

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Elaboración de un prototipo de sistema controlador de carga de baterías de ácido plomo e ion litio de 24v por medio de energía solar

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Mauricio Salomón Aguilar

Cartago, Costa Rica

13 de junio de 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

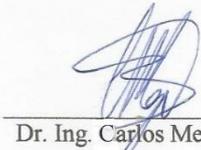
**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Elaboración de un prototipo de sistema controlador de carga de baterías de ácido plomo e ion litio de 24v por medio de energía solar , realizado por Mauricio Salomón Aguilar y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

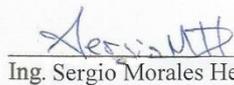
Miembros del Tribunal Evaluador


Ing. Sergio Arriola Valverde

Profesor lector


Dr. Ing. Carlos Meza Benavides

Profesor lector


Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor

Cartago, 12 de junio del 2017

Declaración de Autenticidad y Responsabilidad.

Yo, Mauricio Salomón Aguilar, portador de la cédula de ciudadanía N° 114070927, declaro que el presente informe de proyecto de graduación, ha sido realizado de manera íntegra por mi persona, donde los resultados obtenidos son absolutamente originales, auténticos y personales.

En bajo tal virtud, doy fe que el contenido, las conclusiones y los efectos legales y académicos que se desprenden del trabajo propuesto y redactados en este documento son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica, donde, cuando se han hecho referencias a otras fuentes bibliográficas, estas han sido debidamente detalladas y documentadas, con el fin de respetar la autoría intelectual de terceros.

Cartago, 13 de junio del 2017.



Mauricio Salomón Aguilar

Céd. 114070927

Resumen

Este documento recopila de manera detallada el proceso de diseño e implementación de un prototipo de sistema solar cargador de baterías de 24V de ácido plomo e ion litio en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este proyecto es parte de los proyectos de investigación del laboratorio de sistemas electrónicos para la sostenibilidad (SESlab).

La importancia de este proyecto radica en incentivar el uso de un transporte alternativo como lo son las bicicletas eléctricas, tanto en funcionarios como estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica con sede en Cartago, debido a la gran cantidad de vehículos que ingresan diariamente al Campus central.

El proceso de investigación se enfocó en el aprovechamiento de la energía fotovoltaica para cargar las baterías de tipo ácido plomo e ion litio de 24V.

Para el diseño del prototipo, fue necesario de un sistema que realice un procesamiento adecuado de energía recibida de un módulo fotovoltaico, de manera que utilice esta energía para cargar las baterías, así como un sistema de monitoreo y control que permita el adecuado proceso de carga de la batería como la extracción de máxima potencia del módulo fotovoltaico cuando esto sea requerido.

Palabras Clave: caracterización, energía renovable, estado de carga, irradiancia, MPPT, RTC.

Abstract

This document allows to collect in detail the process of design and implementation of a prototype solar charger system of 24V batteries of lead acid and lithium ion at the Technological Institute of Costa Rica.

This project is part of the research projects of the laboratorio de sistemas electrónicos para la sostenibilidad (SESlab).

The importance of this project is to encourage the use of alternative transportation such as electric bicycles, both University staff and students of the Instituto Tecnológico de Costa Rica central Campus, due to the large number of vehicles that enter daily to the central Campus.

The research process focused on the use of photovoltaic energy to charge lead-acid and lithium-ion batteries of 24V.

For the design of the prototype, it is necessary a system that performs an adequate processing of energy received from a photovoltaic module, so that it uses this energy to charge the batteries, as well as a system of monitoring and control that allows the proper process of charge of battery, as well the extraction of maximum power of the photovoltaic module when this is necessary.

Keywords: photovoltaic module, MPPT, renewable energy, electrons, photoelectric property, state of charge, irradiance, characterization.

ÍNDICE GENERAL

1. Capítulo 1: Introducción	11
1.1. Motivación.....	11
1.2. Objetivos de la tesis	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos	12
1.3. Restricciones.....	13
1.4. Supuestos.....	13
1.5. Delimitaciones.....	13
1.6. Glosario	13
2. Capítulo 2: Marco teórico	14
2.1. Descripción del prototipo de sistema a elaborar.....	14
2.2. Antecedentes bibliográficos	14
2.2.1. Estado del arte	14
2.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	15
2.3.1. Batería	15
2.3.2. Radiación y energía solar	21
2.3.3. Tecnología fotovoltaica.....	22
2.3.4. Convertidor CC-CC	25
2.3.5. Algoritmos MPPT.....	32
3. Capítulo 3. Solución seleccionada.....	37
4. Capítulo 4. Descripción detallada de la solución	38
4.1. Características eléctricas del módulo fotovoltaico	38
4.2. Características eléctricas de las baterías	38
4.3. Diseño del convertidor CC-CC	38
4.4. Montaje y pruebas del convertidor.	40
4.5. Diseño de la etapa de monitoreo y control.....	41
4.5.1. Etapa de monitoreo	41
4.6. Algoritmo de control de prueba de carga de batería.....	45
4.7. Tiempos de ejecución del algoritmo	51
4.8. Gráfica de carga de batería de ácido plomo de 24V con una fuente de alimentación de 17V 10A.....	52

4.9	Gráfica de carga de batería de ion litio de 24V con una fuente de alimentación de 17V 10A.....	53
4.10	Algoritmo de MPPT.....	54
4.11	Gráfica de carga de batería de ácido plomo de 24V con el módulo fotovoltaico.	59
4.12	Gráfica de carga de la batería de ion litio de 24V con el módulo fotovoltaico.	60
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	62
5.1	Conclusiones.....	62
5.2	Recomendaciones.....	62
6.	Referencias.....	63
7.	Anexos.....	65
7.1.	Hojas de Fabricante.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente de una celda de batería. [30].....	15
Figura 2. Comparación de energía específica de baterías primarias y secundarias. [12]	17
Figura 3. Proceso de carga de una celda de batería de ácido plomo. [15]	20
Figura 4. Circuito equivalente de una celda solar. [32]	23
Figura 5. Curva característica de un módulo fotovoltaico. [28].....	24
Figura 6. Modelo general del convertidor reductor. [22].....	25
Figura 7. Principio de funcionamiento en modo continuo del convertidor reductor. [22]	26
Figura 8. Valores de tensión y corriente en el tiempo para un convertidor reductor ideal en modo continuo. [22]	28
Figura 9. Circuito general del convertidor tipo elevador. [23].....	30
Figura 10. Principio de funcionamiento en modo continuo del convertidor elevador. [23]	30
Figura 11. Variación del punto de máxima potencia a diferentes niveles de irradiancia. [28].....	33
Figura 12. Representación gráfica del método de perturbar y observar. [29].....	35
Figura 13. Representación gráfica del método incremental de conductancia. [29].....	35
Figura 14. Diagrama general de solución implementada.....	37
Figura 15. Circuito elevador de tensión diseñado para prueba de concepto.	40
Figura 16. Divisor de tensión de entrada.....	41
Figura 17. Divisor de tensión de salida.	42
Figura 18. Circuito convertidor elevador de tensión con sistema de control.	43
Figura 19. Diagrama de flujo de algoritmo de control de prueba del convertidor elevador de tensión.....	44
Figura 20. Diagrama de flujo de algoritmo de control de carga de 3 etapas de baterías ácido plomo e ion litio de 24V con una fuente de alimentación regulada.	47
Figura 21. Fuente reguladora KEPCO modelo BOP 100-10MG.	49
Figura 22. Módulo SD.....	49
Figura 23. Módulo RTC.....	50
Figura 24. Diseño del circuito PCB.	50
Figura 25. Diagrama de flujo resumido	51
Figura 26. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V con fuente regulada.	52
Figura 27. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V.....	53
Figura 28. Circuito de resistencia equivalente visto desde la perspectiva del módulo fotovoltaico. [25]	54
Figura 29. Ipanel vs Vpanel.....	55
Figura 30. Ppanel vs Vpanel.....	55
Figura 31. Algoritmo de perturbar y observar.....	56
Figura 32. Resultados de prueba del MPPT.	57
Figura 33. Algoritmo de control de carga de baterías de ácido plomo e ion litio de 24V con un módulo fotovoltaico como fuente de alimentación.	58

Figura 34. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V con módulo fotovoltaico.....	59
Figura 35. Gráfico de tensión, corriente y potencia entregada por el módulo fotovoltaico al sistema de carga de la batería de ácido plomo de 24V.....	60
Figura 36. Gráfico de proceso de carga de batería de ion litio de 24V con módulo fotovoltaico.....	61
Figura 37. Gráfico de tensión, corriente y potencia entregada por el módulo fotovoltaico al sistema de carga de la batería de ion litio de 24V.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones eléctricas STC del módulo fotovoltaico.....	38
Tabla 2. Caracterización del circuito de prueba del convertidor elevador sin sistema de control.	40
Tabla 3. Caracterización del circuito de prueba del convertidor elevador con sistema de control.	45
Tabla 4. Tiempos de ejecución de procesos del algoritmo de la figura 25	52

1. Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica vela por contribuir con el medio ambiente, es por esto que dedica programas de investigación en pro de colaborar con el mejoramiento del ecosistema. Desde 1999, el Instituto Tecnológico de Costa Rica junto con la comisión Institucional Ambiental, hoy denominada Unidad de Gestión Integrada, han desarrollado políticas ambientales entre las que destacan: el sistema de reciclaje, el sistema de tratamiento de aguas y un centro de impresión con el fin de evitar una mayor cantidad de impresoras personales. [1]

La generación de energía por medio de paneles fotovoltaicos ha aumentado en los últimos años, ya que al ser un medio relativamente de bajo costo, es una alternativa de energía limpia para desplazar a las plantas térmicas que producen contaminación ambiental. Entre sus ventajas están que la energía solar es inagotable y no genera contaminación, por ello se considera una de las fuentes renovables más importantes para mitigar los efectos de contaminación que se producen por la generación de energía con combustible y otros tipos que generan gran impacto a nivel ambiental. [2]

El laboratorio de sistemas electrónicos para la sostenibilidad (SESlab), es un laboratorio de la escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica creado en el año 2010 por varios profesores e investigadores de la escuela, en este se desarrollan actividades de extensión, investigación y actualización profesional relacionados con sistemas electrónicos que contribuyen al desarrollo sostenible. Este laboratorio se concentra en las áreas de energías renovables, eficiencia energética y monitorización. [3]

Inicialmente, SESlab se ha dedicado al desarrollo de tecnologías y sistemas electrónicos relacionados con la tecnología fotovoltaica. Este tipo de energía se basa en la propiedad fotoeléctrica de algunos materiales, los cuales emiten electrones cuando la luz solar incide en ellos; esta forma de generar energía eléctrica requiere de poco mantenimiento debido a que no hay elementos mecánicos involucrados en la generación de electricidad. [4]

El Instituto Tecnológico de Costa Rica pretende crear e instalar próximamente múltiples estaciones de carga de baterías que utilicen energía limpia, en este caso, energía solar con los paneles fotovoltaicos para bicicletas eléctricas con el fin de minimizar el impacto del caos vial en el campus central, además de que al mismo tiempo se estaría formando una concientización sobre la importancia de reducir los medios de transporte tradicionales en pro del ambiente.

En Europa ha sido implementado en casi todas sus principales ciudades el uso de sistemas de alquiler de bicicletas promovidos por los gobiernos locales, por ejemplo, en Lyon, Francia, desde el año 2005 existen más de 100.000 usuarios, en Barcelona, España, desde el año 2009, los usuarios tienen a disposición 6000 bicicletas ubicadas en 401 estaciones diferentes distribuidas en toda la ciudad. [5]

En un proyecto realizado en el año 2013 diseñado por la Ingeniera Andrea Fajardo en colaboración con SESlab, se elaboró una estación de bicicletas con un sistema de carga de baterías para bicicletas eléctricas, donde se aprovecha la energía solar mediante un módulo de sistema fotovoltaico (2 paneles solares), esta estación de carga se llama Vehlis.

Actualmente este sistema permite la carga de solo un tipo de batería por lo tanto solo la batería de ácido-plomo puede ser cargada, debido a esto se pretende adaptar el sistema para que permita cargar baterías tanto de ácido-plomo como de ion-litio, al menos una batería de cada tipo.

Además, se puede incluir un sistema de monitoreo para saber el estado de la carga de la batería, los valores de corriente y tensión que entrega el módulo fotovoltaico que recibe la batería en cada etapa del proceso de carga respectivo.

Para realizar este proyecto es fundamental tener conocimientos electrónicos, matemáticos y computacionales.

Se necesitaron de conceptos computacionales y electrónicos para llevar a cabo la implementación de un algoritmo que permita extraer la máxima potencia de un conjunto de módulos fotovoltaicos, así como un algoritmo de control y monitoreo de carga de baterías.

Se hizo uso de conceptos de electrónica y matemática para realizar la implementación de un sistema de acople de energía y su procesamiento adecuado que permitiera cargar de forma correcta, una batería de ácido plomo y una batería de ion litio, ambas de 24V.

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo general

Implementar un prototipo de sistema que permita extraer la máxima potencia de un módulo fotovoltaico cuando se necesite, para cargar de manera óptima una batería de ácido plomo y una batería de ion litio.

Indicador: Porcentaje de error no mayor al 10% tanto en el proceso de extracción de potencia del módulo fotovoltaico, como en el proceso de carga de la batería de ion litio y ácido plomo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un cargador de baterías de ácido-plomo.

Indicador: *Desviación de la corriente entregada a la batería en la etapa de corriente constante y tensión entregada a la batería en la etapa de tensión constante no mayor al 5%.*

2. Diseñar un cargador de baterías de ion-litio.

Indicador: *Desviación de la corriente entregada a la batería en la etapa de corriente constante y tensión entregada a la batería en la etapa de tensión constante no mayor al 5%.*

3. Diseñar un sistema de control, que permita la extracción de la máxima potencia disponible del módulo fotovoltaico cuando sea posible, en conjunto con el sistema de control de la carga del tipo de batería.

Indicador: *Porcentaje de error del punto de extracción de la máxima potencia no mayor al 10%.*

1.3 Restricciones

El prototipo debe cargar únicamente baterías de 24V de ácido plomo e ion litio.

El prototipo debe utilizar como fuente de energía un módulo fotovoltaico modelo KD135GX-LFBS.

1.4 Supuestos

Ente los supuestos se tiene que el sistema opera entre las 6am a las 6pm, esto debido a que en ese rango de tiempo se tiene la presencia de la luz solar.

El sistema funciona bajo el supuesto de que se conecta una batería de ácido plomo o ion litio de 24V.

1.5 Delimitaciones

Este prototipo está diseñado para operar en interiores, de manera que no se vea afectado por condiciones climáticas como la lluvia.

1.6 Glosario

CC-CC: Corriente Continua- Corriente Continua.

MPPT: Buscador de punto de potencia máxima.

MPP: Punto de potencia máxima.

PWM: Modulador de ancho de pulso.

SOC: Estado de carga de la batería.

2. Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Descripción del prototipo de sistema a elaborar

Con el fin de fomentar el uso de bicicletas eléctricas como plan piloto que ayude en la reducción en la cantidad de vehículos que emiten contaminantes en la sede principal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se requiere en cada estación de bicicletas, de un sistema que extraiga la energía solar de manera que se aproveche esta energía para cargar las baterías utilizadas en las bicicletas eléctricas que forman parte de los recursos a utilizar para establecer el plan piloto.

Se pone a disposición el uso de un módulo fotovoltaico como fuente de energía limpia, por lo que es necesario del diseño de un sistema que extraiga la energía del módulo fotovoltaico, además, que realice un procesamiento adecuado de dicha energía de manera que se realice un proceso de carga correcto de la batería, dependiendo de sus características químicas y eléctricas.

Además, es necesario del diseño de un sistema que lleve a cabo tanto la monitorización y control de la tensión y corriente que entrega a la batería el sistema de procesamiento de energía, como la extracción de la máxima potencia que puede generar el módulo fotovoltaico, cuando sea necesario dadas las condiciones climatológicas.

2.2. Antecedentes bibliográficos

2.2.1 Estado del arte

Los reguladores de carga son equipos que controlan el nivel de carga de las baterías de forma controlada, de manera que se evite un deterioro importante y una sobrecarga en la batería. Cuando el proceso de carga concluye, el regulador se encarga de detener la producción de energía por parte del módulo fotovoltaico.

Existen 2 tipos de reguladores: PWM y MPPT.

La diferencia primordial entre ambos reguladores consiste en el rendimiento que consiguen obtener de los paneles solares.

Regulador PWM

Un regulador PWM utiliza la tensión y corriente que necesita la batería o el grupo de baterías para su carga o descarga. Es decir, a pesar que el módulo fotovoltaico tenga la capacidad de producir una tensión y/o corriente mayor a la que la batería necesite para su proceso de carga, sólo suministrará la necesaria para la batería. [7]

Regulador MPPT

Un regulador MPPT ajusta su voltaje de entrada para conseguir la máxima potencia del módulo fotovoltaico, para transformar esa energía y así suministrar un voltaje variable requerido por la batería, por lo tanto, existe un desacople de potencia entre el módulo fotovoltaico y la batería. [7]

Con el fin de obtener el máximo rendimiento de un módulo fotovoltaico, un regulador de carga debe ser capaz de elegir el punto de máxima potencia que puede entregar el panel, un regulador

MPPT se basa en ese funcionamiento. El voltaje de entrada de un regulador PWM es en principio igual al voltaje del módulo fotovoltaico, por lo tanto, no se aprovecha el punto de máxima potencia en la mayoría de los casos. [7]

2.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

2.3.1 Batería

Una batería eléctrica, es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía almacenada en electricidad. Su descubrimiento e invención es atribuido al físico y químico italiano Alessandro Volta. [8]

Cada celda contiene un electrodo positivo o cátodo, un electrodo negativo o ánodo, y electrolitos que permite que los iones se muevan entre los electrodos lo que da como resultado que la corriente eléctrica fluya fuera de la batería.

Las baterías están clasificadas en dos grandes grupos a saber: primarias (desechables) y secundarias (recargables). Hoy en día, las baterías recargables representan cerca del 75% del mercado global de baterías. Dentro de cada una de estas categorías hay diferentes tipos de baterías con cierto proceso químico que las caracterizan, cada uno con ciertas ventajas y desventajas.

Los materiales mayoritariamente utilizados actualmente para fabricar las baterías son: litio, plomo y el níquel.

Además de la característica química de la batería, se tienen otras características, por ejemplo: el tipo de química, tensión nominal, tensión de carga, tensión de descarga, capacidad, energía que puede suministrar, resistencia, rendimiento, energía específica, densidad de energía, estado de carga, profundidad de descarga, tasa C. [9]

Modelo teórico de una batería

La figura 1 representa el modelo teórico más simple de una batería, compuesta por una fuente constante CD y una resistencia interna. La característica particular de este modelo es que la resistencia interna no es constante sino variable, en función del estado de carga.

