



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**SIMULACIÓN DE UN CIRCUITO DE POTENCIA PARA
OBTENER UN VOLTAJE CONSTANTE DE UN BANCO DE
SUPERCAPACITORES**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

JONATHAN JOSIPP GUACHAMÍN JIMÉNEZ

DIRECTOR: ING. GONZALO EFRAÍN GUERRÓN LÓPEZ

Quito, marzo 2017

© Universidad Tecnológica Equinoccial 2017.
Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1716242191
APELLIDO Y NOMBRES:	Guachamín Jiménez Jonathan Josipp
DIRECCIÓN:	Balcón del Valle
EMAIL:	jonx_guach@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	2604324
TELÉFONO MOVIL:	0994810579

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Simulación de un circuito de potencia para obtener un voltaje constante de un banco de supercapacitores
AUTOR O AUTORES:	Jonathan Josipp Guachamín Jiménez
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. Gonzalo Efraín Guerrón López
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Mecatrónico
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	En este documento se presenta el diseño y simulación de un circuito de potencia, la función principal del circuito es mantener constantes los parámetros de voltaje de (48V) y potencia de (1kW) durante una hora utilizados para el funcionamiento de un motor DC de imanes permanentes con un respaldo de la energía de un banco de supercapacitores. El elemento más importante en este circuito se denomina convertidor DC-DC bidireccional, a partir del

	<p>cual se diseñan y eligen los componentes más apropiados para que cumplan con los requisitos propuestos. Otro elemento escogido de electrónica de potencia es el mosfet de canal N, entre los diferentes tipos de conmutadores debido a que sus características se ajustan a los parámetros establecidos. Se especifica el tipo y valor de cada uno de los componentes, de igual manera se proporcionan las ecuaciones y métodos utilizados para llegar a obtener los valores de salida. En este sistema, se propone un control mediante PID, el cual será capaz de controlar el PWM para el correcto funcionamiento de los conmutadores de potencia. También se realizaron las pruebas correspondientes para la validación del circuito en relación a los resultados obtenidos.</p>
PALABRAS CLAVES:	Supercapacitor; bidireccional; motor; mosfet; PID.
ABSTRACT:	<p>In this document the design and simulation of a power circuit are presented. The main function of the circuit is to maintain constant the voltage (48V) and power (1kW) parameters for one hour used for the operation of a permanent magnet DC motor with a backup of the energy of a supercapacitors module. The most important element is called bidirectional DC-DC converter, from which the most appropriate components are designed and chosen to meet the proposed requirements. Another chosen element of the power electronics is the N-channel mosfet, among the different types of switches because their characteristics conform to the established parameters. It specifies the type and value of each one of the components, as well as the equations and methods used to get the output values. In this system, a PID is proposed, which will be able to control the PWM for the correct operation of the power switches. The corresponding tests were also carried out for the validation of the circuit in relation to the results obtained.</p>
KEYWORDS	Supercapacitor; bidireccional; motor; mosfet; PID.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f:  _____

Jonathan Josipp Guachamín Jiménez

C.I. 1716242191

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **GUACHAMÍN JIMÉNEZ JONATHAN JOSIPP**, CI 1716242191 autor del proyecto titulado: **Simulación de un circuito de potencia para obtener un voltaje constante de un banco de supercapacitores** previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecatrónico** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 30 de marzo de 2017

f:  _____

Jonathan Josipp Guachamín Jiménez

C.I. 1716242191

DECLARACIÓN

Yo **GUACHAMÍN JIMÉNEZ JONATHAN JOSIPP**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Jonathan Josipp Guachamín Jiménez

C.I. 1716242191

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Simulación de un circuito de potencia para obtener un voltaje constante de un banco de supercapacitores**", que, para aspirar al título de **Ingeniero Mecatrónico** fue desarrollado por **Jonathan Josipp Guachamín Jiménez**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Gonzalo Efraín Guerrón López

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 0401241245

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	6
1.2. SUPERCAPACITORES	6
1.3. TRANSISTORES DE POTENCIA	10
1.4. COMPARACIÓN DE CONMUTADORES.....	11
1.5. MOTORES DC.....	12
1.6. Convertidores DC-DC	13
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO.....	11
2.1. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS.....	12
2.2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR DC-DC.....	13
2.2.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA INDUCTANCIA	15
2.2.2. DIMENSIONAMIENTO DEL CAPACITOR	15
2.3. COMPONENTES DEL CIRCUITO	16
2.4. SIMULACIÓN.....	17
2.4.1. CIRCUITO DE CONTROL.....	19
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
BIBLIOGRAFÍA	29
ANEXOS	32

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Comparación de conmutadores (Velocidad de conmutación).	12
Tabla 2. Valores del circuito equivalente para motor DC.	12
Tabla 3. Parámetros del motor DC.	13
Tabla 4. Valores del cálculo de la inductancia.	15
Tabla 5. Valores del cálculo del capacitor.	16
Tabla 6. Componentes del circuito.	16
Tabla 7. Resultados obtenidos.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Clasificación y tipos de supercapacitores.....	7
Figura 2. Conexión paralelo-serie.	8
Figura 3. Proceso de carga de supercapacitores.	9
Figura 4. Proceso de descarga de supercapacitores.	9
Figura 5. Tiempos de conmutación en un transistor.....	10
Figura 6. Comparación de conmutadores (Voltaje y Corriente).....	11
Figura 7. Circuito equivalente del motor DC.....	12
Figura 8. Convertidor DC-DC bidireccional.	14
Figura 9. Diagrama de bloques del sistema.	14
Figura 10. Esquema del circuito sin convertidor DC-DC.	17
Figura 11. Voltaje de salida sin convertidor DC-DC.	17
Figura 12. Potencia de salida sin convertidor DC-DC.	18
Figura 13. Esquema del sistema.....	19
Figura 14. Esquema del circuito con control PID.....	20
Figura 15. Señal de control PWM.	21
Figura 16. Bloque de control PID.	21
Figura 17. Voltaje de salida con control PID aplicado.	21
Figura 18. Voltaje de salida al terminar una hora.	23
Figura 19. Picos de voltaje de salida.....	23
Figura 20. Corriente de salida al terminar una hora.	24
Figura 21. Picos de corriente de salida.	24
Figura 22. Potencia de salida al terminar una hora.	25
Figura 23. Picos de potencia de salida.	25

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1. Datos técnicos del módulo de supercapacitores.	33
Anexo 2. Datos técnicos del MOSFET.....	34
Anexo 3. Datos técnicos del diodo.....	35

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño y simulación de un circuito de potencia, la función principal del circuito es mantener constantes los parámetros de voltaje de (48V) y potencia de (1kW) durante una hora utilizados para el funcionamiento de un motor DC de imanes permanentes con un respaldo de la energía de un banco de supercapacitores. El elemento más importante en este circuito se denomina convertidor DC-DC bidireccional, a partir del cual se diseñan y eligen los componentes más apropiados para que cumplan con los requisitos propuestos. Otro elemento escogido de electrónica de potencia es el mosfet de canal N, entre los diferentes tipos de conmutadores debido a que sus características se ajustan a los parámetros establecidos. Se especifica el tipo y valor de cada uno de los componentes, de igual manera se proporcionan las ecuaciones y métodos utilizados para llegar a obtener los valores de salida. En este sistema, se propone un control mediante PID, el cual será capaz de controlar el PWM para el correcto funcionamiento de los conmutadores de potencia. También se realizaron las pruebas correspondientes para la validación del circuito en relación a los resultados obtenidos.

Palabras clave: supercapacitor; bidireccional; motor; mosfet; PID.

ABSTRACT

In this document the design and simulation of a power circuit are presented. The main function of the circuit is to maintain constant the voltage (48V) and power (1kW) parameters for one hour used for the operation of a permanent magnet DC motor with a backup of the energy of a supercapacitors module. The most important element is called bidirectional DC-DC converter, from which the most appropriate components are designed and chosen to meet the proposed requirements. Another chosen element of the power electronics is the N-channel mosfet, among the different types of switches because their characteristics conform to the established parameters. It specifies the type and value of each one of the components, as well as the equations and methods used to get the output values. In this system, a PID is proposed, which will be able to control the PWM for the correct operation of the power switches. The corresponding tests were also carried out for the validation of the circuit in relation to the results obtained.

Keywords: supercapacitor; bidirectional; motor; mosfet; PID.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que la demanda energética aumenta y se buscan nuevas tecnologías y dispositivos para generar y almacenar energía de la manera más eficiente, se desarrollan e implementan diferentes tipos de sistemas y componentes que sustituyen a los que se emplean actualmente para obtener un mejor aprovechamiento energético, generando aplicaciones en varios campos.

Debido a la necesidad de almacenar energía se han desarrollado diferentes dispositivos para hacerlo, de forma directa (supercapacitores) o indirecta, en los últimos años el uso de supercapacitores ha tenido gran importancia debido a su mayor capacidad de almacenamiento en comparación con un capacitor común, además de soportar altos valores de corriente, presentan una gran ventaja ante las baterías en cuanto se refiere a su vida útil y tiempo de carga, debido a que, es capaz de gestionar la carga rápidamente siendo esta una de sus ventajas más notables ante otros componentes. (Hernández I. I., 2011)

Actualmente, una aplicación de los supercapacitores es en el transporte terrestre y marítimo, dada la necesidad de reemplazar los combustibles fósiles (Segura, 2016). El uso de combustibles fósiles tiene un gran impacto ambiental ya que su uso en el transporte genera gases de efecto invernadero y otras sustancias que contaminan notablemente el entorno, es por esta razón que el desarrollo de nuevas fuentes renovables de energía es tan importante (Celi Orrala, 2015).

Debido a que la mayor cantidad de energía producida por combustibles fósiles está destinada al sector del transporte, es de gran importancia buscar nuevas fuentes renovables de energías para un cambio de matriz energética como es el caso de Ecuador, donde se han realizado nuevos proyectos para la generación de energía renovable como hidroeléctricas y generadores eólicos, con estos proyectos se puede disminuir la dependencia de la producción de combustibles fósiles en grandes cantidades (Estratégicos, 2013).

En vehículos eléctricos o híbridos se aprovechan los excedentes de energía producidos y son utilizados posteriormente, generando un mejor control en el uso energético y optimizando el uso del resto de componentes del sistema, dando como resultado una mejora en el tiempo de vida del sistema eléctrico de estos vehículos gracias al almacenamiento de energía mediante supercapacitores. (Hernández, 2014).

El objetivo general es diseñar un circuito de potencia, que permita obtener un voltaje constante de 48 voltios y 1 kW durante una hora de trabajo, el cual será utilizado para propulsar un motor DC de imanes permanentes. En base al objetivo general, los objetivos específicos son: dimensionar y seleccionar cada componente que conforme el circuito de potencia; simular el sistema

con los respectivos componentes seleccionados y validar que el circuito cumple con los valores de voltaje, corriente y potencia de salida que alimentan al motor DC.

