Shen, y H. Liang. Study of supercapacitor in the application of power electronics. *WSEAS*, 8(6):508–517, Junio 2009.
- [13] Z. Chlodnicki, W. Koczara, y N. Al-Khayat. Hybrid ups based on supercapacitor energy storage and adjustable speed generator. *Power Quality and Utilization*, XIV(1):13–24, 2008.
- [14] E. F. Cuevas López. Control de velocidad de un motor de cd a través de un arreglo en cascada sepic-puente completo alimentado con un panel solar. Master's thesis, UTM, Huajuapán de León, Oaxaca, Junio 2010.
- [15] Y. Diab, P. Venet, y G. Rojat. Comparison of the different circuits used for balancing the voltage of supercapacitors: Studying performance and lifetime of supercapacitors. *ESSCAP*, pages 1–6, 2006.
- [16] H. Douglas y P. Pillay. Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles. In IEEE, editor, *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*, pages 1599–1604, Noviembre 2005.
- [17] EPCOS. *UltraCap Double Layer Capacitors*, 2001. Product Profile 2001.
- [18] C. A. Estrada Gasca, C. A. Arancibia Bulnes, R. Dorantes Rodríguez, J. Islas Samperio, y A. Muhlia Velásquez. Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México. Anexo 6, Universidad Nacional Autónoma de México, Mayo 2005.
- [19] M. García Esteban. *Estrategias de Control para Sistemas Bilineales Aplicados a los Convertidores de Potencia DC-DC*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Marzo 2000.
- [20] L. Gauchía Babe. *Nonlinear Dynamic Per-unit Models for Electrochemical Energy Systems. Application to a Hardware-in-the-loop Hybrid Simulation*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, Diciembre 2009.
- [21] J. Gideon Moses. Nanocomposite electrodes for electrochemical supercapacitors. Master's thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, Enero 2009.
- [22] I. Gil Mera. Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microredes eléctricas. Master's thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, Julio 2010.
- [23] M. A. Guerrero Martínez, E. Romero Cadaval, F. Barrero González, M. I. Milanés Montero, y E. González Romera. Supercapacitors: Alternative energy storage systems. *Power Electronics & Electric Systems*, 85:188–195, October 2009.

- [24] M. A. Guerrero Martínez, E. Romero Cadaval, M. I. Milanés Montero, V. M. Miñambres Marcos, y E. González Barrero. Aplicación de sistemas de almacenamiento de energía con supercondensadores en plantas de generación fotovoltaica. *Power Electrical & Electronic Systems*, Julio 2009.
- [25] L. Hagvaag Seim. Modeling, control and experimental testing of a supercapacitor/battery hybrid system - passive and semi-active topologies. Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Diciembre 2011.
- [26] M. S. Halper y J. C. Ellenbogen. Supercapacitors: A brief overview. Technical report, MITRE, McLean, Virginia, Marzo 2006.
- [27] D. W. Hart. *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall, Nunñez de Balboa, 120, 28006 Madrid, 1ra. edition, 2001.
- [28] H. Hoimoja, D. Vinnikov, y R. Strzelecki. Application of ultracapacitors in low-voltage power supply systems of light rail vehicles. *OJEEE*, 1(1):30–34, 2007.
- [29] P. Hurley. *Solar Supercapacitor Applications*, volume 1. Good Idea Creative Services, 324 Minister Hill Road, Wheelock VT 05851 USA, 2009.
- [30] I. I. Juárez Hernández. Simulación de un sistema de recuperación de energía basado en supercapacitores con aplicación en tracción eléctrica. Master's thesis, Instituto Politécnico Nacional, D. F., Julio 2011.
- [31] K. Kawashima, T. Uchida, y Y. Hori. Development of a novel ultracapacitor electric vehicle and methods to cope with voltage variation. *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009*, pages 724–729, Septiembre 2009.
- [32] P. Kumaran Kozhiparambil. Development of a supercapacitor based surge resistant uninterruptible power supply. Master's thesis, The University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2011.
- [33] Inc. LedEngin. High luminous efficacy cool white led emitter lz4-00cw10, Diciembre 2009. Datasheet.
- [34] O. A. López Esquivel. Sistema de respaldo eléctrico empleando supercapacitores, con capacidad de filtro activo de corriente. Master's thesis, Universidad Autónoma de, San Luis Potosí, Mayo 2005.
- [35] A. Loría y H. Nijmeijer. Passivity based control. *Control Systems, Robotics and Automation*, XIII.

