



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA:
AUTOMATIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO
SOLAR FOTOVOLTAICO**

**AUTORES:
CADENA CASTRO DAVID ALEXANDER
JARAMILLO CALDERÓN DIEGO FERNANDO**

**DIRECTOR: ING. AYALA, PAÚL
CODIRECTOR: ING. IBARRA, ALEXANDER**

SANGOLQUÍ

2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICADO

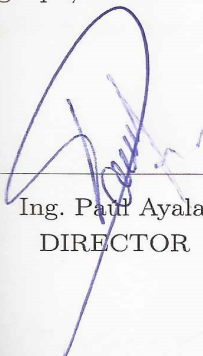
Ing. Paúl Ayala
Ing. Alexander Ibarra

CERTIFICAN

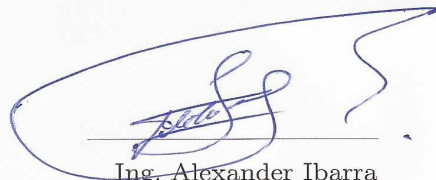
Que el trabajo titulado "*Automatización de un Prototipo de Vehículo Solar Fotovoltaico*", realizado por los señores David Alexander Cadena Castro y Diego Fernando Jaramillo Calderón, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a los señores David Alexander Cadena Castro y Diego Fernando Jaramillo Calderón que entreguen al Ingeniero Luis Orozco en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Octubre del 2015



Ing. Paúl Ayala
DIRECTOR



Ing. Alexander Ibarra
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

DAVID ALEXANDER CADENA CASTRO

DIEGO FERNANDO JARAMILLO CALDERÓN

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado "*Automatización de un Prototipo de Vehículo Solar Fotovoltaico*", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Octubre del 2015



Sr. David Cadena



Sr. Diego Jaramillo

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros David Alexander Cadena Castro y Diego Fernando Jaramillo Calderón. Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "*Automatización de un Prototipo de Vehículo Solar Fotovoltaico*", cuyo contenido ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre del 2015



Sr. David Cadena



Sr. Diego Jaramillo

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo tan especial a mi familia por ser siempre el apoyo en cada paso de mi formación profesional. Lo dedico a mis abuelos, quienes con cariño me han motivado a ser mejor cada día, a mis hermanos por ese amor fraternal y apoyo incondicional; y a mis padres quienes con sabiduría, cariño y paciencia han sabido guiar mi caminar, siempre de la mano y apoyándome en cada momento para llegar a ser la persona que soy hoy en día.

David Cadena

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo, a Dios por presentarse en un momento en el que mi vida perdió su rumbo, a mis padres por ser un apoyo incondicional durante toda mi vida, a mi madre por sus consejos y paciencia al criarme, por su bello corazón al perdonar y por que en sus ojos veo el trabajo y dedicación de todas las mujeres de mi familia para sacar adelante cualquier proyecto de vida propuesto, a mis hermanas por ser mi pilar fundamental para creer en la existencia del amor, y en quienes radica mi felicidad, motivación y ambición diaria.

Diego Jaramillo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres porque sin su apoyo, cariño y enseñanzas no me habría sido posible este gran logro, siempre han sido mi ejemplo y mi motivación para cumplir con cada una de las metas propuestas en mi vida. Quiero agradecer también a mis hermanos, quienes con su amor han sido, más que nada, amigos, confidentes y apoyo en los momentos más difíciles de este proceso. Por último, quiero agradecer a mis amigos y amigas, quienes en este caminar se han convertido en hermanos, apoyándonos siempre en momentos buenos y malos y aprendiendo juntos la importancia de una calidad moral y ética en cada paso que damos.

David Cadena

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres por su colaboración económica, moral y en especial emocional a lo largo de mi vida universitaria, por su tiempo que ha sido mi más grande tesoro que apreciare por siempre, a mis hermanas por su apoyo incondicional en aquellos momentos en el que no avisaba un futuro claro y en especial por moldear mi mente a un mundo lleno de inclusión y respeto mutuo.

Un agradecimiento especial al Ing. Paúl Ayala por el tiempo y dedicación otorgados a lo largo del desarrollo de este proyecto, por su gentileza al compartir sus conocimientos de manera incondicional.

Diego Jaramillo

Índice General

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e Importancia	2
1.3. Alcance del proyecto	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Energía Solar	5
2.1.1. Efecto fotovoltaico	5
2.2. Sistemas Solares fotovoltaicos	6
2.2.1. Módulo Fotovoltaico	7
2.3. Motores Eléctricos DC	7
2.3.1. Principio de funcionamiento	9
2.3.2. Motores de Imán Permanente	10
2.4. Freno Eléctrico	12

2.4.1.	Freno Dinámico	12
2.4.2.	Freno Regenerativo	13
2.5.	Energía Eléctrica Otorgada por Baterías	14
2.5.1.	Batería	14
2.5.2.	Cargador de Baterías	19
2.6.	Sistemas de Control	20
2.6.1.	Modelo Matemático Motor DC	20
2.6.2.	Control de Par y Velocidad de Motor Eléctrico DC	24
2.7.	Sistemas de Electrónica de Potencia	28
2.7.1.	Convertidores DC - DC	28
3.	DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE	31
3.1.	Sistemas de Carga para Baterías	31
3.1.1.	Sistema de Carga por Red Eléctrica Pública	31
3.1.2.	Sistema de Carga por Energía Solar	35
3.1.3.	Sistema de Carga por Frenado Regenerativo	39
3.2.	Sistema de Control para Motor DC	42
3.2.1.	Obtención y Análisis de modelo matemático del motor	43
3.2.2.	Algoritmo de Control en Modo Deslizante	44
3.3.	Diseño del Sistema de Monitoreo y Control	45
3.3.1.	Análisis de variables	45
3.3.2.	Diseño de instrumentación	46
4.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS	48
4.1.	Montaje de Circuitos de Control y Potencia	48
4.1.1.	Sistema para Control de Motor DC	49
4.1.2.	Sistemas para Carga de Banco de Baterías	50
4.2.	Equipos y Sistema de Monitoreo	53
4.2.1.	Pedal de Acelerador	53
4.2.2.	Elementos de Iluminación	54
4.2.3.	Tablero de Control y Visualización	55
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS	57
5.1.	Pruebas y Resultados	57
5.1.1.	Sistema para Control de Motor DC	57
5.1.2.	Sistema para Control de Freno Regenerativo	60
5.1.3.	Sistema para Control de Carga por Paneles Fotovoltaicos	60
5.1.4.	Sistema para Control de Carga por Red Eléctrica	62

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Recomendaciones	66
REFERENCIAS	67

Índice de Figuras

2.1. Esquema del Efecto Fotovoltaico	5
2.2. Componentes de un Sistema Solar Fotovoltaico básico	6
2.3. Tipos de Módulos Fotovoltaicos	7
2.4. Motor DC	8
2.5. Partes de un motor DC	9
2.6. Esquema Motor Imán Permanente con Núcleo de Hierro	11
2.7. Motor de Devanado Superficial	11
2.8. Motor de Bobina Móvil	12
2.9. Esquema Eléctrico de un sistema de frenado dinámico	13
2.10. Esquema eléctrico de un sistema de freno regenerativo	14
2.11. Batería Cargada	15
2.12. Batería Proceso de Descarga	16
2.13. Batería Proceso de Carga	16
2.14. Conexión de Baterías en Serie	18
2.15. Conexión de Baterías en Paralelo	18
2.16. Conexión de Baterías en Serie - Paralelo	19
2.17. Representación Eléctrica de un Motor DC	21
2.18. Representación del Modelo Matemático de un Motor DC en Dia- grama de Bloques	23
2.19. Esquema de Control por Cuadrantes para Motor DC	25
2.20. Señal de Control por PWM para un Motor DC	27
2.21. Esquema de Conversor Buck	28
2.22. Esquema Conversor Boost	29
2.23. Esquema Uso de Circuito Snubber	30
3.1. Diagrama Bloques Sistema Carga por Red Eléctrica	31
3.2. Diagrama Flujo para Control de Sistema Carga por Red Eléctrica	34
3.3. Diagrama Bloques Sistema Carga por Energía Solar	35

3.4.	Diagrama Flujo para Control de Sistema Carga por Paneles Fotovoltaicos	38
3.5.	Diagrama Flujo para Control de Convertidor Buck. Proceso de Carga por Paneles Fotovoltaicos	38
3.6.	Diagrama Bloques Sistema de Carga por Freno Regenerativo . . .	39
3.7.	Diagrama Flujo para Control en Sistema Freno Regenerativo . . .	41
3.8.	Diagrama Bloques Sistema Control Motor DC	42
3.9.	Diagrama Flujo de Operación en Modo Deslizante Sistema Control Motor DC	45
3.10.	Esquema de Divisores de Tensión	47
4.1.	Esquema de Distribución de los Sistemas de Carga y Control . . .	49
4.2.	Esquema de Distribución - Banco de Convertidores Boost	50
4.3.	Instalación Física de Paneles Fotovoltaicos	51
4.4.	Topología de Conexión en Paneles Fotovoltaicos	51
4.5.	Implementación Física de Sistema de Carga por Freno Regenerativo	52
4.6.	Esquema Distribución de Módulos en Sistema Carga por Red Eléctrica	52
4.7.	Fuente Conmutada 12V - 250W	53
4.8.	Implementación Física de Sistema de Carga por Red Eléctrica . .	53
4.9.	Pedal de Acelerador Electrónico	54
4.10.	Luces Delanteras	55
4.11.	Luces Traseras	55
4.12.	Distribución elementos en Panel de Control	56
4.13.	Distribución elementos en Panel de Control	56
5.1.	Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Motor DC .	58
5.2.	Respuesta en Tensión - Control para Motor DC	58
5.3.	Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga Freno Regenerativo	60
5.4.	Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga por Paneles Fotovoltaicos	61
5.5.	Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Sist. Carga por Paneles Fotovoltaicos	62
5.6.	Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga por Red Eléctrica	63
5.7.	Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Sist. Carga por Red Eléctrica	64

Índice de Tablas

3.1. Elementos para Construcción Convertidor Boost - Carga Red Eléctrica	33
3.2. Elementos para Construcción Convertidor Buck - Carga Paneles Fotovoltaicos	37
3.3. Elementos para Construcción Convertidor Boost - Carga Freno Regenerativo	41
3.4. Elementos para Construcción Convertidor Boost - Control de Motor DC	43
3.5. Parámetros eléctricos y mecánicos de motor	44
5.1. Valores Reales - Prueba Control Motor DC	59
5.2. Valores Simulados - Prueba Control Motor DC	59
5.3. Error Relativo	59

RESUMEN

En el presente documento se detalla los procedimientos llevados a cabo en el diseño e implementación de un sistema de control para un motor eléctrico de corriente continua (CC) de un vehículo solar, sistema de frenado regenerativo que trabajará a la par con sistema de freno mecánico, el sistema de carga de un banco de baterías que será energizado por paneles fotovoltaicos, y el sistema de monitoreo de parámetros eléctricos, dichos sistemas han sido montados en un prototipo de vehículo solar, la finalidad del proyecto es la optimizar el consumo energético del motor eléctrico así como la de presentar nuevas alternativas de movilidad frente a vehículos con motores de combustión interna, estos diseños han sido realizados en su mayoría con técnicas de electrónica de potencia, puesto que dentro de esta rama se presentan métodos que permiten un mejor uso de la energía eléctrica para cargas con alto nivel de consumo energético.

PALABRAS CLAVE:

- **PANEL FOTOVOLTAICO**
- **MOTOR ELÉCTRICO CC**
- **FRENO REGENERATIVO**
- **BANCO BATERÍAS**
- **VEHÍCULO SOLAR**

ABSTRACT

The present project shows the design and implementation of a control system for a electric motor used in a solar vehicle, a regenerative breaking system which works overall with the mechanic breaking system, a battery charging system which works energy photovoltaic panels and monitoring system of electric values, all of these systems had been set in a solar vehicle prototype, the main objective of this project is to improve the energy consumption of the electric motor as well as shows new mobility alternatives versus vehicles with internal combustion motor, these designs had been developed with power electronics techniques, because in this subject technicians have benn discovered new ways for using electric power with loads of energetic high demand.

KEYWORDS:

- **PHOTOVOLTAIC PANELS**
- **ELECTRIC MOTOR**
- **REGENERATIVE MOTOR**
- **BANK BATTERIES**
- **SOLAR VEHICLE**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Un vehículo fotovoltaico es un vehículo propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar fotovoltaica, la misma que es obtenida desde paneles solares ubicados en alguna superficie del mismo, las celdas fotovoltaicas permiten convertir la energía del sol en energía eléctrica la cual puede ser almacenada o usada directamente por el motor. Diferentes proyectos han buscado optimizar la funcionalidad del vehículo, por lo cual se tiende a mejorar los sistemas eléctricos, pues estos controlan la potencia que ingresa al vehículo.

Las baterías que se utilizan juegan un papel importante debido a que tienen la funcionalidad de proveer la energía necesaria para generar el movimiento del vehículo ya que en ocasiones los sistemas fotovoltaicos no son capaces de otorgar la energía necesaria para generar movimiento en este tipo de vehículos por lo que es necesario adaptar un banco de baterías para alimentar el motor eléctrico, o algún elemento que controle la forma de energizar el motor, es así que los sistemas fotovoltaicos toman el papel de fuentes para sistemas de carga de las baterías, siendo en este punto de gran importancia el algoritmo que se implemente para usar de la mejor manera la energía que puede ser entregada por los paneles.

El tiempo de autonomía en un vehículo solar fotovoltaico dependerá directamente de la duración de la radiación solar en un día, si el vehículo se encuentra energizado por una banco de baterías este tiempo se vera afectado por la capacidad de almacenamiento de las baterías que conforman el banco, para aumentar dicho tiempo se suele usar diferentes topologías de conexión que buscan aumentar tanto la tensión de alimentación como la capacidad de almacenamiento de corriente.

1.2. Justificación e Importancia

Los vehículos eléctricos han tenido un auge debido a la introducción de ideologías que se enfocan a la conservación del medio ambiente, la limitante que han tenido son los altos costes debido a los métodos de energización del vehículo, con el paso del tiempo se han ido mejorando las técnicas de electrónica que están enfocadas a manejar la energía a ser usada por un vehículo eléctrico.

Actualmente existe una creciente demanda de vehículos con un menor consumo de combustible y una menor emisión de contaminantes, lo que permite el estudio de nuevos enfoques y desarrollos en cuanto a la generación de energía mediante el uso de nuevas fuentes. El uso generalizado de vehículos eléctricos puede conseguir importantes ahorros de combustible y mantener un tiempo de autonomía y prestaciones similares a las de un vehículo convencional. Un auto alimentado por energía solar solo puede usarse cuando exista radiación solar, a menos que posea un sistema que permita la generación de energía y su posterior almacenamiento para ser usada por el vehículo en horas donde la radiación solar es mínima o inexistente. El desarrollar proyectos que permitan el uso adecuado de las nuevas fuentes de energía da la apertura para que el presente proyecto sea viable, en el desarrollo del mismo se busca automatizar los sistemas eléctricos de un vehículo que ha sido equipado con paneles fotovoltaicos, pretendiendo mejorar el funcionamiento del vehículo usando una adecuada topología en la conexión del banco de baterías y el modo en que se cargan las mismas, esto permitirá un uso eficiente de energía y que se mantenga un tiempo de autonomía cuando no exista radiación solar, además que se abre la brecha para realizar un estudio enfocado al control, almacenamiento de energía solar y su uso eficiente.

1.3. Alcance del proyecto

En la actualidad se cuenta con un vehículo tipo GO KART que se encuentra en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en este se realizó una revisión que ha permitido conocer el estado actual del mismo, de esta manera se conocieron los equipos que se encuentran colocados en el vehículo y que pueden ser usados para el desarrollo del proyecto, entre los equipos eléctricos principales se tiene dos paneles fotovoltaicos de 145 W cada uno, un motor eléctrico DC de 48 V y 19.17 hp de potencia máxima y elementos de iluminación como luces de parada y faros.

En el presente proyecto se desarrollará el diseño e implementación de los diferentes sistemas eléctricos que puede contener el vehículo solar como son: banco de baterías con una correcta topología, sistema de carga de energía para el banco de baterías, sistema de carga mediante conexión a red eléctrica pública, sistema de potencia para funcionamiento de motor, sistema de control para aceleración, parada y arranque del motor eléctrico, sistema de frenado regenerativo, sistema de control para luces y un sistema de monitoreo de los parámetros eléctricos que permita dar información al conductor del tiempo de autonomía del vehículo, corriente usada por el motor, energía almacenada en las baterías, activación de sistema de frenado regenerativo, estas funciones se las realizará a través de tecnología basada en microcontroladores ARM, por último se tendrá la respectiva interface de usuario que permita interactuar con la persona que conduzca el vehículo.

El proyecto se desarrollará por parte de dos estudiantes de la Carrera de Ingeniería Electrónica en Automatización y Control los cuales realizarán las actividades de diseño, construcción, pruebas e implementación de los diferentes sistemas eléctricos para el correcto funcionamiento del vehículo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Automatizar el sistema eléctrico de un prototipo de vehículo solar fotovoltaico mediante técnica de electrónica de potencia.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Plantear una topología de conexión de baterías para la alimentación del motor eléctrico del vehículo solar que permita prolongar el tiempo de vida útil del vehículo.
- Implementar un sistema de carga para el banco de baterías a través de paneles fotovoltaicos o por la red eléctrica pública.
- Implementar un sistema de freno regenerativo que permita la carga del banco de baterías en el vehículo para condiciones en las cuales no sea necesario el uso del motor eléctrico de una manera directa.

- Desarrollar un sistema de monitoreo que permitan conocer el tiempo de autonomía del vehículo y parámetros eléctricos.
- Desarrollar un sistema de control que permita optimizar el consumo eléctrico del vehículo para poder aumentar el tiempo de autonomía del mismo.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Energía Solar

Es la energía radiante producida en el Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la Tierra a través del espacio en paquetes de energía llamados fotones (luz), los cuales interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre [1].

2.1.1. Efecto fotovoltaico

Se genera cuando el material de la celda solar que puede ser de silicio u otro material semiconductor, atrae parte de los fotones del sol. El fotón absorbido libera a un electrón que se halla en el interior de la celda. Ambos lados de la celda están conectados por un cable eléctrico, de tal manera que se genera una corriente eléctrica [1], como se muestra en la Figura 2.1.

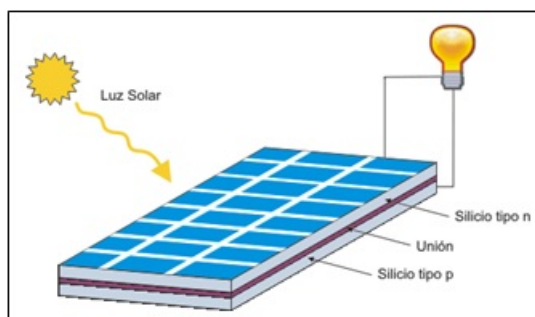


Figura 2.1: Esquema del Efecto Fotovoltaico [2]

2.2. Sistemas Solares fotovoltaicos

Estos sistemas producen energía eléctrica directamente de la radiación solar, la función básica de convertir la radiación solar en electricidad la efectúa el modulo fotovoltaico. La corriente que produce el modulo fotovoltaico es corriente continua a una tensión que generalmente es de 12V, existiendo configuraciones del sistema para 24V ó 48V.