1.1. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El suministro de energía proviene principalmente de fuentes como combustibles fósiles y nucleares y también se usan fuentes de energía renovable como hidroeléctricas, solar, eólica, geotérmica, biomasa y biocombustibles. (Kularatna, 2015).

Los dispositivos usados para almacenar energía pueden clasificarse según la forma de funcionamiento en dos tipos: almacenamiento directo e indirecto los cuales se basan en diferentes principios para almacenar energía. El almacenamiento indirecto se lo puede realizar con reservas artificiales y naturales (Fanjul, 2003).

Los dispositivos de almacenamiento directo pueden ser de dos tipos, eléctrico y magnético. Para el tipo eléctrico se usan supercapacitores los cuales son capaces de almacenar los picos de energía que se producen en un sistema y la proveen durante una interrupción de corta duración, al combinarlos con otras fuentes de energía se puede extender la vida útil de la fuente principal. En cuanto al tipo magnético, se lo hace mediante superconductores magnéticos de almacenamiento de energía, en estos dispositivos la energía es almacenada usando el campo de una bobina magnética.

1.2. SUPERCAPACITORES

El supercapacitor es un dispositivo eléctrico el cual se utiliza en procesos de almacenamiento de energía, su principal mecanismo para hacerlo se basa en la carga de una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito de materiales de electrodo de alta superficie. (Martínez Peñalver, Marcos, Lago, Quintáns, & Iglesias, 2014)

El principio de funcionamiento de los supercapacitores es el almacenamiento de energía por medio de la pseudocapacitancia, se da lugar a la oxidación o reducción causadas por la transferencia de electrones entre un electrolito y la superficie del electrodo lo cual genera corrientes conocidas como corrientes faradaicas, dicho proceso se basa en la ley de Faraday (Velasco, 2011). Para poder producir estas corrientes faradaicas y dar lugar a la pseudocapacitancia se lo puede hacer mediante la adsorción de iones, reacciones redox y la intercalación-desintercalación. (Porto, 2010) .

La principal diferencia con un capacitor común se encuentra en los altos valores de capacitancia que pueden alcanzar los supercapacitores, mientras los capacitores comunes trabajan en escalas iguales o menores a los microfaradios, los supercapacitores pueden llegar a capacitancias de cientos o miles de faradios, a cambio, los voltajes son más bajos, por lo general

estos voltajes se encuentran en rangos de decenas de voltios. (San Martín, Zamora, San Martín, Aperribay, & Eguía, 2011), (Maxwell, 2014).

Actualmente se trabaja en sistemas híbridos en los cuales se utilizan los picos de energía para almacenarlos y aprovecharlos de la mejor manera, gracias al uso de este tipo de sistemas en los que se trabaja con pilas de combustible, baterías y supercapacitores se obtiene un aumento en la eficiencia global de un sistema, mejorando así el funcionamiento y vida útil del resto de componentes (Feroldi, Serra, & Riera, 2006), (Celi Orrala, 2015).

Las principales características son los cortos tiempos de carga y sus altos valores de capacitancia que pueden alcanzar, es por estas razones que se los utiliza como un método de almacenamiento de energía en varias aplicaciones como en los vehículos eléctricos en los cuales se pueden utilizar los picos de energía que se generan el momento de frenar, para almacenarlos con un banco de supercapacitores y usarlos posteriormente para cargar la batería, otros usos pueden ser en el suministro de energía a dispositivos portátiles, en plantas fotovoltaicas, se los puede usar como sistemas híbridos con otras fuentes de energía. El campo en el que más ha ganado importancia es en el transporte ya sea terrestre, aplicándolo en automóviles híbridos y eléctricos, como en el transporte marítimo y su aplicación en lanchas eléctricas.

Los supercapacitores o supercondensadores, se pueden clasificar en: capacitores electroquímicos de doble capa (EDLCs), pseudocapacitores y capacitores híbridos (Figura 1), (Manzo, 2014).

Esta clasificación se basa en los materiales con los que se fabrican los electrodos, los de doble capa electroquímica usan derivados del carbón, los pseudocapacitores utilizan óxidos de metal y los capacitores híbridos utilizan una integración de los dos anteriores.

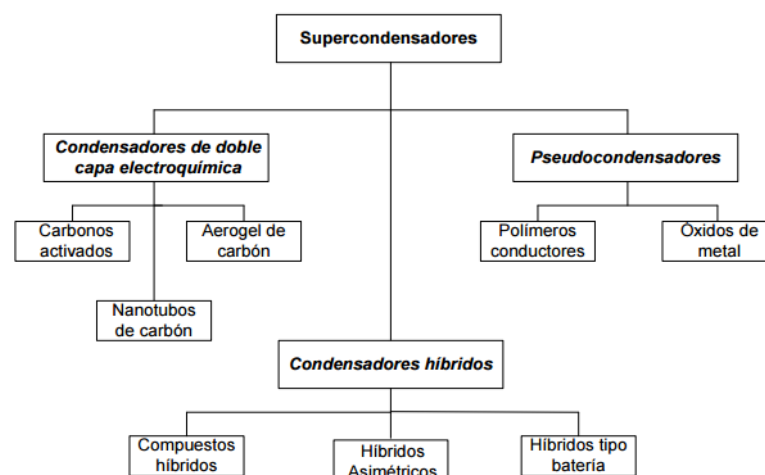


Figura 1. Clasificación y tipos de supercapacitores. (Hernández, 2014)

En la mayoría de los casos los sistemas requieren valores de voltajes que son mayores a una sola celda, la solución en estos casos es formar bancos de supercapacitores los cuales serán conformados por más celdas conectadas en serie o paralelo para alcanzar los valores deseados. La energía que se puede extraer de un banco de supercapacitores está dada por la ecuación 1.

$$\Delta E_{SC} = \frac{1}{2} * C_{SC} * (v_i - v_f)^2 \quad [1]$$

Donde:

C_{SC} : capacidad del supercapacitor [$\frac{A*s}{V}$]

v_i : tensión inicial [V]

v_f : tensión final [V]

ΔE_{SC} : energía obtenida [W.s]

Los tipos de conexiones para conformar un banco de supercapacitores pueden ser en serie para mayor voltaje, paralelo para mayor capacitancia o una combinación entre los dos, la forma de conectarlos depende de la aplicación que se vaya a dar ya que se puede aumentar el voltaje o la capacitancia según la forma de conexión.

El principal objetivo de la conexión en serie de los supercapacitores es aumentar el voltaje que se obtiene a la salida del banco ya que este es igual a la suma de voltajes de cada celda, la capacitancia total se puede calcular mediante la ecuación 2.

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad [2]$$

En la conexión en paralelo se obtienen valores más altos de capacitancias, se suman las capacitancias de cada celda para obtener la capacitancia total, pero al realizar esta conexión el voltaje es igual al de una sola celda.

Es posible realizar la conexión combinada de serie y paralelo para obtener los valores de capacitancia y voltaje requeridos, un ejemplo se puede ver en la Figura 2.

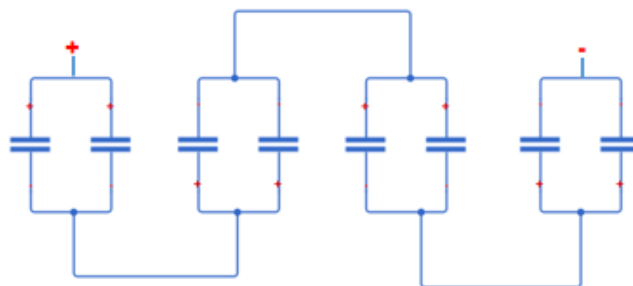


Figura 2. Conexión paralelo-serie.

El proceso de carga de un supercapacitor es igual al de un capacitor común. Los tiempos de carga y descarga se encuentran en función de τ , esta es la constante de tiempo del circuito. Para este proceso es necesario un tiempo de carga el cual va a depender de la capacitancia del mismo y la impedancia que se va a utilizar. El comportamiento de la carga se realiza hasta que el supercapacitor alcanza el voltaje aplicado como se muestra en la Figura 3, el valor de voltaje de carga es obtenido mediante la ecuación 3 (Gian, 2006).

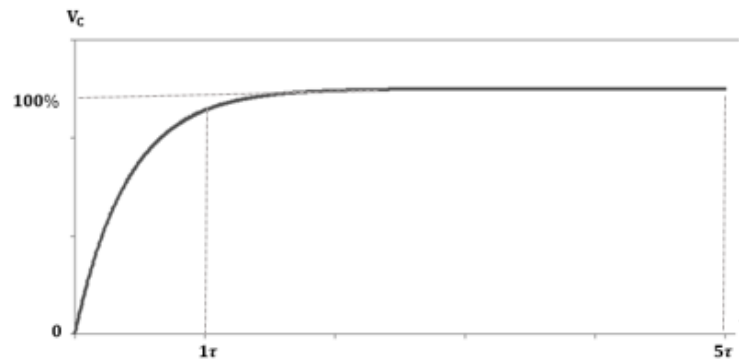


Figura 3. Proceso de carga de supercapacitores.

$$V_{(t)} = V_f(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad [3]$$

El tiempo de descarga al igual que el tiempo de carga, se da de forma exponencial (Figura 4) y su principal característica es que los tiempos de carga y descarga de los supercapacitores son cortos (minutos o segundos) en comparación con otras fuentes de energía como las baterías que llegan a tardar horas, (Mera, 2009). El valor de voltaje de descarga es obtenido mediante la ecuación 4.

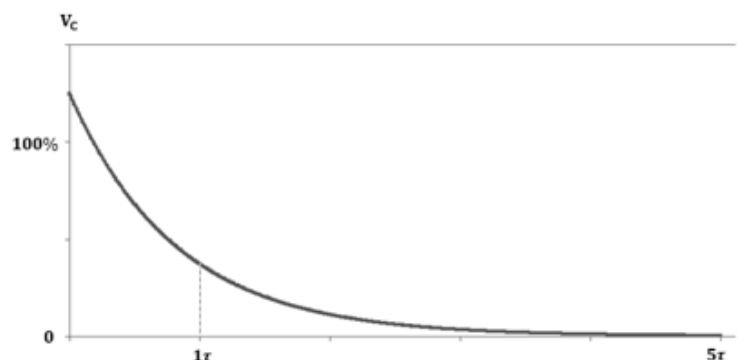


Figura 4. Proceso de descarga de supercapacitores.

$$V_{(t)} = V_i * e^{-\frac{t}{RC}} \quad [4]$$

Las propiedades y desarrollo de los supercapacitores han mejorado notablemente en los últimos años, utilizándolos para el almacenamiento de energía junto con otros componentes para la alimentación de un sistema. Las características que predominan son las siguientes: densidad de potencia alta (1-10 kW/Kg), rendimiento eléctrico alto (95-99%), no necesitan

mantenimiento, no poseen elementos tóxicos y tienen resistencia a condiciones adversas de temperatura (Mera, 2009).