- [36] A. Marcus Namisnyk. A survey of electrochemical supercapacitor technology. Master's thesis, University of Technology, Sydney, Sydney, Australia, Junio 2003.
- [37] Maxwell Technologies, 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123, USA. *Product Guide Boostcap Ultracapacitors*.
- [38] J. M. Miller. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*, volume 45. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage, Herts, SG1 2AY, United Kingdom, 2008.
- [39] J. A. Olmos López, G. Guerrero Ramírez, F. V. Canales A., y M. A. Oliver Salazar. Control basado en pasividad para convertidores elevadores cfp en paralelo. *Congreso Anual 2010 de la Asociación de México de Control Automático*, 2010.
- [40] L. M. Palma Fanjul. Some new applications of supercapacitors in power electronic systems. Master's thesis, Texas A&M University, Agosto 2003.
- [41] A. Rancaño Fernandez. Study on storage energy devices: Supercapacitors, a green alternative. Master's thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Noviembre 2011.
- [42] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, y Y. Liu. Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 89(12):1744 – 1756, Diciembre 2001.
- [43] A. Rufer y P. Barrade. A supercapacitor-based energy storage system for elevators with soft commutated interface. *Industry Applications*, 38(5):1151–1159, Septiembre/Octubre 2002.
- [44] K. Sahay y Dwivedi B. Supercapacitors energy storage system for power quality improvement: An overview. *Journal of Electrical Systems*, 5(3), Septiembre 2009.
- [45] A. Schneuwly y R. Gallay. Properties and applications of supercapacitors from the state-of-art to future trends. *Garmanage*, pages 1–10, 2000.
- [46] P. Sharma y T. S. Bhatti. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 51(12):2901–2912, Diciembre 2010.
- [47] L. Shi y M. L. Crow. Comparison of ultracapacitor electric circuit models. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1–6, Julio 2008.
- [48] Solarex. Photovoltaic modules sx-40, sx-50, 1999. Datasheet.



- [49] M. Spinetti Rivera. *Síntesis de Controladores para Convertidores de Potencia Utilizando Realimentación de la Salida Pasiva de la Dinámica Exacta del Error de Seguimiento: Teoría y Práctica*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Enero 2010.
- [50] A. Stienecker. *An ultracapacitor-Battery Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles*. Dissertation, The University of Toledo, Agosto 2005.
- [51] C. Tammineedi. Modeling battery-ultracapacitor hybrid systems for solar and wind applications. Master's thesis, The Pennsylvania State University, Mayo 2011.
- [52] Tecate Group, 7520 Mission Valley Road, San Diego, California, USA. *PowerBurst Product Guide*.
- [53] Maxwell Technologies. Charging of ultracapacitors. Application note, Maxwell Technologies, Diciembre 2005.
- [54] E. E. Tihomir C. y E. E. Zeljko J. Supercapacitors in power converter dc link: A short overview of design and application issues. *MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention*, pages 130–135, Mayo 2011.
- [55] F. F. Valderrama, H. Moreno C., y H. Manuel Vega. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc-dc tipo boost. *INGENIUM*, 12(24):44–55, Agosto-Septiembre 2011.
- [56] A. M. van Voorden, L. M. Ramirez Elizondo, G. C. Paap, J. Verboomen, y L. van der Sluis. The application of super capacitors to relieve battery-storage systems in autonomous renewable energy systems. In IEEE, editor, *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pages 479–484, Lausanne, Julio 2007.
- [57] P. A. Velarde Rueda. Diseño e implementación de un control no lineal de convertidores conmutados dc-dc, utilizando técnicas de deslizamiento; y la viabilidad del uso de la pasividad y linealización entrada-salida por realimentación. Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Noviembre 2010.
- [58] J. A. Villa García. Control no lineal de convertidores eléctricos de potencia. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Agosto 2005.
- [59] M. S. W. Chan, K. T. Chau, y C. C. Chan. Effective charging method for ultracapacitors. *Asian Electric Vehicles*, 3(2):771–776, Diciembre 2005.
- [60] L. Zubieta y R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1):199–205, Enero-Febrero 2000.