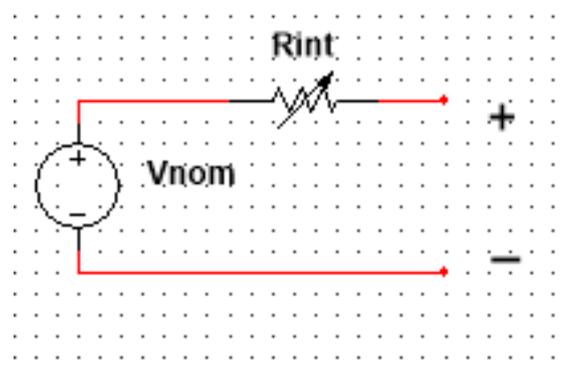


Figura 1. Circuito equivalente de una celda de batería. [30]

Principales parámetros de las baterías

Tensión nominal

La tensión nominal es la tensión en corriente directa que suministra la batería en funcionamiento normal. [9]

Tensión de carga

La tensión de carga es la que se necesita en el proceso de carga de la batería, y debe ser mayor a la tensión nominal. [9]

Tensión de descarga

La tensión de descarga es la tensión mínima de una batería en la cual se considera que está descargada. Se recomienda que se recargue lo más pronto posible para evitar daños debido al proceso de sulfatación. [9]

Capacidad

La capacidad C de una batería se define como la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar y suministrar dicho dispositivo. Básicamente, es la cantidad de corriente que puede brindar una batería, en un tiempo determinado y a una tensión definida. Se expresa en amperios-hora (Ah). Este valor es la corriente que puede suministrar la batería en un periodo de 1 hora. [9]

Energía específica, densidad de energía

La energía específica o densidad de energía gravimétrica, define la capacidad de la batería en peso (Wh / kg). La densidad de energía, o densidad de energía volumétrica, refleja el volumen en litros (Wh/l). Los productos que requieren largos tiempos de funcionamiento a una carga moderada se optimizan para una energía específica alta; la capacidad de entregar altas cargas actuales puede ser ignorada.

Estado de carga

Es la cantidad de energía presente en la batería, respecto al total, expresada en porcentaje. [9]

Profundidad de descarga

Se refiere a la cantidad de energía que se ha extraído de la batería, expresada en porcentaje. [9]

Tasa C

Las tasas de carga y descarga de una batería se rigen por las tasas C . La capacidad de una batería se clasifica comúnmente en $1C$, significando que una batería completamente cargada clasificada en $1Ah$ debe proporcionar $1A$ por una hora. La misma batería que descarga a $0,5C$ debe

proporcionar 500mA por dos horas, y en 2C entrega 2A por 30 minutos. Las pérdidas en descargas rápidas reducen el tiempo de descarga y estas pérdidas también afectan los tiempos de carga. [10]

Una tasa C de 1C también se conoce como una descarga de una hora; 0.5C o C / 2 es una descarga de dos horas y 0,2C o C / 5 es una descarga de 5 horas. Algunas baterías de alto rendimiento pueden cargarse y descargarse por encima de 1C con una tensión moderada. [9]

Tipos de baterías

Existen 2 tipos de baterías: primarias y secundarias. En este documento sólo se hará mención de las baterías tipo secundarias (recargables) dado que son las que interesan para el proyecto.

Hay que tener claro que una batería de tipo primario tendrá una cantidad mucho mayor disponible que una batería recargable. La figura 2 da una comparación de energía específica entre las baterías de tipo primario y las recargables (de tipo secundario).

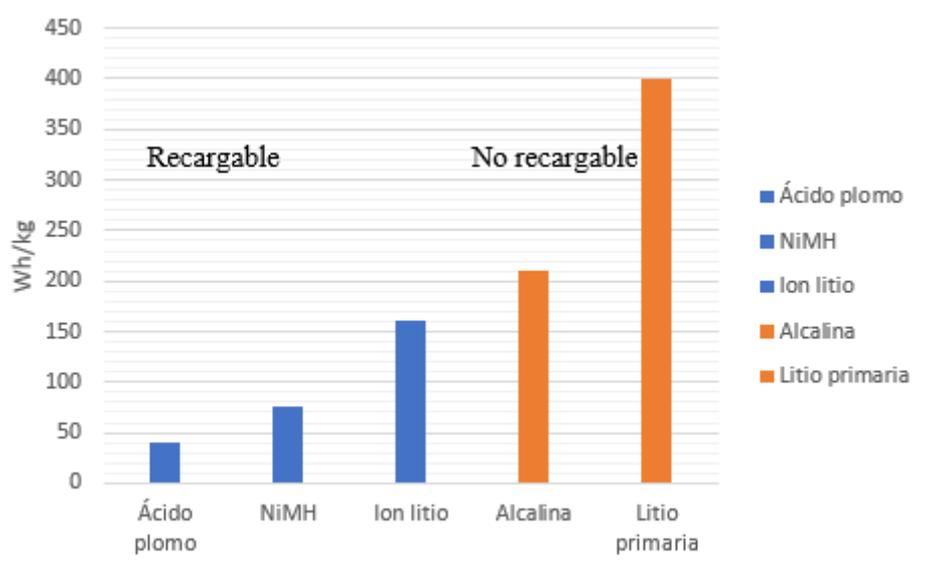


Figura 2. Comparación de energía específica de baterías primarias y secundarias. [12]

Baterías recargables o de tipo secundario

Las baterías secundarias (recargables) se pueden descargar y recargar varias veces, debido a que la composición original de los electrodos puede ser restaurada por la corriente inversa. [12]

Entre los tipos de baterías secundarias se puede citar: ácido-plomo, níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal-hidruro (Ni-MH), ion-litio. Las baterías de níquel-cadmio son una tecnología vieja, las cuales han sido reemplazadas debido a preocupaciones ambientales asociadas al cadmio, dado que éste es un metal tóxico, y no puede ser eliminado en un relleno sanitario común, por lo que debe ser reciclado. Las baterías de Ni-MH ofrecen algunas de las ventajas de las baterías de NiCd,

y sin los efectos adversos medioambientales, pero aun así este tipo de baterías es poco utilizado ya que no es tan barata como la de ácido-plomo y no posee la densidad de la batería de ion-litio. Es por esto que para un controlador de carga de batería que use un MPPT, se enfoca en el uso de baterías de ácido plomo e ion litio. Además, este tipo de baterías es ampliamente utilizado en bicicletas eléctricas. [12]

Batería de ácido plomo

Este es el sistema más viejo de la batería recargable. El ácido de plomo es resistente y tiene un precio económico, pero tiene una energía específica baja y un recuento de ciclo limitado. El ácido de plomo se utiliza para sillas de ruedas, coches de golf, vehículos de transporte de personal, iluminación de emergencia y fuente de alimentación ininterrumpida (UPS). El plomo es tóxico y no se puede depositar en vertederos. [13]

Hay tres tipos de baterías de ácido-plomo: de arranque, de ciclo profundo y marina. La de tipo arranque es la batería automotriz típica usada para arrancar un automóvil. Este tipo de batería tiene muchas placas finas de plomo (área superficial alta) que permite una corriente de salida alta. Estas baterías son ideales para aplicaciones en las que la corriente es necesaria por un tiempo muy corto, pero para aplicaciones de ciclo profundo este tipo de batería tiene una vida útil muy corta. [13]

La batería de ácido-plomo de ciclo profundo tiene unas placas de plomo que permiten que este tipo de batería se descargue y recargue muchas veces sin degradación. Un inconveniente es el hecho de que hay superficie inferior entre las placas de plomo y el ácido electrolito, que significa una corriente de salida menor. Aunque el plomo-ácido de ciclo profundo está diseñado para ser descargado al 20% de capacidad, la batería tendrá una mayor duración si la carga nunca cae por debajo del 50%. [13]

Las baterías de ácido-plomo marinas se encuentran entre las de arranque y las de ciclo profundo. Las placas de plomo son más delgadas que las de ciclo profundo, pero más gruesas que una batería de arranque, y esto le da una mejor salida de corriente y una vida útil más corta cuando se usa en aplicaciones de ciclo profundo. [13]

Batería de ion-litio

El ion litio está reemplazando muchas aplicaciones que antes eran utilizadas por baterías de plomo y níquel. Debido a problemas de seguridad, Li-ion necesita un circuito de protección para que el escape térmico no cause que la batería explote. Es más caro que la mayoría de las baterías, pero el alto recuento de ciclos y el bajo mantenimiento reducen su costo por ciclo. [14]

El ion litio ofrece una de las densidades de energía mayores, así como el menor peso de todas las baterías y constituye un tercio del mercado global. Poseen un alto nivel de tensión por celda, baja tasa de auto descarga, tasa de carga rápida, y un tiempo de vida relativamente bueno cuando están

en ciclo profundo. El litio también es altamente reactivo con el agua, así que se debe tener el cuidado de no exponer este tipo de baterías al agua. [14]

Todas las baterías recargables de litio utilizan iones de litio para almacenar la energía por medio del movimiento de estos iones desde el cátodo hacia el ánodo. Durante la descarga, el ánodo presenta una reacción de oxidación con electrones libres que conducen la corriente a un circuito externo, mientras el cátodo presenta una reacción de reducción (se gana electrones). [14]

Debido a que en este proyecto se utilizan baterías tanto de ácido plomo como de ion litio el proceso de carga se enfoca en estos 2 tipos de baterías.

Proceso de carga de baterías

Ácido plomo

Las baterías de ácido plomo, utilizan el método de carga de CC-TC (corriente continua/tensión continua). Una corriente regulada da como resultado el incremento de la tensión en las terminales hasta que la tensión límite de carga es alcanzada, en este punto la corriente decae debido a la saturación. El tiempo de carga va de 12-16 horas hasta 36-48 horas en baterías estacionarias. Con corriente alta de carga y métodos de carga multietapa, el tiempo de carga se puede ver disminuido de 8-10 horas, sin embargo, sin una carga completa. La tecnología de ácido plomo es lenta y no se puede cargar tan rápido como otras baterías. [15]

Las baterías de ácido plomo, deben tener un proceso de carga de 3 etapas, las cuales son:

1. Carga de corriente constante.
2. Carga de tope.
3. Carga de flotación.

La etapa de corriente constante aplica la mayor parte de la carga y necesita de aproximadamente la mitad del tiempo de carga requerido. La carga de tope continúa a una corriente de carga más baja y en decremento, proporcionando saturación, y por último la carga de flotación compensa la pérdida causada por la auto descarga. [15]

Durante la carga de corriente constante, la batería se carga a aproximadamente 70% en 5-8 horas, el 30% restante se llena con la carga de tope que dura entre 7-10 horas.

La carga de flotación en la tercera etapa mantiene la batería a plena carga, para evitar pérdidas que se den por autodescarga de la batería, de manera que permanezca a un estado de carga del 100%. La Figura 3 ilustra estas tres etapas.

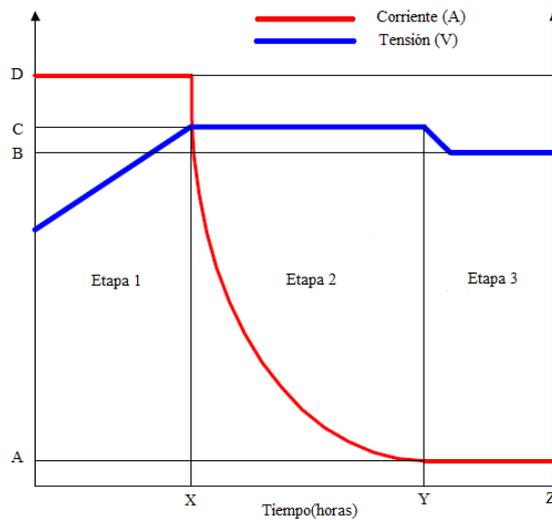


Figura 3. Proceso de carga de una celda de batería de ácido plomo. [15]

De la figura 3 se denotan los puntos de interés, donde el valor D corresponde al valor de corriente máxima de carga, el valor A corresponde al valor mínimo de corriente de carga, donde se considera que la batería está cargada al 100%.

El valor en C corresponde a la tensión máxima de tope que alcanza la batería y el valor en B corresponde a la tensión de flotamiento.

El cambio de la etapa 1 a la 2 ocurre de manera simultánea en el momento exacto que la batería alcanza una tensión límite. La corriente empieza a decaer y la tensión se mantiene constante. La carga completa se alcanza cuando la corriente llega a un valor entre 3-5% de la capacidad de la batería, denotado por la letra A. Por ejemplo, para este proyecto se utilizó una batería con una capacidad de 12Ah, por lo que cuando en el proceso de carga, la corriente alcance un valor entre 360mA y 600mA, se tiene que en este punto la batería está totalmente cargada y se ha concluido la segunda etapa de carga. Una batería con alta fuga, nunca podrá alcanzar esta corriente de saturación, por lo que se requiere de un temporizador para saber el tiempo que ha transcurrido y determinar que se debe cambiar a la tercera y última etapa de carga, la de carga de flotación. [15]

El valor correcto de la tensión límite de carga por celda, está en el rango de 2,3-2,45 V. Establecer la tensión de umbral es una decisión muy importante en este proceso, ya que, por un lado, la batería quiere estar completamente cargada para obtener la máxima capacidad y evitar la sulfatación en la placa negativa, por otro lado, la saturación excesiva al no conmutar a la carga del flotador, provoca la corrosión de la rejilla en la placa positiva. Esto también lleva a fuga de gases y pérdida de agua. [15]

La temperatura también tiene un papel importante en el proceso de carga. Un ambiente más cálido requiere de un umbral de tensión ligeramente inferior y una temperatura más fría prefiere un ajuste más alto. Los cargadores expuestos a fluctuaciones de temperatura incluyen sensores de temperatura para ajustar la tensión de carga para una óptima eficiencia de carga. [15]

El coeficiente de carga de una batería de ácido plomo es de $-3\text{mV}/^\circ\text{C}$. Estableciendo una temperatura ambiente de 25°C , la tensión de carga debe ser reducida en 3mV por celda para cada

grado por encima de los 25°C, y aumentar 3mV por celda para cada grado por debajo. Si no es posible llevar ese control es mejor elegir una tensión más baja por razones de seguridad. [15]

Una vez que se llega a la carga completa por medio de saturación, la batería no debe permanecer en la tensión de tope durante más de 48 horas y debe reducirse al nivel de tensión flotante. Esto es especialmente crítico para sistemas sellados, ya que son menos tolerantes a sobrecargas. Si se carga más allá de los límites especificados, la energía redundante se convierte en calor y la batería comienza a funcionar. La tensión recomendada de flotación varía entre 2,25-2,27V por celda. [15]

Ion litio

El cargador de ion litio es un dispositivo de límite de tensión que tiene similitudes con el proceso de carga de ácido plomo. Las diferencias con el ion litio están en una mayor tensión de celda, tolerancias de tensiones más estrechas y la ausencia de carga de flotación cuando se tiene carga completa. Mientras que las baterías de ácido plomo ofrecen una flexibilidad en términos de tensión de umbral, los fabricantes de las celdas de ion litio son muy estrictos en el ajuste correcto, ya que el ion litio no puede aceptar sobrecarga. [16]

La tensión máxima de celda debe fijarse a no más de 4.2V. La tolerancia es de $\pm 50\text{mV}$. Aumentar la tensión incrementa la capacidad, pero ir más allá de las especificaciones dadas por el fabricante lleva al estrés de la batería y compromete su seguridad. Existen circuitos de protección internos en la batería que no permiten exceder la tensión permitida, así como una temperatura máxima en la celda. [16]

La tasa de carga recomendada de una celda de ion litio está entre 0.5C y 1C. El tiempo de carga completa es de aproximadamente 2-3 horas. Los fabricantes de estas celdas recomiendan cargar a 0,8C o menos para prolongar la duración de la batería, sin embargo, la mayoría de las celdas pueden tomar una tasa de carga C más alta con poco estrés. La eficiencia de la carga es de alrededor del 99 por ciento y la celda permanece fresca durante la carga. [16]

Algunos paquetes de Li-ion pueden experimentar un aumento de temperatura de aproximadamente 5°C cuando alcanzan la carga completa. Esto podría ser debido al circuito de protección y / o resistencia interna elevada. Es recomendado suspender el uso de la batería o del cargador si la temperatura sube más de 10°C bajo velocidades de carga moderadas. La carga completa se alcanza cuando la corriente baja hasta un 3% de la corriente de capacidad. [16]

El aumento de la corriente de carga no apresura mucho el estado de plena carga. Aunque la batería alcanza el pico de voltaje más rápido, la carga de saturación tardará más. En consecuencia, con una corriente más alta, la etapa 1 es más corta, pero la saturación durante la etapa 2 tomará más tiempo. Una carga de corriente elevada, sin embargo, llenará rápidamente la batería a aproximadamente 70 por ciento.

Li-ion no necesita ser completamente cargado como es el caso con plomo ácido, ni es deseable hacerlo. De hecho, es mejor no cargar completamente porque una alta tensión estresa a la batería. La elección de un umbral de tensión más bajo o la eliminación de la carga de saturación por completo, prolonga la vida de la batería, pero esto reduce el tiempo de ejecución. [16]

2.3.2 Radiación y energía solar

El Sol es la fuente de energía más importante y abundante que existe en la Tierra. Además de ser gratuita y limpia, la energía solar es prácticamente inagotable, ya que está garantizada para los próximos 6000 millones de años. Se estima que la cantidad de energía anual proveniente del Sol

a la tierra corresponde a 3×10^{24} J, es decir, 10000 veces más energía del consumo actual de la población mundial. [17]

El Sol es una estrella esférica de plasma caliente y de campos magnéticos internos. El plasma es el cuarto estado de la materia, es un gas que contiene iones positivos y electrones libres cuya carga total es prácticamente nula. Se produce a muy bajas presiones o a muy altas temperaturas, como lo es el caso de las estrellas y el Sol. La temperatura aparente del Sol es de aproximadamente 5780 K. [18]

2.3.3 Tecnología fotovoltaica

El efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico que transforma la energía luminosa en energía eléctrica. La luz está compuesta de partículas llamadas fotones, y un rayo de luz es una corriente de fotones. Cuando la luz incide sobre un material, se desprenden electrones de este debido al choque de los fotones. Los electrones que se desprenden pueden ser utilizados entonces para establecer una corriente eléctrica. [19]

En el caso particular de los módulos fotovoltaicos, la luz incide sobre materiales semiconductores que han sido preparados especialmente para este tipo de aplicaciones. El semiconductor más empleado en la fabricación de sistemas fotovoltaicos es el Silicio.

Como parte de la preparación por la que pasa el semiconductor, se le incrustan átomos de otros elementos, obteniéndose materiales con diferentes características eléctricas. A estos materiales se les denomina materiales tipo N y tipo P. [19]

Los módulos fotovoltaicos están compuestos de muchas pequeñas láminas de Silicio llamadas celdas. En estas se unen capas de materiales tipo N y tipo P, a lo cual se le llama una unión P-N. [19]

Celdas fotovoltaicas: tecnologías y características

Existen varias tecnologías de celdas fotovoltaicas, dependiendo tanto de los materiales utilizados en la construcción como del proceso de fabricación.

En general, las celdas se clasifican por generaciones, y dentro de cada una de ellas hay varios tipos de celdas:

- En la primera generación se tienen las celdas de Silicio cristalino, que se pueden, a su vez, clasificar en celdas monocristalinas y policristalinas.
- En la segunda generación se encuentran las celdas de película delgada. Aquí se incluyen varias tecnologías, entre las que se pueden mencionar las de Silicio amorfo, las de Diseleniuro de Cobre e Indio (CIS) y las de Teluro de Cadmio (CdTe).
- Finalmente, se tienen las celdas de tercera generación, que incluyen las que combinan varias tecnologías en una sola celda.

El módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico consiste de la asociación en serie de un conjunto de celdas fotovoltaicas, dentro de un soporte que les brindan protección y facilitan su manipulación. Los módulos pueden conectarse fácilmente entre sí para lograr los niveles de corriente y tensión requeridos para una instalación en particular. [19]

Cada celda fotovoltaica puede proporcionar cerca de 0,4 V, por lo que se conectan en serie para elevar la tensión de salida del conjunto.

El módulo consiste de un marco que les brinda protección contra los agentes externos, como la humedad. Las celdas se colocan entre capas de diferentes materiales, comenzando por la parte frontal que tiene vidrio templado; luego sigue una capa de acetato etilen vinilo; después van las celdas fotovoltaicas. Sigue una nueva capa de acetato etilen vinill y una capa de tedlar en la parte posterior. La energía se extrae por medio de los cables que comunican las celdas con el exterior. [19]

La vida útil de un módulo fotovoltaico se determina por el tipo de construcción que se le dé a este y no de la vida útil de las celdas del material semiconductor. Generalmente la garantía que se les da a los módulos va entre 20 y 25 años. [19]

Características eléctricas de un módulo fotovoltaico

La figura 4 corresponde al circuito equivalente de una celda solar.

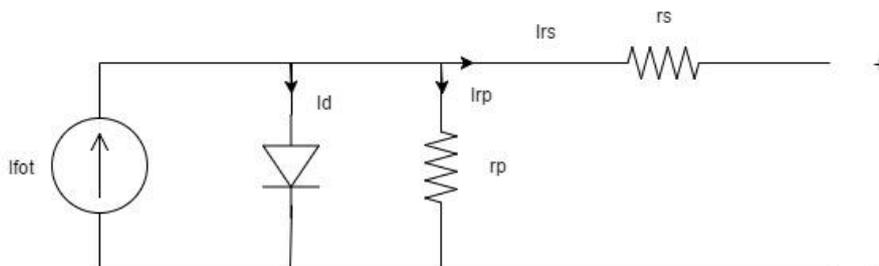


Figura 4. Circuito equivalente de una celda solar. [32]

Existen una serie de parámetros utilizados por los fabricantes de módulos fotovoltaicos para caracterizar el comportamiento de sus dispositivos.

Condiciones de prueba normalizadas (Standard Test Conditions, STC)

Las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos varían dependiendo de una serie de condiciones, algunas de ellos ambientales, como la temperatura y la irradiancia. [19]

Al variar una de estas condiciones, el comportamiento eléctrico del módulo cambia. Así que se puede tener una infinidad de comportamientos para un dispositivo dependiendo de la combinación de condiciones a las que esté expuesto. Debido a esto, para reportar las características eléctricas de

los módulos las mediciones se toman bajo unas condiciones específicas, a las que se les llama Condiciones de prueba normalizadas (Standard Test Conditions, STC). [19]

Estas son:

- Irradiancia normal (pico): 1000 W/m²
- Temperatura de la celda: 25°C
- Distribución espectral: 1,5

Curva característica de un módulo. (curva v- i)

Uno de los principales medios para describir el comportamiento de un módulo fotovoltaico es a través de su curva característica. Esta describe la variación de la corriente del módulo en función de la tensión entre sus extremos. Es proporcionada por el fabricante, y es obtenida a partir de los ensayos aplicados al módulo bajo condiciones STC. Estas condiciones no representan una situación típica de operación de un módulo, ya que al tenerse una irradiancia de 1000 W/m² la temperatura de las celdas aumenta mucho más allá de los 25°C. [19]

En la figura 5 se muestra la forma general la curva característica.

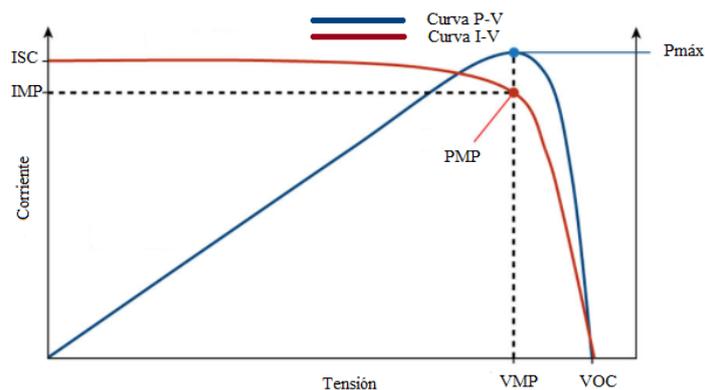


Figura 5. Curva característica de un módulo fotovoltaico. [28]

Se puede apreciar que la potencia que entrega el módulo no es lineal y existe un punto específico de tensión y corriente, donde se obtiene la máxima potencia del módulo, éste punto es el Pmp. Los valores importantes de la curva se definen a continuación:

- **Corriente de cortocircuito (Isc):** Intensidad máxima de la corriente que se puede producir en un módulo. Se da cuando se hace un cortocircuito con los terminales del mismo.
- **Tensión en circuito abierto (Voc):** Tensión máxima que se puede producir en un módulo. Se obtiene cuando los terminales están en condiciones de circuito abierto.

- **Potencia máxima P_{mp} (o $P_{m\acute{a}x}$):** Máxima potencia que se puede obtener del módulo: $P_{mp} = V_{mp} * I_{mp}$. En la figura anterior se marca este punto con un pequeño círculo negro.
- **Corriente de máxima potencia I_{mp} (o I_{pmax}) y Tensión de máxima potencia V_{mp} (o V_{pmax}):** Par de valores de intensidad y tensión que producen la potencia máxima que puede suministrar el módulo fotovoltaico. En la figura anterior la intersección de estos valores está marcada con un pequeño círculo rojo.
- **Eficiencia del módulo:** Cociente entre la potencia eléctrica producida por el módulo y la potencia de la radiación incidente.

2.3.4 Convertidor CC-CC

Los convertidores CC-CC son ampliamente utilizados en fuentes de alimentación CC conmutadas y en aplicaciones de accionamiento de motores. La función principal del convertidor es transformar los niveles de tensión continua en niveles de tensión controlada. Existen varios tipos de convertidores, pero de ellos se tienen 2 tipos fundamentales: [21]

- Tipo buck o reductor.
- Tipo boost o elevador.

Los demás tipos de convertidores existentes, son extensiones o modificaciones de los 2 tipos anteriormente mencionados.

Convertidor tipo reductor

En este tipo de topología, la tensión de salida siempre será menor o igual que la tensión de entrada, consecuentemente, la corriente de salida será mayor a la corriente de entrada. La figura 6 representa el modelo general del convertidor reductor.

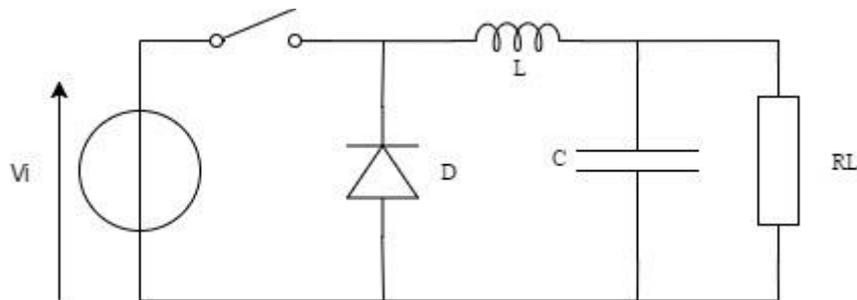


Figura 6. Modelo general del convertidor reductor. [22]

Como se puede apreciar en la figura 6, el convertidor consta de un interruptor, un diodo, un inductor y una carga. En la salida se coloca un capacitor en paralelo con la carga, esto con el fin de reducir rizado en la tensión de salida. También, se acostumbra a utilizar un transistor tipo Mosfet de canal N como interruptor, el cual será manejado por una señal de conmutación a una frecuencia seleccionada en su terminal de compuerta. [22]

En los convertidores reductores modernos con rectificación síncrona, se acostumbra a utilizar otro transistor Mosfet en lugar del diodo.

Los convertidores CC-CC conmutados (de tipo reductor), proveen una eficiencia de potencia mucho mayor que un regulador lineal, los cuales son circuitos simples que reducen la tensión al disipar la potencia en forma de calor, pero no aumentan la corriente de salida. [22]

Funcionamiento del convertidor reductor

El funcionamiento de un convertidor reductor consta de un inductor controlado por 2 semiconductores, los cuales alternan la conducción de la corriente del inductor tanto hacia la fuente de alimentación como a la carga, por ello se tienen 2 etapas de operación: Cuando el interruptor de entrada está abierto y cuando está cerrado. Además, se tienen 2 modos de operación: modo en corriente continua y modo en corriente discontinua. [22]

Modo Continuo

El convertidor opera en modo continuo cuando la corriente que pasa por el inductor nunca llega ser cero durante el ciclo de conmutación. En este modo, el principio de funcionamiento se puede describir con la figura 7.

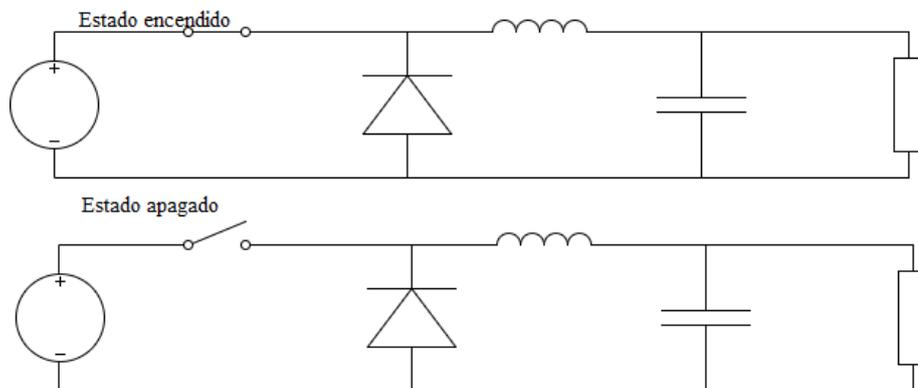


Figura 7. Principio de funcionamiento en modo continuo del convertidor reductor. [22]

Como se observa en la figura 7, existen dos estados de operación del convertidor reductor, estado encendido y estado apagado. [22]

Estado encendido

En el estado encendido, el interruptor de entrada está cerrado, esto hace fluir la corriente que suministra la fuente de alimentación en sentido horario, además, el diodo está en polaridad inversa, lo que impide el flujo de corriente sobre él, por lo que la corriente tiene únicamente un camino a través del inductor, y luego de éste, a través del capacitor y la carga. Inicialmente, el flujo de corriente a la carga se restringe a medida que la energía se almacena en el inductor, por lo que la corriente en la carga y en el capacitor se acumula gradualmente durante el estado de encendido. [22]

Si se realiza el análisis con base en las leyes de corriente y tensión de Kirchhoff, se tiene por LVK la siguiente ecuación:

$$V_{in} = V_L + V_O \quad (1)$$

Estado apagado

En el estado de apagado, el interruptor de entrada está abierto, lo que impide la conexión de la fuente de alimentación con los demás componentes, ahora el diodo está polarizado en directa, permitiendo el flujo de corriente sobre él mismo, el inductor se comporta como una fuente de energía, ya que la energía que se almacenó sobre él en el estado de encendido ahora es devuelta al circuito, esto gracias al efecto electromagnético del inductor, que causa que la corriente fluya a través de la carga y el diodo. Una vez que el inductor regresa gran parte de su energía almacenada al circuito y la tensión de carga empieza a caer, la carga almacenada en el capacitor se convierte en la fuente principal de energía del circuito, manteniendo el flujo de corriente hacia la carga hasta que se regrese al estado de encendido. [22]

Por LVK y asumiendo que el diodo es ideal, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_L = -V_O \quad (2)$$

La energía almacenada en el inductor se describe por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (3)$$

De la ecuación (3) se puede observar que la energía almacenada en el inductor se incrementa en el estado de encendido y se decrementó en el estado de apagado. El inductor tiene la función de transferir la energía desde la entrada a la salida.

Se sabe que la tensión en el inductor viene descrita por la siguiente ecuación:

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (4)$$

Para el análisis del cambio de la corriente I_L con respecto al tiempo, se debe partir de que existe un tiempo donde el interruptor está cerrado al que llamaremos t_{on} y un tiempo donde el interruptor está abierto, que se denota como t_{off} .

El incremento de la corriente del inductor en el estado de encendido se da por la siguiente ecuación:

$$\Delta I_{L ON} = \int_0^{t_{on}} dI_L \quad (5)$$

Despejando el valor de dI_L en la ecuación (4) y sustituyendo en la ecuación (5), se tiene:

$$\Delta I_{L ON} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt \quad (6)$$

Despejando el valor de V_L de la ecuación (1) correspondiente al estado encendido y sustituyendo en la ecuación (6), se tiene:

$$\Delta I_{L ON} = \int_0^{t_{on}} \frac{(V_{in}-V_o)}{L} dt = \frac{(V_{in}-V_o) \times t_{on}}{L} \quad (7)$$

De igual forma, se calcula el decremento de la corriente en el estado apagado, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta I_{L OFF} = \int_0^{t_{off}} \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \times t_{off}}{L} \quad (8)$$

Asumiendo que el convertidor opera en estado estable (modo continuo), la energía almacenada en cada componente al final del ciclo de conmutación T es igual a la energía inicial en el ciclo, lo que significa que la corriente I_L es igual en $t=0$ como en $t=T$. Por lo tanto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\Delta I_{L ON} + \Delta I_{L OFF} = 0 \quad (9)$$

La figura 8 corresponde a los valores de tensión y corriente en el tiempo para un convertidor reductor ideal.

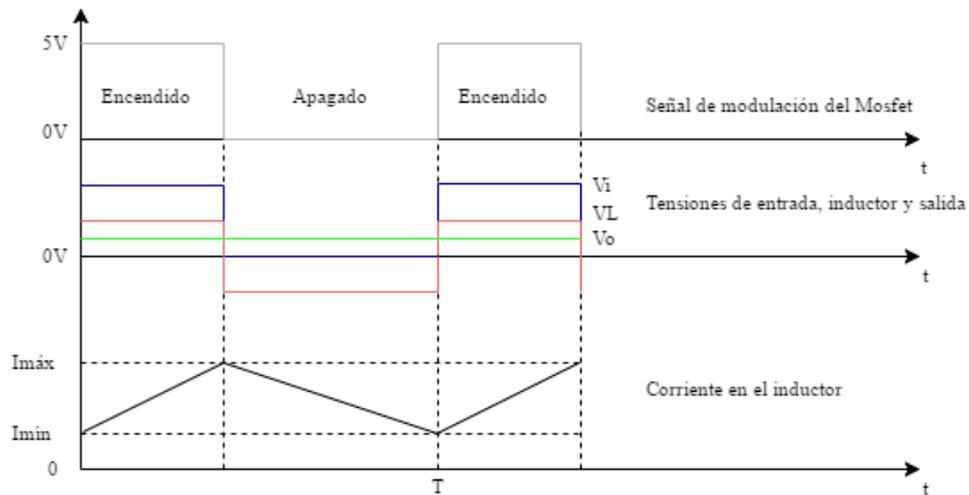


Figura 8. Valores de tensión y corriente en el tiempo para un convertidor reductor ideal en modo continuo. [22]

Sustituyendo la expresión de la ecuación (7) y (8) en la ecuación (9) se obtiene:

$$\frac{(V_{in}-V_o)*t_{on}}{L} - \frac{V_o \times t_{off}}{L} = 0 \quad (10)$$

De la figura 19 se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$t_{on} = D \times T \quad (11)$$

$$t_{off} = T - D \times T \quad (12)$$

Donde

D: corresponde al ciclo de trabajo de una señal cuadrada en un periodo T, su valor está comprendido entre 0 y 1.

Sustituyendo las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (10) y desarrollando, se obtiene que:

$$V_o = D \times V_{in} \quad (13)$$

De esta forma, con la ecuación (13) se obtiene la relación entre la tensión de salida con la tensión de entrada, la cual está relacionada por un factor multiplicativo el cual es el ciclo de trabajo, además, se sabe que el valor del ciclo de trabajo está entre 0 y 1, por lo que se cumple que la tensión de salida siempre será menor o igual a la tensión de entrada.

Modo discontinuo

En algunos casos la cantidad de energía requerida por la carga es tan grande que puede ser transferida en un tiempo menor que el periodo de conmutación; en este caso la corriente a través de la bobina cae a cero durante una parte del periodo. [22]

Convertidor tipo elevador

En este tipo de topología, la tensión de salida siempre será mayor o igual que la tensión de entrada, consecuentemente, la corriente de salida será menor a la corriente de entrada. La figura 9 representa el modelo general del convertidor elevador. [23]

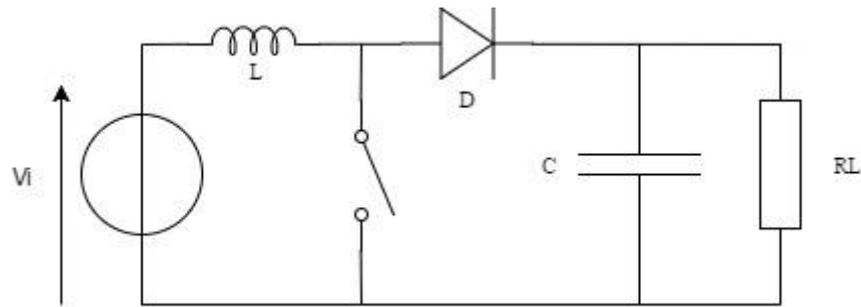


Figura 9. Circuito general del convertidor tipo elevador. [23]

Esta topología es muy similar a la del convertidor reductor, con la diferencia del intercambio en las posiciones del inductor, interruptor y diodo. Ahora, el inductor se ubica en el nodo de entrada.

Funcionamiento del convertidor elevador

Al igual que en el convertidor reductor, este circuito tiene 2 estados de operación, encendido y apagado, así como 2 modos de operación, modo continuo y discontinuo. Se dio más énfasis al modo continuo en el análisis, ya que se requiere trabajar en este modo.

Modo continuo

La figura 10 representa los 2 estados de operación del modo continuo en el convertidor elevador.