1.3. TRANSISTORES DE POTENCIA

Para el diseño del circuito, se necesita un tipo de transistor de potencia adecuado para obtener la salida de voltaje requerida. Los transistores como los BJT, MOSFET, GTO e IGBT pueden encenderse o apagarse mediante señales de control permitiendo el flujo de corriente en una dirección cuando se encuentra encendido e impidiendo su flujo cuando se encuentra apagado.

Es importante tener en cuenta que el transistor requiere de tiempos de encendido y de apagado debido a sus capacitancias internas.

Al encender el transistor después de un tiempo de estar apagado se obtiene un tiempo de retraso $t_{d\ on}$ en el cual se da un aumento de corriente, a continuación, se tiene un tiempo en el cual la corriente se eleva t_r , con la suma de los dos tiempos, se obtiene el tiempo de activación. Para la desactivación de igual manera, se produce un tiempo de retraso de desconexión $t_{d\ off}$ y un tiempo de caída de corriente t_f como se observa en la Figura 5, (Rashid, 2005).

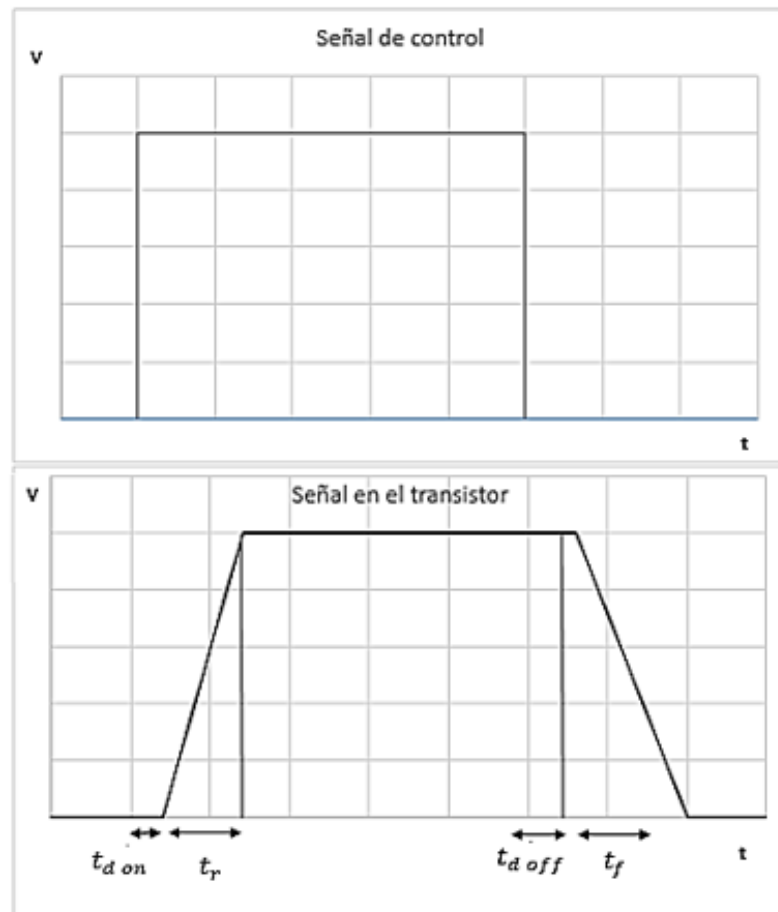


Figura 5. Tiempos de conmutación en un transistor.

1.4. COMPARACIÓN DE CONMUTADORES

Existen cierto tipo conmutadores de potencia que se diferencian en algunas características como sus límites de potencia y velocidad de conmutación, es óptimo elegir correctamente el tipo de conmutador que se utilizará en el diseño, es posible que ciertos dispositivos tengan mejores características debido al avance tecnológico, una comparación de forma general se presenta en la Figura 6 en la cual se consideran los valores de corriente y voltaje que soporta cada conmutador. (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009)

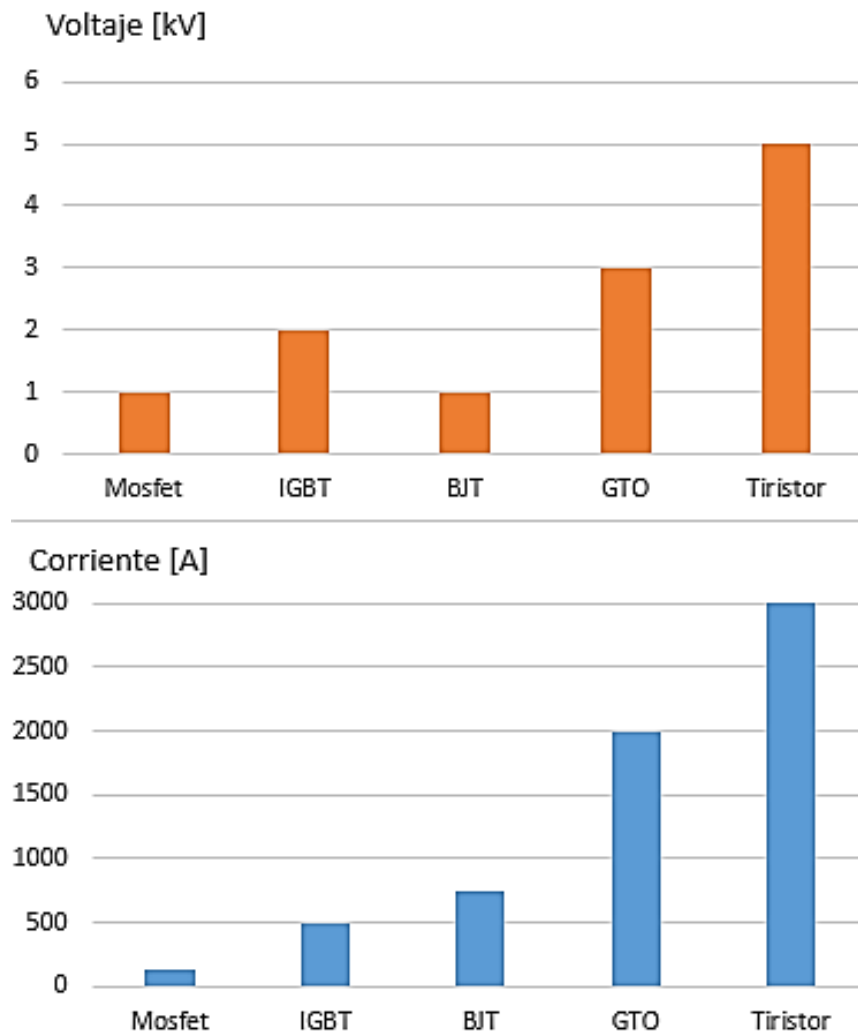


Figura 6. Comparación de conmutadores (Voltaje y Corriente).

En la Tabla 1 se presenta una comparación de los conmutadores mencionados, esta se realiza en función a la velocidad de conmutación y la frecuencia que puede alcanzar cada uno, (Rashid, 2005), (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009).

Con los parámetros presentados en la Figura 6 y en la Tabla 1, se puede seleccionar el conmutador que se ajuste a las condiciones de trabajo tomando en consideración el voltaje, corriente y frecuencia de trabajo.

Tabla I. Comparación de conmutadores (Velocidad de conmutación).

Dispositivo	Velocidad De Conmutación	Frecuencia
MOSFET	Alta	1 MHz
IGBT	Media	100 kHz
BJT	Media	10 kHz
GTO	Baja	1 kHz
TIRISTOR	Baja	500 Hz

1.5. MOTORES DC

Los motores de corriente directa son máquinas que se encargan de transformar energía eléctrica suministrada en energía mecánica, dependiendo del principio de funcionamiento, (Chapman, 2012), tipo de accionamiento y componentes del motor, se encuentran los siguientes tipos de motores DC:

- Motor DC de excitación separada
- Motor DC en derivación
- Motor DC de imanes permanentes
- Motor DC en serie
- Motor DC compuesto

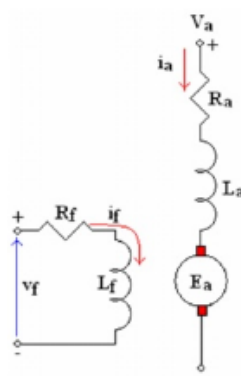


Figura 7. Circuito equivalente del motor DC.
(Benito, 2015)

El motor DC de imanes permanentes, ofrece varias ventajas en comparación con los otros tipos de motores DC en ciertas aplicaciones, estas ventajas son: no requiere un circuito de campo externo, no requiere devanados de compensación, por lo tanto, son más pequeños que los motores en derivación, son menos costoso, más sencillos y con mayor eficiencia que los

motores DC con campos electromagnéticos separados. Este tipo de motor no necesita de un tipo de excitación para su funcionamiento y sus condiciones de trabajo son establecidas por el suministro de energía aplicado (Chapman, 2012).

Se puede representar el comportamiento del motor DC mediante una resistencia R_a , una inductancia L_a y la fuerza electromotriz del motor E_a , (Benito, 2015) de esta manera se presenta el circuito equivalente de un motor DC (Figura 7).

1.6. Convertidores DC-DC

Los convertidores DC-DC son utilizados para regular o adaptar los niveles de voltaje suministrados y convertirlos en voltajes de salida controlados. Los tipos de convertidores básicos son: el convertidor reductor, el cual reduce el voltaje suministrado y tiene aplicaciones en el control de velocidad de motores; el convertidor elevador produce voltajes mayores al voltaje de entrada; el convertidor bidireccional realiza las funciones tanto del convertidor reductor como del elevador (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009).

El convertidor bidireccional alcanza eficiencias superiores al 80% debido a su doble modo de operación de elevador y reductor, la topología más eficaz consta de un puente de tres fases de conmutadores, de esta manera se reduce el factor de rizo en los parámetros de salida del convertidor DC-DC, es decir en el voltaje y corriente de salida (Trieste, Hmam, Olivier, & Bourguet, 2015), (Haibo, Mao, Lu, & Wang, 2009).

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

Para el desarrollo del diseño y simulación del circuito de potencia, se utiliza la metodología en V; inicialmente se define los requerimientos que intervendrán durante todo el proceso, a continuación, se lleva a cabo los diferentes diseños, tomando en consideración la parte mecánica, electrónica y de control.

Se tomarán los parámetros del motor, los cuales servirán para determinar las condiciones de trabajo del mismo.

Para el diseño electrónico se escoge el circuito más adecuado para realizar la función de mantener un voltaje constante en la salida de dicho circuito, además, se realiza el dimensionamiento y selección de los componentes que estarán involucrados.

Se utiliza un control en lazo cerrado en el cual se establece un punto de referencia para poder controlar los parámetros de salida del circuito mediante control PID.

Se realiza la integración de todas las partes para conformar un solo circuito, una vez integrado el sistema se realizan pruebas mediante simulaciones para determinar si se cumplen los requerimientos establecidos, este procedimiento se realizará de manera cíclica hasta obtener los resultados deseados. Para realizar las pruebas se utilizará software de tipo SPICE y un software de simulación electrónica con los cuales se tomarán mediciones de voltaje, corriente y potencia, de esta manera se podrá comprobar el cumplimiento de objetivos.