La energía eléctrica que se produce se almacena en baterías, para que pueda ser utilizada en cualquier otro momento, inclusive cuando no esté disponible la radiación solar. El regulador de carga es el componente encargado de controlar el buen funcionamiento del sistema evitando la posible sobrecarga y descarga de la batería.

Un Sistema Fotovoltaico está conformado básicamente de un modulo ó generador fotovoltaico, una batería (sistema de acumulación), un regulador de carga (equipo de control) y las cargas en corriente continua (luminarias, televisor, etc.). A estos elementos hay que añadir los materiales auxiliares de infraestructura como: cables, estructuras soporte, etc. Los componentes de un sistema solar fotovoltaico básico se observan en la Figura 2.2.

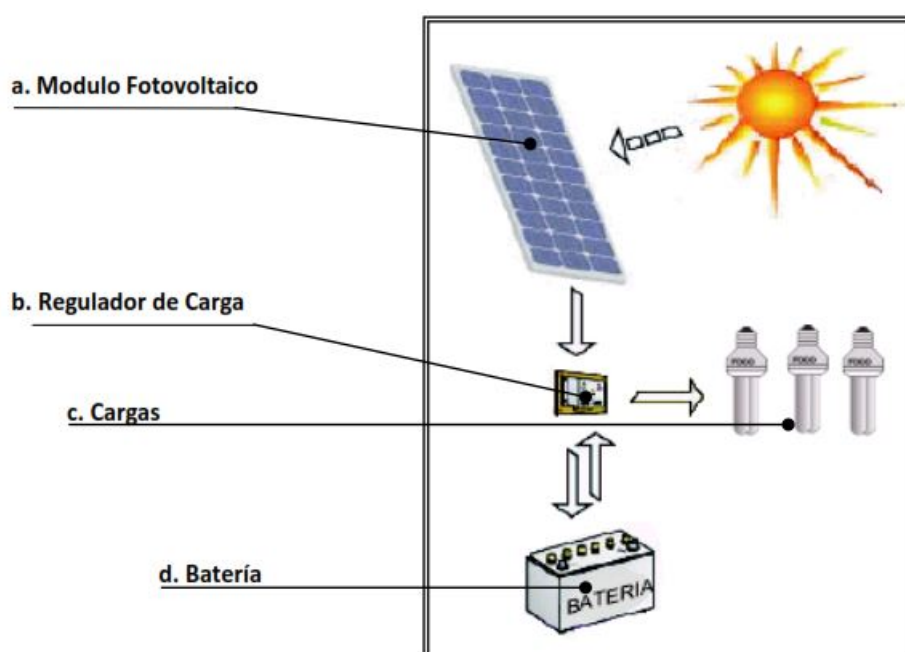


Figura 2.2: Componentes de un Sistema Solar Fotovoltaico básico

[1]

2.2.1. Módulo Fotovoltaico

Es un conjunto de celdas fotovoltaicas que convierten la radiación solar (luz solar) en energía eléctrica, generan una tensión de 12V DC para el uso de diferentes equipos [1]. Todas las características básicas de un módulo fotovoltaico están señaladas bajo condiciones estándar como:

- Radiación = $1\ 000\ W/m^2$, $T = 25\ ^\circ C$.
- Potencia Pico [Wp] = Máxima salida de potencia en Watts pico (por ejemplo: 36 Wp).
- Corriente de cortocircuito [A] = Corriente entre los polos conectados de un módulo (por ejemplo: 2.31A para un módulo de 36 Wp).
- Tensión de circuito abierto [V] = Voltaje entre los polos de un módulo sin carga (por ejemplo: 20.5V para un módulo de 36 Wp) .

En la Figura 2.3 se muestran dos tipos de módulos fotovoltaicos.



Figura 2.3: Tipos de Módulos Fotovoltaicos

[1]

2.3. Motores Eléctricos DC

Son dispositivos electromotrices, es decir convierten la energía eléctrica DC en energía motriz [3]. Todos los motores cuentan con un eje de salida que sirve para acoplar un engranaje, polea o algún mecanismo capaz de transmitir el movimiento generado por el motor.



Figura 2.4: Motor DC
[4]

Las partes de un motor eléctrico elemental DC de 2 polos [3], se muestra en la Figura 2.5 y son las siguientes:

- Armadura.
- Conmutador.
- Escobillas.
- Eje.
- Imán de campo.
- Fuente de poder DC.

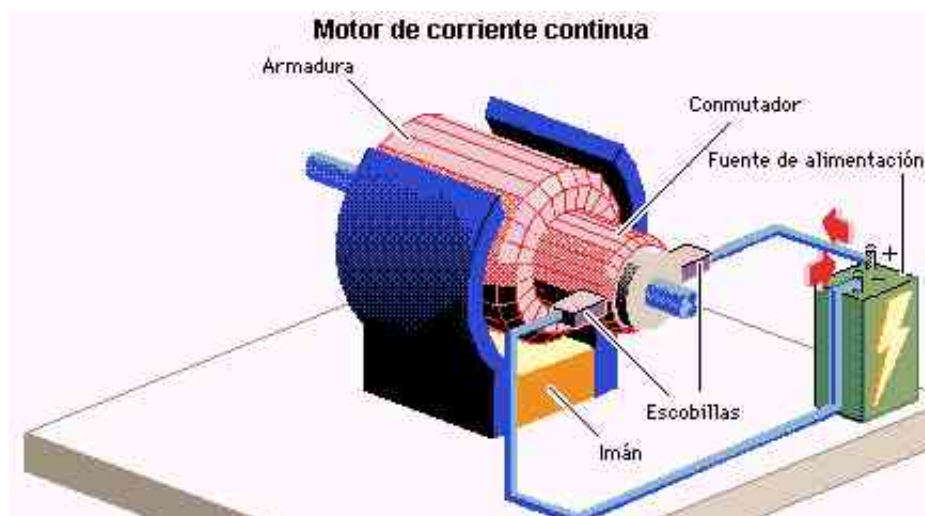


Figura 2.5: Partes de un motor DC
[3]

2.3.1. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de un motor se basa en la acción de campos magnéticos opuestos, los cuales hacen girar el rotor o eje interno en dirección contraria al estator (que puede ser un imán externo o una bobina), con lo que si se sujeta la carcasa del motor por medio de soportes el rotor unido al eje de salida será lo único que gire, si se desea cambiar la dirección de giro del motor bastará con invertir la polaridad de la fuente de alimentación.

Para modificar la velocidad de un motor se puede variar la tensión de alimentación con lo que el motor perderá o ganará velocidad. Al aplicar una tensión en los bornes de un motor de DC por los conductores del inducido circulará una corriente que al estar en un campo magnético genera una fuerza que hace girar los conductores y por ende al inducido, la fuerza que se ejerce sobre el conductor es proporcional al campo magnético y a la corriente, por tanto, el momento del par, denominado "par motor" se puede expresar como se indica en (2.10) :

$$\text{Par motor} = K \times \varphi \times I_a \quad (2.3.1)$$

donde, I_a es la corriente del inducido.

Cuando giran los conductores con el inducido en el devanado se induce una fuerza electromotriz (f.e.m) la cual se opone a la tensión aplicada a los bornes. Es por esto que la f.e.m inducida en el motor se denomina "Fuerza contra electromotriz" (f.c.e.m). En la ecuación (2.3.2) se establece la intensidad de corriente en el

inducido:

$$I_a = (E_a - E_b)/R_a \quad (2.3.2)$$

Entonces:

$$E_a = E_b + I_a \times R_a \quad (2.3.3)$$

donde, E_b es la tensión aplicada para generar fuerza electromotriz, E_a es la tensión aplicada, I_a es la intensidad de armadura, R_a es la resistencia de armadura.

2.3.2. Motores de Imán Permanente

El campo magnético de un motor de DC se puede producir por imanes permanentes o bobinas. Los motores de imán permanente se clasifican de acuerdo con el esquema de conmutación y al diseño de la armadura.

De acuerdo con la construcción de la armadura se clasifican en :

- Núcleo de hierro.
- Devanado Superficial.
- Bobina móvil.

De núcleo de Hierro.

El esquema del rotor y estator de este tipo de motor se muestra en la Figura 2.6. El material del imán permanente puede ser bario-ferrita, o un compuesto de “tierras raras”. El flujo magnético que produce el imán circula a través de la estructura del rotor laminado el cual tiene ranuras donde se localizan los conductores de la armadura. [3] Las características de estos motores son:

- La inercia del motor es relativamente alta (ya que la parte giratoria está formada por las bobinas de la armadura).
- Inductancia alta.
- Bajo costo y alta confiabilidad.

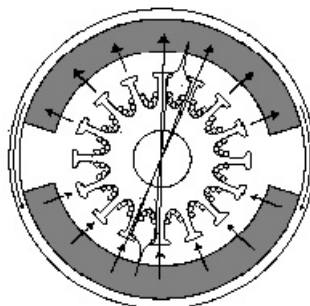


Figura 2.6: Esquema Motor Imán Permanente con Núcleo de Hierro
[3]

De Devanado Superficial

La Figura 2.7 muestra la construcción del rotor de un motor DC de devanado superficial. Los conductores de la armadura están pegados a la superficie del rotor cuya estructura es cilíndrica, esta estructura está construida de discos laminados sujetos al eje del motor. Los conductores están proyectados en el entre hierro de aire que se encuentra entre el rotor y el campo del imán, este campo presenta una menor inductancia que el del motor con estructura de núcleo de hierro [3].

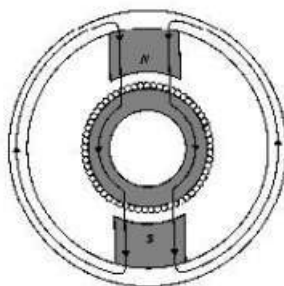


Figura 2.7: Motor de Devanado Superficial
[3]

De Bobina Móvil

Estos motores son diseñados para tener momentos de inercia muy bajos e inductancia de armadura también muy baja. La estructura del conductor está soportada por un material no magnético normalmente resinas epóxicas o de fibra de vidrio que forma un cilindro hueco. Un extremo del cilindro forma un eje, que está conectado al eje del motor, por tal motivo el motor de bobina móvil es una buena elección como actuador en sistemas de control de alto desempeño [3]. En

la Figura 2.8 se representa la sección transversal de estos motores.

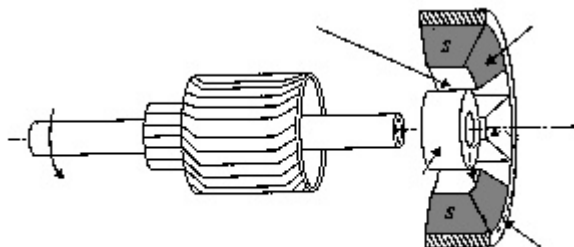


Figura 2.8: Motor de Bobina Móvil
[3]

2.4. Freno Eléctrico

Los motores eléctricos pueden funcionar como generadores y en consecuencia ser frenados eléctricamente, siempre y cuando tanto el circuito de campo como el circuito del inducido se puedan excitar de manera independiente, en el momento de activar el frenado del motor. Si la potencia eléctrica entregada por el motor se convierte en calor a través de una resistencia, la máquina se detendrá rápidamente, a este tipo de frenado se le conoce como freno dinámico.

Existe otro tipo de frenado eléctrico en el cual la energía eléctrica producida se devuelve a la línea de alimentación en lugar de ser transformada en calor a través de resistencias, este tipo de frenado se denomina freno regenerativo, útil o de recuperación de energía [5].

2.4.1. Freno Dinámico

En la Figura 2.9 se representa el esquema del freno dinámico.

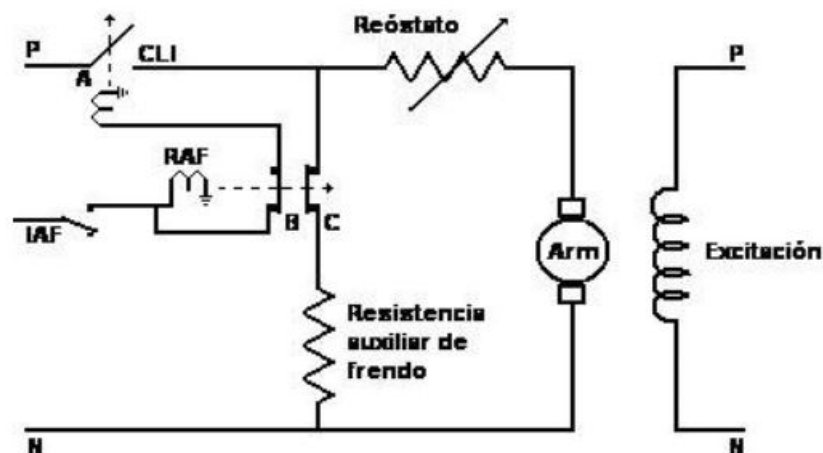


Figura 2.9: Esquema Eléctrico de un sistema de frenado dinámico [5]

Cuando el interruptor IAF se abre, se desenergiza el relevador de arranque de frenado, en consecuencia el contacto A se abre, quitando la alimentación del inducido del motor, en ese mismo momento se cierra el circuito del inducido a través de la resistencia de arranque y la resistencia auxiliar de freno por medio del contacto C del relevador RAF. Si la excitación del motor se mantiene, el inducido en movimiento a través de sus conductores presentarán una tensión y éste actuará como generador de excitación independiente.

El movimiento del inducido se produce por la inercia del rotor y la carga conectada al motor, en estas condiciones la energía desarrollada por el motor como generador, se disipará en forma de calor a través de las resistencias de arranque y auxiliar, provocando un fenómeno de frenado [5].

2.4.2. Freno Regenerativo

En este tipo de freno, la energía de rotación producida por el motor (el cuál está funcionando como generador durante la etapa de frenado de un vehículo), se devuelve a la fuente de alimentación en lugar de que ésta energía sea disipada en forma de calor. Cuando un motor, gira a una alta velocidad, la carga tiende a arrastrar al motor en el mismo sentido, la tensión del inducido es mayor que la tensión de línea, lo que provoca que exista un retorno de corriente hacia la fuente de alimentación del motor [5].

El circuito utilizado en un frenado regenerativo se muestra en la Figura 2.10.

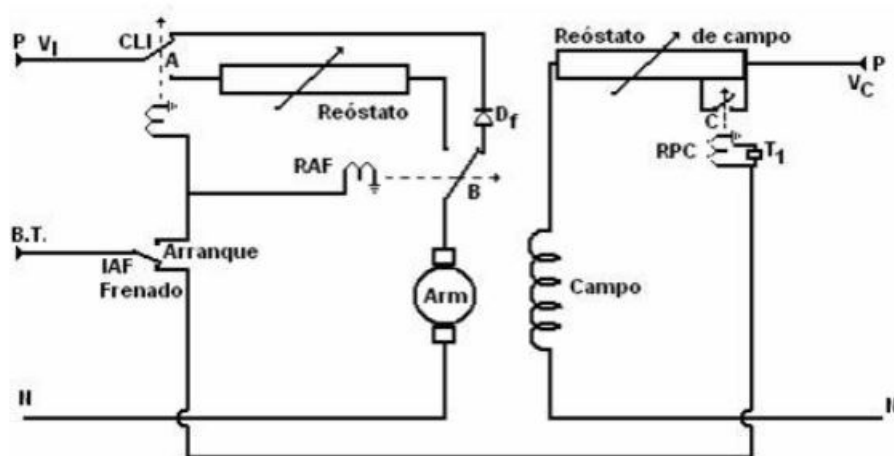


Figura 2.10: Esquema eléctrico de un sistema de freno regenerativo [5]

2.5. Energía Eléctrica Otorgada por Baterías

2.5.1. Batería

Una batería es un dispositivo que permite almacenar energía en forma química, para en un posterior proceso de descarga entregar energía eléctrica, esto a través de un circuito que permite revertir el proceso de carga [6]. Las baterías están construidas con un número determinado de celdas electroquímicas, usualmente se encuentra baterías de seis celdas donde cada una de ellas es capaz de almacenar aproximadamente dos voltios, razón por la cual es común encontrar baterías de doce voltios en el mercado.

Tipos de Baterías [6]

En el mercado existen dos tipos de baterías, estas son:

- Baterías no recargables.- más conocidas como pilas, en estas la reacción química durante su uso es irreversible, su ciclo de vida es único y la autonomía viene dada por el tiempo que demora en descargarse, no permiten el mantenimiento.
- Batería recargables.- la mayoría de este tipo de baterías son del tipo plomo ácido, y algunas de otros elementos químicos pero por su costo son rara vez usadas, entre las aleaciones más usadas se encuentran níquel - cadmio,

níquel - zinc, zinc - aire, sodio - azufre, hidruro metálico de litio, ion de litio, litio - polímero.

Funcionamiento

Una batería esta compuesta por celdas individuales conectadas en serie, cada una de ellas es capaz de producir un promedio de dos voltios, cada una de estas posee varias placas que alternan entre positivas y negativas mediante una placa plástica, todas la placas positivas se conectan a un lado y las negativas a otro. Las placas se encuentran sumergidas en un electrolito que es una mezcla de ácido sulfúrico y agua, este electrolito deberá estar aproximadamente a cinco milímetros arriba de las placas [7].

En una batería completamente cargada, como se muestra en la Figura 2.11, las placas negativas son de plomo poroso, que llevas el símbolo químico de Pb , las placas positivas son de peróxido de plomo esponjoso PbO_2 , el electrolito por tanto es ácido sulfúrico diluido H_2SO_4 .

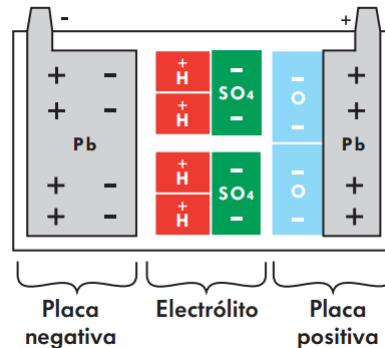


Figura 2.11: Batería Cargada
[7]

El proceso de descarga ocurre cuando las placas positivas y negativas están conectadas por un consumidor eléctrico, en dicho caso los electrones fluyen de la placa negativa a través del consumidor (carga) a la placa positiva, el arribo de los electrones a la placa positiva, rompe la unión del plomo con el oxígeno, el oxígeno cargado negativamente se combina con el hidrógeno, cargado positivamente que viene del ácido sulfúrico (electrolito) formando agua.

El resto del sulfato del ácido sulfúrico cargado negativamente se combina con las dos placas para formar sulfato de plomo. Este proceso se describe en la Figura 2.12.

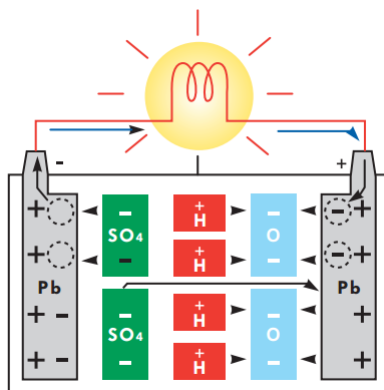


Figura 2.12: Batería Proceso de Descarga
[7]

Durante el proceso de carga, Figura 2.12, los electrones son forzados por el sistema de carga desde las placas positivas a las placas negativas, el sulfato cargado negativamente SO_4 es rechazado de las placas negativas, las cuales se vuelven plomo puro, la placa positiva también otorga sulfato, el oxígeno del agua cargado negativamente se combina con el plomo positivo de las placas positivas y forma peróxido de plomo PbO_2 , el resto de hidrógeno positivo y el sulfato negativo se combinan para formar ácido sulfúrico.