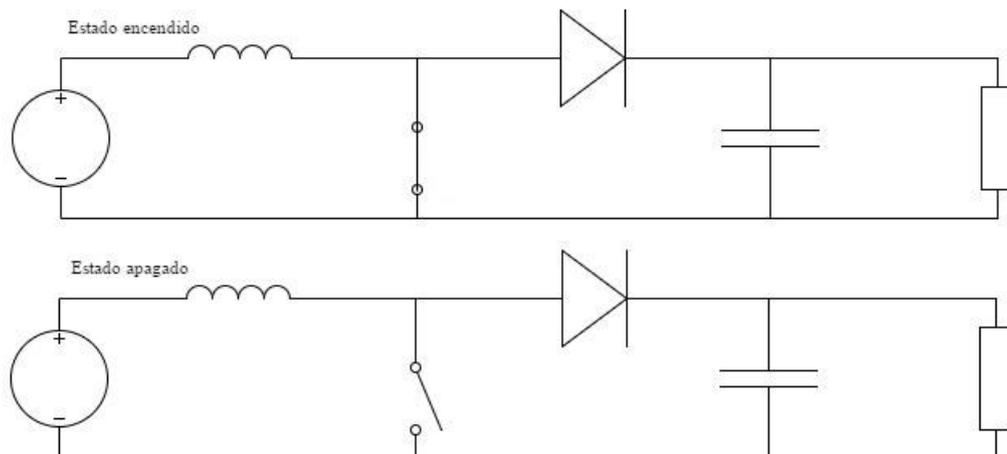


Figura 10. Principio de funcionamiento en modo continuo del convertidor elevador. [23]

Estado encendido

En este estado, el interruptor está cerrado, esto hace una conexión directa del inductor de entrada hacia el punto de retorno a la fuente de poder, además, se tiene el diodo en polarización inversa, por lo tanto la corriente de la fuente de alimentación fluye únicamente por el inductor, en este momento el inductor almacena toda la energía posible de la fuente de alimentación. [23]

Por LVK, se tiene la siguiente ecuación:

$$V_{in} = V_L \tag{14}$$

Estado apagado

En este estado, el interruptor está abierto, por lo que ahora la corriente puede fluir por el diodo, ya que éste está en polarización directa, y así se puede transferir la energía hacia el capacitor, el cual se cargará hasta la tensión de salida. [23]

Por LVK y asumiendo un diodo ideal ($V_D=0$), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{in} = V_L + V_o \quad (15)$$

La expresión del cambio de la corriente en el estado encendido corresponde a la siguiente ecuación:

$$\Delta I_{L\ on} = \int_0^{t_{on}} dI_L \quad (16)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (14) y despejando, se obtiene:

$$dI_L = \frac{V_{in}}{L} dt \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (17) y (11) en la ecuación (16), se tiene:

$$\Delta I_{L\ on} = \int_0^{D \times T} \frac{V_{in}}{L} dt = \frac{V_{in} \times D \times T}{L} \quad (18)$$

La expresión del cambio de corriente en el estado apagado corresponde a la siguiente ecuación:

$$\Delta I_{L\ off} = \int_0^{t_{off}} dI_L \quad (19)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (15) y despejando, se obtiene:

$$dI_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} dt \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación (20) y (12) en la ecuación (19), se tiene:

$$\Delta I_{L\ off} = \int_0^{(1-D) \times T} \frac{V_{in} - V_o}{L} dt = \frac{(V_{in} - V_o) \times (1 - D) \times T}{L} \quad (21)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones (19) y (21) en la ecuación (9), se tiene la expresión:

$$\frac{V_{in} \times D \times T}{L} + \frac{(V_{in} - V_o) \times (1 - D) \times T}{L} = 0 \quad (22)$$

Simplificando la ecuación (22), se obtiene:

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (23)$$

De esta forma, con la ecuación (23) se obtiene la relación entre la tensión de salida con la tensión de entrada, la cual está relacionada por un factor multiplicativo de $\frac{1}{1-D}$, además se sabe que el ciclo de trabajo tiene valores entre 0 y 1, por lo que el resultado de este factor multiplicativo será mayor o igual a 1, y de esta manera se demuestra matemáticamente la función del convertidor elevador, la cual es mantener una tensión de salida mayor a la tensión de entrada. [23].

Además, si se asume que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, podemos llegar a una ecuación que relacione la corriente de salida con la corriente de entrada tomando en cuenta la expresión de la ecuación (23).

$$I_o = (1 - D) \times I_{in} \quad (24)$$

2.3.5 Algoritmos MPPT

Para muchas aplicaciones, la implementación de un sistema que utilice tecnología fotovoltaica no resulta eficiente debido al costo beneficio que este sistema da. Se sabe que la curva característica de una celda solar es no lineal, y que existe un punto específico donde se obtiene la máxima potencia que el módulo fotovoltaico puede entregar en ese preciso momento.

Hay muchos factores que desempeñan un papel importante en determinar si el módulo fotovoltaico está funcionando de manera óptima y el punto máximo de potencia. Debido a las fluctuaciones en las condiciones ambientales predominantes, la temperatura de la celda solar y el nivel de irradiancia que exista en ese momento, la curva IV cambiará y por lo tanto el punto de máxima potencia del módulo también cambiará. Por esta razón, un algoritmo MPPT no debe ser estático y debe estar constantemente rastreando el punto de máxima potencia.

La figura 11 muestra la variación de la curva IV con el cambio de nivel de irradiancia.

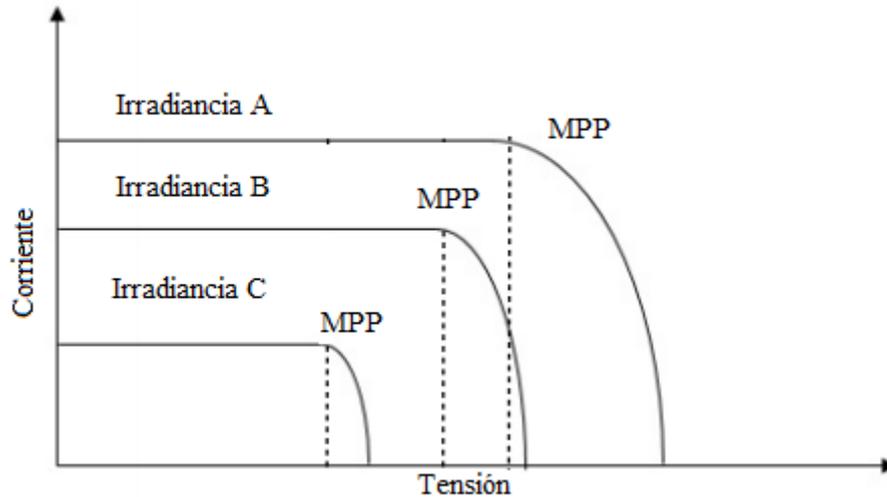


Figura 11. Variación del punto de máxima potencia a diferentes niveles de irradiancia. [28].

Existen varios algoritmos MPPT, a continuación, se presentan 5 de ellos:

- Método de tensión constante.
- Método de circuito abierto.
- Método de corriente en corto circuito.
- Método de perturbar y observar.
- Método de incremento en la conductancia.

Método de tensión constante

Este método es simple pero muy ineficiente. Se basa en el uso de un valor único de tensión para representar la tensión del punto de máxima potencia. En algunos casos, este valor es dado por una resistencia externa conectada a un pin de control de un circuito integrado. Para el caso de diferentes valores de irradiancia, este método recolectará alrededor del 80% de la potencia máxima disponible. Básicamente se coloca una carga, se desconecta, se mide la tensión en circuito abierto, se calcula la tensión del punto máximo de potencia y luego se varía el punto hasta que se llega a la tensión máxima. [28]

Dado que la potencia máxima de un módulo fotovoltaico no siempre está entre el 70-80% de la tensión de circuito abierto, la eficiencia de este método es baja. [28]

Método de tensión en circuito abierto

Es un método similar al de tensión constante, pero con una mejora en su diseño el cual utiliza una fórmula para calcular la tensión del punto de máxima potencia con el valor de la tensión en circuito abierto. Una vez que el sistema obtenga el valor de la tensión de circuito abierto (V_{oc}), se calcula la tensión del punto de potencia máxima con la siguiente fórmula:

$$V_{mpp} = k \times V_{oc} \quad (25)$$

El valor de la constante k está típicamente entre 0.7 y 0.8 y siempre es menor que la unidad. Es necesario actualizar el valor de V_{oc} ocasionalmente para compensar por cambios en la temperatura de la celda. El monitoreo de la corriente de entrada puede indicar cuando la V_{oc} debe ser nuevamente medida. El valor de la constante k es una función de la función logarítmica de irradiación, se debe aumentar su valor al aumentar la irradiación. [28]

Entre las ventajas de este método está su costo relativamente bajo, así como su fácil implementación. [28]

Entre las desventajas se tiene que no es un método muy exacto, dado que se necesita de ajustes en su constante k y en el valor de V_{oc} , además de que no opera en el punto exacto de MPP. [28]

Método de corriente en corto circuito

Esta técnica también es referida como el método de corriente constante. Este método utiliza el valor de la corriente en corto circuito I_{sc} para estimar la corriente en el punto de máxima potencia I_{mpp} , expresada en la siguiente fórmula:

$$I_{mpp} = k \times I_{sc} \quad (26)$$

Se utiliza una carga pequeña para generar una condición de corriente en corto circuito. Durante esta condición, la tensión de entrada decae a 0, por lo que el circuito de conversión de potencia debe ser alimentado por otra fuente. [28]

Una ventaja de este sistema es la tolerancia para la capacitancia de entrada comparada con el método de tensión de circuito abierto. [28]

El valor de la constante k esta entre 0.9 y 0.98, siempre menor a 0.

Método de perturbar y observar

En este método sigue el procedimiento de medir constantemente la tensión (o corriente en algunos sistemas) y perturbar el sistema de manera que la tensión continúe incrementándose. Después de que se pase el punto máximo de potencia, la tensión comenzará a disminuir, por lo tanto, el indicador en este algoritmo es el momento en que la tensión actual es menor a la tensión anterior medida, ahí el algoritmo de control debe ser capaz de enviar una señal de control al sistema, de manera que la tensión vuelva a aumentar y disminuir, por lo que se mantendrá en constante incremento y decremento, lo que quiere decir que oscila entre un rango donde se encuentra el punto máximo, pero no llega a caer en él. [29]

La figura 12 corresponde a la representación gráfica del método de perturbar y observar.

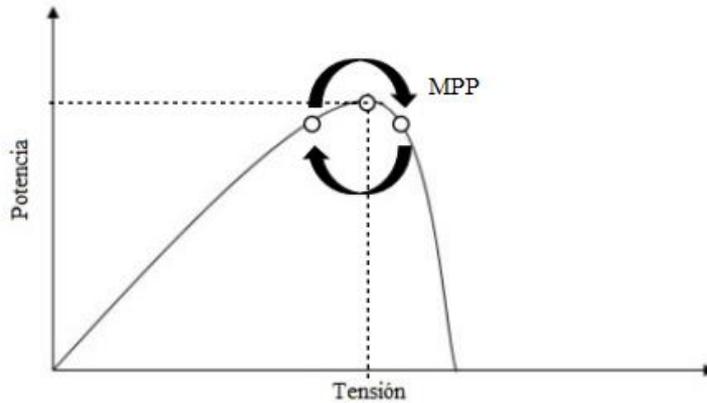


Figura 12. Representación gráfica del método de perturbar y observar. [29]

Método incremental de conductancia

Este método es más complejo, pero más preciso que el de perturbar y observar. La idea de este método es de comparar la derivada de la potencia con respecto a la tensión a cero y determinar si es mayor o menor a éste. Dado que, en el punto de máxima potencia, la derivada de la potencia con respecto a la tensión es cero, método permite tener una aproximación muy exacta. [29]

La figura 13 corresponde a la representación gráfica del método incremental de conductancia.

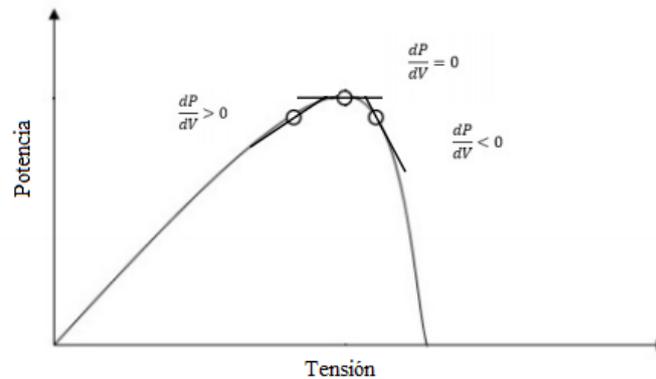


Figura 13. Representación gráfica del método incremental de conductancia. [29]

La ecuación que describe el sistema está dada por:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (27)$$

El punto de máxima potencia se alcanza cuando $\frac{dP}{dV} = 0$, por lo que la ecuación (27) se reescribe como:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (28)$$

Entre las ventajas de usar este método se tiene que:

- Es capaz de detectar de manera correcta cualquier cambio en la irradiancia y ajustar el valor MPP al ajustar el ciclo de trabajo.
- Tiene una eficiencia muy buena.
- Reduce oscilaciones acerca del punto MPP.
- Es capaz de reducir pérdidas de potencia y costos del sistema.

Como desventaja se puede mencionar que el tiempo computacional es incrementado debido a la reducción de la frecuencia de muestreo dado a la alta complejidad del algoritmo en comparación con el método de perturbar y observar. [28]

3. Capítulo 3. Solución seleccionada

Dadas las características eléctricas tanto del módulo fotovoltaico como de las baterías, se concluyó que se necesita de un convertidor tipo elevador, ya que se quiere elevar la tensión dada por el módulo fotovoltaico, la cual llega a un máximo de 22.1V (V_{oc}), para que en la salida se tenga una tensión máxima de 29.4V.

En conjunto con el convertidor tipo elevador, se requiere de un sistema de monitoreo y control que se encargue del proceso de control de las etapas de carga de la batería, así como de la extracción de la máxima potencia que pueda entregar el módulo fotovoltaico cuando se necesite.

Para la extracción de la máxima potencia, se seleccionó el método de perturbar y observar, debido a su facilidad de implementación, así como en términos de estabilidad y eficiencia acordes con los requerimientos de este proyecto.

Se utilizó una pantalla LCD, para visualizar información importante del proyecto, como por ejemplo la tensión y corriente entregada por el módulo fotovoltaico, así como la tensión y corriente que se suministra a la batería.

A continuación, la figura 14 muestra el diagrama de conexión básico de la solución implementada.

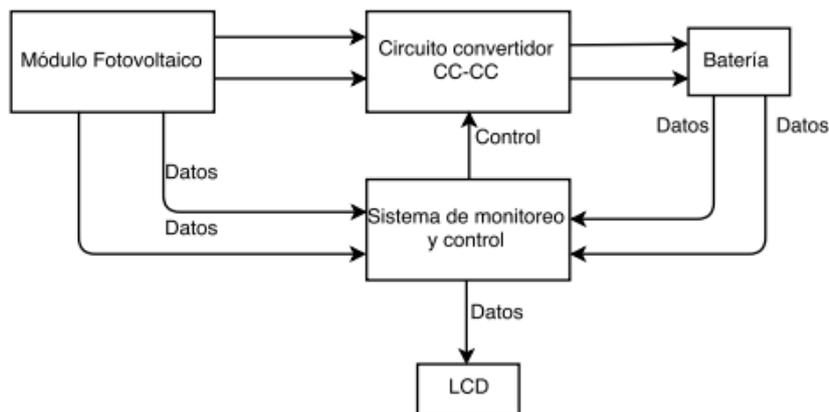


Figura 14. Diagrama general de solución implementada

Como se aprecia en la figura 14, se tiene como fuente principal de energía, un módulo fotovoltaico, el cual suministra la energía que produce a un convertidor CC-CC, el cual se encarga de procesar esta potencia recibida del módulo, de forma que sea aprovechada por los requerimientos de la batería para su debido proceso de carga. Dicho proceso, será controlado por el sistema de monitoreo y control, el cual recibe y procesa datos de valores de tensiones y corrientes tanto del módulo como de la batería, y a partir de estos datos controla el sistema convertidor CC-CC, de manera que se aproveche la máxima potencia disponible del módulo fotovoltaico y además que se lleve el proceso de carga óptimo requerido del tipo de batería a cargar.

4. Capítulo 4. Descripción detallada de la solución

En este capítulo se da una descripción detallada del diseño propuesto para dar solución al problema que originó el proyecto. Se explicarán los pasos que se siguieron para la determinación del proceso de dimensionamiento del prototipo, las características de cada módulo planteado en el diseño modular de la figura 14, así como los componentes utilizados en el diseño.

4.1 Características eléctricas del módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico es de la marca Kyocera modelo KD135GX-LFBS, a continuación, se presenta una tabla 1 con sus características eléctricas.

Tabla 1. Especificaciones eléctricas STC del módulo fotovoltaico.

Medida	Valor
Pmp	135 W
Vmp	17.7 V
Imp	7.63 A
Voc	22.1 V
Isc	8.37 A
Ptolerancia	±5 W

4.2 Características eléctricas de las baterías

Ambas baterías son de 24V, la batería de ion litio tiene una capacidad de 12.5Ah y posee un sistema de control interno, que la desconecta internamente del cargador en caso de que la temperatura interna de las celdas sea mayor a 40°C, además, su fabricante recomienda un tiempo de carga entre 4 y 8 horas. La batería de ácido plomo tiene una capacidad de 12Ah y su fabricante recomienda un tiempo de carga entre 6 y 10 horas.

4.3 Diseño del convertidor CC-CC

Basados en el circuito de la figura 21, se procedió a calcular los valores requeridos de los componentes que se utilizaron, como: el inductor, el capacitor, el diodo de conmutación, así como el transistor MOSFET, pero, primero se establecieron los límites donde el convertidor sea funcional.

Estos límites se definieron de forma que a partir de 7.5V el sistema sea funcional, dado que se quiere elevar la tensión hasta 30V aproximadamente y se tiene un factor de 4, por lo que el ciclo de trabajo según la ecuación (23) es de aproximadamente 75%.

Para el cálculo de la inductancia, se utilizó la siguiente ecuación [24]:

$$L = \frac{V_{in} \times (V_{out} - V_{in})}{\Delta I_L \times f_s \times V_{out}} \quad (29)$$

Dónde:

ΔI_L = corriente de rizado.

f_s = frecuencia de conmutación.

Se definió una frecuencia de conmutación de 75kHz. Para definir la corriente de rizado, fue necesario conocer la corriente de carga, ya que una buena estimación de corriente de rizado está entre el 1% y 10% de la corriente de carga. [24]

La corriente de carga está definida por la corriente máxima de carga que se quiere administrar a la batería, dadas las recomendaciones de tiempos de carga de ambos fabricantes de los 2 tipos de baterías a cargar y sus respectivas capacidades de carga, se define una corriente de carga máxima de 2A para ambas baterías.

Se definió una estimación de rizado del 7.5% de la corriente de carga, esto dio como resultado una corriente de rizado de 0.15 A

Con este valor de corriente de rizado, se calculó el valor estimado de la inductancia de acuerdo a la ecuación (29), y se obtuvo un valor de inductancia de 0.5 mH.

Para garantizar el modo de conducción continua, se requiere que [25]:

$$L > \frac{V_{in(max)}}{2 \times I_{in(min)} \times f} \quad (30)$$

Donde la tensión máxima es la tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico V_{oc} , la corriente mínima será ligeramente mayor al doble del 5% de la corriente de carga de la batería, el 10% correspondiente a 2A, aproximadamente 0.2 A, por lo que la corriente mínima de entrada será aproximadamente de 0.4 A. Se resolvió la ecuación (30), con un resultado de inductancia mínimo de 0.37mH para garantizar el modo de conducción continua.