2.1. PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS

El motor utilizado para el análisis se representa mediante el circuito equivalente de un motor DC, el cual se encuentra conectado a la salida del circuito de potencia, dicho circuito equivalente consta de una resistencia en serie con un inductor y un voltaje que representa a la fuerza contra-electromotriz que presenta el motor. (Meza Weber & Ramos Morales, 2015).

Para la simulación se utilizan los valores de los elementos que conforman el circuito equivalente del motor, los cuales se indican en la Tabla 2, también se muestran parámetros característicos de un motor DC, como sus constantes de par de torsión del motor y de voltaje del motor (k_t , k_e) y el flujo de campo (φ_f), (Morales, 2011).

Tabla 2. Valores del circuito equivalente para motor DC.

R_a	L_a	e	φ_f	k_t	k_e
1.89Ω	0.36mH	7.5V	1.5Wb	0.167	0.288

A partir de los valores que se desean obtener en el motor DC los cuales son voltaje $V_f = 48V$ y energía $\Delta E_{SC} = 1kWh$, considerando que el voltaje inicial $V_i = 0V$, se puede determinar el valor de capacitancia que se necesita en el módulo o banco de supercapacitores a partir de la ecuación 1, el valor de capacitancia requerido por los supercapacitores es igual a $C_{sc} = 3125F$ para obtener un voltaje de $48V$ y una potencia de $1kW$ durante una hora.

$$P = V * I \quad [5]$$

Mediante la ecuación 5 se puede determinar la corriente necesaria para obtener un voltaje de $48V$ y una potencia de $1kW$, esta corriente será igual a $I = 20.83 A$.

A continuación, se utilizan las ecuaciones 6 y 7 para determinar los parámetros de trabajo del motor, los cálculos se realizarán con los valores de la Tabla 2.

$$T_{em} = k_T * I_a \quad [6]$$

$$w_m = \frac{1}{k_E} (V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em}) \quad [7]$$

Donde $k_T = k_t \phi_f$ y $k_E = k_e \phi_f$; k_t es la constante del par de torsión del motor; k_e es la constante de voltaje del motor; T_{em} es el par de torsión electromagnético; V_t es el voltaje suministrado al motor y w_m es la velocidad de estado permanente como función de T_{em} para un V_t determinado. (Benito, 2015). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3, estos valores serán constantes durante todo el análisis.

Tabla 3. Parámetros del motor DC.

k_T	k_E	T_{em}	w_m
$0.25 \frac{Nm}{A}$	$0.0072 Vs$	$5.2 Nm$	$1206.6 rpm$

2.2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR DC-DC

Para poder mantener un voltaje constante a partir del banco de supercapacitores es necesario utilizar un circuito de potencia el cual permita aumentar el voltaje que se tiene como entrada debido a la descarga exponencial del banco de supercapacitores, una opción es utilizar un convertidor DC-DC elevador y la otra opción es el convertidor bidireccional, debido a las ventajas del convertidor DC-DC bidireccional con el cual se obtiene una mayor eficiencia energética, se seleccionará este convertidor (Figura 8), en su comportamiento de elevador mantendrá un voltaje constante en el motor y en modo reductor podría cargar nuevamente el

banco de supercapacitores para usarlo posteriormente sin necesidad de una carga de la fuente principal (Haibo, Mao, Lu, & Wang, 2009).

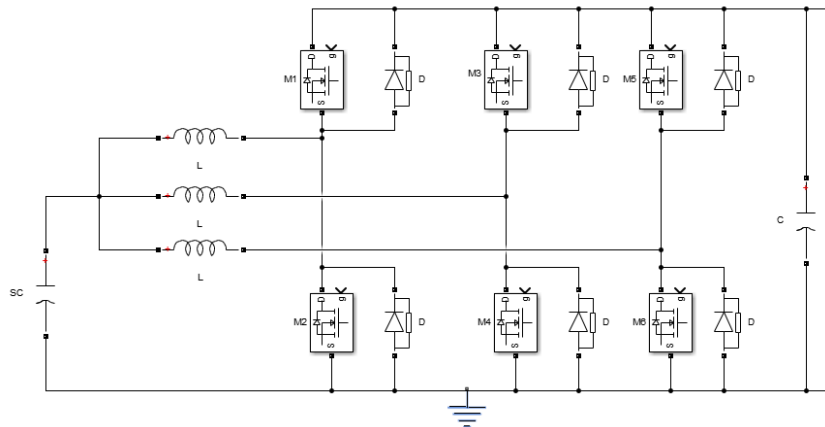


Figura 8. Convertidor DC-DC bidireccional.

El convertidor consta de conmutadores, en este caso se seleccionan MOSFET debido a sus características distintivas ante otros conmutadores que se muestran en la Figura 6 y en la Tabla 1, la ventaja de los MOSFET es que, son capaces de trabajar a altas frecuencias, pero soportan bajas potencias, voltajes y corrientes eléctricas, debido a las condiciones establecidas de salida del circuito, se consideran a estos conmutadores como la mejor opción por la potencia de trabajo relativamente baja (Rashid, 2005).

El resto de componentes que conforman el convertidor son: bobinas, un capacitor y diodos que son colocados en anti-paralelo a los conmutadores mencionados anteriormente, estos componentes son seleccionados para cumplir con los valores de voltaje y potencia que han sido establecidos, también se debe tomar en cuenta el factor de rizo que se obtiene a la salida del circuito, que será máximo de 2% del voltaje y corriente de salida (Dworsky, 2002).

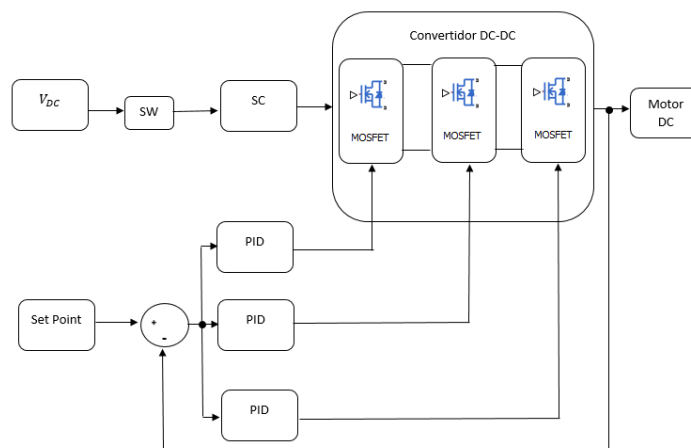


Figura 9. Diagrama de bloques del sistema.

En la Figura 9 se presenta el diagrama de bloques del sistema el cual se conforma de los siguientes componentes: fuente de voltaje DC (V_{DC}), switch (SW), supercapacitores (SC), el convertidor DC-DC bidireccional, motor DC y el sistema de control que se realiza mediante PID con su respectivo set point, para controlar el PWM necesario en la conmutación de MOSFET. (Trieste, Hmam, Olivier, & Bourguet, 2015).

2.2.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA INDUCTANCIA

Para calcular la inductancia L que es usada en el circuito, se necesita relacionar la frecuencia del PWM (F_{PWM}), el ciclo de trabajo (D) y el factor de rizo de corriente (ΔI), mediante la ecuación 8:

$$\Delta I = \frac{V_{DC}}{F_{PWM} * L} D(1 - D) \quad [8]$$

Relacionando todas las variables mencionadas, se puede calcular el valor de la inductancia, (Haibo, Mao, Lu, & Wang, 2009), los valores se representan en la Tabla 4, se utiliza una frecuencia total de $F_{PWM} = 12kHz$ y $D = 0.49$, estos valores de frecuencia son utilizados debido a que se obtienen las condiciones más óptimas y un tiempo de estabilización menor del sistema, deducidos mediante pruebas de simulación.

Tabla 4. Valores del cálculo de la inductancia.

Parámetro	Valor
V_{DC}	48V
F_{PWM}	12kHz
D	0.49
ΔI	0.45A
L	2.2mH

2.2.2. DIMENSIONAMIENTO DEL CAPACITOR

En el cálculo del capacitor C_{DC} también es necesario relacionar algunas variables como la corriente del banco de supercapacitores (I) la cual se toma como corriente máxima, la relación entre la potencia requerida de $1kW$ y el voltaje que se suministra al motor DC (48V) por lo tanto la corriente tendrá un valor de $I = 20.83A$ y un factor de rizo de $\Delta V_{DC} = 0.96V$ que es el 2% del voltaje de salida, para obtener el valor de este capacitor se utiliza la ecuación 9.

$$\Delta V_{DC} = \frac{I}{F_{PWM} * C_{DC}} D(1 - D) \quad [9]$$

En la Tabla 5 se detallan los valores utilizados para el cálculo del capacitor, se puede observar que debido a que el cálculo del capacitor es igual a un valor no comercial, se toma un capacitor comercial igual a $C_{DC} = 0.47mF$ con el cual se realizarán simulaciones posteriormente.

Tabla 5. Valores del cálculo del capacitor.

Parámetro	Valor
I	20.83A
F_{PWM}	12kHz
D	0.49
ΔV_{DC}	0.96V
C_{DC}	0.45mF

2.3. COMPONENTES DEL CIRCUITO

Una vez calculados los componentes principales del convertidor DC-DC bidireccional los cuales son la inductancia y el capacitor, se agregan los elementos que faltan y se lo hace mediante sus características de funcionamiento y capacidad de soportar los valores de voltaje, corriente y potencia.

Tabla 6. Componentes del circuito.

Componente	Tipo/Valor
<i>Supercapacitores</i>	BMOD0083 P048 B01 BMOD0165 P048 BXX
<i>MOSFET</i>	IRFZ44
<i>DIODO</i>	SD41
L	2.2mH
C_{DC}	0.47mF

Se tienen dos opciones para el módulo de supercapacitores de 48V; la primera opción es el módulo BMOD0083 P048 B01 en el cual cada celda tiene una capacitancia de 1500F; la segunda opción es el módulo BMOD0165 P048 BXX en el cual cada celda tiene una capacitancia de 3000F (Anexo 1), el conmutador que se utiliza es un mosfet de potencia canal-N IRFZ44 (Anexo 2) con tiempos de encendido y apagado que se encuentran en unidades de nanosegundos, conectado en anti-paralelo se tienen diodos SD41 (Anexo 3), el valor de capacitancia e inductancia fueron

calculados anteriormente, el tipo y los valores de los componentes que forman parte del convertidor se detallan en la Tabla 6.

2.4. SIMULACIÓN

Para empezar a simular el comportamiento del circuito convertidor DC-DC bidireccional con un motor de imanes permanentes, primero se obtienen datos de voltaje y potencia que se generan el momento de conectar directamente los supercapacitores al motor sin ningún tipo de circuito de control en un tiempo establecido de una hora.