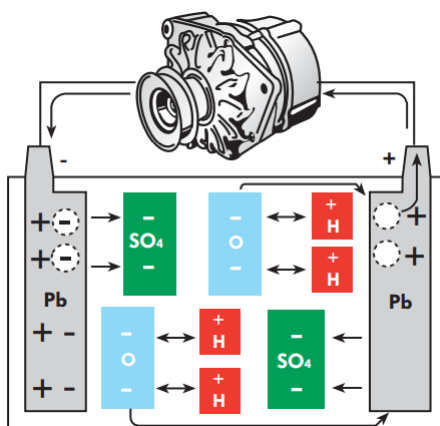


Figura 2.13: Batería Proceso de Carga
[7]

Capacidad de almacenamiento

Es la cantidad de energía que una batería puede almacenar, esta capacidad se mide en amperios-hora (Ah) [7]. Esto indica la cantidad de energía que puede

generar una batería antes de descargarse completamente (se debe tener en cuenta que la unidad amperios-hora no es realmente una medida de energía; para convertir amperios-hora a energía en watts-hora, se multiplica por la tensión de la batería).

Teóricamente, una batería de 100Ah deberá generar una corriente de 2 A para 50 horas (es decir, 2 amperios por 50 horas es igual a 100 amperios-hora). Sin embargo, la capacidad de almacenamiento estimada es un parámetro general, y no una medida exacta, del tamaño de la batería; ya que la capacidad cambia según la antigüedad y estado de la batería, así como según la velocidad a la que se sustrae la energía. Si la corriente se extrae rápidamente de la batería, su capacidad se reduce [1].

Carga, Descarga y Estado de Carga

- La corriente de carga, es la corriente eléctrica de la que está provista una batería y que está almacenada en ella. Al igual que toma más o menos tiempo llenar un tanque de agua, dependiendo de la velocidad con la que el agua ingresa, así el tiempo requerido para cargar completamente una batería depende de la magnitud de la corriente con la cual se carga.

La ecuación (2.5.1) determina aproximadamente la cantidad de energía recibida por una batería (Q , en amperios horas), multiplicando la corriente de carga (I , amperios) por el tiempo de carga (T , en horas).

$$Q = I \times T \quad (2.5.1)$$

Si se multiplica (2.5.1) por la tensión de batería, se obtendrá la cantidad de energía suministrada a la batería, expresada en watts-hora. No se debe cargar baterías a una corriente mayor de un décimo de su capacidad estimada, es decir una batería de 100Ah no deberá ser cargada a una corriente de más de 10 amperios.

- El estado de Descarga, se produce cuando su energía está siendo usada por una carga (como pueden ser, luces, radio, TV o bombas de agua). La velocidad con la que se sustrae corriente de la batería se llama corriente de descarga. Se puede calcular la cantidad de energía extraída de una batería durante un periodo de tiempo igual que en el caso del cargado de energía, multiplicando la corriente de descarga por el tiempo de uso de la carga [1].

Topologías de Conexión de Baterías

Existen dos tipos de formas para conectar baterías a la vez, estos son en serie y paralelo, a continuación se explicará cada una de ellas.

- Conexión en Serie, en este tipo de conexión el borne positivo de una batería se conecta a un borne negativo de otra batería, siendo los bornes libres los terminales de donde se alimentará el circuito de carga, además el valor de la tensión se sumará y se mantendrá la capacidad de la batería. Figura 2.14.

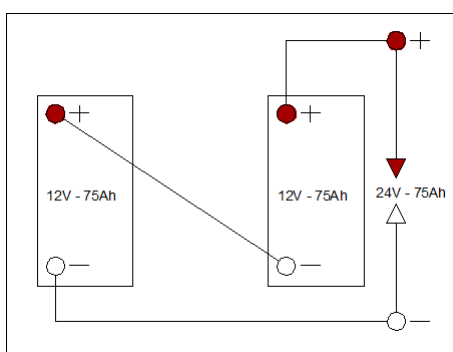


Figura 2.14: Conexión de Baterías en Serie

- Conexión en Paralelo, en este tipo de conexión el borne positivo de una batería se conecta a un borne positivo de otra batería y de igual manera con los bornes negativos de cada una de ellas, siendo cualquier borne de la parte positiva y negativa el lugar de donde se alimentará el circuito de carga, además el valor de la tensión se mantendrá y aumentará la capacidad de la batería. Figura 2.15.

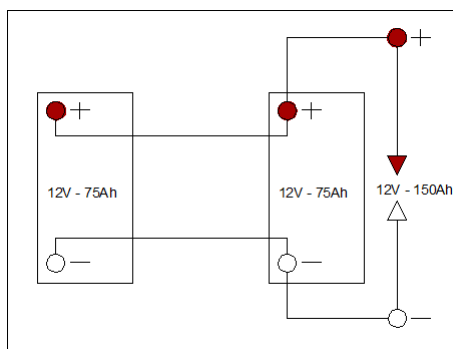


Figura 2.15: Conexión de Baterías en Paralelo

- Conexión Serie - Paralelo, en este tipo de conexión se tiene una combinación de las dos topologías antes mencionadas, conexión serie y paralelo, la conexión a serie de las baterías formará una batería equivalente que posteriormente será conectada en paralelo con una o varias baterías equivalentes a la inicial, con este tipo de conexión lo que se busca es que aumente tanto la tensión como la capacidad del banco. Figura 2.16.

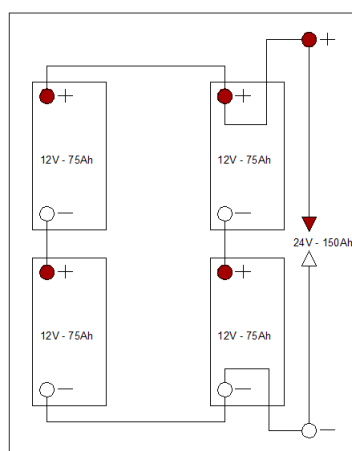


Figura 2.16: Conexión de Baterías en Serie - Paralelo

2.5.2. Cargador de Baterías

Un cargador de baterías es un equipo que permite suministrar tensión y corriente eléctrica a una batería con la finalidad de que se puedan revertir procesos químicos dentro de cada una de las celdas de la batería para que estas vuelvan a almacenar energía eléctrica de manera química y que a la posterior pueda otorgar nuevamente energía eléctrica.

Un cargador de baterías puede variar en su modo de trabajo, dependerá del tipo de batería que se requiera recargar, la capacidad de la batería, los parámetros de carga dados por cada fabricante de la batería y por último del tiempo de recarga.

Funcionamiento de un Cargador de Batería

El objetivo de un cargador de baterías es revertir los procesos químicos dentro de la batería, dentro de este proceso es necesario controlar la tensión que se aplica a la batería, el nivel de corriente que se suministra y dependiendo del algoritmo de carga, se deberá tener en cuenta los tiempos asociados a cada una de las etapas necesarias [8].

El algoritmo de carga de una batería dependerá del tiempo en que se quiera cargar esta, normalmente se tiene una batería parcial o totalmente descargada, es decir la batería presenta tensiones en el rango de 11,4V hasta 12,9V, al principio se intenta alcanzar la tensión de absorción que es un valor típico entre 14,2 a 15 V, la corriente debe ser limitada en esta etapa, la corriente de carga se mantiene constante y la tensión de la batería aumenta lentamente.

La siguiente etapa pasa cuando la batería alcanza un 80% de su carga, se reconoce esta etapa puesto que la corriente de carga bajará a medida que la batería completa su proceso de carga, durante esta etapa la corriente disminuye y la tensión se mantiene.

Las etapas finales se conocen como flotantes puesto que se ha llegado a un porcentaje casi total de carga, y es necesario mantener dicha tensión por ende se sigue entregando una tensión de carga hasta que la batería sea desconectada del cargado, otro método que suele usarse es no entrar a esta etapa de flote y desconectar la batería cuando se alcanzado la carga plena y se realiza un proceso de sensado y sí es necesario el cargado es capaz de conectar la batería automáticamente.

2.6. Sistemas de Control

2.6.1. Modelo Matemático Motor DC

En un motor de corriente directa (DC) para obtener el modelo matemático es necesario poder relacionar la tensión aplicada a la armadura con la velocidad del motor, el análisis de los dos parámetros antes mencionados permiten considerar las características eléctricas y mecánicas del sistema.

Características Eléctricas Motor DC

El circuito eléctrico equivalente de un motor DC, se muestra en la Figura 2.17, donde V_a es la tensión aplicada a la armadura del motor que esta representada como la suma en serie de la resistencia de armadura (R_a), inductancia de armadura (L_a) y tensión inducida (V_c) que es opuesta a la fuente de tensión. La tensión inducida es generada por el núcleo del motor que induce un campo a los imanes permanentes del motor.

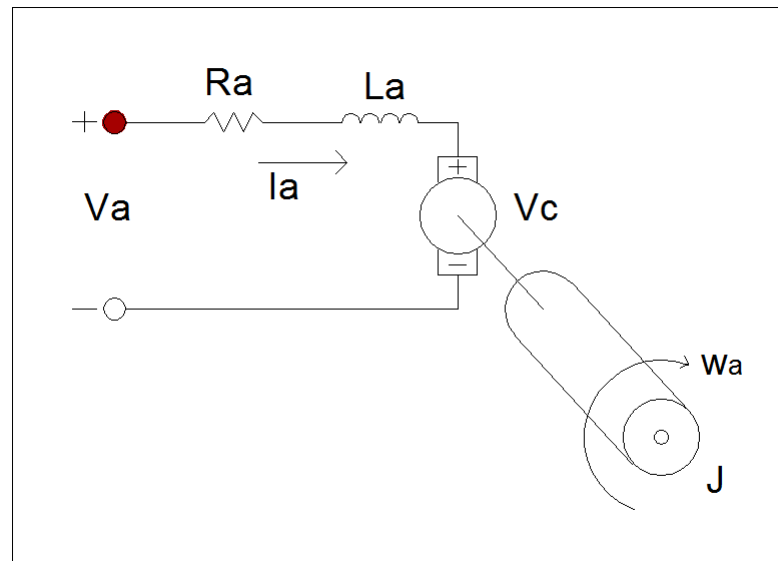


Figura 2.17: Representación Eléctrica de un Motor DC

Mediante el uso de una ecuación diferencial aplicando leyes de Kirchoff en el circuito equivalente de la Figura 2.17, se tiene que la suma de tensiones dentro del lazo es igual a cero. (2.6.1).

$$V_a - V_{Ra} - V_{La} - V_C = 0 \quad (2.6.1)$$

Donde, según la ley de Ohm, la tensión a través de la resistencia está representada por:

$$V_{Ra} = i_a \times R_a \quad (2.6.2)$$

Donde i_a es la corriente de armadura, y la tensión a través de de la inductancia es proporcional al cambio de corriente a través del núcleo con respecto al tiempo, se tiene:

$$V_{La} = L_a \frac{d}{dt} i_a \quad (2.6.3)$$

Donde L_a es la inductancia del núcleo de la armadura. Finalmente se tiene que para que exista f.e.m la tensión del inducida debe cumplir que:

$$V_c = k_V \times \omega_a \quad (2.6.4)$$

Donde k_V es la constante de velocidad determinada por el flujo de densidad de los imanes permanentes, la reluctancia del núcleo de hierro de la armadura y el número de vueltas de la armadura, y ω_a es la velocidad de giro de la armadura.

En base a (2.6.4), (2.6.3) reemplazadas en (2.6.1) se tiene:

$$V_a - i_a \times R_a - L_a \frac{d}{dt} i_a - k_V \times \omega_a = 0 \quad (2.6.5)$$

Características Mecánicas del Motor DC

Basándose en el balance de equilibrio del sistema de la Figura 2.17, la suma de torques de el motor debería ser igual a cero, por consiguiente se tiene:

$$T_e - T_{\omega'} - T_{\omega} - T_L = 0 \quad (2.6.6)$$

Donde T_e es el torque electromagnético, $T_{\omega'}$ es el torque de aceleración rotacional del rotor, T_{ω} es el torque producido por la velocidad del rotor y T_L es el torque mecánico producido por la carga. El torque electromagnético es proporcional a la corriente a través de la armadura y es descrito como :

$$T_e = k_t \times i_a \quad (2.6.7)$$

Donde k_t es la constante de torque y depende de la densidad de flujo de los imanes, reluctancia del núcleo de hierro y el número de vueltas en la armadura. $T_{\omega'}$ es:

$$T_{\omega'} = J \frac{d}{dt} \omega_a \quad (2.6.8)$$

Donde J es la inercia del rotor y el equivalente mecánico de la carga. El torque asociado a la velocidad es descrito como:

$$T_{\omega} = B \times \omega_a \quad (2.6.9)$$

Donde B es el coeficiente de amortiguación. En base a (2.6.7), (2.6.9) reemplazadas en (2.6.6) se tiene:

$$k_t \times i_a - J \frac{d}{dt} \omega_a - B \times \omega_a - T_L = 0 \quad (2.6.10)$$

De (2.6.5) y (2.6.10), y teniendo en cuenta que se debe relacionar la corriente de armadura con la velocidad de giro se tiene el siguiente sistema:

$$\frac{d}{dt} i_a = -\frac{R_a}{L_a} \times i_a - \frac{k_V}{L_a} \times \omega_a + \frac{V_a}{L_a} \quad (2.6.11)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_a = \frac{k_t}{J} \times i_a - \frac{B}{J} \times \omega_a - \frac{T_L}{J} \quad (2.6.12)$$

Función de Transferencia en Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques del sistema puede ser desarrollado por la resolución de (2.6.11) y (2.6.12), usando la transformada de Laplace, para cada ecuación se tiene:

$$s \times I_a(s) - i_a(0) = -\frac{R_a}{L_a} \times I_a(s) - \frac{k_v}{L_a} \times \omega_a(s) + \frac{1}{L_a} \times V_a(s) \quad (2.6.13)$$

$$s \times \omega_a(s) - \omega_a(0) = \frac{k_t}{J} \times I_a(s) - \frac{B}{J} \times \omega_a(s) - \frac{1}{J} \times T_L(s) \quad (2.6.14)$$

Al resolver las anteriores ecuaciones y despejando las variables de relación corriente de armadura y velocidad angular se tiene:

$$I_a(s) = \frac{-k_v \times \omega_a(s) + V_a(s)}{L_a \times s + R_a} \quad (2.6.15)$$

$$\omega_a(s) = \frac{-k_t \times I_a(s) - T_L(s)}{J \times s + B} \quad (2.6.16)$$

De (2.6.15) y (2.6.16) se puede deducir el diagrama de bloques de la función de transferencia del modelo matemático del motor DC, dicho diagrama se muestra en la Figura 2.18.

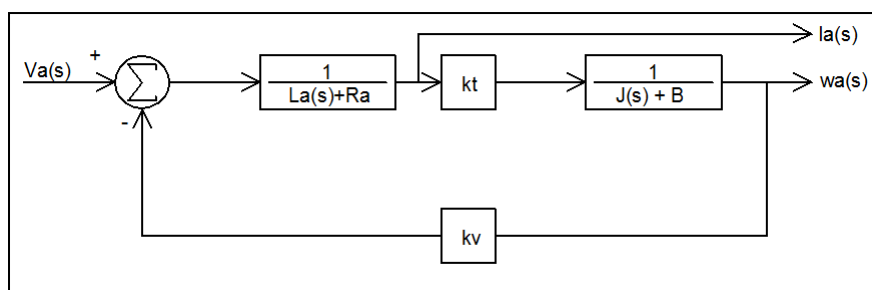


Figura 2.18: Representación del Modelo Matemático de un Motor DC en Diagrama de Bloques

De la Figura 2.18, se tiene:

V_a =tensión inducido de armadura.

L_a =inductancia de armadura reflejada por el motor

R_a =resistencia de armadura

k_t =constante torque dada por el fabricante del motor

k_v =constante velocidad dada por el fabricante del motor

J =inercia del rotor, depende de la carga acoplada al motor

B =coeficiente de amortiguación asociado con la rotación del motor

2.6.2. Control de Par y Velocidad de Motor Eléctrico DC

Un controlador para motor DC está dedicado a aplicaciones de velocidad y posición, el uso de estos controladores ha estado en auge debido a su bajo costo y excelente desempeño puesto que son usados en aplicaciones donde las actividades de mantenimiento no son frecuentemente requeridas, al contrario de los controladores para motores AC cuyo costo inicial es alto y se requiere un continuo mantenimiento.

Para controlar un motor DC, normalmente se cumple con dos etapas, la primera la de energización y la segunda la de sentido de giro del motor, para la primera se usan convertidores de potencia y para la segunda un juego de dispositivos de conmutación que permitan alterar el sentido de giro del motor.[9]

Un motor DC posee ciertos límites de funcionamiento que deben ser tomados en cuenta para su control, dentro de dichos límites se da importancia a la corriente de armadura y la tensión inducida de armadura con que se energice al motor, puesto que de estos dos parámetros dependerá el par y velocidad que se induzca al motor DC.

Control del Sentido de Giro por Método de Cuadrantes

El Control por Cuadrantes permite influir en el sentido de giro y velocidad de un motor DC, en la Figura 2.19 se muestra el funcionamiento del primer y tercer cuadrante que representan un motor energizado tanto en polaridad positiva como negativa respectivamente, mientras que en el segundo y cuarto cuadrante se tiene un proceso de frenado debido a que el motor a dejado de recibir energía y a comenzado a funcionar como un generador eléctrico por lo cual la dirección de la corriente se invierte a la de su cuadrante diagonal opuesto.

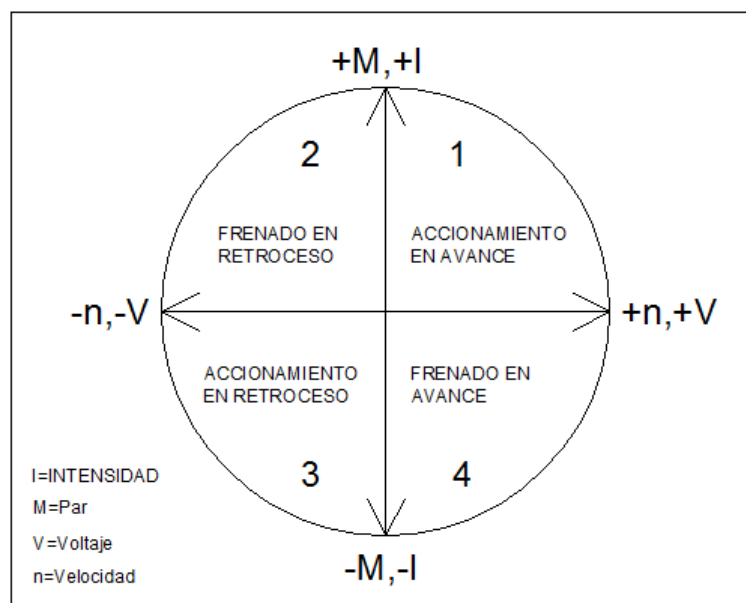


Figura 2.19: Esquema de Control por Cuadrantes para Motor DC

- Controlador de Dos Cuadrantes o Semipunte (*Half-Bridge*)

En este tipo de control, usan dos cuadrantes de la misma columna, es decir el motor puede girar en sentido horario o contrario a las agujas del reloj permanentemente, puesto que los elementos de conmutación solo permitirán este modo de trabajo y una inversión de giro no es posible de manera automática.