Para el cálculo de la capacitancia, se utilizó la siguiente ecuación [24]:

$$C_{min} > \frac{I_{out(max)} * D}{f_s * \Delta V_{out}} \quad (31)$$

Dónde:

ΔV_{out} = tensión de rizado.

f_s = frecuencia de conmutación.

La tensión de rizado se estableció al 2% de la tensión de salida máxima, esto es el 2% de 30V, aproximadamente 0.6V. La corriente de salida máxima debe de ser la corriente de carga máxima definida para las baterías, en este caso, 2A.

Se resolvió la ecuación (31), con un resultado de capacitancia mínima de 0.67 μ F. Se escogió el valor de capacitancia de 150 μ F, ya que cumple con lo establecido en la ecuación (31).

El diodo que se escogió es del tipo Schottky, dado que éste permite reducir pérdidas de potencia más que un diodo común [24], debido a que puede operar a frecuencias de conmutación altas.

Otra ventaja de este diodo con respecto a un diodo común es que soportan una corriente de pico mayor, por lo tanto, un pico de corriente en el sistema no es un problema para el mismo. [26].

El transistor MOSFET que se escogió, fue el IRF540, el cual es conmutación de frecuencias altas y soporta corrientes mayores a la máxima entregada por el módulo fotovoltaico (ver hoja de datos).

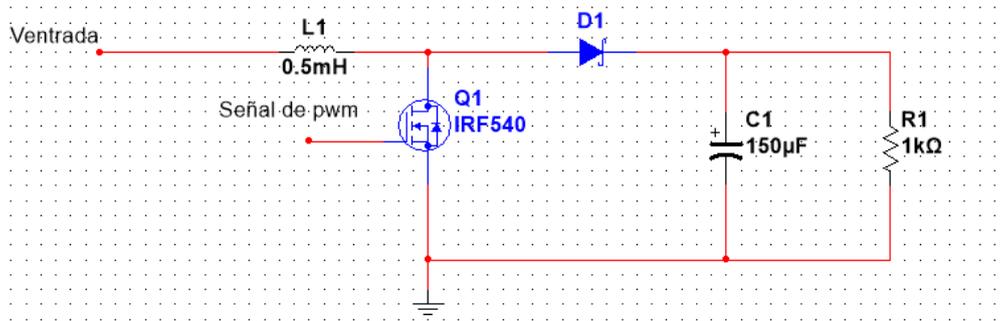


Figura 15. Circuito elevador de tensión diseñado para prueba de concepto.

4.4 Montaje y pruebas del convertidor.

Las pruebas del convertidor con los valores anteriormente establecidos de los componentes utilizados, se llevaron a cabo en una tarjeta de montaje protoboard.

Se realizaron pruebas para caracterizar el funcionamiento del circuito convertidor elevador a lazo abierto (sin sistema de control), con una resistencia de carga R_L de $1k\Omega$, una frecuencia de conmutación de $70kHz$ y los valores de los componentes calculados en el apartado anterior. La tabla 2 recopila los datos de dicha prueba.

Tabla 2. Caracterización del circuito de prueba del convertidor elevador sin sistema de control.

Vin(V)	Iin(mA)	Vout(V)	Iout(mA)	D (%)	Eficiencia (%)	Error Vout(%)
7.5	145	29.56	29.56	75.18	80.35	1.47
8.5	134	30.2	30.2	71.8	80.07	0.67
10	110	29.65	29.65	66.78	79.92	1.17
13	105	33.28	33.28	56.62	81.14	10.93
15	114	37	37	49.95	80	23.33
17.7	96	36.7	36.7	40.63	79.26	22.33
19	83	35.5	35.5	36.22	79.91	18.33
20	77	35.3	35.3	32.84	80.9	17.67
22.1	70	35.7	35.7	25.76	82.4	19

Los resultados obtenidos de la tabla 2 son aceptables hasta llegar a los 13V, a partir de ese punto, los resultados tienen una divergencia con la ecuación (23) muy por encima de niveles aceptables. Se debe recordar que los componentes no son ideales, además que las mediciones de sus valores

no son exactas, además que ésta primera prueba se realizó en la placa de protoboard, por lo que éstas razones contribuyeron a una divergencia por encima de los valores aceptables.

Para reducir la divergencia con la ecuación (23), se propuso un algoritmo de control que estuviera en constante toma de datos relevantes como las tensiones y corrientes de entrada y salida del convertidor, para así ajustar el ancho de modulación de la señal de PWM con la que se controla el MOSFET de tipo N. Se conoce que, al aumentar el ciclo de trabajo de esta señal, se aumenta la tensión de salida, y caso contrario al disminuir el ciclo de trabajo.

4.5 Diseño de la etapa de monitoreo y control

Se escogió el microcontrolador Atmel Atmega329P de arquitectura RISC avanzada, el cual tiene una frecuencia de operación de 20MHz, una memoria flash programable de 32Kbytes, memoria EEPROM de 1Kbyte, memoria interna SRAM de 2Kbytes. Con este microcontrolador, se diseñó la etapa de monitoreo y control del circuito elevador de tensión.

La tarjeta de desarrollo Arduino Nano utiliza este microcontrolador y otros componentes que permiten una programación de fácil acceso a varias entradas y salidas tanto digitales como análogas. El arduino nano tiene 8 pines de entradas/salidas análogas, 14 pines de entradas/salidas digitales, entre ellas 6 puertos de pwm, así como 1 par de puertos de comunicación TX y RX.

4.5.1 Etapa de monitoreo

En esta etapa se dan las lecturas de tensiones y corrientes de entrada y salida. Para las mediciones de tensiones, se requirió de diseñar un circuito que escale la tensión, ya que el microcontrolador trabaja con tensiones de entradas de hasta 5V máximo, y tanto las tensiones de entrada y salida del circuito convertidor son mucho mayores a los 5V, por lo que se utilizó un divisor de tensión tanto en la entrada como la salida del convertidor.

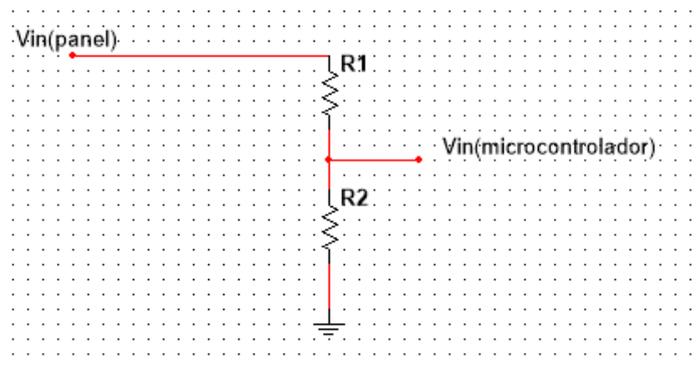


Figura 16. Divisor de tensión de entrada.

Aplicando la fórmula de divisor de tensión, se tiene que:

$$V_{in(microcontrolador)} = \frac{V_{in(panel)} \times R2}{R1 + R2} \quad (32)$$

Se sabe que la tensión del panel fotovoltaico varía en un rango desde 0V hasta 22.1V, además que la tensión de entrada al microcontrolador no debe exceder los 5V, así que se estableció una entrada máxima de V_{in} (microcontrolador) de 4.5V, sustituyendo estos valores en la ecuación (36) se obtiene:

$$\frac{V_{in(panel)}}{V_{in(microcontrolador)}} = \frac{22.1}{4.5} \cong 5 = \frac{R1 + R2}{R1} \quad (33)$$

Por lo que, la relación entre las resistencias del circuito de la figura 16 es de:

$$4R1 = R2 \quad (34)$$

De igual forma, se procede a calcular los valores resistivos del divisor de tensión de la etapa de salida del convertidor elevador.

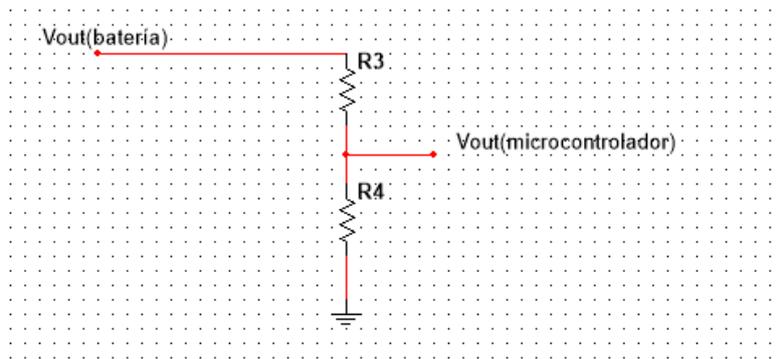


Figura 17. Divisor de tensión de salida.

$$V_{out(microcontrolador)} = \frac{V_{out(batería)} \times R4}{R3 + R4} \quad (35)$$

Se sabe que la tensión máxima de salida de batería no será mayor a 30V, pero se estima en un poco más por precaución, en 35V.

$$\frac{V_{out(batería)}}{V_{in(microcontrolador)}} = \frac{35}{4.5} \cong 8 = \frac{R3 + R4}{R4} \quad (36)$$

Por lo que, la relación entre las resistencias del circuito de la figura 17 es de:

$$7R3 = R4 \quad (37)$$

Para las mediciones de las corrientes, se utilizó un sensor de corriente ACS 712, el cual realiza la medición de corriente directa en serie y da un valor de tensión proporcional a la corriente medida.

Entre las ventajas del sensor de corriente ACS712 de Allegro Systems están:

- Bajo ruido de señal analoga.
- Tiempo de subida de la salida de $5\mu\text{s}$ en respuesta a la corriente de entrada.
- Maneja hasta un ancho de banda de 80kHz .
- Error de 1.5% a temperatura ambiente de 25°C .
- Resistencia interna de conducción de $1.2\text{m}\Omega$.
- Alimentación de 5V .
- Sensibilidad de salida desde 66mV/A hasta 185mV/A .

La figura 18 corresponde al circuito utilizado para la prueba de control del convertidor elevador de tensión.

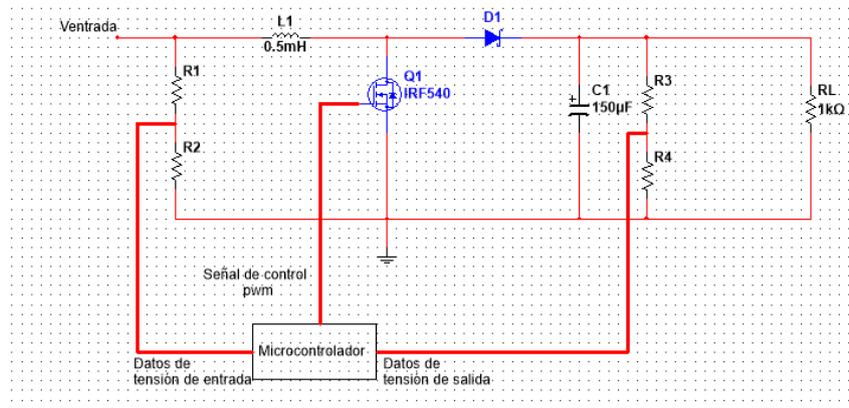


Figura 18. Circuito convertidor elevador de tensión con sistema de control.

En esta etapa, se diseñó un algoritmo que disminuyera el porcentaje de error de la tensión de salida, de manera que, si la tensión de salida es menor que la tensión deseada en la salida, se aumente el ciclo de trabajo de la señal de PWM, y caso contrario se disminuya el ciclo de trabajo. Se seleccionó trabajar con un rango de tensiones dieran como resultado un porcentaje de error debajo del 2% .

Algoritmo de control de prueba de concepto de circuito convertidor elevador de tensión.

El siguiente algoritmo fue utilizado para la primera prueba de control de tensión de salida del circuito de la figura 31, el cual fue alimentado con una fuente reguladora de tensión marca Agilent modelo E3631A.

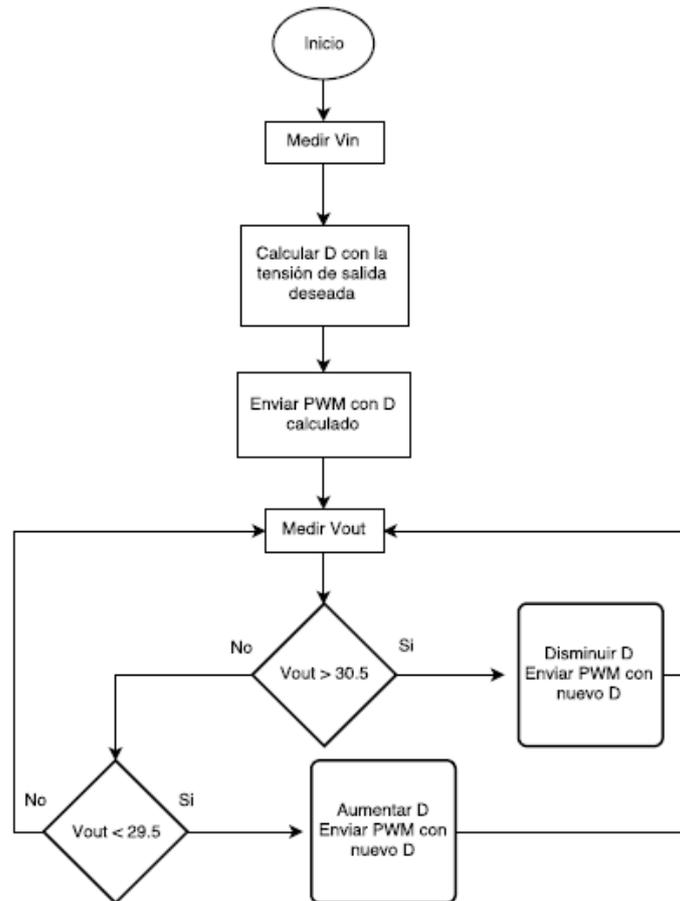


Figura 19. Diagrama de flujo de algoritmo de control de prueba del convertidor elevador de tensión.

El algoritmo de la figura 19, inicia con los valores iniciales de las variables requeridas, además envía una señal de control PWM con un ciclo de trabajo del 50%, esto para que el MOSFET esté con un periodo de conmutación establecido al inicio del proceso. Se mide la tensión de entrada, seguido a esto se calcula el ciclo de trabajo requerido para elevar la tensión de entrada a la tensión de salida deseada, esto con la ecuación (23).

Se envía el ciclo de trabajo calculado a la compuerta del MOSFET, seguido a esto, se mide la tensión de salida, se compara si la tensión de salida es mayor a la tensión máxima definida, en este caso de 30.5V, de ser así, se disminuye el ciclo de trabajo en pasos de 0.1%, hasta que la tensión de salida no sea mayor a 30.5V.

En caso de que la tensión de salida no sea mayor al máximo permitido, se compara si es menor al mínimo requerido, de ser así, se aumenta el ciclo de trabajo en pasos de 0.1%, hasta que la tensión de salida no sea menor a 29.5V.

En caso de que la tensión de salida esté en el rango deseado, el sistema mantendrá el ciclo de trabajo de la señal de control del MOSFET en ese momento y continuará midiendo el valor de dicha tensión y en el momento que salga del rango de valores deseados, tomará decisiones ya antes mencionadas.

A continuación, en la tabla 3 se recopilan los datos relevantes del experimento de caracterizar el circuito de prueba del convertidor elevador con el sistema de control del diagrama de flujo propuesto en la figura 19.

Tabla 3. Caracterización del circuito de prueba del convertidor elevador con sistema de control.

Vin(V)	Iin(mA)	Vout(V)	Iout(mA)	D (%)	Eficiencia (%)	Error Vout (%)
7.5	145	29.7	29.7	74.58	81.11	1
8.5	134	30.3	30.3	72.6	80.6	1
10	110	29.7	29.7	66.95	80.2	1
13	86	30.16	30.16	45.21	81.36	0.53
15	73	30.06	30.06	39.56	82.52	0.2
17.7	63	30.43	30.43	29.95	83.04	1.43
19	57	30.06	30.06	24.46	83.44	0.2
20	53	29.93	29.93	21.64	84.5	0.23
22.1	49	30.4	30.4	17.89	85.34	1.33

La tabla 3 muestra que el error en la salida de tensión del convertidor es menor al 2% para una carga resistiva de $1k\Omega$. la eficiencia máxima es alrededor de 85%.

El siguiente paso consistió en diseñar el algoritmo de control de todo el proceso de carga de la batería. Como se mencionó anteriormente en este documento, es recomendado utilizar un algoritmo de control de carga de 3 etapas para la batería de ácido plomo a saber, las etapas de: corriente constante, tensión tope de saturación y tensión de mantenimiento. Para la carga de ion litio, según recomendaciones de expertos, basta con utilizar las 2 primeras etapas de la carga. [16]

4.6 Algoritmo de control de prueba de carga de batería.

Es importante que en el momento en que se conecte una fuente de entrada al circuito convertidor elevador de tensión, exista una carga conectada en la salida, y en caso que si exista, asegurar siempre una conexión con la misma, dado que, si no se encuentra conectada una carga, entonces la corriente de salida del convertidor elevador es de 0A, y esto no es deseado dado que el inductor L continuará dando de su energía a la salida del circuito, y esto hará que el capacitor salda se cargue de forma rápida a valores de tensión altos (mayor a 50V), algo totalmente erróneo e indeseado.

Para garantizar que siempre exista una carga conectada a la salida del convertidor, se pretende utilizar relés tanto en la entrada como en la salida del circuito convertidor, de manera que funcione como un acople del sistema de alimentación que en este caso es el módulo fotovoltaico y de la carga, en este caso, la batería a cargar.

El algoritmo de control del proceso de carga de la batería, se basa en el control de los niveles de tensión y corriente de carga de la batería, dependiendo de la etapa en la que se encuentre el proceso.

Para la etapa 1 de carga, se requiere monitorear y controlar la corriente de carga, de manera que no exceda un límite máximo de corriente para no dañar la batería. La tensión no requiere ser controlada en esta etapa, dado que se espera que incremente de forma gradual, pero si debe ser

monitoreada, de manera que cuando se alcance un valor de tensión de carga máximo previamente establecido, se proceda con el control de la segunda etapa de carga.

Para la etapa 2, se debe monitorizar y controlar la tensión de carga, de manera que permanezca en un rango establecido, para cumplir con lo establecido en el proceso de carga de la batería, que indica una tensión de carga constante en la segunda etapa. La corriente no requiere ser controlada en esta etapa, dado que se espera que disminuya de forma gradual, pero si debe ser medida, de manera que cuando se alcance un valor de corriente mínima previamente establecida, se proceda de ser el caso con la tercera etapa si se tiene una batería de ácido plomo, caso contrario se dé por terminado el proceso en caso de tener una batería de ion litio.

Para la etapa 3, se necesita monitorizar y controlar la tensión de carga en el rango establecido de tensión de mantenimiento. Además, se requiere monitorizar el tiempo transcurrido en esta etapa, dado que se estableció el tiempo de etapa 3 de 1 hora.

La figura 21 corresponde al diagrama de flujo del algoritmo de control de carga de 3 etapas de las baterías de ácido plomo e ion litio de 24V.