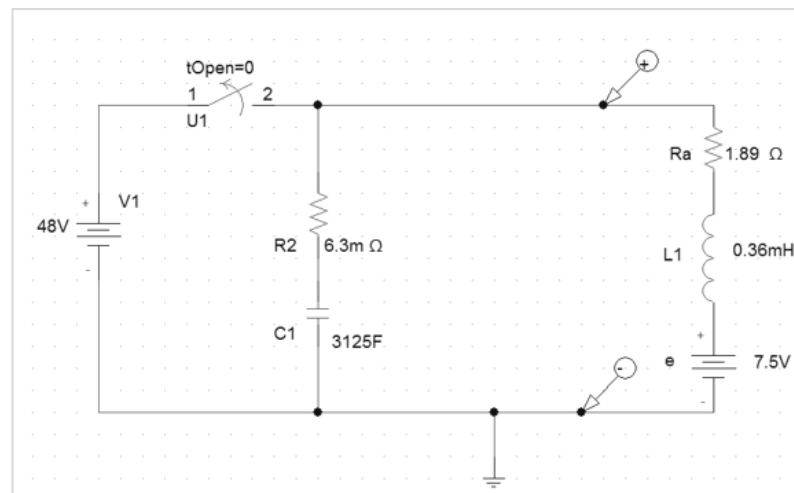


Figura 10. Esquema del circuito sin convertidor DC-DC.

El análisis empieza con el circuito presentado en la Figura 10, se considera que el supercapacitor se encuentra cargado, el supercapacitor es representado por su valor de capacitancia y una resistencia en serie establecida por los datos técnicos del módulo elegido que es igual a $6.3m\Omega$.

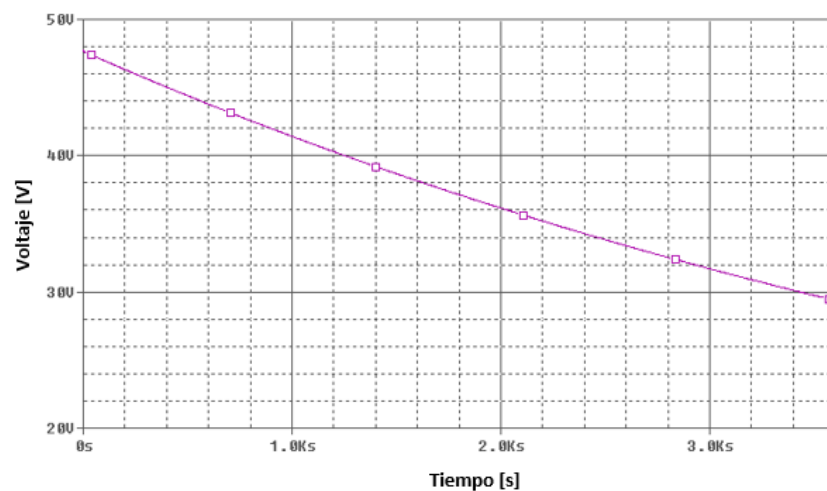


Figura 11. Voltaje de salida sin convertidor DC-DC.

En la Figura 11 se observa el voltaje obtenido del circuito sin convertidor DC-DC durante una hora, el cual disminuye exponencialmente hasta llegar a un

valor de $29.37V$, de igual manera la potencia disminuye desde un valor inicial de $1.0186kW$ hasta $339.9W$ como se indica en la Figura 12.

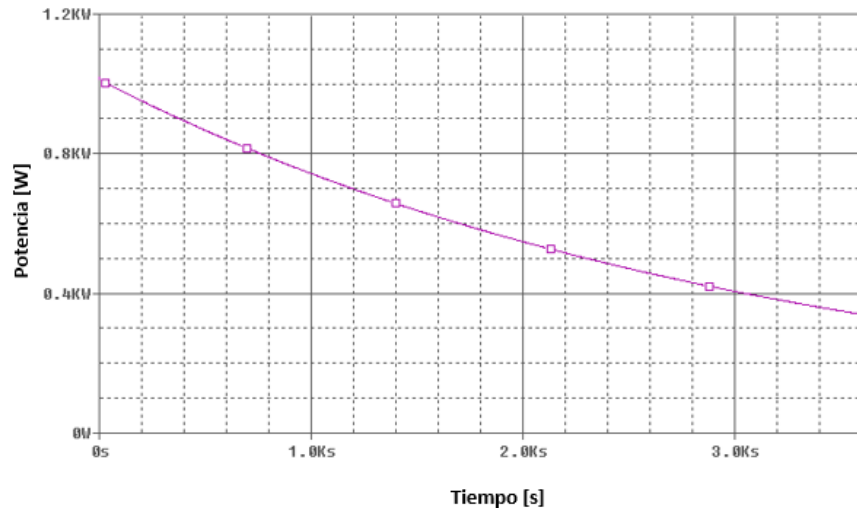


Figura 12. Potencia de salida sin convertidor DC-DC.

Una vez establecidos estos valores al cabo de una hora, se procede a determinar el límite de voltaje que se puede obtener con el convertidor DC-DC mediante la ecuación 10 en la cual se relaciona el voltaje de entrada (V_d), voltaje de salida (V_o) y ciclo de trabajo del PWM (D).

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad [10]$$

Despejando la ecuación 10 se puede determinar el valor mínimo de voltaje de entrada V_d que se necesita para un voltaje de salida determinado, en este caso se tiene un voltaje que representa a la fuerza contra-electromotriz por lo tanto la salida no es de $48V$, para estos cálculos será la suma de estos dos voltajes, es decir $55.5V$, usando un ciclo de trabajo de PWM igual a 0.5, este valor de entrada de voltaje deberá ser de $27.75V$. Por lo tanto, el convertidor podrá mantener sus valores de voltaje y potencia en la salida durante una hora sin necesidad de carga, siempre que el voltaje de entrada sea mayor al voltaje mínimo de $27.75V$.

$$V_d = V_o(1 - D)$$

De la ecuación 10 también se determina el ciclo de trabajo necesario que se debe tener para el control del mosfet mientras el voltaje de entrada disminuye, teniendo en cuenta que el valor máximo de voltaje de salida que se obtiene de un convertidor elevador es al 50% del periodo.

$$D = \frac{V_o - V_d}{V_o}$$

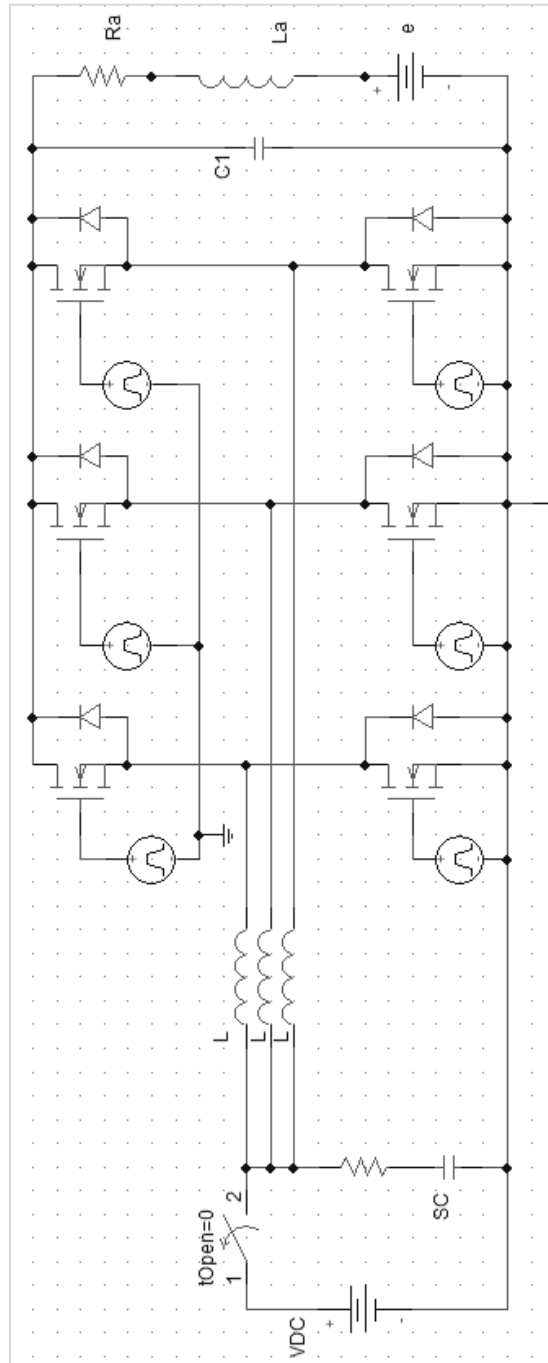


Figura 13. Esquema del sistema.

Una vez obtenidos estos componentes del sistema y las variables que controlarán el mismo, se puede proceder a desarrollar el circuito completo como se muestra en la Figura 13.

2.4.1. CIRCUITO DE CONTROL

Para el desarrollo del circuito de control, se utilizará un control PID como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 8, debido a ventajas de un software diferente, se armará nuevamente el sistema (Figura 14), esta vez incluyendo el control que permitirá alcanzar los parámetros establecidos.