- Controlador de Cuatro Cuadrantes o Punte Completo (*Full-Bridge*)

El control por cuatro cuadrantes de un motor DC permite establecer el sentido de giro pues se tiene un control tanto de la tensión y corriente de alimentación hacia el motor; en el primer cuadrante tanto el par como la velocidad tienen el mismo sentido, y con una tensión e intensidad positiva se deduce que el motor está consumiendo energía y gira hacia adelante, si se observa el cuarto cuadrante tanto la tensión como la velocidad son positivas pero el par y la corriente son negativas, de esto se deduce que se mueve hacia adelante pero el motor genera una fuerza en sentido contrario, es decir el motor se encuentra en un proceso de frenado, en el tercer cuadrante sucede lo inverso al primer cuadrante por lo que se lo conoce como proceso de retroceso del motor, en el segundo cuadrante sucede lo inverso al cuarto cuadrante con la diferencia que el proceso de frenado se realiza mientras ha dejado de retroceder el motor.

Control en Etapa de Energización Motor DC

Dentro de las técnicas de control que se usan para controlar la etapa de energización en motores de corriente continua existen dos métodos que han tomado importancia, el control por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation*) y control por frecuencia de pulso (*Pulse Frequency Modulation*), también conocida como control por modo deslizante, siendo este último una técnica más robusta para cargas de alto consumo energético [10].

■ Control por Ancho de Pulso o Control PWM

Este método permite controlar la duración del ancho de pulso de una señal cuadrada, esto se logra con el uso de un microcontrolador o equipos diseñados para generación de ondas, este control de pulsos permite controlar el modo en el que conducen los elementos de potencia, que pueden ser tiristores o transistores [11].

Este método permite recortar la corriente continua de alimentación hacia la carga en forma de una onda cuadrada, la energía que recibe la carga estará reflejada por la proporción de tiempo en alto y bajo que se mantenga la señal de onda cuadrada en un ciclo de trabajo, al controlar esta relación se podrá variar la velocidad de un motor de corriente continua, en la Figura 2.20 se muestran dos posibles casos que se pueden dar en el control PWM de un motor de corriente continua.

Las ventajas que presenta esta técnica de control son las de bajo ruido y un mejor control de la frecuencia de conmutación, debido a que es una técnica usada en frecuencias de trabajo bajas, de 500Hz a 50KHz, mientras que las desventajas que muestra son las de baja eficiencia en el uso de cargas bajas o livianas debido a las pérdidas por conmutación. [10]

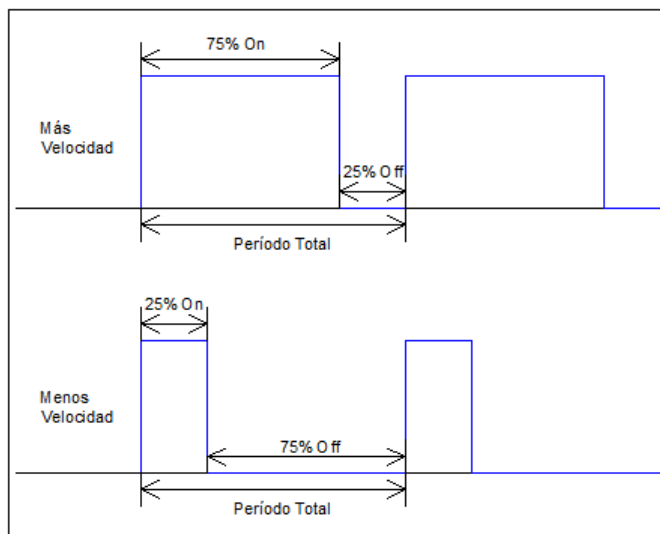


Figura 2.20: Señal de Control por PWM para un Motor DC

■ Control por Modo Deslizante

Si se tiene la ley de control (u), definida como:

$$u = \begin{cases} 1 & s(x) > 0 \\ 0 & s(x) < 0 \end{cases} \quad (2.6.17)$$

La función $s(x)$ se denomina función de conmutación, y dicta el valor que tomará una función con la se quiere incidir dentro de la ley de control del modo deslizante, esta función posee una superficie con dimensión de

$$S = \{x \in R^n : s(x) = 0\} \quad (2.6.18)$$

Donde S es la superficie de discontinuidad o superficie de conmutación, si existe una región R donde existe un modo deslizante, es un subconjunto de S . Un convertidor puede estar controlado en modo deslizante cuando se utiliza la ley de control (2.6.17) y hay una región R donde existe modo deslizante.

Para que exista el modo de deslizamiento, la función $s(x)$ y su derivada temporal, deben tener signos contrarios para que las trayectorias generadas se dirijan a la superficie S [12].

Este modo de control permite variar la frecuencia de trabajo dentro de un convertidor de energía, la estabilidad de la frecuencia con la que se trabaje, se logra cuando el convertidor a alcanzado un punto de estabilidad entre el valor de la referencia y el valor de proceso con el que se este trabajando.

Este método permite el uso de un amplio rango de cargas que pueden oscilar entre valores muy bajos (miliohms) y altos (kilohms), las desventajas que presenta son las de alto rizado a la salida y al trabajar con frecuencias variables es necesario una correcta ejecución en la etapa de control de conmutación debiendo limitarse anchos de banda para un correcto trabajo.

2.7. Sistemas de Electrónica de Potencia

2.7.1. Convertidores DC - DC

Los convertidores DC - DC son circuitos de potencia en los cuales los semiconductores usados conmutan a frecuencias mayores a las de variación de las formas de onda de entrada y salida del conversor, es decir se controla el modo de conducción y bloqueo de los semiconductores lo que origina el cambio de los parámetros de entrada a otros diferentes a la salida. Los conversores DC - DC permiten controlar el flujo de energía entre dos sistemas de continua, algunos ejemplos de estos sistemas son fuentes de alimentación para equipos electrónicos, control de máquinas eléctricas de corriente continua [13].

Convertidor Buck

El circuito de un convertidor buck se muestra en la Figura 2.21, donde V_i es la tensión de entrada, V_o es la tensión de salida, en este tipo de convertidor se cumple que V_o es menor que V_i , por esta razón es conocido también como convertidor reductor, el dispositivo de conmutación S opera a una frecuencia de $1/T$, donde T es el período de trabajo [13].

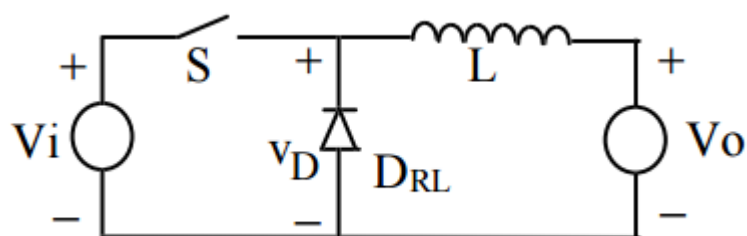


Figura 2.21: Esquema de Convertidor Buck

Convertor Boost

El circuito de un convertor boost se muestra en la Figura 2.22, donde V_i es la tensión de entrada, V_o es la tensión de salida, en este tipo de convertor se cumple que V_o es mayor que V_i , por esta razón es conocido también como convertor elevador o Step-Up, el dispositivo de conmutación S opera a una frecuencia de $1/T$, donde T es el período de trabajo, cuando el elemento S está conduciendo la energía entregada por la fuente es acumulada en el inductor L , y cuando S es bloqueado esa energía es llevada a la salida [13].

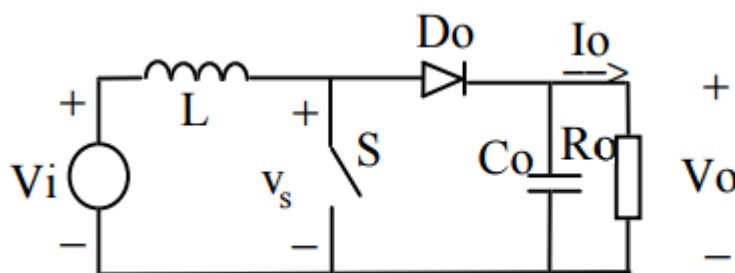


Figura 2.22: Esquema Convertor Boost

Circuito Snubber en un Convertor DC-DC[14]

Parte de la implementación de un circuito convertor de energía conlleva la pérdida de potencia en forma de calor por parte de los dispositivos de conmutación que se este usando. Para reducir estas pérdidas se usan elementos pasivos en ciertas configuraciones que permiten eliminar los sobre picos de tensión y corriente, estos picos incrementan el deterioro del transistor en su etapa de conmutación debido a que permiten la elevación de la temperatura del dispositivo.

Este circuito se conecta en paralelo al transistor usado para la conmutación, como se muestra en la Figura 2.23, la funcionalidad de dicho circuito se observa cuando la temperatura del transistor no se eleva considerablemente o al usar equipos de medición los cambios de tensión y corriente al momento de la conmutación no se realizan de manera abrupta.

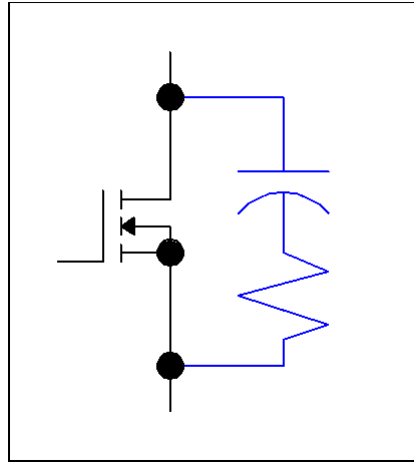


Figura 2.23: Esquema Uso de Circuito Snubber

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE

3.1. Sistemas de Carga para Baterías

3.1.1. Sistema de Carga por Red Eléctrica Pública

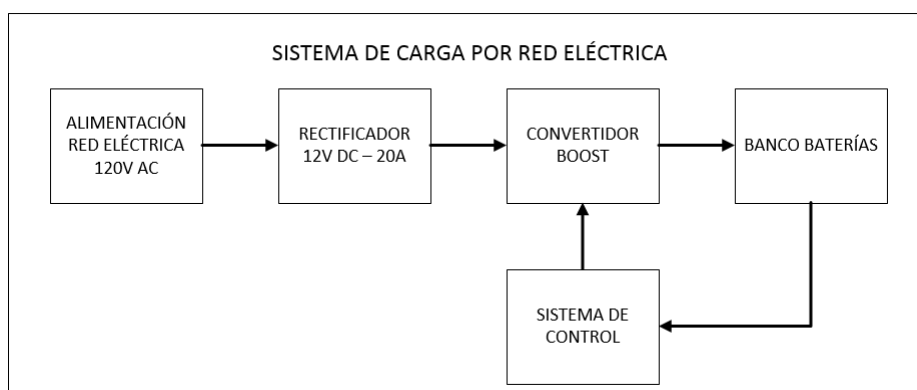


Figura 3.1: Diagrama Bloques Sistema Carga por Red Eléctrica

Para realizar la carga del banco de baterías por energización desde la red eléctrica, se ha seguido el orden mostrado en la Figura 3.1, la etapa de energización se da por la conexión a punto de fuerza de la red eléctrica, después se ingresa a un proceso de rectificación mediante el uso de una fuente conmutada, posteriormente se ingresa a la etapa de potencia, que está construida con base en un convertidor elevador (*boost*), este es controlado por un sistema que toma las decisiones que influyen en el convertidor y por ende en el tiempo de carga del banco, siendo de importancia este concepto para no disminuir el tiempo de vida de las baterías.

- Banco de Baterías

Se constituye de dos baterías conectadas en serie, la importancia de este elemento radica en la información técnica que se pueda obtener, debido a que los valores máximos de corriente y tensión de carga vienen dadas por el fabricante, para las baterías usadas en el proyecto se tienen un rango de tensiones comprendidos entre 13,5V a 13,8V, una intensidad de corriente máxima de 6,79A por batería y una impedancia a plena carga de $31m\Omega$ [15].

- Sistema de Control

La técnica a ser usada para controlar el sistema será la de modulación por ancho de pulso, se deberá tener en cuenta el valor máximo de corriente que admite una batería para lo cual se debe restringir el funcionamiento del convertidor elevador, con la finalidad de proteger el el banco de baterías.

- Convertidor Elevador (*Boost*)

El convertidor tendrá la función de elevar la tensión de entrada para cargar el banco de baterías, además deberá contar con un proceso de protección en caso de que la corriente de carga supere el valor nominal máximo permitido por la batería, este convertidor cumplirá con los siguientes requisitos:

- Tensión de entrada $V_{IN} = 12V$
- Tensión de Salida $V_O = 27V$
- Intensidad de Salida $I_O = 2A$
- Frecuencia $f_{s_{MAX}} = 25Khz$
- Rizado en el inductor $\Delta I = 0,7A$
- Rizado de la tensión de salida menor a 1 %

El ciclo de trabajo (D) para el convertidor está dado por la ecuación:

$$D = \frac{V_O - V_{IN}}{V_O}$$

$$D = \frac{27 - 12}{27} = 0,55$$

La intensidad de corriente que circula por el inductor está dada por:

$$I_L = \frac{I_O}{1 - D}$$

$$I_L = \frac{2}{1 - 0.55} = 4.44 A$$

El valor de la inductancia a usar será:

$$L = \frac{V_{IN} \times D \times T_S}{\Delta I}$$

donde T_S es el período de conmutación

$$L = \frac{12(0,55)(1/25000)}{0,7} = 342\mu H$$

Para asegurar el funcionamiento del inductor, se aumenta en un 25 % su valor, de tal forma el inductor será:

$$L = 1,25(342\mu H)$$

$$L = 428\mu H$$

El valor del capacitor será:

$$C = \frac{I_O \times D}{f_s \times \Delta V_C}$$

$$C = \frac{2(0,55)}{25000(0,25)} = 176\mu F$$

Dicho capacitor deberá ser por lo menos del doble de la tensión requerida a la salida del convertidor, y su valor de capacitancia acorde a lo existente en el mercado.

De los cálculos antes mencionados se tiene la Tabla 3.1 que resume los elementos necesarios para la construcción del convertidor elevador.

Tabla 3.1: Elementos para Construcción Convertidor Boost - Carga Red Eléctrica

Elemento	Valor
Ciclo Trabajo	55 %
Bobina	342 μ H
Capacitor	50v - 176 μ F

Algoritmo de Control

Para la implementación del código del algoritmo se usará un microcontrolador ARM, STM32F411 montado sobre una placa STM32 Núcleo, la cual permite la

lectura de valores analógicos con una resolución de 12 bits a una tensión máxima de entrada de 3.3V, una memoria para programa de 512KB, memoria SRAM de 128KB, un cristal de 100MHz, capaz de trabajar con las frecuencias requeridas por el sistema, una tensión de alimentación máxima de 12V DC, y una buena disponibilidad para su montaje en un circuito impreso.

El diagrama mostrado en la Figura 3.2 representa el algoritmo que se encuentra implementado en el microcontrolador ARM, STM32F411, dicho programa es capaz de controlar el tiempo de conmutación del transistor que actúa como llave de encendido o apagado en el convertidor elevador, para este proceso el programa compara el valor de referencia dado por un divisor de tensión implementado en una placa de circuito impreso con la tensión del banco de baterías que es tomado mediante instrumentación electrónica, de esta comparación se decide si aumentar, disminuir o mantener el ciclo de trabajo establecido hasta ese instante, el control permite que el banco de baterías siempre se mantenga en un proceso de carga hasta que el usuario desconecte el sistema del cargador. El código del programa se encuentra en el Apéndice ??.

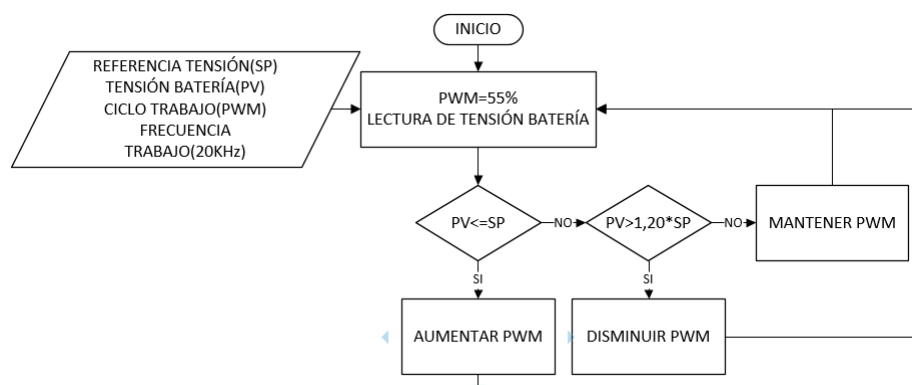


Figura 3.2: Diagrama Flujo para Control de Sistema Carga por Red Eléctrica

3.1.2. Sistema de Carga por Energía Solar

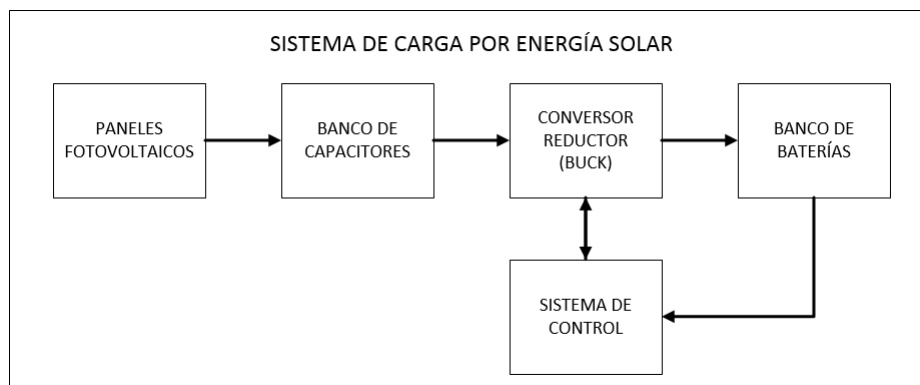


Figura 3.3: Diagrama Bloques Sistema Carga por Energía Solar

Este sistema está energizado por un arreglo en paralelo de dos paneles fotovoltaicos, los cuales tienen las siguientes características: 150W, 44V a plena radiación y 4,5A en cortocircuito, posteriormente alimentan un banco de capacitores con la finalidad de mantener una tensión constante al momento de energizar el convertidor, la elección de un convertidor reductor se debe a que son necesarios 27V DC para cargar el banco de baterías, el sistema de control estará encargado de leer el estado de carga del banco de baterías y actuar en el convertidor, por último el sistema de control actuará en el convertidor mediante la técnica de modo deslizante tomando como superficie de control a la corriente que circula por la bobina del convertidor.