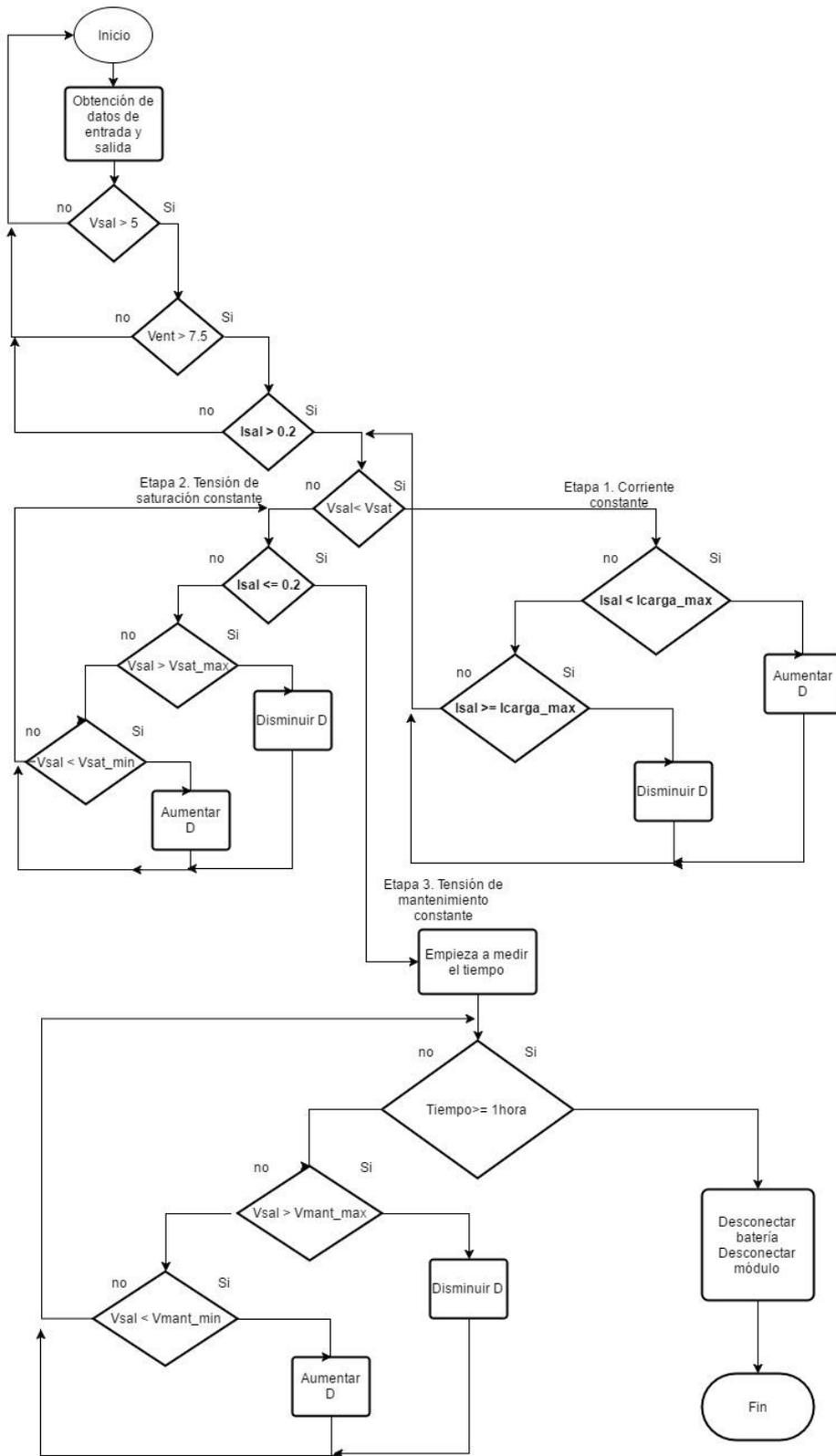


Figura 20. Diagrama de flujo de algoritmo de control de carga de 3 etapas de baterías ácido plomo e ion litio de 24V con una fuente de alimentación regulada.

Dónde:

V_{sal} = Tensión de salida del convertidor, en este caso es la tensión de la batería.

V_{ent} = Tensión de entrada del convertidor.

I_{sal} = Corriente de salida del convertidor, en este caso, corriente de carga de la batería.

V_{sat} = Tensión de saturación o tope correspondiente a la etapa 2 del sistema de carga de la batería.

V_{sat_max} = Tensión de saturación máxima.

V_{sat_min} = Tensión de saturación mínima.

V_{mant} = Tensión de mantenimiento, correspondiente a la etapa 3 del sistema de carga de la batería.

V_{mant_max} = Tensión de mantenimiento máxima.

V_{mant_min} = Tensión de mantenimiento mínima.

D = Ciclo de trabajo de la señal de control de pwm utilizada en el mosfet.

El programa inicia con los valores iniciales de las variables utilizadas, se miden las señales de tensión y corriente tanto en la entrada como en la salida, seguido a esto se pregunta si la tensión de salida es mayor a 5V, esto se hace para asegurarse que se tiene conectada una batería, para el diseño del algoritmo final, este valor puede cambiar a 20V, así se asegura de que esté conectada una batería de 24V mínimo. De no detectar esa tensión mínima de salida, el sistema asume que no está conectada la batería al sistema, y se devuelve al inicio del programa.

Luego, se compara si hay una tensión de entrada mayor a los 7.5V, que es la tensión mínima requerida para que el circuito convertidor elevador de tensión funcione de forma correcta. En caso negativo, al igual que la pregunta anterior, el sistema asume que no está conectado a una fuente de alimentación y se devuelve al inicio del programa.

En caso de tener las tensiones mínimas requeridas tanto en la entrada como en la salida, el sistema calcula el ciclo de trabajo requerido para obtener la tensión de salida deseada, y envía la señal de control con este ciclo de trabajo. Seguido a esto, el sistema pregunta si la corriente de salida es mayor al 2% de la corriente de carga establecida, la cual es 2A para ambas baterías, esto con el fin de asegurarse que exista esa corriente de carga. Luego, se pregunta si la tensión de salida es menor a la tensión de saturación, esto para distinguir si se encuentra en la etapa 1 o en la etapa 2, dado que el valor de esa tensión es la que define si se está en la etapa de corriente constante de carga o la etapa de tensión constante de saturación. Para la batería de ácido plomo la tensión de saturación se definió en un valor de 2.4V por celda (28.8V), y para la batería de ion litio se definió en 4.15V por celda (29.05V).

Si la tensión de salida es menor que la tensión de saturación el sistema reconoce que está trabajando en la etapa 1 de corriente continua y debe regular esta corriente de salida de modo que se encuentre en un rango aceptable de corriente, en este caso se definió ese rango con una corriente de carga mínima de 1.98A y una corriente de carga máxima de 2.02A. La técnica de regulación es la misma utilizada en el algoritmo anterior.

En esta etapa, como se explicó previamente en el marco teórico, la corriente de carga debe ser constante, y la tensión en la batería irá aumentando en forma lineal, hasta llegar a una tensión máxima.

Cuando la tensión de la batería es mayor o igual a la tensión de saturación, el sistema reconoce que debe entrar en la etapa 2, la cual se encarga de regular esta tensión de la batería en un rango donde la tensión de saturación máxima para la batería de ácido plomo es de 29V y la tensión mínima es de 28.2V. En el caso de la batería de ion litio, la tensión máxima de saturación es de 29.4V y la tensión mínima es de 28.8V.

Al principio de esta segunda etapa, el sistema pregunta si la corriente de carga es menor o igual 0.2A, dado que como se explicó en el marco teórico, en la etapa de tensión constante de tope, la corriente de carga desciende exponencialmente, hasta llegar a una corriente mínima donde se estabiliza, esta corriente en teoría es igual al 5% de la corriente de carga, pero en este sistema se define al 10%, ya que las baterías han sido muy usadas y su resistencia interna no está en las mejores condiciones. Por lo tanto, se define una corriente de 0.2A, para que el sistema cuando detecte que la corriente de carga es igual o menor a 0.2A, se prosiga a la tercera y última etapa de carga.

En la tercera etapa, el sistema debe regular la tensión de la batería a un rango de tensiones definidas como tensión de mantenimiento, en este caso se definió una tensión máxima de mantenimiento de 27.4V y una tensión mínima de mantenimiento de 26.6V. El sistema debe mantener esta regulación de tensión en la batería por un tiempo de 1 hora que es el tiempo de duración de la tercera etapa, para esto, siempre está preguntando si el tiempo transcurrido desde que inició esta etapa es mayor o igual a 1 hora, para avisar de que el proceso ha concluido.

Para la prueba de concepto, se utilizó una fuente reguladora marca KEPCO modelo BOP 100-10MG.



Figura 21. Fuente reguladora KEPCO modelo BOP 100-10MG.

Para ambas cargas, únicamente se utilizó el proceso de las etapas 1 y 2, la tercera etapa se omitió en la prueba de ácido plomo, dado que es un proceso muy similar a la etapa 2 y para esta prueba de concepto bastó con utilizar las primeras 2 etapas.

Para obtener y analizar los datos, se requirió de un módulo lector tipo SD, la cual permite guardar datos en una memoria de tipo SD.



Figura 22. Módulo SD.

Además, se utilizó un módulo RTC, el cual es un reloj a tiempo real, que permite tener información de la fecha y hora de las variables para la toma de resultados, con el fin de tener la medida de tiempo transcurrido en el gráfico del proceso de carga de la batería.

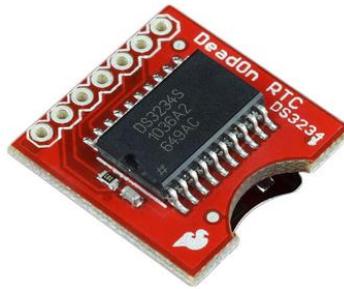


Figura 23. Módulo RTC.

Se agregó al programa el código correspondiente a las funciones de guardar los datos necesarios para la elaboración del gráfico del proceso de carga de la batería. Esta función crea un archivo en formato .txt, al cual agrega información relevante, como: las tensiones y corrientes tanto de entrada como de salida del sistema, el valor del ciclo de trabajo y el tiempo en que se tomó el dato, el cual fue de cada 10 segundos.

Para esta prueba con la batería, se realizó el diseño del circuito en PCB, con el programa de Eagle Cad de Autodesk con licencia gratuita de estudiantes.

La figura 24 corresponde al circuito diseñado en el programa de Eagle Cad de Autodesk.

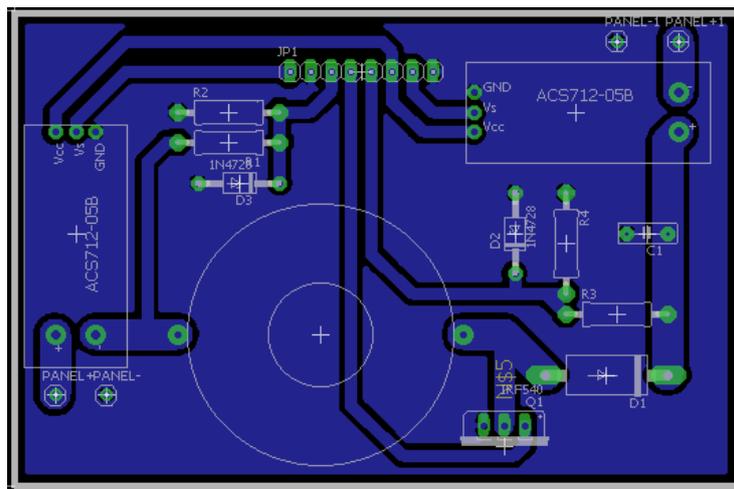


Figura 24. Diseño del circuito PCB.

Se utilizó un ancho de pista de 3.81 mm para las conexiones donde fluye la corriente de entrada, dado que para este sistema y con las condiciones dada de corriente de salida máxima, la corriente de entrada máxima no será mayor a 5A, por lo que su ancho de pista recomendado es de 3.6mm o superior. Las demás pistas tienen un ancho de 1.41mm. [27]

4.7 Tiempos de ejecución del algoritmo

La figura 25 corresponde a una representación más resumida del diagrama de flujo mostrado en la figura 20.

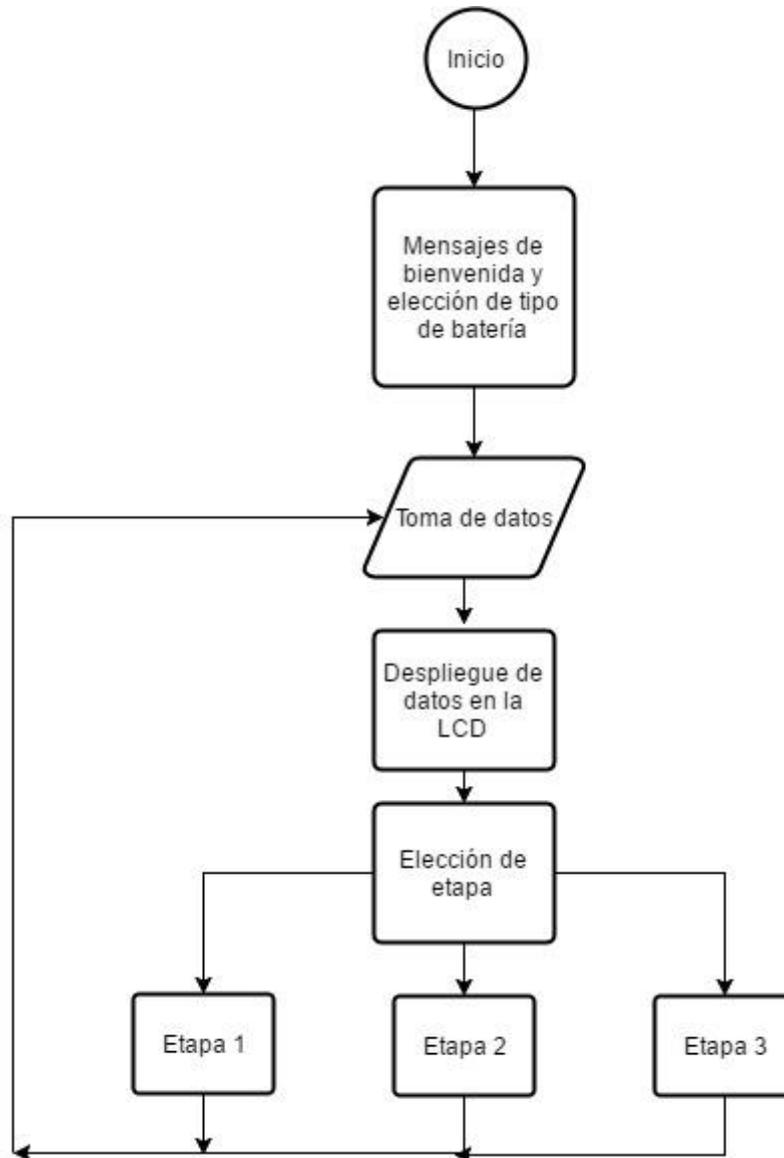


Figura 25. Diagrama de flujo resumido

En el proceso de toma de datos, se adquieren los datos de tensión y corriente suministrada por el módulo fotovoltaico, así como los de tensión y corriente de carga de la batería. Estos datos son “filtrados” en una función que toma 40 muestras y promedia el resultado.

La tabla 4 corresponde a los tiempos de ejecución de cada proceso del algoritmo de la figura 25.

Tabla 4. Tiempos de ejecución de procesos del algoritmo de la figura 25

Proceso	Tiempo
Toma de datos	42.8 ms
Despliegue de datos en la LCD	12.5 ms
Elección de etapa	50 μ s
Etapa 1	79.1 ms
Etapa 2	46 ms
Etapa 3	45.8 ms

Es importante recordar que en la etapa 1, la cual es la etapa de corriente constante, se encuentra el algoritmo MPPT, por esta razón es el proceso de mayor duración.

En resumen, para una batería que esté en la etapa 1, todo el algoritmo correspondiente al proceso de monitoreo y control de carga, tendrá una duración de 134.45 ms, mientras que para la etapa 2 o 3 se tendrá un tiempo de ejecución de 101.35 ms.

4.8 Gráfica de carga de batería de ácido plomo de 24V con una fuente de alimentación de 17V 10A

La figura 26 corresponde al gráfico obtenido del proceso de carga de la batería de ácido plomo de 24V.

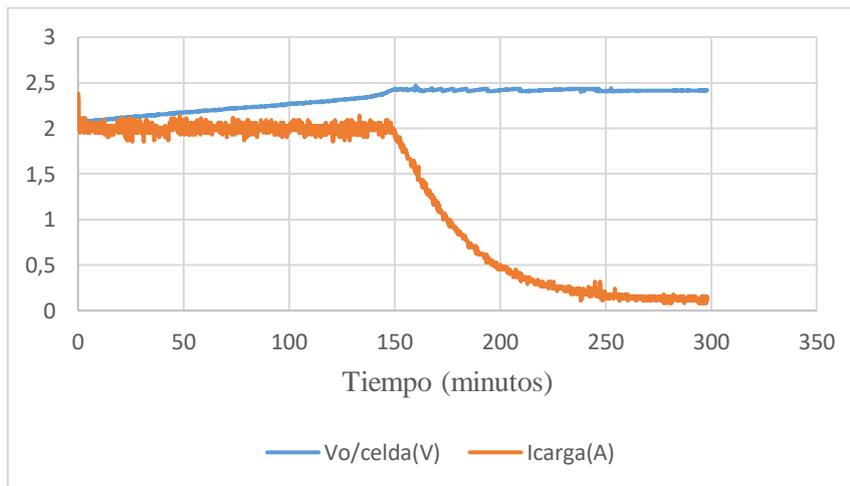


Figura 26. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V con fuente regulada.

De la figura 26, se observa que el proceso dura 300 minutos, para las 2 etapas de carga, si se agrega la hora de la tercera etapa, se llega a un total de 6 horas del proceso de carga, lo cual es el tiempo recomendado por el fabricante.

Es importante mencionar que la tensión y corriente suministrada por la fuente de alimentación fue estable, ya que, para la primera etapa, la tensión de entrada se mantuvo constante a 15.7V y la corriente de entrada a 4.4A, para la segunda etapa la tensión de entrada aumentó de forma paulatina hasta un valor final de 16.9V y la corriente de entrada disminuyó hasta 0.4A.

La primera etapa tuvo una duración de 150 minutos y se tiene un promedio de corriente de carga de 2.01A, bastante preciso a la corriente de carga deseada, con un porcentaje de error máximo de 3 % y un porcentaje de error promedio de 0.5 %.

La segunda etapa también tuvo una duración de 150 minutos, su tensión promedio de saturación fue de 2.42V por celda, en total 29.04V. Se obtuvo un porcentaje de error máximo de 2.81 % y un porcentaje de error promedio de 0.83 %.

La corriente de carga disminuyó de forma exponencial en la etapa 2, algo esperado según la gráfica de la figura 3, hasta un valor de 0,11A donde se mantuvo constante en ese valor mínimo. Es importante recordar que la batería se considera que está totalmente cargada cuando esta corriente de carga disminuye hasta un valor entre 3-5 % del valor de la corriente de la capacidad de la batería, en este caso al ser la batería de ácido plomo, su capacidad es de 12Ah y el 3% equivale a 0.36A, por lo que a valores menores de esta corriente ya podemos considerar que la batería se ha cargado.

De esta manera, se concluye con éxito el primer objetivo y se cumple con los márgenes del indicador.