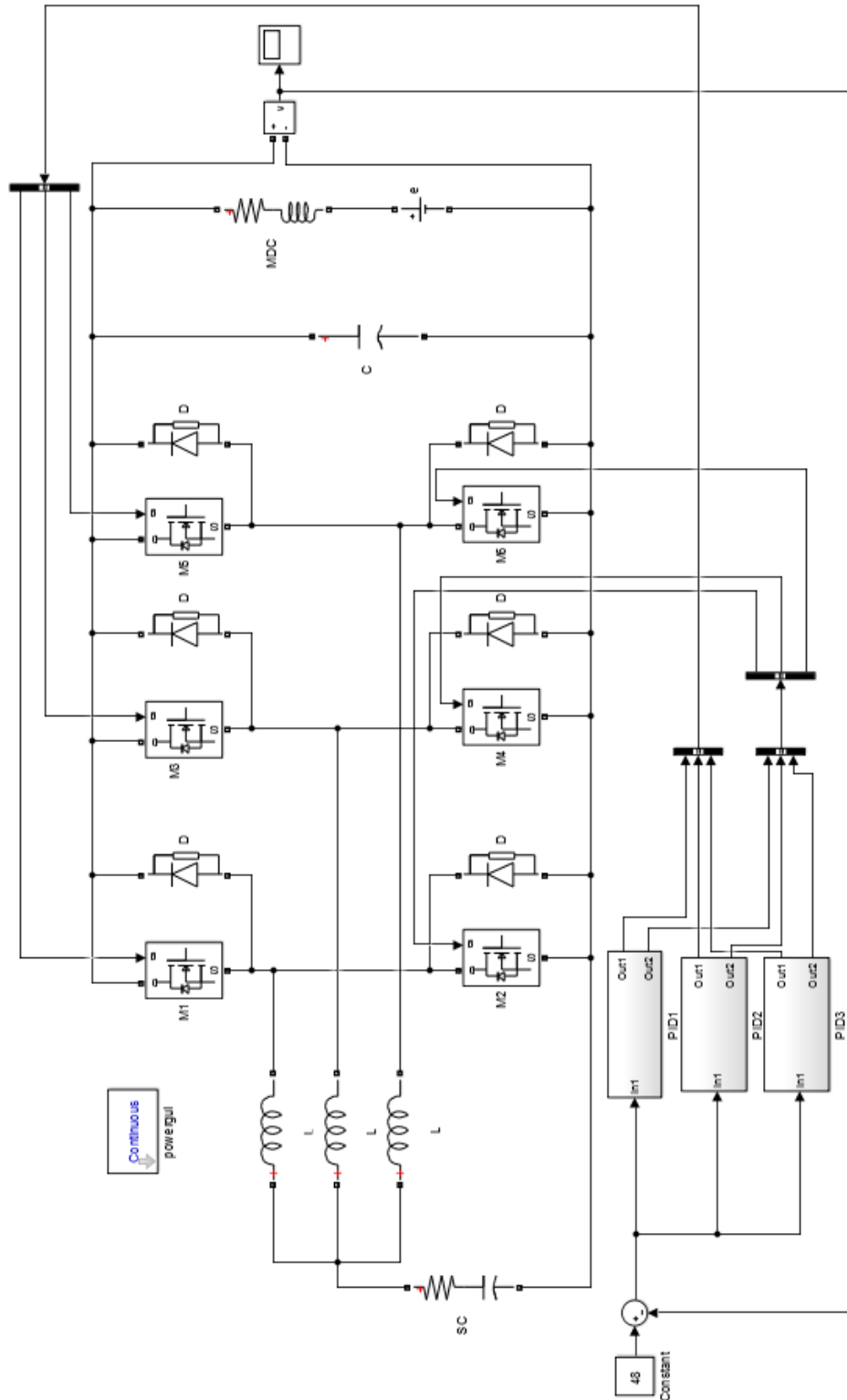


Figura 14. Esquema del circuito con control PID.

Cada bloque de control se encarga de regular el PWM de cada par de conmutadores, debido a que, solo puede permanecer en estado "on" un conmutador mientras que su par debe permanecer en estado "off" por lo tanto, las señales de cada par de conmutadores deben ser opuestas (Figura 15). En la Figura 16 se muestra el circuito de cada bloque de control.

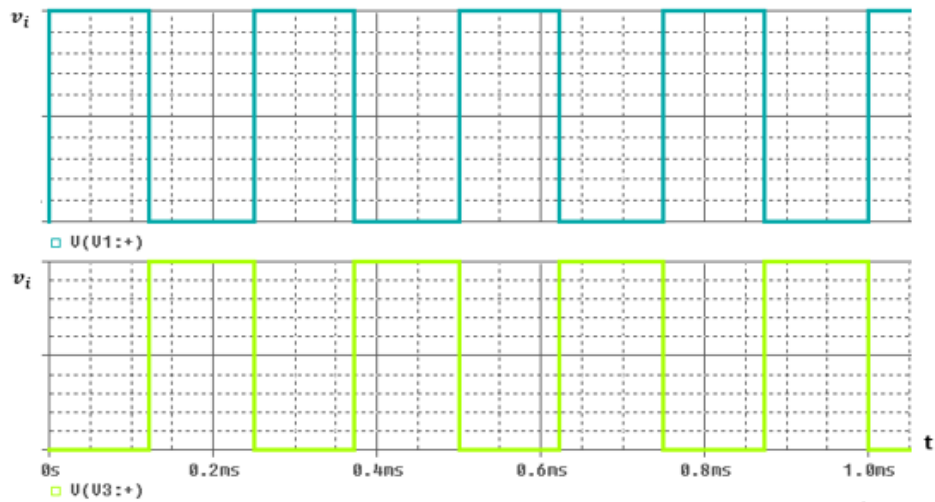


Figura 15. Señal de control PWM.

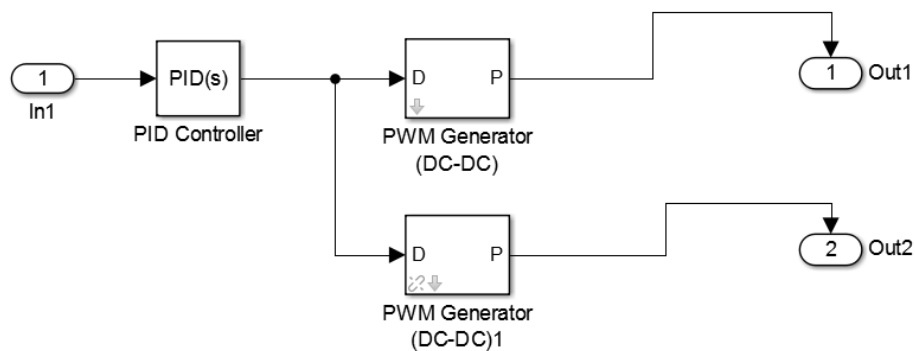


Figura 16. Bloque de control PID.

En la Figura 17 se presenta el voltaje que se obtiene en el motor con el control PID aplicado. El control propuesto satisface el voltaje requerido de 48V, las constantes generadas en base a reglas heurísticas (Villajulca, 2011) mediante software son: $k_p = 0.0001$, $k_i = 3.8$ y $k_d = 0.001$. Una vez desarrollado el control para los conmutadores, se procede a realizar pruebas con el circuito establecido anteriormente en la Figura 13, en el cual se simula con componentes comerciales.

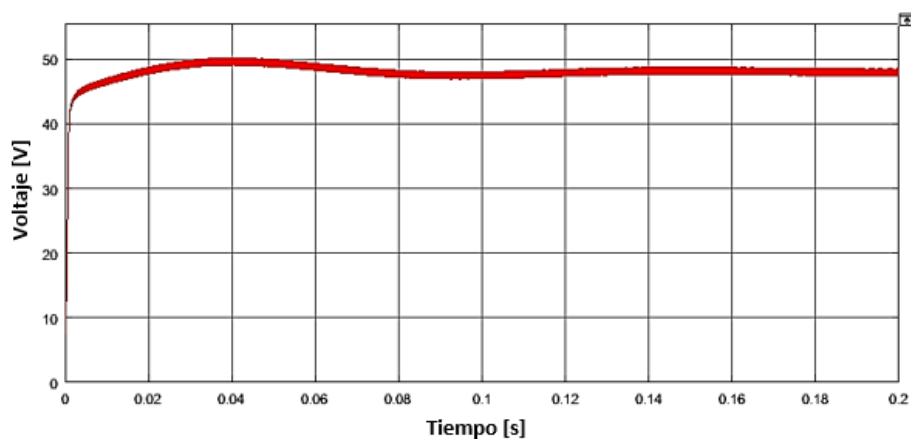


Figura 17. Voltaje de salida con control PID aplicado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de asegurar la obtención de los parámetros establecidos, se han tomado los límites tanto en el voltaje de entrada como en el ciclo de trabajo del PWM, lo que permite analizar el comportamiento del sistema al término de una hora.

Como se puede observar en la Figura 18, el voltaje obtenido es de 48V con picos que varían entre 48.53V y 47.89V, por lo tanto, el factor de rizo se encuentra en el rango permitido del 2% del voltaje de salida como se estableció inicialmente (Figura 19).

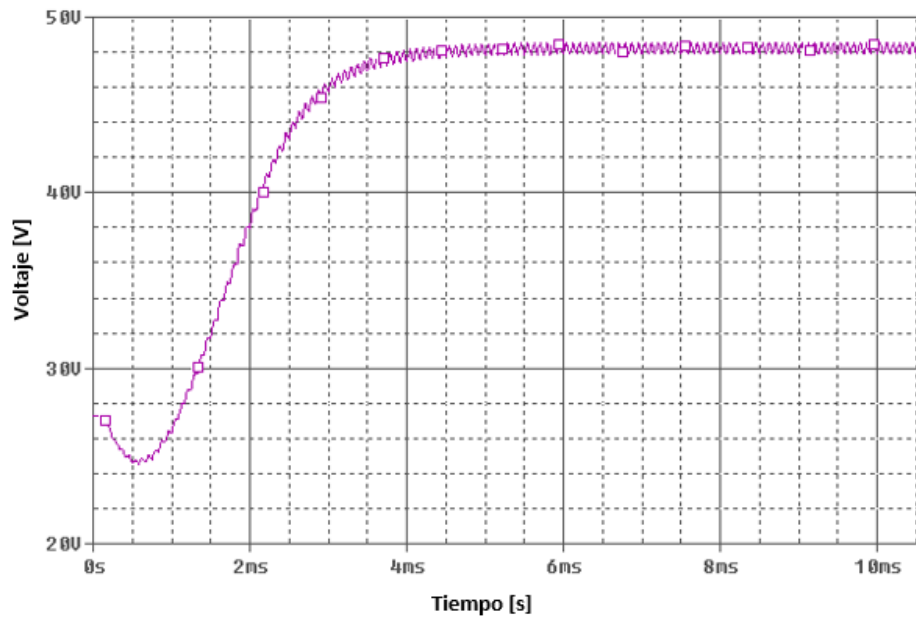


Figura 18. Voltaje de salida al terminar una hora.

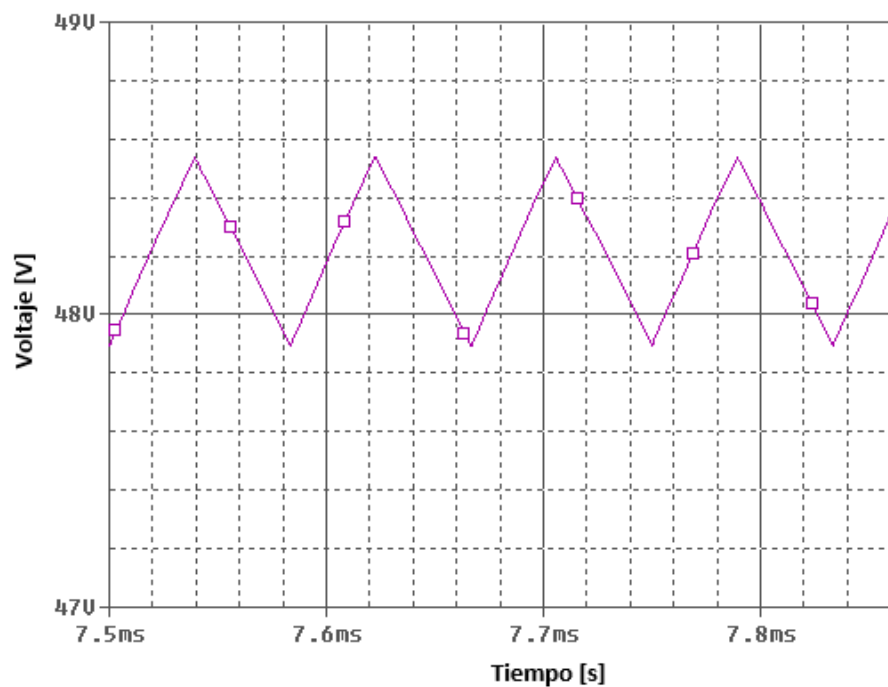


Figura 19. Picos de voltaje de salida.