- Convertidor Reductor (*Buck*)

El convertidor tendrá la función de reducir la tensión de entrada dada por los paneles para cargar el banco de baterías, además deberá contar con un proceso de protección en caso de que la corriente de carga supere el valor nominal máximo permitido por el banco de batería, este convertidor cumplirá con los siguientes requisitos:

- Voltaje de entrada $V_{IN} = 44V$
- Voltaje de salida $V_O = 27V$
- Intensidad de salida $I_O = 5A$
- Frecuencia $f_{s_{MAX}} = 50KHz$

- Rizado en el inductor $\Delta I = 0,5A$
- Rizado en tensión de salida no mayor a 0,5%
- Carga $R = 5\Omega$

El ciclo de trabajo (D) para el convertidor está dado por la ecuación:

$$D = \frac{V_O}{V_{IN}}$$

$$D = \frac{27}{44} = 0,61$$

El valor de la inductancia a usar será:

$$L_{MIN} = \frac{(1 - D) \times R}{2f_S}$$

$$L_{MIN} = \frac{(1 - 0,61)(5)}{2(50000)} = 19\mu H$$

Para asegurar el funcionamiento del inductor, se aumenta en un 25% su valor, de tal forma el inductor será:

$$L = 1,25(19\mu H)$$

$$L = 23\mu H$$

Cálculo de la intensidad a través de la bobina

$$I_L = \frac{V_O}{R}$$

$$I_L = \frac{27V}{5\Omega} = 5,4A$$

Cálculo de variación en la intensidad a través de la bobina

$$\Delta I = \left(\frac{V_{IN} - V_O}{L}\right)D \times T_S$$

$$\Delta I = \left(\frac{44V - 27V}{23\mu H}\right)(0,61)\left(\frac{1}{50000}\right) = 9A$$

Cálculo de corrientes máximas y mínimas en la bobina:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = 5,4 + (9/2) = 9,9A$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = 5,4 - (9/2) = 0,9A$$

Cálculo de la corriente eficaz en la bobina

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_L^2 + \left(\frac{\Delta i_L/2}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{5,4^2 + \left(\frac{9/2}{\sqrt{3}}\right)^2} = 5,99A$$

Cálculo del capacitor

$$C = \frac{1 - D}{8 \times L \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times f_s^2} = \frac{1 - 0,61}{8 \times 23\mu H \times 0,005 \times 50000^2} = 169\mu F$$

Dicho capacitor deberá ser por lo menos del doble del voltaje requerido a la salida del convertidor, y su valor de capacitancia acorde a lo existente en el mercado. De los cálculos antes mencionados se tiene la Tabla 3.2 que resume los elementos necesarios para la construcción del convertidor elevador.

Tabla 3.2: Elementos para Construcción Convertidor Buck - Carga Paneles Fotovoltaicos

Elemento	Valor
Ciclo Trabajo	61 %
Bobina	23uH
Capacitor	50V - 169uF

Algoritmo de Control

Para la implementación del código del algoritmo se usará un microcontrolador ARM, STM32F407VG montado sobre una placa DISCOVERY, la cual permite la lectura de valores análogos con una resolución de 12 bits a una tensión máxima de entrada de 3.3V, una memoria para programa de 1MB, memoria SRAM de 192KB, un cristal de 168MHz, capaz de trabajar a altas frecuencias requeridas por la técnica de modo deslizante, una tensión de alimentación máxima de 5V DC, y una buena disponibilidad para su montaje en un circuito impreso.

El diagrama mostrado en la Figura 3.4 representa el algoritmo que se encuentra implementado en el microcontrolador ARM, STM32F407VG, dicho programa es capaz de controlar el tiempo de conmutación del transistor que actúa como llave de encendido o apagado en el convertidor reductor, así como elementos de conexión desde el convertidor reductor hacia el banco de baterías, para este proceso el programa compara el nivel de tensión que posee el banco de baterías, si no supera un límite este ingresa a procesos de comparación para establecer la adecuada ley de control con la cual se actuará sobre el convertidor así como el tiempo hasta que el banco se encuentre totalmente cargado, dichos procesos han sido desarrollados como interrupciones dentro de la lógica del programa y se los puede observar en la Figura 3.5, en estos procesos se compara la tensión del banco de baterías con un valor referencia, este último es establecido por el usuario mediante un divisor de tensión ubicado en la placa de circuito impreso, si la tensión del banco es menor a la de referencia el sistema ingresa a un proceso de conexión entre el convertidor y el banco de baterías, caso contrario se desconecta el banco de baterías, ya que se asume que el banco está completamente cargado. El código del programa se

encuentra en el Apéndice ??.

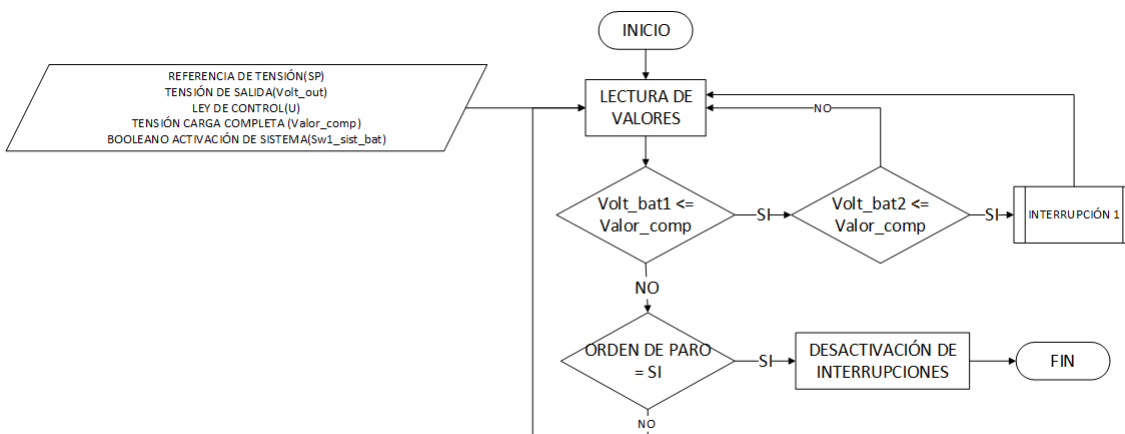


Figura 3.4: Diagrama Flujo para Control de Sistema Carga por Paneles Fotovoltaicos

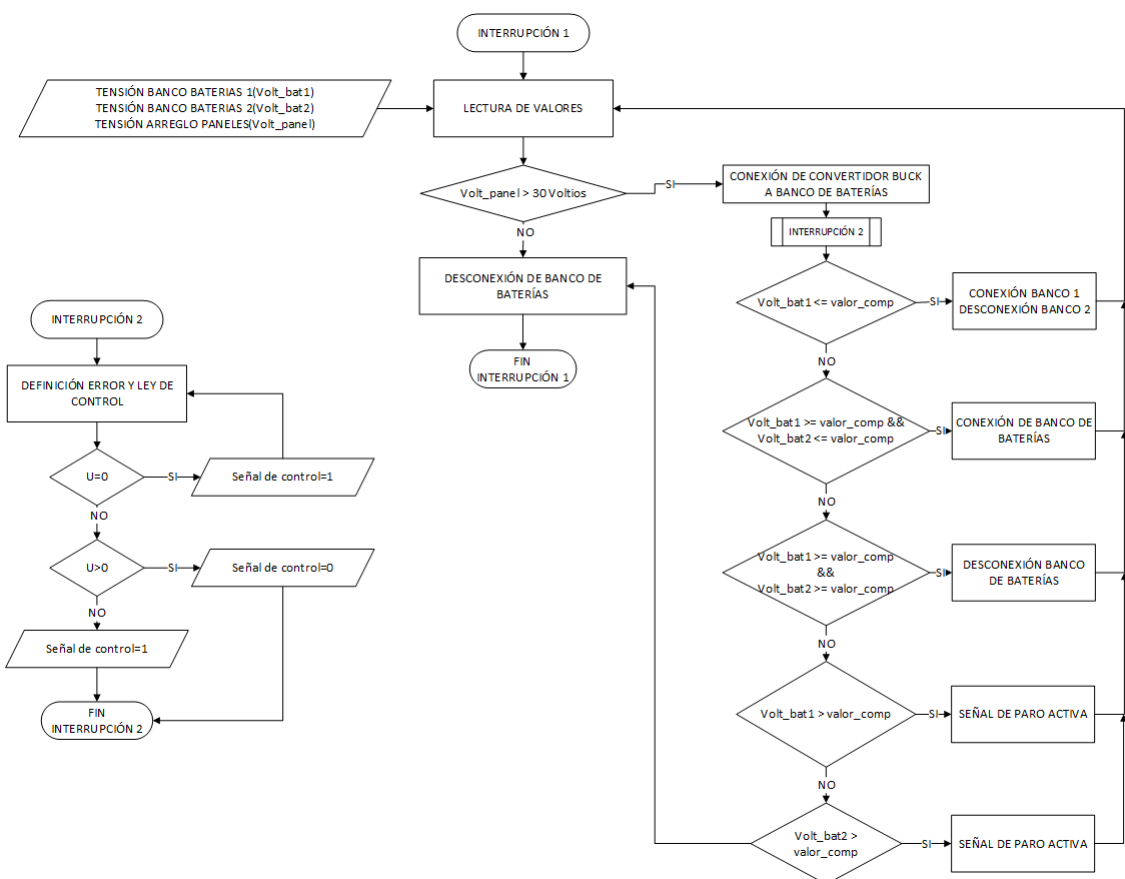


Figura 3.5: Diagrama Flujo para Control de Convertidor Buck. Proceso de Carga por Paneles Fotovoltaicos

3.1.3. Sistema de Carga por Frenado Regenerativo

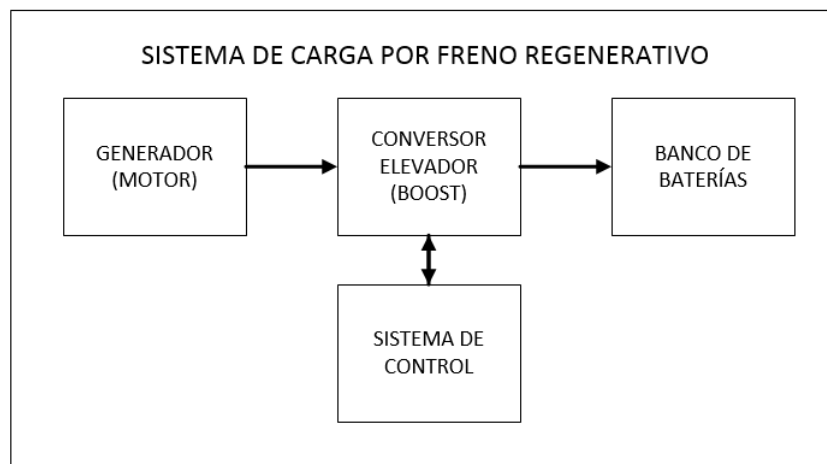


Figura 3.6: Diagrama Bloques Sistema de Carga por Freno Regenerativo

Este sistema está energizado por el motor del vehículo ya que trabaja como generador eléctrico al momento de desconectarse en el proceso de frenado, tanto la tensión como la intensidad de corriente otorgados por el generador ingresan a un convertidor elevador, con la finalidad de aumentar la tensión de entrada a una útil para la carga de baterías, debido a que el ciclo de trabajo de esta etapa de frenado es pequeña el sistema debe ser capaz de otorgar una corriente alta al banco de baterías simulando un proceso de carga rápida con la finalidad de que la mayor cantidad de energía generada sea aprovechada, el sistema de control usa la técnica de modo deslizante y tiene como superficie de deslizamiento la corriente que circula por la bobina del convertidor, además en la rutina de control se tiene un proceso de protección con la finalidad de desconectar el sistema de potencia del generador en el caso de que la intensidad de corriente exceda un límite que no permita un trabajo eficaz.

- Convertidor Elevador (*Boost*)

El convertidor tendrá la función de elevar la tensión de entrada otorgada por el generador a una útil para la carga del banco de baterías, los requisitos de este convertidor son los siguientes:

- Tensión de entrada $V_{IN} = 10V$
- Tensión de Salida $V_O = 27V$
- Intensidad de Salida $I_O = 10A$

- Frecuencia $f_{s_{MAX}} = 50Khz$
- Rizado en el inductor $\Delta I = 2A$
- Rizado de la tensión de salida menor a 1 %

El ciclo de trabajo (D) para el convertidor está dado por la ecuación:

$$D = \frac{V_O - V_{IN}}{V_O}$$

$$D = \frac{27V - 10V}{27V} = 0,62$$

La intensidad de corriente que circula por el inductor está dada por:

$$I_L = \frac{I_O}{1 - D}$$

$$I_L = \frac{10}{1 - 0,62} = 26,3 A$$

El valor de la inductancia a usar será:

$$L = \frac{V_{IN} \times T_S}{\Delta I}$$

donde T_S es el período de conmutación

$$L = \frac{(10)(0,5)(1/50000)}{2} = 62uH$$

Para asegurar el funcionamiento del inductor, se aumenta en un 25 % su valor, de tal forma el inductor será:

$$L = 1,25(62uH)$$

$$L = 77,5uH$$

El valor del capacitor será:

$$C = \frac{I_O \times D}{f_s \times \Delta V_C}$$

$$C = \frac{(10)(0,62)}{(50000)(0,3)} = 413uF$$

Dicho capacitor deberá ser por lo menos del doble del voltaje requerido a la salida del convertidor, y su valor de capacitancia acorde a lo existente en el mercado.

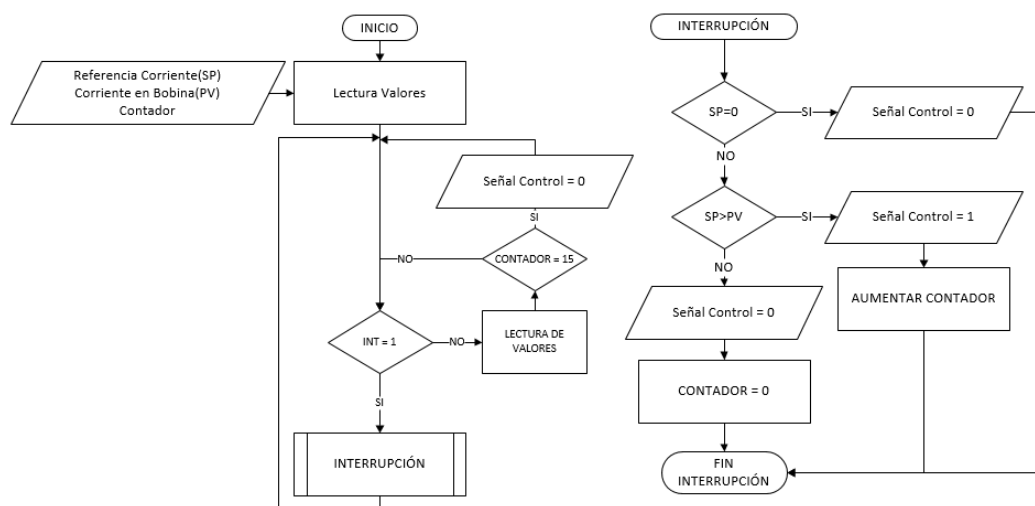
De los cálculos antes mencionados se tiene la Tabla 3.3 que resume los elementos necesarios para la construcción del convertidor elevador.

Tabla 3.3: Elementos para Construcción Convertidor Boost - Carga Freno Regenerativo

Elemento	Valor
Ciclo Trabajo	62%
Bobina	78uH
Capacitor	50V - 413uF

Algoritmo de Control

El diagrama mostrado en la Figura 3.7 representa el algoritmo que se encuentra implementado en el microcontrolador ARM STM32F030, dicho programa es capaz de controlar el tiempo de conmutación del transistor que actúa como llave de encendido o apagado en el convertidor elevador, para dicho proceso se debe comparar el valor de referencia dado por un divisor de voltaje montado en la placa de circuito impreso con el sensor de corriente ubicado a la salida de la bobina del convertidor, del proceso de comparación se designará un valor binario que funcionará como señal de control hacia el convertidor, además se cuenta con un procedimiento de seguridad con la finalidad de que la señal lógica 1 no se mantenga por un período prolongado lo que podría alterar el funcionamiento del convertidor llevando a trabajar en modo discontinuo, el proceso de generación de la señal de control se realiza en un determinado periodo que es definido por el programador, en este caso la interrupción se realiza cada 20us. El código del programa se encuentra en el Apéndice ??.

**Figura 3.7:** Diagrama Flujo para Control en Sistema Freno Regenerativo

3.2. Sistema de Control para Motor DC

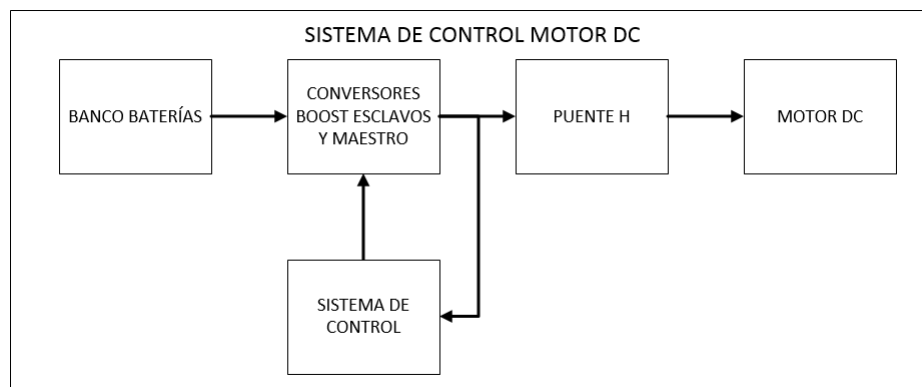


Figura 3.8: Diagrama Bloques Sistema Control Motor DC

Este sistema se encuentra energizado por el banco de baterías, este a su vez alimenta a cuatro convertidores elevadores conectados en paralelo, donde uno de ellos trabaja como maestro, y cuya función es la de leer la intensidad de corriente que pasa por la bobina de entrada para crear la superficie de deslizamiento con la cual trabajara el sistema de control, se recurre a este tipo de conexión de los convertidores ya que la potencia necesaria para inducir movimiento en el motor es muy alta y la construcción de un solo convertidor elevaría las pérdidas de potencia, los costes de la construcción y los procesos de medición de parámetros eléctricos se dificultarían, a continuación de la etapa de potencia se tiene un puente de solenoides cuya función es la de dar el sentido de giro al motor, como último elemento del sistema se posee un motor de imanes permanentes cuya finalidad es la de transmitir movimiento hacia las ruedas del vehículo.

- Tensión de entrada $V_{IN} = 24V$
- Tensión de Salida $V_O = 48V$
- Intensidad de Salida $I_O = 30A$
- Frecuencia $f_{sMAX} = 100Khz$
- Rizado en el inductor $\Delta I = 2A$
- Rizado de la tensión de salida menor a 1%

El ciclo de trabajo (D) para el convertidor está dado por la ecuación:

$$D = \frac{V_O - V_{IN}}{V_O}$$

$$D = \frac{48V - 24V}{48V} = 0,5$$

La intensidad de corriente que circula por el inductor está dada por:

$$I_L = \frac{I_O}{1 - D}$$

$$I_L = \frac{2}{1 - 0,55} = 4,44 A$$

El valor de la inductancia a usar será:

$$L = \frac{V_{IN} \times D \times T_S}{\Delta I}$$

donde T_S es el período de conmutación

$$L = \frac{24V \times 0,5 \times (1/50000)}{2A} = 120\mu H$$

Para asegurar el funcionamiento del inductor, se aumenta en un 25 % su valor, de tal forma el inductor será:

$$L = 1,25(120\mu H)$$

$$L = 150\mu H$$

El valor del capacitor será:

$$C = \frac{I_O \times D}{f_S \times \Delta V_C}$$

$$C = \frac{30A \times 0,5}{100000 \times 0,3} = 500\mu F$$

Dicho capacitor deberá ser por lo menos del doble del voltaje requerido a la salida del convertidor, y su valor de capacitancia acorde a lo existente en el mercado.