4.9 Gráfica de carga de batería de ion litio de 24V con una fuente de alimentación de 17V 10A.

La figura 27 corresponde al gráfico obtenido del proceso de carga de la batería de ion litio de 24V.

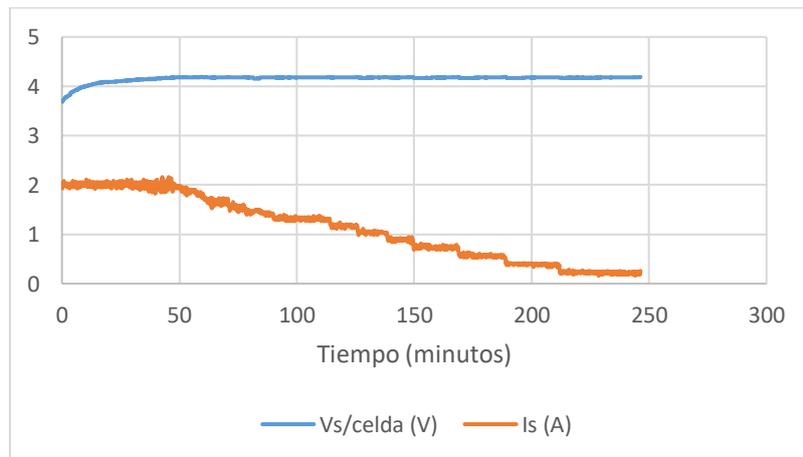


Figura 27. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V.

De la figura 27, se observa que el proceso dura 245 minutos, para las 2 etapas de carga.

Es importante mencionar que la tensión y corriente suministrada por la fuente de alimentación fue estable, ya que, para la primera etapa, la tensión de entrada se mantuvo constante a 14.2V y la corriente de entrada a 6.3A, para la segunda etapa la tensión de entrada aumentó de forma paulatina hasta un valor final de 15.9V y la corriente de entrada disminuyó hasta 0.4A.

La primera etapa tuvo una duración de 48 minutos y se tiene un promedio de corriente de carga de 1.99A, bastante preciso a la corriente de carga deseada con un porcentaje de error máximo de 4.5 % y un porcentaje de error promedio de 0.5 %.

La segunda etapa tuvo una duración de 197 minutos, su tensión promedio de saturación fue de 4.18V por celda, en total 29.2V. El porcentaje de error máximo de esta tensión es de 0.96 % y el porcentaje de error promedio de 0.65 %. La corriente de carga disminuyó hasta un valor de 0.21A.

De esta manera, se concluye con éxito el segundo objetivo y se cumple con los márgenes del indicador.

4.10 Algoritmo de MPPT

El algoritmo que se implementó fue el de perturbar y observar, dado a su facilidad de implementación y a que su eficiencia es aceptable acorde con las especificaciones y requerimientos de este proyecto.

Para la prueba del algoritmo, se necesitó de una referencia para poder comparar la potencia máxima que entrega el sistema con MPPT con el punto real en esa irradiancia específica, por ello, lo primero que se hizo fue hacer una prueba para lograr un tipo de “caracterización” del módulo fotovoltaico utilizado, para esto, se utilizó el siguiente análisis de resistencia equivalente vista por la fuente de alimentación, en este caso, el módulo fotovoltaico.

La figura 28 corresponde al circuito de resistencia equivalente vista desde la perspectiva del módulo fotovoltaico.

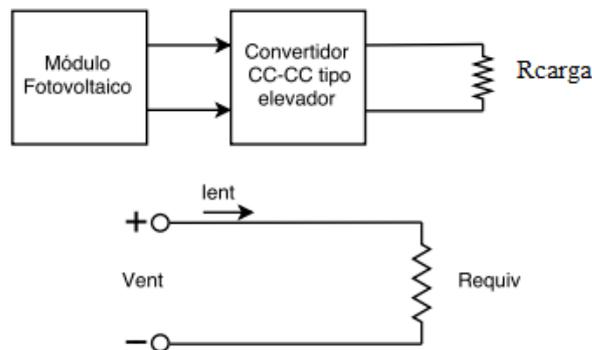


Figura 28. Circuito de resistencia equivalente visto desde la perspectiva del módulo fotovoltaico. [25]

Se puede encontrar una resistencia equivalente vista desde la perspectiva del módulo fotovoltaico, con la siguiente ecuación:

$$R_{equiv} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}} \quad (38)$$

Con base en las ecuaciones (23) y (24), se puede reescribir la ecuación (42) como:

$$R_{equiv} = \frac{(1 - D)V_{sal}}{\frac{I_{sal}}{(1 - D)}} = (1 - D)^2 R_{carga} \quad (39)$$

Con base en la ecuación (43), se tiene que la resistencia equivalente vista desde el módulo fotovoltaico es dependiente tanto del valor de ciclo de trabajo de la señal de control del PWM, así como de la resistencia de carga, en este caso la resistencia interna de la batería, la cual en el momento es que esta descargada, tendrá valores muy pequeños en el rango de los mΩ.

Se realizó la prueba con el circuito previamente diseñado de la figura 24 conectado a una batería de ácido plomo descargada, con un ciclo de trabajo inicial de 1% y cada 10 segundos se aumentó el ciclo en pasos de 1%, de esta manera, se hizo un barrido de valores del ciclo de trabajo hasta llegar al 100%, para obtener una tensión casi a circuito abierto con una corriente casi de 0A hasta una tensión muy baja con una corriente de casi corto circuito.

Se guardaron los datos en un archivo .txt, para luego graficarlos con Excel. La figura 29 corresponde al gráfico de corriente del panel vs tensión del panel. Esta prueba se realizó el día 4 de mayo del 2017 a las 9:37 am con una irradiancia promedio de 805 W/m².

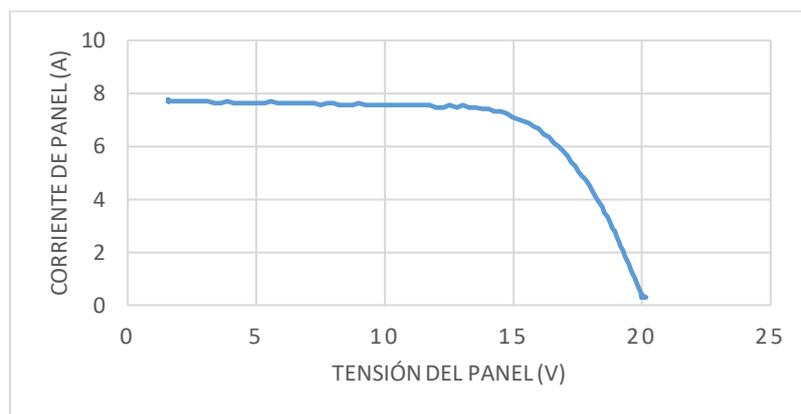


Figura 29. I_{panel} vs V_{panel} .

La figura 30 corresponde al gráfico de potencia de panel vs tensión de panel.

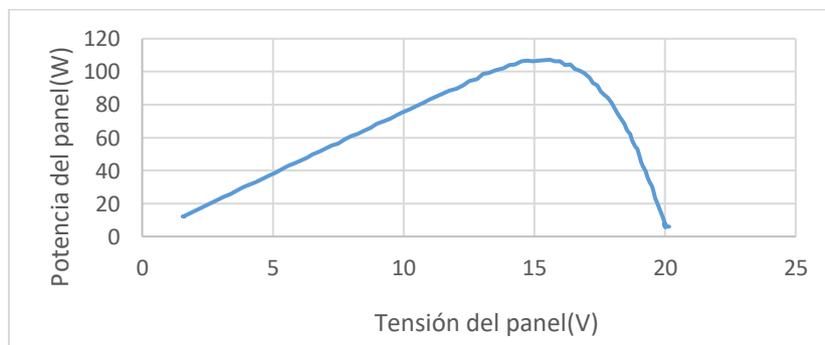


Figura 30. P_{panel} vs V_{panel} .

Con base en los resultados obtenidos, la potencia máxima fue de 107.2 W, con una tensión del módulo fotovoltaico de 15.59V y una corriente de 6.88A. Seguido a estos, se probó el algoritmo de perturbar y observar, detallado a continuación en la figura 31.

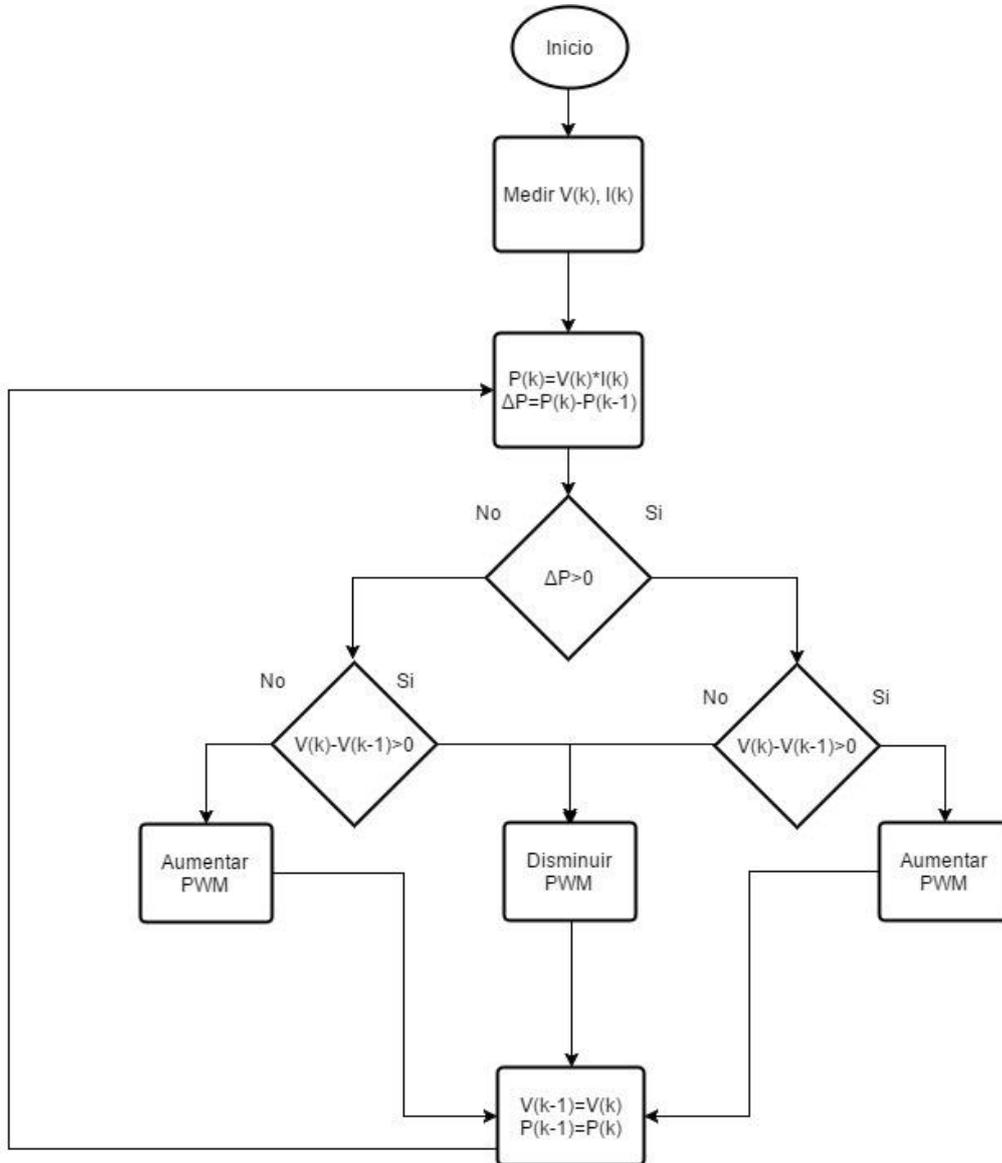


Figura 31. Algoritmo de perturbar y observar.

Dónde:

$V(k)$: Es la tensión entregada actual del módulo fotovoltaico.

$V(k-1)$: Es la tensión entregada anterior del módulo fotovoltaico.

$P(k)$: Potencia entregada actual del módulo fotovoltaico.

$P(k-1)$: Potencia entregada anterior del módulo fotovoltaico.

ΔP : $P(k)-P(k-1)$.

Se probó el algoritmo de la figura 31 junto con el circuito previamente diseñado de la figura 24 conectado a la batería de ácido plomo descargada, con una irradiancia promedio de 805 W/m^2 , los resultados se aprecian en la figura 32.

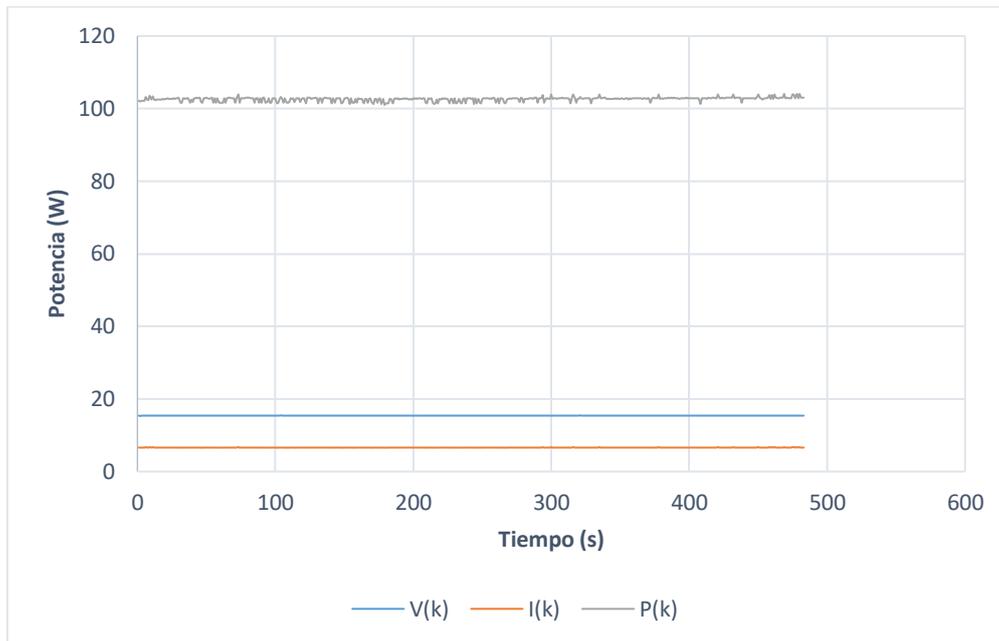


Figura 32. Resultados de prueba del MPPT.

La figura 32 muestra la forma en que se comporta el algoritmo MPPT de observar y perturbar, ya que la potencia oscila entre 2 rangos y el punto máximo se encuentra en este rango de oscilación. En este caso, la potencia oscila en un rango entre 101.2W y 104.1W.

La potencia promedio en ese lapso de 483 segundos fue de 102.6 W, lo que deja un porcentaje de error con el punto de máxima potencia de 4.29%, lo cual está por debajo del mínimo establecido por el indicador.

Con este algoritmo de MPPT y el algoritmo de control de carga de las baterías de ácido plomo e ion litio de 24V expuesto en la figura 20, se procedió con el diseño del algoritmo de carga de las baterías.

Es importante mencionar que el algoritmo MPPT se utilizará únicamente en la etapa de corriente constante, ya que en esta etapa se requiere de la corriente máxima de carga y es donde se extrae la mayor potencia del proceso de carga, además, el MPPT se utilizará en caso de que la corriente que reciba el circuito convertidor CC-CC no sea suficiente para abastecer a la batería de su corriente de carga necesaria en la etapa de corriente constante.

La figura 33 corresponde al diagrama de flujo del algoritmo de control de carga de las baterías de ácido plomo e ion litio de 24V.

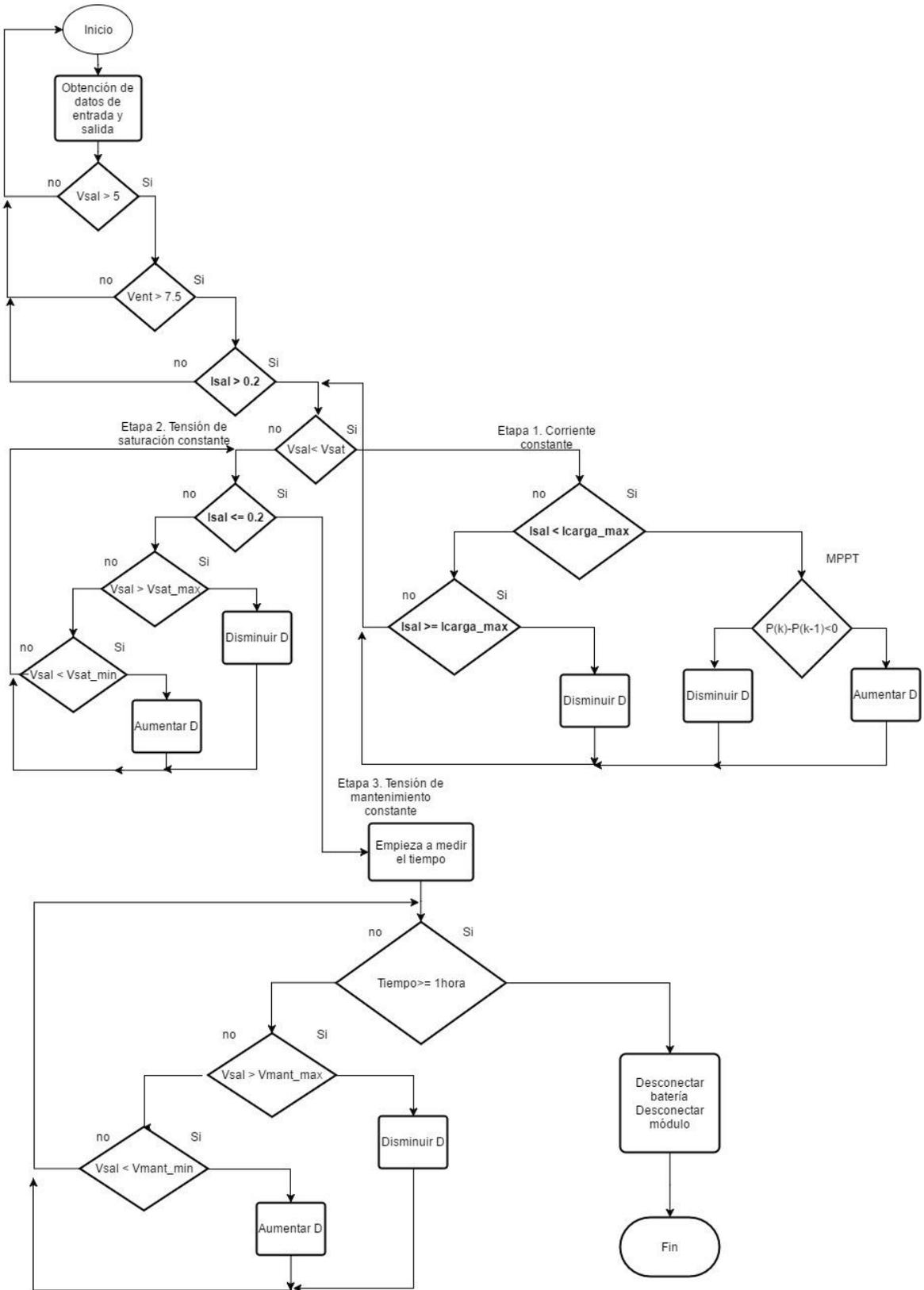


Figura 33. Algoritmo de control de carga de baterías de ácido plomo e ion litio de 24V con un módulo fotovoltaico como fuente de alimentación.