El valor de la corriente en el motor es mayor al calculado, es decir excede el valor de $I = 20.83A$ (Figura 20), los valores de corriente obtenidos de la simulación fluctúan entre $21.452A$ y $21.433A$, como se puede ver en la Figura 21, esta diferencia se encuentra dentro de los límites establecidos del 2% de la corriente de salida.

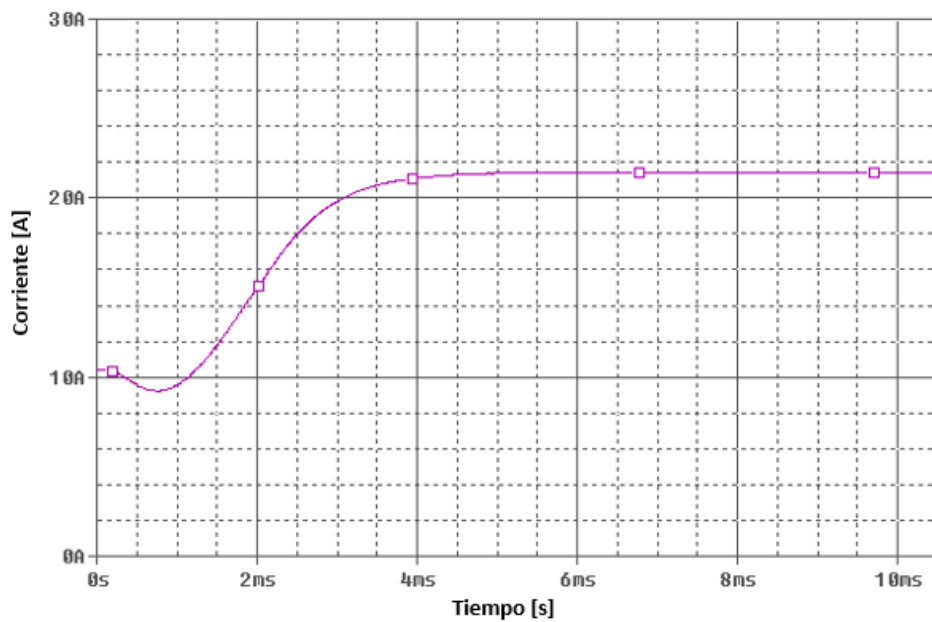


Figura 20. Corriente de salida al terminar una hora.

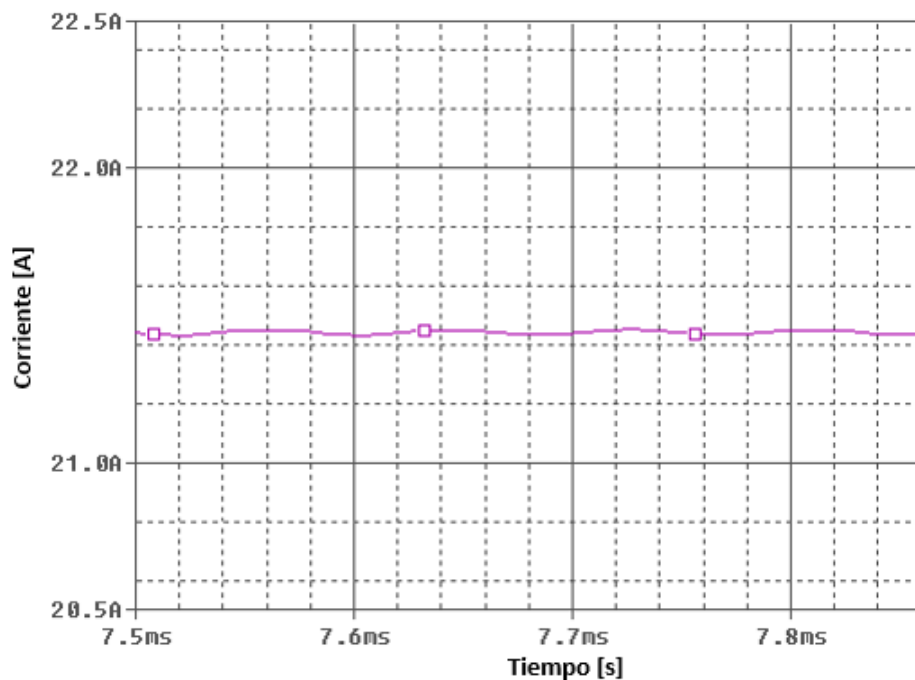


Figura 21. Picos de corriente de salida.

Finalmente se comprueba si la potencia cumple con los requerimientos al cabo de una hora, se puede ver en la Figura 22 que la potencia sobrepasa ligeramente a $1kW$ y estos valores se encuentran entre $1.0408kW$ y

1.0269kW, es decir hay una diferencia aproximada de 14W (0.13%) entre la máxima potencia y la mínima obtenida (Figura 23).

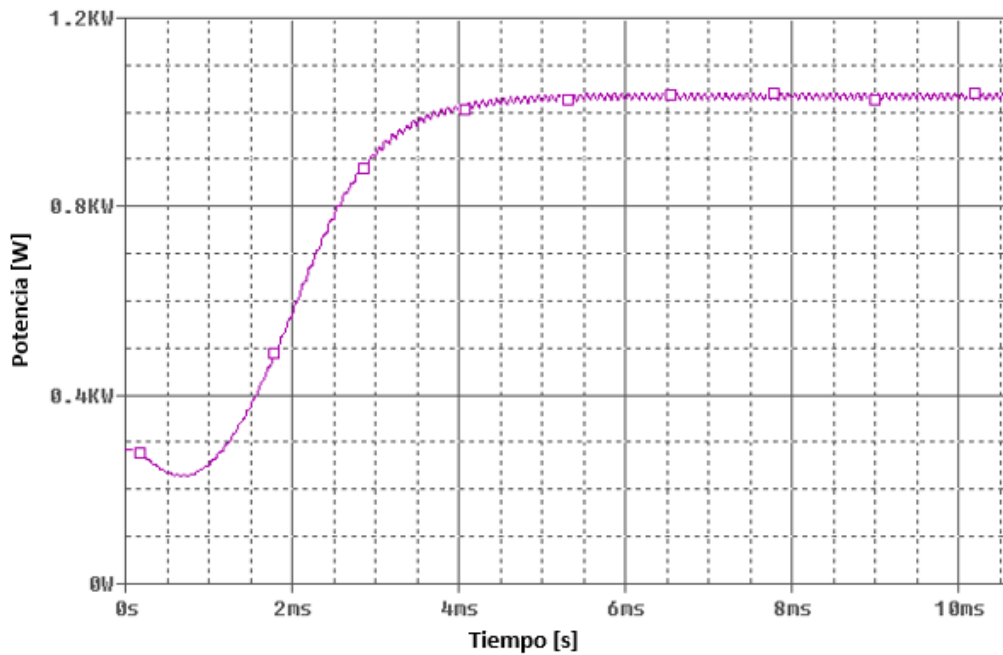


Figura 22. Potencia de salida al terminar una hora.

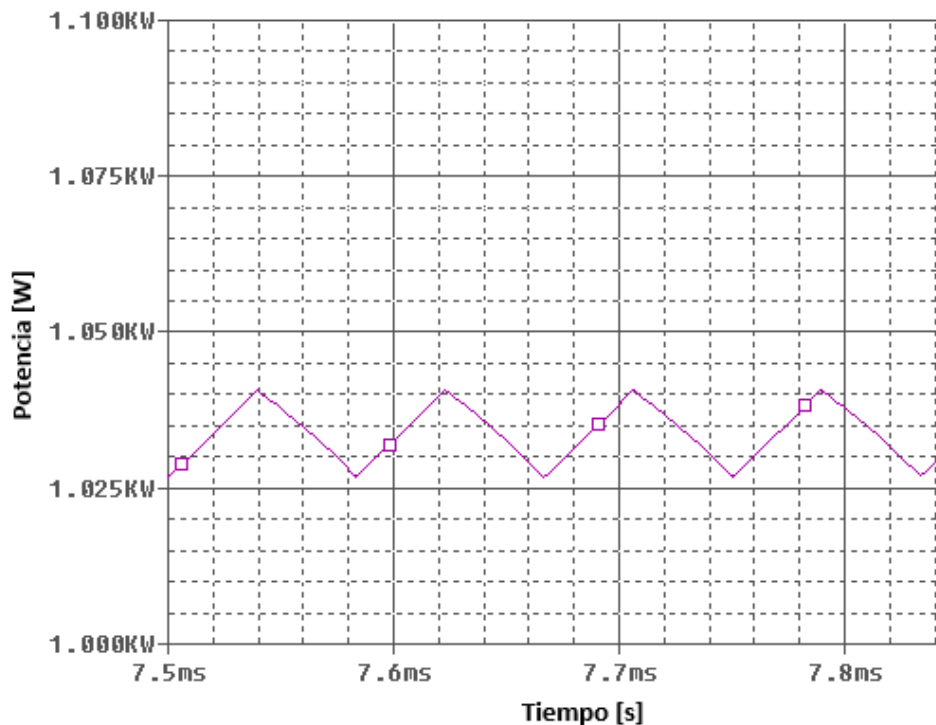


Figura 23. Picos de potencia de salida.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de forma numérica, se comparan los valores utilizados para los cálculos realizados y los valores obtenidos de la simulación, los errores obtenidos en voltaje, corriente y potencia son relativamente bajos, en todo caso los valores obtenidos en simulación

superan los valores deseados; de igual manera se puede observar que el factor de rizado para voltaje y corriente tienen errores elevados pero esto indica que el rizado es aún menor a lo propuesto y permite un comportamiento más eficaz del sistema.

Tabla 7. Resultados obtenidos.

$V_d = 27.75V$ $D = 0.49$					
	V_o	I_o	P_o	ΔV_{DC}	ΔI
Ideal	48V	20.83A	1kW	2%	2%
Simulación	48.53V	21.452A	1.0408kW	1.33%	0.091%
Error	1.10%	2.99%	4.08%	33.5%	4.55%

Estos datos han sido obtenidos considerando que el voltaje que suministran los supercapacitores es de 27.75V y que el ciclo de trabajo del PWM en los conmutadores es 0.49.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- En base a los requerimientos definidos inicialmente, se ha podido validar el circuito con sus respectivos componentes debido a que cumple con la función de elevar el voltaje suministrado por los supercapacitores a medida que estos se descargan de manera exponencial durante el periodo de una hora.
- Se ha diseñado y dimensionado correctamente cada componente del circuito de potencia tomando en consideración las condiciones finales de trabajo y demostrando los resultados que se obtienen al finalizar el tiempo de una hora, debido a limitaciones del software de simulación, se han obtenido los datos únicamente al final de dicho periodo, además se han detallado los componentes elegidos para la simulación y los parámetros de trabajo para su funcionamiento.
- Con los datos obtenidos en la Tabla 6 se puede demostrar que con las condiciones del circuito convertidor DC-DC bidireccional al término de una hora es posible mantener el voltaje constante en $48V$ y con una potencia de $1kW$ manteniendo los límites en cuanto se refiere al factor de rizo tanto en el voltaje como en la corriente que son utilizados para propulsar el motor DC de imanes permanentes.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable calcular los parámetros iniciales que sirvan como punto de partida para la simulación, debido a que, en ciertos casos se deben variar estos parámetros para obtener resultados óptimos que cumplan con las especificaciones de salida para el motor DC.
- Es preferible utilizar un ciclo de trabajo que se aproxime al 50% para alcanzar los valores máximos de salida, debido a que el tiempo de carga del capacitor e inductores deberá superar al tiempo de descarga.
- Es importante tener un circuito de control con retroalimentación, gracias a esta señal se puede controlar de mejor manera el funcionamiento de los conmutadores, es por esta razón que se ha propuesto el control PID en lazo cerrado.