De los cálculos antes mencionados se tiene la Tabla 3.4 que resume los elementos necesarios para la construcción del convertidor elevador.

Tabla 3.4: Elementos para Construcción Convertidor Boost - Control de Motor DC

Elemento	Valor
Ciclo Trabajo	55 %
Bobina	150uH
Capacitor	100V - 500uF

3.2.1. Obtención y Análisis de modelo matemático del motor

La identificación del motor se realiza con la ayuda del programa Matlab®^(R), usando la función *ident* sobre una base de datos tomada en pruebas al vacío del motor, para generar la señal de excitación se construye un divisor de tensión, para alternar entre dos tensiones de alimentación, dichos datos han sido tomados mediante una tarjeta de adquisición, siendo la constante de tiempo de muestreo (τ) 5us.

Al analizar los datos se obtiene una función de transferencia, que mediante un análisis de coeficientes por el método de igualación con la función de transferencia expresada en el inciso 2.6.1 del Capítulo II, permite conocer los parámetros mecánicos y eléctricos del motor en estudio, los cuales se encuentran expresados en la Tabla 3.5, así como la función de transferencia del motor, que cumple con la forma:

$$G(s) = \frac{k_t \times k_v}{(L_a \times s + R_a)(J \times s + B)}$$

$$G(s) = \frac{6,1301E10}{(s + 450)(s + 1,31E08)}$$

Tabla 3.5: Parámetros eléctricos y mecánicos de motor

Parámetro		Valor
Resistencia de Armadura	R_a	0,01 Ω
Inductancia de Armadura	L_a	37uH
Coefficiente de Torque	kt	0,13 $\frac{Nm}{A}$
Coefficiente de Velocidad	k_v	0,132629 $\frac{Vs}{rad}$

3.2.2. Algoritmo de Control en Modo Deslizante

El diagrama mostrado en la Figura 3.9 representa el algoritmo que se encuentra implementado en el microcontrolador, dicho programa es capaz de controlar los tiempos de conmutación de los transistores que actúan como llaves de encendido o apagado en los convertidores, para dicho proceso se debe comparar el valor de referencia dado por el pedal de aceleración del vehículo con el sensor de corriente ubicado a la salida de la bobina del convertidor maestro, del proceso de comparación se designará un valor binario que funcionará como señal de control hacia el convertidor, el proceso de generación de la señal de control se realiza en un determinado periodo que es definido por el programador, en este caso la inte-

rupción se realiza cada 10us, período adecuado para que los procesos de lectura no interfieran con el tiempo de respuesta del sensor de corriente y que permitan que el convertidor funcione adecuadamente sin entrar a un régimen discontinuo. El código del programa se encuentra en el Apéndice ??.

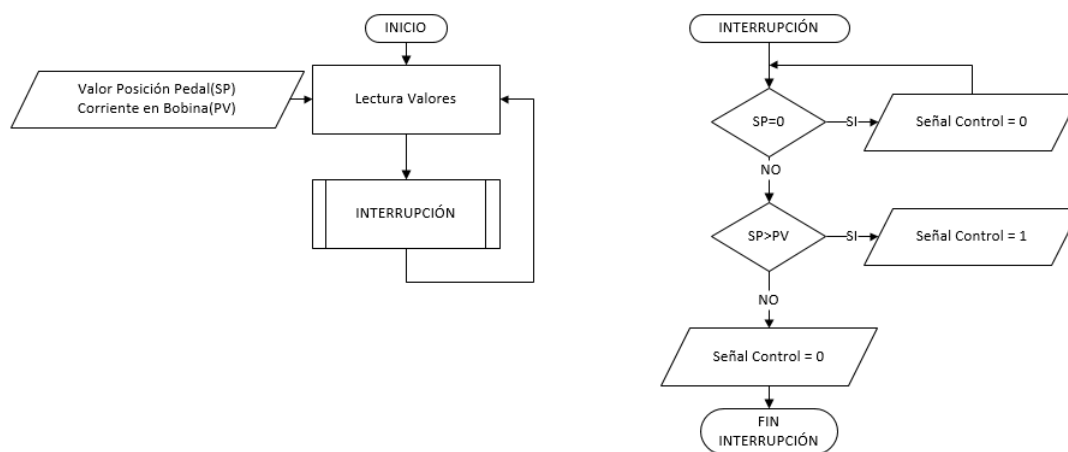


Figura 3.9: Diagrama Flujo de Operación en Modo Deslizante Sistema Control Motor DC

El código de control está programado en un microcontrolador ARM de la marca *ST Microelectronics*, el modelo que se usa es el STM32F407VG implementado sobre una tarjeta *DISCOVERY*, dicho dispositivo ha sido elegido por su capacidad de trabajar a altas frecuencias, bajo consumo energético ($VCC_{MAX} = 5V$ y $IC_{MAX} = 100mA$).

3.3. Diseño del Sistema de Monitoreo y Control

Los procedimientos de monitoreo permiten que el usuario del vehículo pueda tomar decisiones al momento de conducir el vehículo, por lo cual la elección de variables adecuadas a ser supervisadas es de importancia, el monitoreo dentro del presente proyecto tiene como finalidad la de informar sobre el estado del banco de baterías, la intensidad de corriente total consumida por todos los sistemas, y la intensidad de corriente sobre la bobina del convertidor maestro, para esto se contará con una pantalla de cristal líquido LCD, donde se presentará dicha información de manera visual, por otra parte el panel de control del vehículo será el responsable de energizar todos los sistemas implementados, establecer el sentido de giro del vehículo al accionar los solenoides que conforman el puente H, uso de las diferentes señales luminosas, y establecer el modo de carga sobre el banco de baterías.

3.3.1. Análisis de variables

Una correcta elección de variables a medir permitirá diferir al usuario sobre valores que pueden afectar el correcto funcionamiento del vehículo, por está razón han sido elegidos los siguientes parámetros:

- *Nivel de Carga de Baterías*

Determina el tiempo de autonomía del vehículo, disminuye cuando el motor del vehículo es forzado a trabajar a alta potencia, momento de arranque o aceleraciones bruscas y aumenta cuando el vehículo entra en procesos de carga ya sea por frenado regenerativo o el sistema fotovoltaico.

- *Intensidad de Corriente General*

Determina la intensidad de corriente total usada por todo el vehículo, y su finalidad es la de establecer una corriente máxima de descarga a ser tomada en cuenta por el usuario ya que no se puede sobre exigir a las baterías pues este procedimiento disminuiría el tiempo útil de trabajo del banco de baterías.

- *Intensidad de Corriente Usada por el Convertidor Maestro*

Determina la intensidad de corriente que circula por la bobina del convertidor maestro, ubicada a la salida de la bobina del convertidor y colocada en este sitio por la necesidad de usar el rizado de corriente producido por la carga y descarga de la bobina, es necesario conocer este parámetro para no esforzar los elementos de cada convertidor y provocar un mal funcionamiento, de manera indirecta también permite conocer la intensidad de corriente que se tiene en la carga.

3.3.2. Diseño de instrumentación

Para tomar los datos de las tensiones en el banco de baterías, entradas y salidas en tensión de los diferentes conversores, tensión otorgada por los paneles fotovoltaicos, y para ingresar los valores de referencia a cada uno de los diferentes sistemas se procedió a usar divisores de tensión, los cuales cumplen con el esquema de la Figura 3.10 (a), debido a que los microcontroladores tienen como límite 3,3V para su modulo ADC, este valor deberá ser el máximo entregado por el divisor para evitar el daño del microcontrolador, se usan valores de resistencia en el orden de los kilo-ohm para asegurarse que la intensidad de corriente que circule sea lo más baja posible, por esta razón se utiliza una resistencia de valor fijo y una

de valor variable con la finalidad de ajustar el valor de tensión a la salida, para los divisores que darán la referencia, se utiliza solamente una resistencia variable puesto que se usa un valor de 3,3V como alimentación al divisor. 3.10 (b).

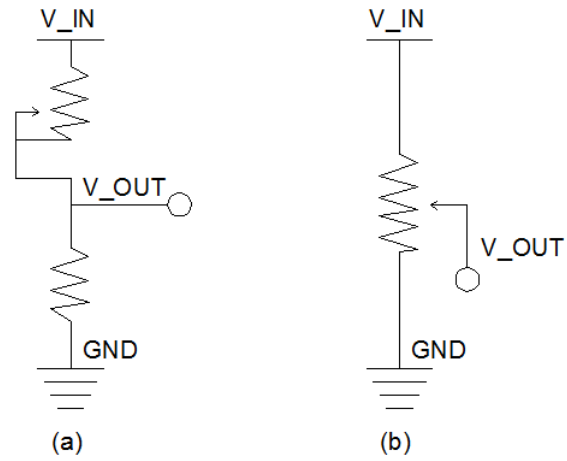


Figura 3.10: Esquema de Divisores de Tensión

Capítulo 4

IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS

4.1. Montaje de Circuitos de Control y Potencia

Los diferentes sistemas de carga como de control se encuentran implementados en una caja de revisión y ubicados bajo la posición que se especifica en la Figura 4.1, estos módulos son capaces de interactuar con los diferentes sistemas de generación de energía como son los paneles fotovoltaicos y el generador eléctrico (motor), después de procesos de conversión de energía se puede alimentar el banco de baterías como el motor con la finalidad de inducir movimiento en el vehículo.

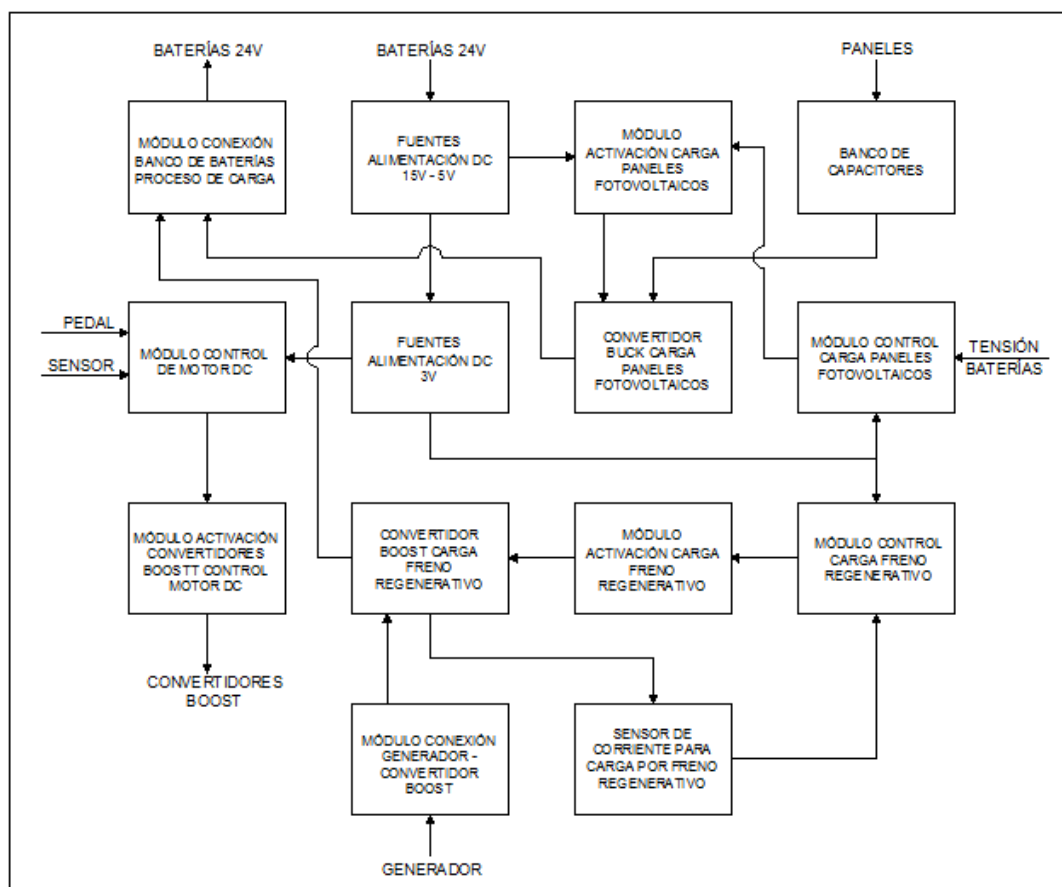


Figura 4.1: Esquema de Distribución de los Sistemas de Carga y Control

4.1.1. Sistema para Control de Motor DC

Este sistema consta de varias etapas que fueron detalladas en el Capítulo 3, Figura 3.8, el banco de convertidores se encuentra implementado del modo que se observa en la Figura 4.2, las placas de salida permiten la conexión de cada una de las salidas de los convertidores y que posteriormente serán conectadas al puente de dirección (puente H), las borneras de alimentación permiten la conexión del banco de baterías, proceso realizado por el usuario quien controla un solenoide (24V - 135A) para la conexión, por último se tiene el circuito de potencia que consta de cuatro convertidores elevadores (*boost*), de los cuales uno de ellos trabaja como maestro, razón por la cual el sensor de corriente se encuentra ubicado cerca de este, los convertidores se encuentran conectados en paralelo, es decir comparten el mismo nodo de alimentación y salida ya sea está positiva o negativa.

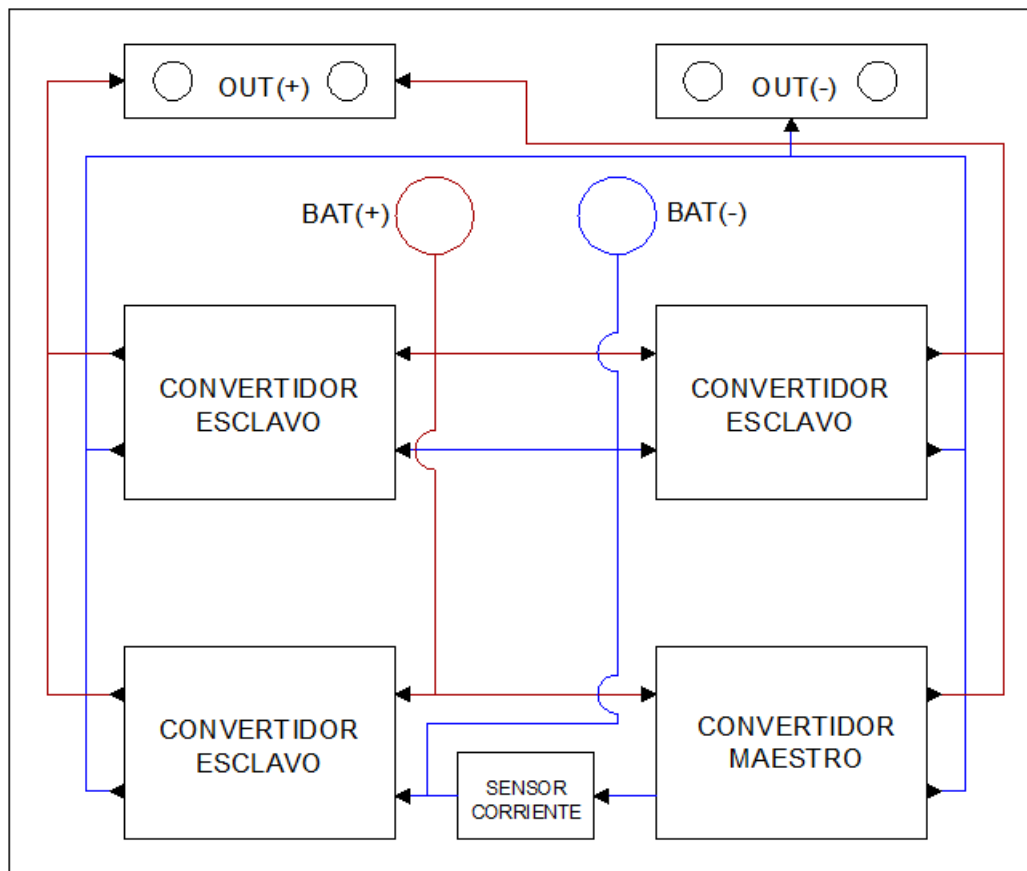


Figura 4.2: Esquema de Distribución - Banco de Convertidores Boost

4.1.2. Sistemas para Carga de Banco de Baterías

Carga con Paneles Fotovoltaicos

Los paneles han sido colocado en la parte superior del vehículo Figura 4.3, para que la mayor cantidad de radiación solar llegue a las celdas solares y puedan otorgar una potencia constante, para esto se ha conectado a los paneles en paralelo Figura 4.4, lo que permite mantener una tensión nominal de salida y una intensidad de corriente del doble a la otorgada por un solo panel, dicha potencia eléctrica alimentará al convertidor reductor para la carga del banco de baterías.



Figura 4.3: Instalación Física de Paneles Fotovoltaicos

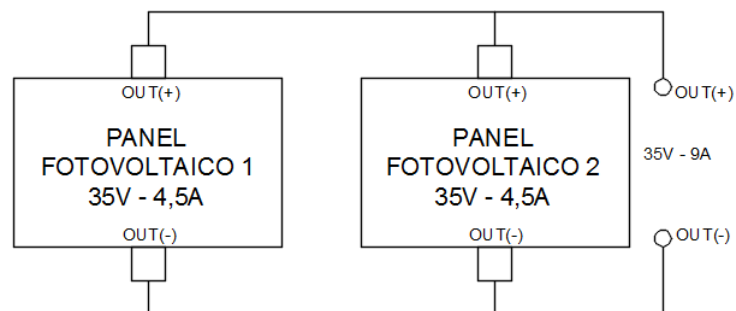


Figura 4.4: Topología de Conexión en Paneles Fotovoltaicos

Carga con Frenado Regenerativo

La implementación de este sistema consta de cinco módulos representados en la Figura 4.1, donde el generador viene dado por el giro normal del motor cuando se ha dejado de acelerar el vehículo, la potencia entregada por este elemento es tomada por el convertidor boost mediante el módulo de conexión que es controlada desde el panel principal por el usuario, el módulo de control se encarga de activar el transistor que funciona como llave de encendido y apagado del convertidor, y el módulo de sensor de intensidad de corriente que es el encargado de generar la superficie de control donde actuará la técnica de control.

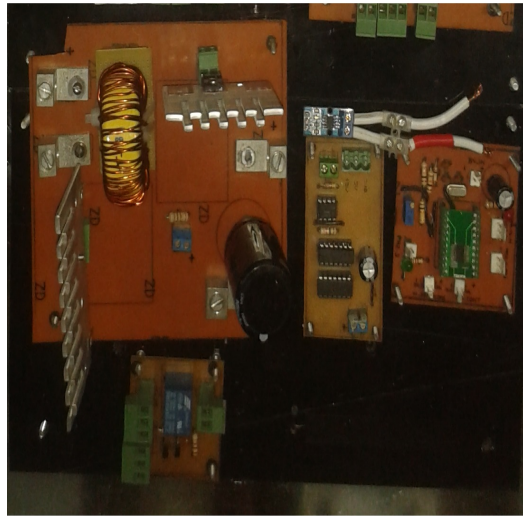


Figura 4.5: Implementación Física de Sistema de Carga por Freno Regenerativo

Carga con Red Eléctrica Pública

La implementación de este sistema se realiza de manera externa al ambiente del vehículo debido a que es más factible encontrar una acometida de punto de fuerza eléctrica en una edificación donde es posible estacionar el vehículo, este sistema consta de cuatro módulos representados en la Figura 4.6, donde la alimentación de energía está dada por una fuente conmutada de tensión, Figura 4.7, esta energía es tomada por el convertidor elevador, que a su vez es controlado por el módulo de control y activación, el módulo de fuente esta encargado de alimentar el *driver* que activa al transistor, y la tarjeta que contiene el microcontrolador. Todo el sistema, Figura 4.8, se ha colocado en una caja, donde se tiene dos bornes para la conexión con el banco de baterías y un interruptor de encendido y apagado para poner en funcionamiento el sistema.