BIBLIOGRAFÍA

- Benito, A. B. (2015). *Máquinas Eléctricas*.
- Celi Orrala, D. A. (2015). Sistema híbrido de suministro de energía basado en pilas de combustible para aplicación en pequeños vehículos eléctricos. 1-2.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas*. México: McGraw-Hill.
- Dworsky, M. E. (2002). *Diseño y construcción de convertor DC-DC para control de ultracapacitores en vehículo eléctrico*. Santiago de Chile.
- Estratégicos, M. C. (2013). Matriz Energética. *Sectores estratégicos para el buen vivir*.
- Fanjul, L. M. (2003). Some new applications of supercapacitors in power electronic systems. 1-7.
- Feroldi, D., Serra, M., & Riera, J. (2006). Control de Sistemas Basados en Pilas de Combustible Tipo PEM.
- Gian, D. C. (2006). *Física: Principios con Aplicación*. México: Pearson Educación.
- Haibo, L., Mao, C., Lu, J., & Wang, D. (2009). *Electronic power transformer with supercapacitors storage energy system*.
- Hernández, I. I. (2011). Simulación de un sistema de recuperación de energía basado en supercapacitores con aplicación en tracción eléctrica. 1-3.
- Hernández, R. R. (2014). *Análisis, modelado e identificación de los condensadores electroquímicos de doble capa*.
- Kularatna, N. (2015). Energy storage devices a general overview. En N. Kularatna, *Energy Storage Devices for Electronic Systems* (págs. 1-3). New Zealand: Elsevier.Inc.
- Manzo, T. M. (2014). Sistema de iluminación mediante LEDS de potencia con almacenamiento en supercapacitores. 9-34.
- Martínez Peñalver, C., Marcos, J., Lago, A., Quintáns, C., & Iglesias, R. (2014). *Modelado, Simulación y Ensayo de un Supercondensador Comercial Mediante Pulsos de alta Corriente*. Vigo.
- Maxwell. (02 de 09 de 2014). Obtenido de Maxwell: http://www.maxwell.com/images/documents/hq_48v_ds10162013.pdf

- Maxwell. (02 de 10 de 2014). Obtenido de Maxwell:
http://www.maxwell.com/images/documents/Product_Comparison_Matrix_3000489_2.pdf
- mccsemi. (05 de 2005). Obtenido de mccsemi:
<http://html.alldatasheet.es/html-pdf/74338/MCC/SD41/139/3/SD41.html>
- Mera, I. (2009). *Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas: Proyecto fin de carrera.*
- Meza Weber, F. J., & Ramos Morales, P. D. (2015). *Modelo matemático motor DC conexión independiente.* Guayaquil.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño. En N. Mohan, *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño* (págs. 15-29). México D.F.: McGRAW-HILL.
- Morales, C. J. (2011). *Monitoreo y adquisición de datos de un motor de corriente directa de imanes permanentes.* México D.F.
- PHILIPS. (02 de 1999). NXP. Obtenido de NXP:
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/17808/PHILIPS/IRFZ44/245/1/IRFZ44.html>
- Porto, R. L. (2010). Control de la síntesis dirigida por micelas para la obtención de nanoestructuras de óxidos de manganeso con uso potencial en capacitores electroquímicos. 10-12.
- Rashid, M. (2005). *Electrónica de Potencia.* México: Pearson.
- San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., & Eguía, P. (2011). Energy Storage Technologies for Electric Applications. *Energy Storage Technologies*, 2-11.
- Segura, J. R. (2016). *Modelación y simulación de un sistema híbrido de almacenamiento de energía eléctrica para la propulsión de embarcaciones tipo taxis en Puerto Ayora.* Quito.
- Trieste, S., Hmam, S., Olivier, J. C., & Bourguet, S. (2015). Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry.
- Velasco, M. Á. (2011). Síntesis de óxidos de manganeso y vanadio, vía plantillas de polímeros naturales para electrodos en un capacitor electroquímico. 1-6.

Villajulca, J. C. (22 de 08 de 2011). *Instrumentación y control*. Obtenido de Instrumentación y control:
<http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/automatizacion/curso-sintonizacion-controladores/item/394-sintonizaci%C3%B3n-de-controladores-por-m%C3%A9todo-heur%C3%A9stico-prueba-y-error.html>

ANEXOS

Anexo 1. Datos técnicos del módulo de supercapacitores.

DATASHEET 48V MODULES

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 48V DC working voltage
- Active cell balancing
- Temperature output
- Overvoltage outputs available
- High power density

TYPICAL APPLICATIONS

- Hybrid vehicles
- Rail
- Heavy industrial equipment
- UPS systems



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0083 P048 B01	BMOD0165 P048 BXX
Rated Capacitance ¹	83 F	165 F
Minimum Capacitance, initial ¹	83 F	165 F
Maximum Capacitance, initial ¹	100 F	200 F
Maximum ESR _{DC} initial ¹	10 mΩ	6.3 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A	100 A
Rated Voltage	48 V	48 V
Absolute Maximum Voltage ²	51 V	51 V
Absolute Maximum Current	1,150 A	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	3.0 mA	5.2 mA
Maximum Series Voltage	750 V	750 V
Capacitance of Individual Cells ¹¹	1,500 F	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell ¹¹	1.5 Wh	3.0 Wh
Number of Cells	18	18

(Maxwell, 2014)

Anexo 2. Datos técnicos del MOSFET.

Philips Semiconductors

Product specification

N-channel enhancement mode TrenchMOS™ transistor

IRFZ44N

GENERAL DESCRIPTION

N-channel enhancement mode standard level field-effect power transistor in a plastic envelope using 'trench' technology. The device features very low on-state resistance and has integral zener diodes giving ESD protection up to 2kV. It is intended for use in switched mode power supplies and general purpose switching applications.

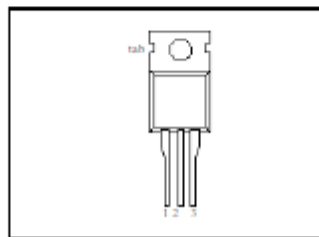
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
V_{DS}	Drain-source voltage	55	V
I_D	Drain current (DC)	49	A
P_{tot}	Total power dissipation	110	W
T_j	Junction temperature	175	°C
$R_{DS(on)}$	Drain-source on-state resistance $V_{GS} = 10V$	22	m Ω

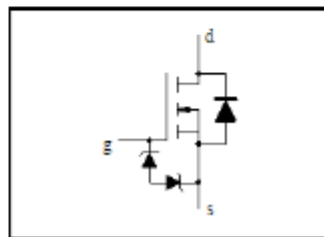
PINNING - TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	gate
2	drain
3	source
tab	drain

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



DYNAMIC CHARACTERISTICS

$T_{mb} = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
g_{fs}	Forward transconductance	$V_{DS} = 25V; I_D = 25A$	6	-	-	S
C_{iss}	Input capacitance	$V_{GS} = 0V; V_{DS} = 25V; f = 1\text{MHz}$	-	1350	1800	pF
C_{oss}	Output capacitance		-	330	400	pF
C_{rss}	Feedback capacitance		-	155	215	pF
Q_g	Total gate charge	$V_{DD} = 44V; I_D = 50A; V_{GS} = 10V$	-	-	62	nC
Q_{gs}	Gate-source charge		-	-	15	nC
Q_{gd}	Gate-drain (miller) charge		-	-	26	nC
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 30V; I_D = 25A;$	-	18	26	ns
t_r	Turn-on rise time	$V_{GS} = 10V; R_{\theta} = 10\Omega$	-	5.0	7.0	ns
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time	Resistive load	-	40	50	ns
t_f	Turn-off fall time		-	30	40	ns
L_d	Internal drain inductance	Measured from contact screw on tab to centre of die	-	3.5	-	nH
L_{d1}	Internal drain inductance	Measured from drain lead 6 mm from package to centre of die	-	4.5	-	nH
L_s	Internal source inductance	Measured from source lead 6 mm from package to source bond pad	-	7.5	-	nH

(PHILIPS, 1999)

Anexo 3. Datos técnicos del diodo.



Componente
 21201 Itasca Street Chatsworth
 CA 91311
 Tel: (818) 705-1100
 Fax: (818) 705-1101

SD41

Features

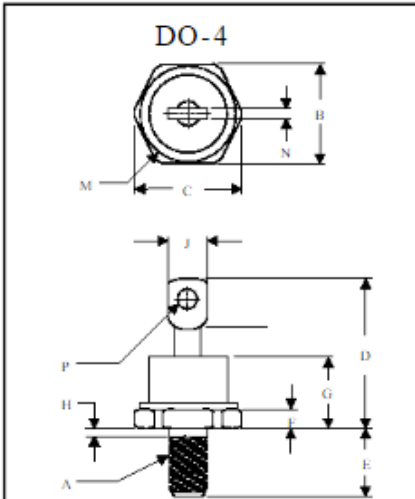
- Metal of siliconrectifier, majonty carrier conducton
- Guard ring for transient protection
- Low power loss high efficiency
- High surge capacity, High current capability

**25 Amp Schottky
 Barrier Rectifier
 45 Volts**

Maximum Ratings

- Operating Temperature: -65 °C to +150°C
- Storage Temperature: -65 °C to +150°C

MCC Part Number	Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	Maximum RMS Voltage	Maximum DC Blocking Voltage
SD41	45 V		45 V



Electrical Characteristics @ 25°C Unless Otherwise Specified

Average Forward Current	$I_{(AV)}$	25 A	$T_c = 105^\circ\text{C}$
Peak Forward Surge Current	I_{FSM}	600 A	8.3ms, halfsine
Maximum Instantaneous Forward Voltage	V_f	0.55 V	$I_{FM} = 30\text{ A}$ $T_A = 125^\circ\text{C}$

DIMENSIONS					
	MIN	TYP	MAX	MIN	MAX
A	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
B	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
D	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
E	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
F	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
G	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
H	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
I	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
J	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
K	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
L	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
M	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

(mccsemi, 2005)