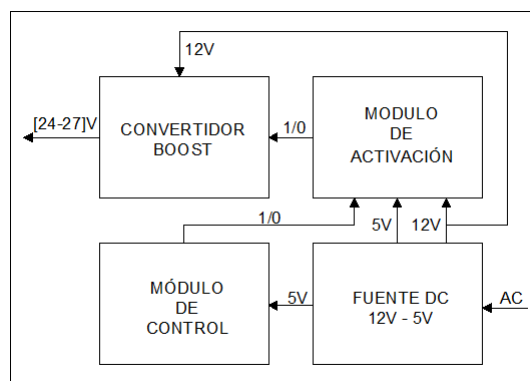


Figura 4.6: Esquema Distribución de Módulos en Sistema Carga por Red Eléctrica



Figura 4.7: Fuente Conmutada 12V - 250W

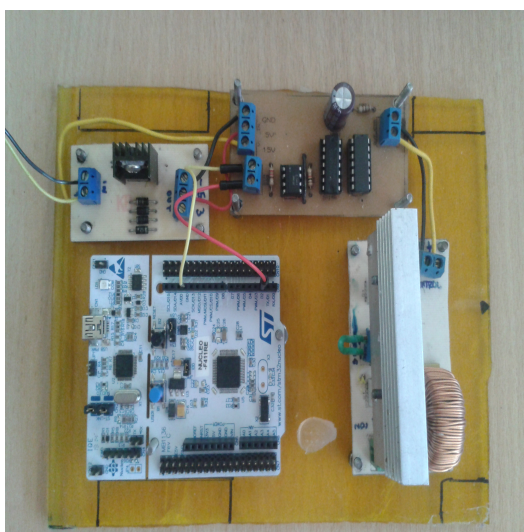


Figura 4.8: Implementación Física de Sistema de Carga por Red Eléctrica

4.2. Equipos y Sistema de Monitoreo

4.2.1. Pedal de Acelerador

El elemento que se muestra en la Figura 4.9, es un pedal de aceleración electrónico, ya que cuenta con dos resistencias variables conectadas en modo diferencial, es decir que permiten que el valor leído por dichas resistencias refleje la correcta posición del pedal a lo largo de su trayectoria radial, este elemento permite establecer la referencia que será tomada por el sistema de control del motor, para aumentar la potencia de alimentación hacia el motor y por ende inducir una

mayor velocidad al mismo, en el presente proyecto solo se ha usado una de las resistencias variables debido a que se requiere de cambios con un alto paso de valor a valor, y si se usará la conexión diferencial dichos valores serían mínimos y no perceptibles por el sistema de control, provocando que la fuerza con la que se presionará el pedal fuese mayor y que el recorrido radial se vea reducido y por ende no se podría llegar a establecer una referencia alta.

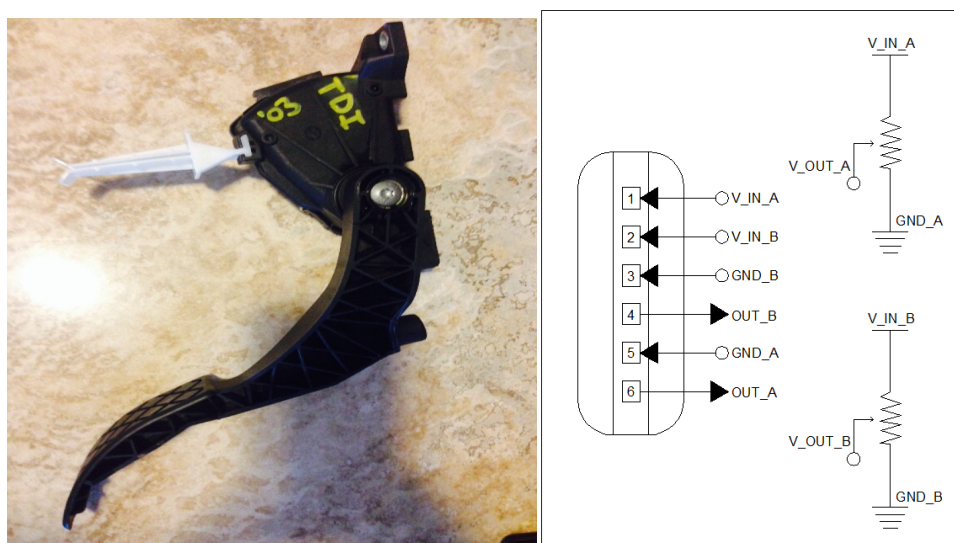


Figura 4.9: Pedal de Acelerador Electrónico

4.2.2. Elementos de Iluminación

El vehículo cuenta con un sistema de iluminación que contempla luces de: pare, aviso de giro (direccionales) y luces de guía, estos elementos se controlan mediante interruptores ubicados en el panel de control y que pueden ser activados por el usuario según sus requerimientos, la luz de pare es controlada por un interruptor normalmente abierto ubicado en el pedal de freno, con la finalidad de que en un procedimiento de frenado se enciendan dichas luces. En la Figura 4.10 se pueden observar las luces de la parte delantera y en la Figura 4.11 las luces de la parte posterior del vehículo.



Figura 4.10: Luces Delanteras

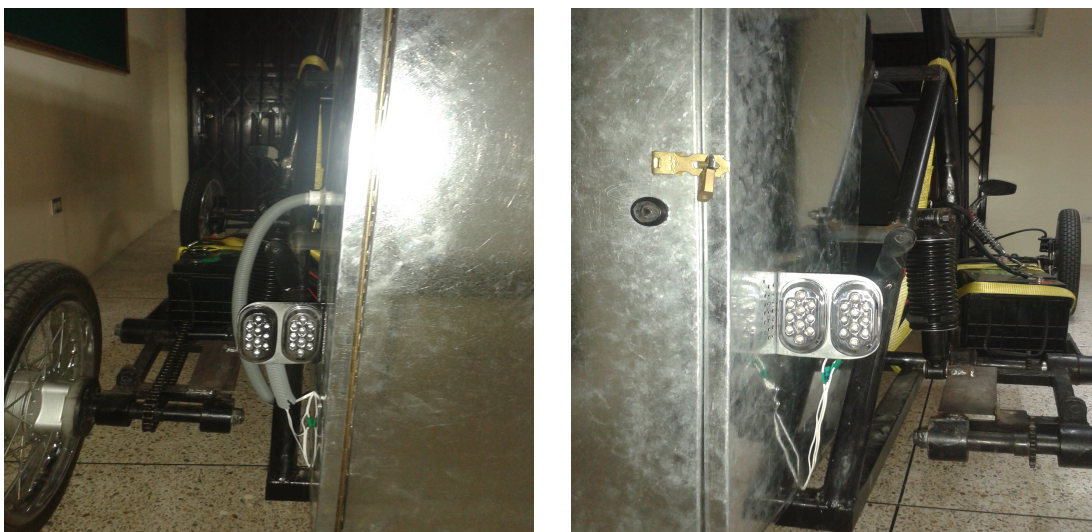


Figura 4.11: Luces Traseras

4.2.3. Tablero de Control y Visualización

Este elemento permite que el usuario tenga el control de todos los sistemas que se encuentran implementados en el vehículo, el tablero con sus elementos se encuentra distribuido como se muestra en la Figura 4.12, este panel permite encender los sistemas electrónicos del vehículo, seleccionar el modo de giro del motor, encender los diferentes tipos de luces, seleccionar el sistema de carga para el banco de baterías y encender el sistema de frenado regenerativo, este panel se encuentra ubicado al costado izquierdo del conductor, como se muestra en la Figura 4.13.

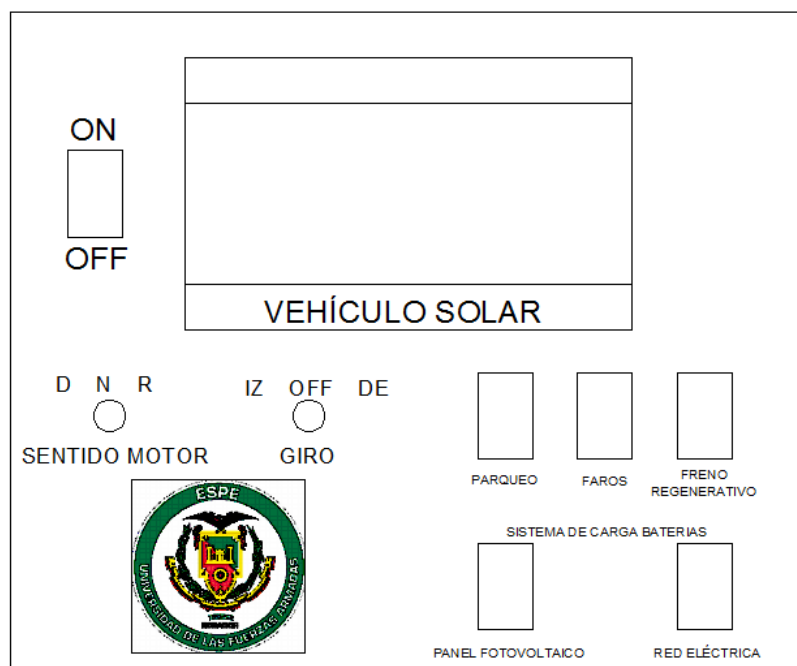


Figura 4.12: Distribución elementos en Panel de Control

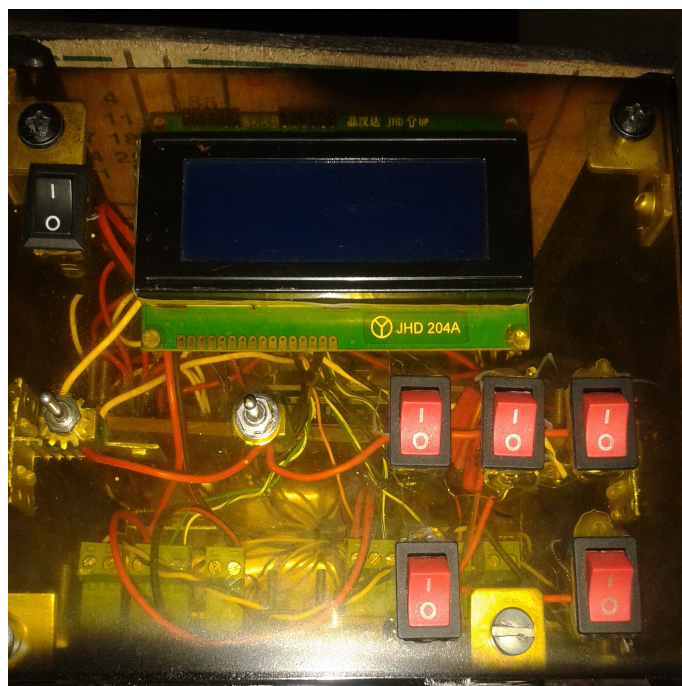


Figura 4.13: Distribución elementos en Panel de Control

Capítulo 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se detallan las pruebas realizadas para los convertidores implementados en cada uno de los sistemas usados, se realiza un análisis con las pruebas para determinar la eficiencia de los convertidores, y el error que tienen estos en comparación con los valores obtenidos en simulación.

5.1.1. Sistema para Control de Motor DC

Para probar el funcionamiento del convertidor se condujo el vehículo sobre una pendiente, y se procedió a acelerar el mismo, debido a que mantener la posición del pedal de aceleración es difícil, establecer el valor referencia se ve afectado, por esta razón se observa altas fluctuaciones en este valor, Figura 5.1, al observar los cambios en valores de aceleración se observan picos de corriente debido a que el motor debe vencer la inercia del vehículo para generar movimiento, en la Figura 5.2 se muestra la respuesta en tensión al realizar la prueba, se observa que el proceso de aceleración permite que los parámetros eléctricos se eleven hasta llegar a los valores para cual fue diseñado el convertidor.

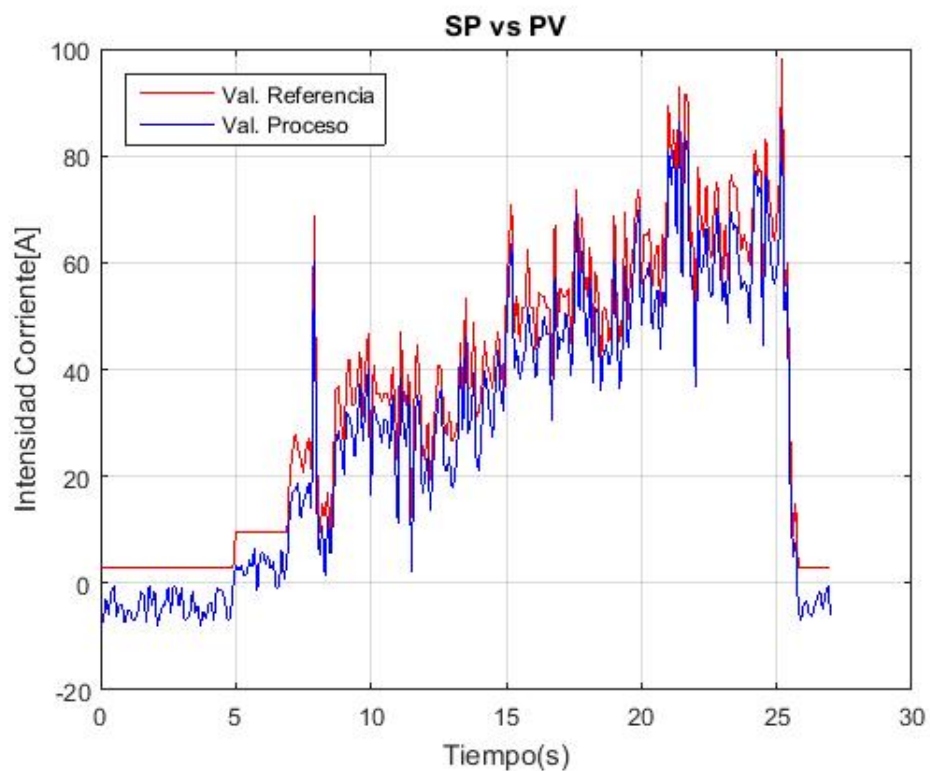


Figura 5.1: Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Motor DC

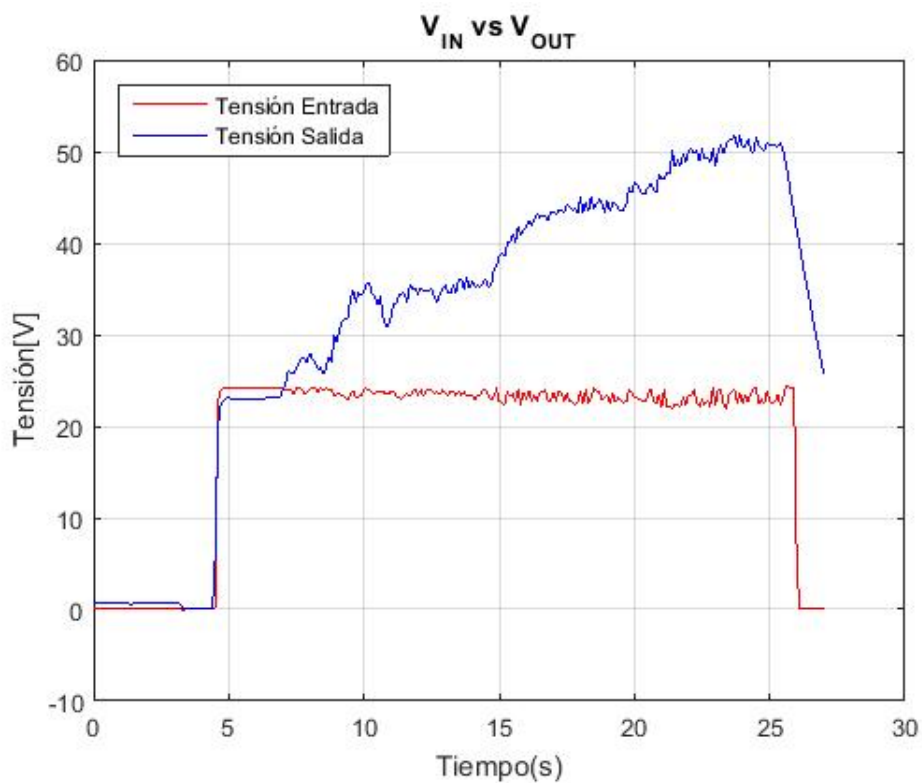


Figura 5.2: Respuesta en Tensión - Control para Motor DC

Análisis de Eficiencia

Para conocer la eficiencia de este convertidor, se han tomado valores al momento de su funcionamiento, y han sido comparados con valores simulados, la simulación se ha llevado a cabo en la herramienta Simulink de Matlab®^(R), el modelo de simulación se encuentra en Apéndice ??, los valores de la Tabla 5.1 reflejan los resultados obtenidos en las pruebas en campo, mientras que en la Tabla 5.2 se tienen los valores obtenidos mediante simulación del sistema, las dos tablas muestran el valor de eficiencia obtenido, y en la Tabla 5.3 se muestra el valor del error relativo, de donde se concluye que los convertidores usados para alimentar al motor han trabajado de una manera eficaz para valores de referencia superior a la de 30A, esto debido a que el motor requiere de una intensidad nominal para vencer la inercia del peso que tiene el vehículo en movimiento.

Tabla 5.1: Valores Reales - Prueba Control Motor DC

VALORES REALES				η
$V_{IN}[V]$	$V_{OUT}[V]$	$I_{IN}[A]$	$I_{OUT}[A]$	
23.90	31.00	25.00	16.00	0.83
23.80	34.50	29.00	17.00	0.85
23.60	35.00	33.00	20.00	0.90
23.50	43.00	46.00	23.00	0.91
23.40	48.40	54.00	24.00	0.92

Tabla 5.2: Valores Simulados - Prueba Control Motor DC

VALORES SIMULADOS				η
$V_{IN}[V]$	$V_{OUT}[V]$	$I_{IN}[A]$	$I_{OUT}[A]$	
24.00	32.00	27.05	16.00	0.87
24.00	32.25	29.78	17.80	0.84
24.00	33.37	29.39	19.39	0.91
24.00	43.49	49.43	24.85	0.91
24.00	49.89	56.78	25.89	0.95

Tabla 5.3: Error Relativo

η_{REAL}	η_{SIM}	$\xi[\%]$
0.83	0.87	4,5
0.85	0.84	1.2
0.90	0.91	1.0
0.91	0.91	0
0.92	0.95	3.1

5.1.2. Sistema para Control de Freno Regenerativo

Para analizar el funcionamiento de este sistema se procedió a tomar datos en un proceso de frenado, para que el motor sea capaz de generar una tensión e intensidad de corriente debe encontrarse a una velocidad mayor a 10 Km/h , en la Figura 5.3 se muestra el funcionamiento del convertidor a nivel de tensión eléctrica, la tensión de entrada refleja un aumento y disminución debido a que el proceso de frenado comienza a una velocidad reducida y aumenta en el transcurso del proceso hasta que se desactiva por parte del usuario dicho proceso, la tensión de salida refleja una estabilidad lo que permite establecer que el procedimiento de control se realizó de una manera eficaz.

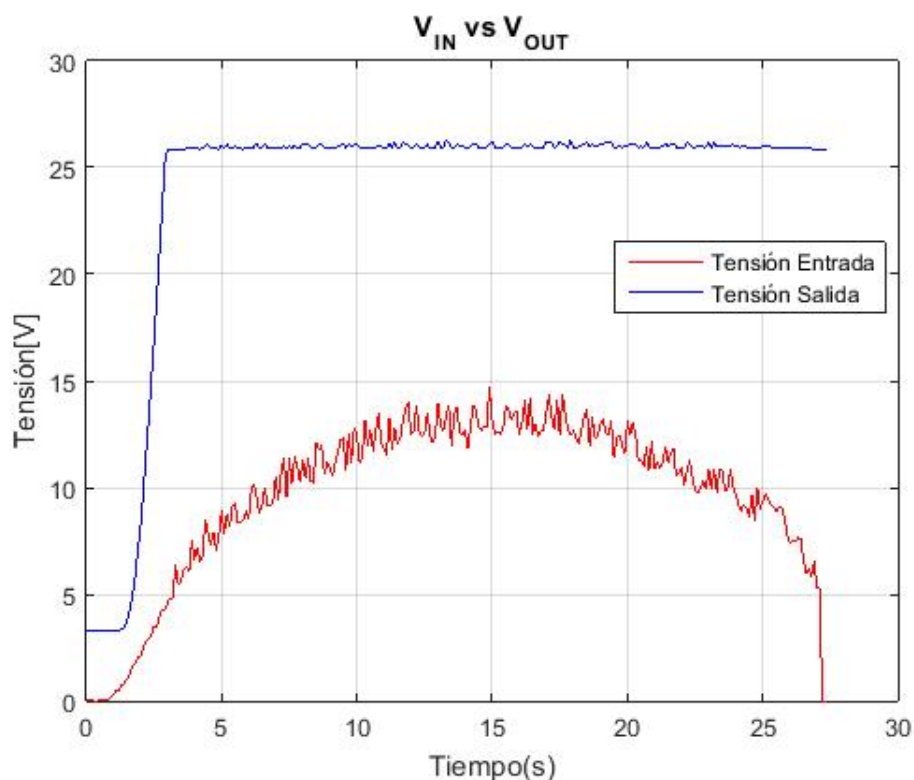


Figura 5.3: Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga Freno Regenerativo

5.1.3. Sistema para Control de Carga por Paneles Fotovoltaicos

Las pruebas para este sistema fueron realizadas en horas en las que se presenta la mayor radiación solar, siendo estas la de la mañana en transcurso al medio día, en la Figura 5.4 se muestra la respuesta en tensión eléctrica del convertidor reductor, se observa que la tensión de entrada presenta picos negativos en relación

a la media de tensión otorgada por los paneles, esto debido a que la radiación solar no es constante y al presentarse obstrucciones ambientales provocan estos cambios, por otro lado en la tensión de salida se observa picos positivos en relación a la media, esto debido a que la acción de control debe responder en los instantes de cambio de radiación solar, en conclusión se tiene una tensión estable que permite la carga del banco de baterías.

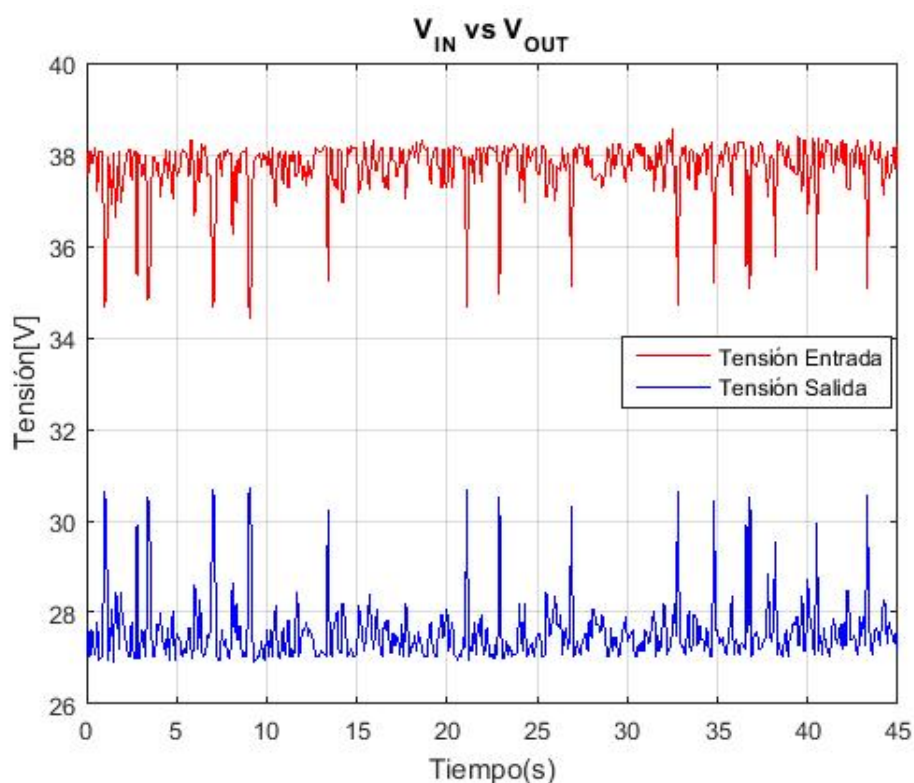


Figura 5.4: Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga por Paneles Fotovoltaicos

En la Figura 5.5 se muestra la respuesta del convertidor reductor en intensidad de corriente, se observa que la intensidad con la que alimentan los paneles al convertidor es fluctuante debido a los cambios de radiación solar antes explicados, sin embargo la respuesta a la salida del convertidor reduce estos picos en la señal ya que se comporta como un filtro, manteniendo una intensidad de corriente promedio capaz de cargar el banco de baterías.

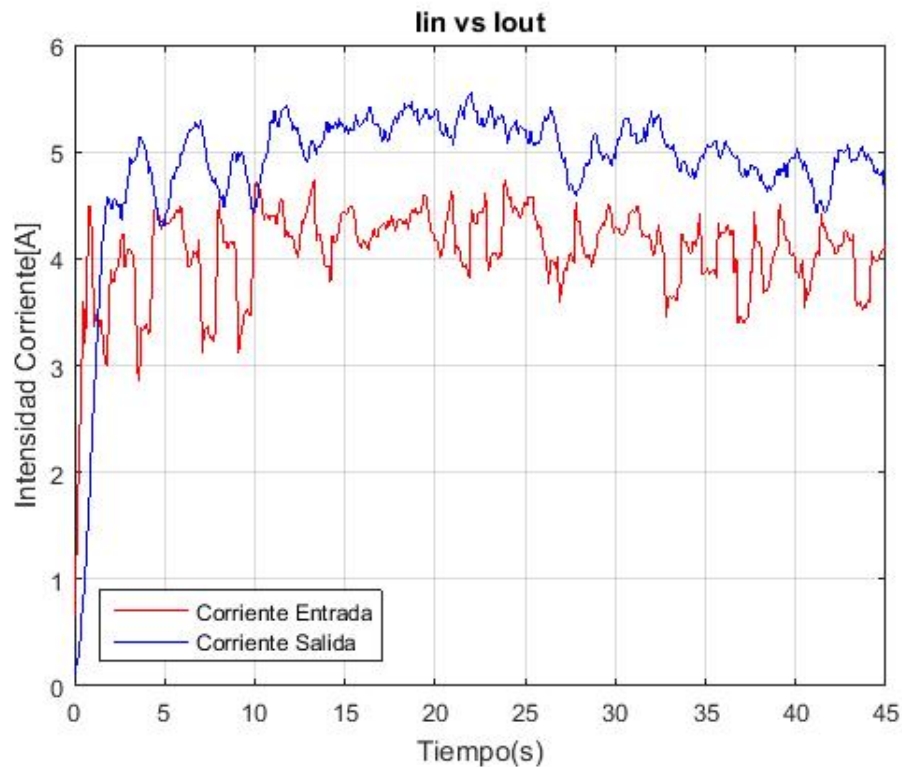


Figura 5.5: Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Sist. Carga por Paneles Fotovoltaicos

5.1.4. Sistema para Control de Carga por Red Eléctrica

Las pruebas para este sistema fueron realizadas con las baterías descargadas a un 50% de su capacidad total, en la Figura 5.6 se muestra la respuesta en tensión eléctrica del convertidor elevador, se observa una respuesta estable que se debe a que el convertidor maneja un ciclo de trabajo fijo ya que es necesario mantener una tensión a la salida lo más lineal posible para cargar el banco de baterías, de igual manera la fuente de alimentación maneja un valor estable pues viene de un circuito rectificador mediante elementos conmutados que permiten tener una tensión con un factor de rizado reducido.

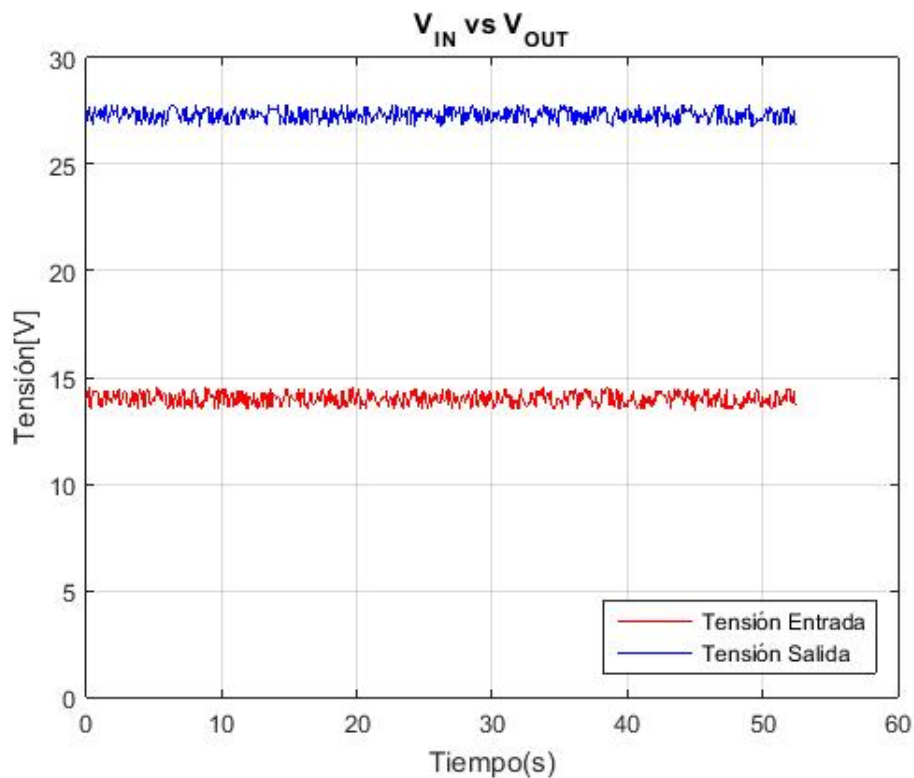


Figura 5.6: Respuesta en Tensión - Control para Sist. Carga por Red Eléctrica

En la Figura 5.7 se muestra la respuesta del convertidor elevador en intensidad de corriente, ya que se trata de un convertidor elevador, la corriente de salida se ve reducida en igual proporción en la que se ve aumentada la tensión de salida, el manejar una corriente de salida estable permite que el banco de baterías entre en un proceso de carga denominado “Carga Lenta”, ya que se mantiene la potencia de alimentación estable permitiendo así que los elementos químicos de la batería no realicen cambios bruscos al momento de cargar las celdas que componen cada una de las baterías.

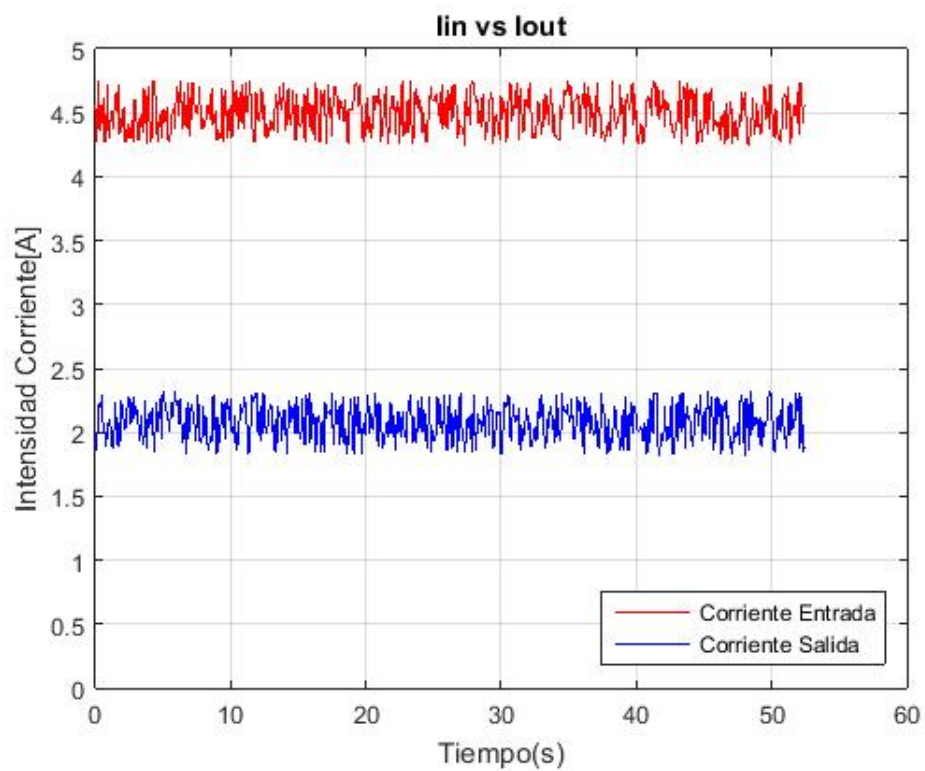


Figura 5.7: Respuesta en Intensidad de Corriente - Control para Sist. Carga por Red Eléctrica

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

El uso de una topología en paralelo de convertidores elevadores (*boost*), ha permitido el manejo de tensión e intensidad de corriente eléctrica en una mayor cantidad, lo que reduce las pérdidas por calor en los elementos usados como llaves de conmutación y costos por elementos en la construcción de convertidores, ya que son necesarios elementos con características reducidas en sus valores nominales de funcionamiento y que procesos de medición de intensidad de corriente no sean difíciles gracias al manejo de un convertidor maestro, cuya finalidad fue la controlar el ciclo de trabajo de los transistores.

El uso de baterías secas ha permitido que el tiempo de autonomía del vehículo sea mayor, ya que el tiempo de descarga se ve reducido ante la robustez de las baterías para soportar altas corrientes de arranque y que las mismas no reduzcan de manera abrupta la energía que pueda otorgar un banco.

El uso de energías renovables para desarrollar sistemas de carga sobre un banco de baterías, permite que energías que se encuentran de modo natural o producidas en el ambiente como lo es la radiación solar o el flujo electromagnético sean aprovechadas para actividades de conversión de energía mediante el uso de convertidores dc-dc, de este modo se ha logrado reutilizar la energía eléctrica y tener la capacidad de almacenarla para un posterior uso en una actividad como la movilidad.

Mantener el movimiento de un vehículo depende de manera indirecta del uso de buenas técnicas de control sobre los sistemas que componen el vehículo, razón

por la cual, técnicas como la de modos deslizantes sobre cargas ligeras (motor dc, baterías), ha permitido que la mayor cantidad de energía necesaria para alimentar dichas cargas sea usada de una mejor manera, reduciendo pérdidas en calor por procesos de conmutación indebidos o llevados a períodos poco eficaces de activación.

Los errores cometidos en la fase de pruebas sobre el convertidor elevador que alimenta al motor se deben a la inestabilidad de la señal de referencia ya que se la obtiene de un elemento mecánico (pedal acelerador) activado por fuerza humana, lo que ha provocado que la ley de control tenga que cambiar rápidamente, logrando así que la toma de datos no pueda ser realizada con precisión.

6.2. Recomendaciones

El uso de un dispositivo maestro, permite que los procesos de control se realicen de una manera más rápida, sin embargo es recomendable el uso del menor número de elementos esclavos ya que el espacio ocupado para su implementación resulta una limitante, además de que el coste de construcción aumentaría si el número de elementos es alto.

Usar elementos pasivos para la reducción de transientes en la activación de transistores o diodos rápidos, permite que convertidores no desperdicien energía en forma de calor, por lo que es de importancia el buen diseño de un circuito supresor de transientes (*snoober*).

Los elementos de la etapa de control como son los microcontroladores se ven susceptibles a variaciones en la alimentación ya sea en su fuente de energización como en los módulos de lecturas digitales o análogas, por lo que se recomienda el uso de un sistema de energización independiente y procesos de opto acoplamiento para protección de los equipos.

REFERENCIAS

- [1] R. ARIVILCA C. ORBEGOZO. Energía solar fotovoltaica. *Deutscher Entwicklungsdienst*, 2010.
- [2] Sunnergy Energías Renovables. Sistemas fotovoltaicos - funcionamiento.
- [3] J.A. POLANÍA PUENTES. Control de motores eléctricos. 2011.
- [4] R. MORENO. Generación de corriente eléctrica mediante un motor de cd (dínamo). 2010.
- [5] A. LEZAMA DIAZ. *Análisis y descripción funcional de la unidad electrónica de frenado utilizada en los trenes de rodadura ferrea FM-95A de la ciudad de México*. PhD thesis, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005.
- [6] C. AQUINO F. MARDER. *Cargador de baterías de Pb de corriente modulada*. Universidad Nacional Del Nordeste, 2004.
- [7] HELLA S.A. *BATERÍAS HELLA. Funcionamiento y Sistema de Carga*. HELLA, 2012.
- [8] SIDEI Ingenieros. *Conceptos Básicos de Carga de Baterías y Algoritmos de Carga*. 2009.
- [9] W. ROBBINS N. MOHAN, T. UNDELAND. *Power Electronics*. 2003.
- [10] STMicroelectronics Group. Dc to dc conversion cookbook - pwm vs pfm.
- [11] M. KAZMIERKOWSKI R. KRISHNAN F. BLAABJERB. *CONTROL IN POWER ELECTRONICS*. ACADEMIC PRESS, 2002.
- [12] D. BIEL SOLÉ. *Control en modo deslizante aplicado a la generación de señal en convertidores conmutados DC/DC*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

- [13] W. UTURBEY. *Notas de Apoyo para el curso básico de Electrónica de Potencia I*. Junio 1996.
- [14] S. LEÓN. *Comparación de metodologías de evaluación de confiabilidad*. PhD thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2011.
- [15] EverExceed Corporation. *Manual SEALED VRLA MONOBLOC AGM BATTERIES*.