4.11 Gráfica de carga de batería de ácido plomo de 24V con el módulo fotovoltaico.

El siguiente paso, fue probar el sistema con el módulo fotovoltaico como fuente de energía. La prueba se realizó, en un día relativamente soleado, pero con nubes. En esta prueba se probaron las 3 etapas de carga.

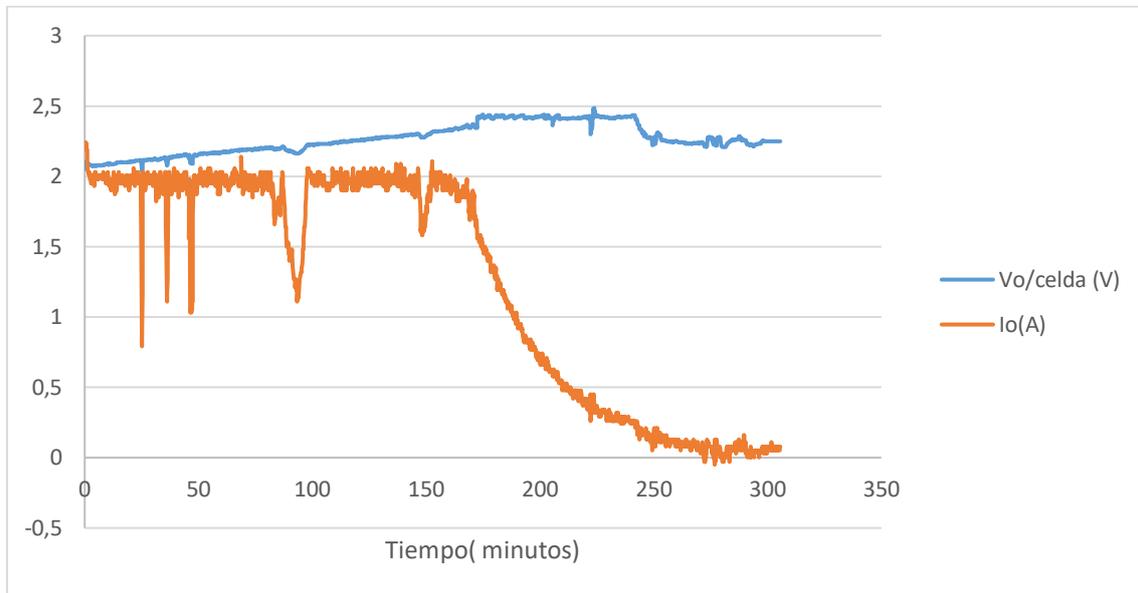


Figura 34. Gráfico de proceso de carga de batería de ácido plomo de 24V con módulo fotovoltaico.

Del gráfico de la figura 34, se aprecian las 3 etapas mencionadas en el marco teórico, la primera etapa de corriente constante, donde se notan en unos intervalos de tiempo donde la corriente disminuyó de forma abrupta, esto debido a que en ese momento una nube se interpuso entre la línea de visión del sol con el módulo fotovoltaico, se puede comparar con la figura 38 la cual muestra en detalle la corriente, tensión y potencia entregada por el módulo durante el tiempo de duración del proceso de carga de la batería. El momento en que la nube se aparta de la línea de visión la corriente incrementa hasta estabilizarse en el rango requerido por el sistema para esta etapa. La duración de la primera etapa fue de 160 minutos.

En la segunda etapa, el sistema estabilizó la tensión de tope en un promedio de 2.41V/celda, equivalente a 28.92V en total, esta etapa tuvo un tiempo aproximado de 82 minutos.

En la tercera etapa, el sistema estabilizó la tensión de mantenimiento en un promedio de 2.25V/celda, equivalente a 27V en total, esta etapa tuvo un tiempo de 60 minutos.

La figura 35 corresponde al gráfico de tensión, corriente y potencia entregada del módulo fotovoltaico al sistema de carga de la batería de ácido plomo de 24V.

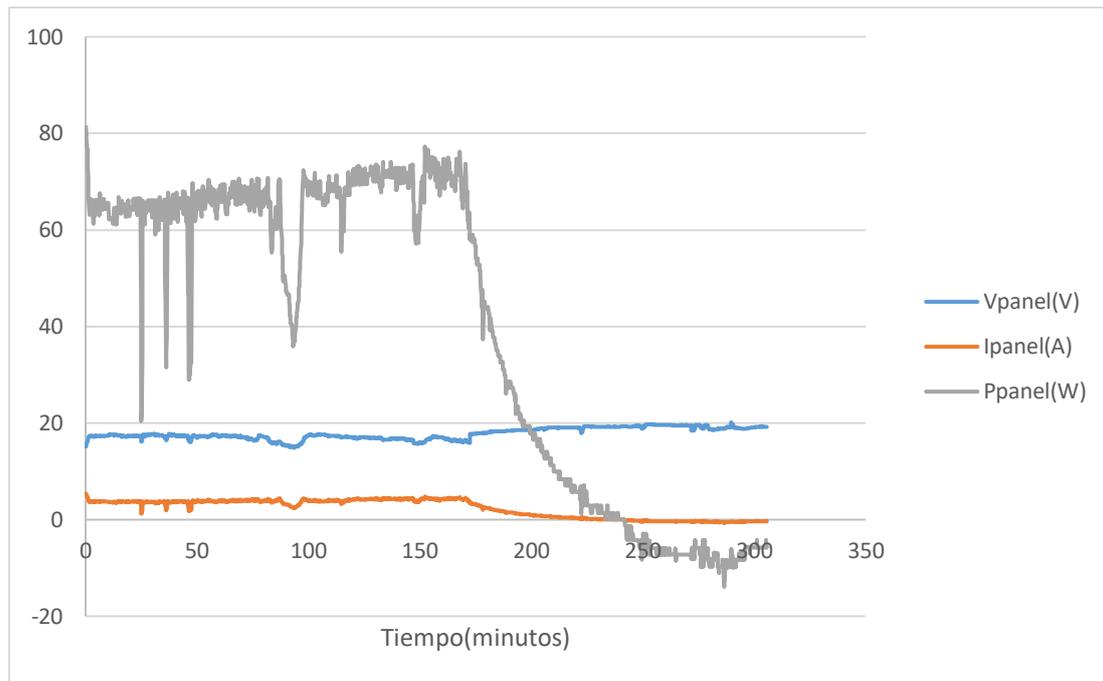


Figura 35. Gráfico de tensión, corriente y potencia entregada por el módulo fotovoltaico al sistema de carga de la batería de ácido plomo de 24V.

De la figura 35, se aprecia que en los mismos intervalos de tiempo donde la corriente de carga de la batería tuvo disminuciones abruptas, fue debido a que el módulo fotovoltaico tuvo estas mismas disminuciones tanto en la corriente que genera como en la tensión, y consecuentemente en la potencia entregada, dado que la nubosidad afecta de manera directa con el nivel de irradiancia recibido por el módulo, y esto afecta la energía que dicho módulo pueda generar y entregar al sistema requerido.

También, se observa de la figura 35, que la gráfica de la corriente y en consecuencia de la potencia llega a ser “negativa”. Esto se debe a errores de lectura por parte del sensor de corriente ACS712 de 30A, debido a que su sensibilidad es baja, alrededor de 66mV/A, y a valores por debajo de los 100mA de corriente, no se tiene una lectura correcta de parte del sensor.

4.12 Gráfica de carga de la batería de ion litio de 24V con el módulo fotovoltaico.

Se realizó la carga de la batería de ion litio, con el módulo fotovoltaico disponible en la estación, en un día soleado y con nubes. La figura 36 corresponde al gráfico del proceso de carga de la batería, este proceso consta de 2 etapas: corriente constante y tensión máxima constante.

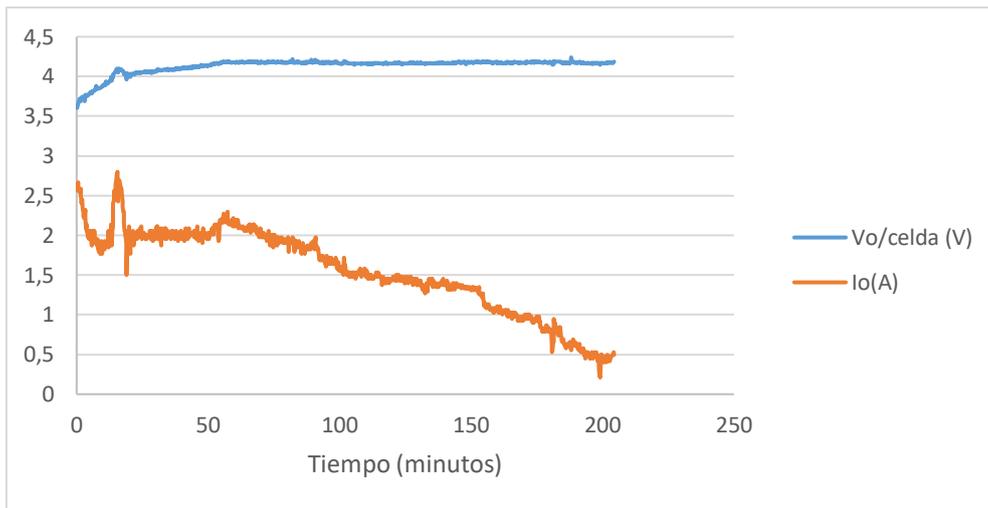


Figura 36. Gráfico de proceso de carga de batería de ion litio de 24V con módulo fotovoltaico.

Del gráfico de la figura 36, se aprecian las 2 etapas mencionadas, la primera etapa de corriente constante, donde se notan en unos intervalos de tiempo donde la corriente aumentó de forma abrupta, esto debido a que en ese momento se despejó aún más la línea de visión entre el sol y el módulo fotovoltaico, por lo que aumentó de manera significativa el nivel de irradiancia recibido, a lo que el sistema reacciona de manera que la corriente de salida regrese al intervalo deseado. La duración de la primera etapa fue de aproximadamente 75 minutos.

En la segunda etapa, el sistema estabilizó la tensión de tope en un promedio de 4.17V/celda, equivalente a 29.19V en total, esta etapa tuvo un tiempo aproximado de 130 minutos.

La figura 37 corresponde al gráfico de tensión, corriente y potencia entregada por el módulo fotovoltaico durante el proceso de carga.

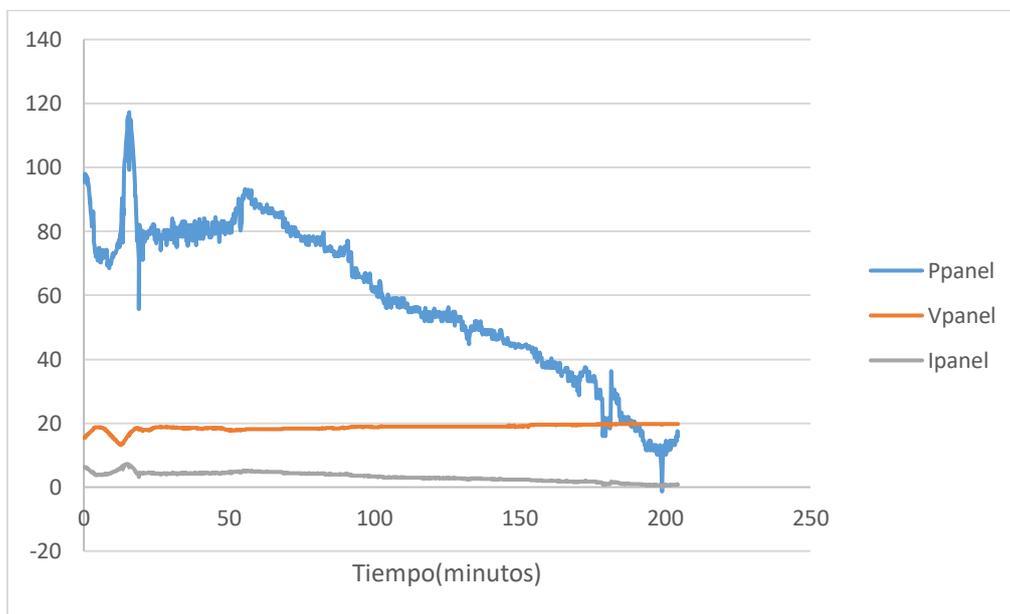


Figura 37. Gráfico de tensión, corriente y potencia entregada por el módulo fotovoltaico al sistema de carga de la batería de ion litio de 24V.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se logró implementar un sistema de control y monitorización de corriente de carga para la batería de ácido plomo con un porcentaje de error máximo de 3 % y un porcentaje de error promedio de 0.5 %.
- Se realizó un sistema de control y monitorización de corriente de carga para la batería de ion litio con un porcentaje de error máximo de 4.5 % y un porcentaje de error promedio de 0.5 %.
- Se puso en funcionamiento un sistema de control y monitorización de la tensión de saturación de carga para la batería de ácido plomo con un porcentaje de error máximo de 2.81 % y un porcentaje de error promedio de 0.83 %.
- Se desarrolló un sistema de control y monitorización de la tensión de saturación de carga para la batería de ion litio con un porcentaje de error máximo de 0.96 % y un porcentaje de error promedio de 0.65 %.
- Se implementó de manera exitosa el algoritmo MPPT de perturbar y observar, con un porcentaje de error de 4.29% con respecto a la caracterización del módulo fv realizada.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda agregar un módulo de conexión a internet al sistema, de manera que se puedan enviar mensajes a una red social para que el usuario reciba alertas importantes sobre su batería. También se puede agregar un módulo GSM, para recibir mensajería de texto directamente al celular, con un teclado matricial se podría digitar el número telefónico cuando el sistema lo pida, y que luego el mismo lo almacene y se comunique con el módulo gsm para que envíe mensajes de importancia.

6. Referencias

- [1] S. Morales, M. Hernández, C. Meza, (2013), “Estación fotovoltaica de recarga para vehículos eléctricos livianos”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, VIE: 5401-1801-0801, 2013.
- [2] W. Jordán “Energía fotovoltaica se enciende”, [online], La Prensa, Panamá, Febrero del 2015, disponible en: http://www.prensa.com/economia/Energia-fotovoltaica-enciende_0_4147085372.html
- [3] “¿Qué es SESLab?” [online] Disponible en: <http://www.ie.tec.ac.cr/seslab/>
- [4] C. Meza. “SESLab promueve e investiga en energías renovables”, Investiga. TEC, vol.14, pp12-13, Mayo 2012.
- [5] S. Bührmann. “Bicycles as public-individual transport-european developments.” In *Meetbike Conference*, 2008.
- [6] Monsolar “¿Cómo funcionan los reguladores de carga solares PWM y MPPT?”, [online], Disponible en <http://www.monsolar.com/blog/como-funcionan-los-reguladores-de-carga-solares-pwm-y-mppt/>
- [7] EnerNaval. “Reguladores de carga solar”, [online], Disponible en <http://www.enersolar.es/PDF/Solar/Comparativa%20reguladores%20EnerNaval.pdf>
- [8] Battery University. “When was the battery invented?”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/when_was_the_battery_invented
- [9] Battery University. “Battery definitions and what they mean”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions
- [10] Battery University. “What is C-rate?”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate
- [11] Battery University. “Advantages of primary batteries”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries
- [12] Battery University. “Comparison table of secondary batteries”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- [13] Battery University. “How does the lead acid battery work?”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [14] Battery University. “How does lithium battery work?”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries
- [15] Battery University. “Charging lead acid”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery
- [16] Battery University. “Charging lithium-ion”, [online], disponible en http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
- [17] M. Grätzel. “Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy.” *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2007.
- [18] H.Sánchez. “El Recurso Solar”. Programa de Especialización en Sistemas Fotovoltaicos. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016.

- [19] H.Sánchez. “*Tecnología Fotovoltaica*”. Programa de Especialización en Sistemas Fotovoltaicos. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016.
- [20] Energías Renovables. “*Los efectos de la temperatura en la producción de instalaciones fotovoltaicas.*” [online], disponible en <http://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713>
- [21] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. “*Power Electronics Converters, Applications, and Design.*” John Wiley & Sons, 1995.
- [22] Wikipedia. “Buck Converter.” [online], disponible en https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter
- [23] Wikipedia. “Boost Converter.” [online], disponible en https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter
- [24] Texas Instruments. *Basic calculation of a boost converter’s power stage.*
- [25] A. Kwasinski. “*DC-DC boost converter*”. Power electronics course. University of Texas at Austin, 2014.
- [26] Texas Instruments, “*Schottky diode selection in Asynchronous boost converters*”.
- [27] Advanced Circuits, “*Trace width website calculator*”. [online], disponible en <http://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>
- [28] A.Dutta, N.Barua, A.Saha, “*Design of an arduino based maximum power point tracking(MPPT) solar charge controller*”, BRAC University, Dhaka 1212, Bangladesh, 2016.
- [29] A.Scheurer, E.Ago, J.Hidalgo, S.Kobosko, “*Photovoltaic MPPT charge controller*”, University of Central Florida, Orlando, FL, 2011.
- [30] A.Vega, J.Araya, L.Rojas, “*Implementación de un sistema basado en microcontroladores para el monitoreo de procesos en baterías recargables de ion-litio y ácido-plomo.*”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2015.
- [31] Ingelibre, “*Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica*”, [online], disponible en <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [32] E.Baethge, A.Berzoy, V.Guzmán, M.Giménez, “*Nuevo sistema de control para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles solares basado en el control predictivo de corriente de convertidores cc-cc.*”, Universidad, Ciencia y Tecnología, 15(60), 151-160. Recuperado en 04 de mayo de 2017, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212011000300005&lng=es&tlng=es

7. Anexos

7.1. Hojas de Fabricante

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



KYOCERA

KD 135 F Series

KD135CX-LFBS KD140CX-LFBS

CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with over 35 years in the solar energy industry, Kyocera demonstrates leadership in the development of solar energy products. Kyocera's Kaizen Philosophy, commitment to continuous improvement, is shown by repeatedly achieving world record cell efficiencies.

QUALITY BUILT IN

- UV stabilized, aesthetically pleasing black anodized frame
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation
- Proven junction box technology with 12 AWG PV wire to work with transformerless inverters
- Quality locking MC4 plug-in connectors to provide safe and quick connections

RELIABLE

- Proven superior field performance
- Tight power tolerance
- Only module manufacturer to pass rigorous long-term testing performed by TÜV Rheinland

QUALIFICATIONS AND CERTIFICATIONS

UL Listing
QICUL173074



Registered to ISO 9001-2000

NEC 2008 Compliant, UL 1703, ISO 9001, and ISO 14001
UL1703 Certified and Registered, UL Fire Safety Class C, CEC, PSEC
Certified IEC61215 Ed 2 IEC61730 by JET



We will!



SOLAR by KYOCERA

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1

Description

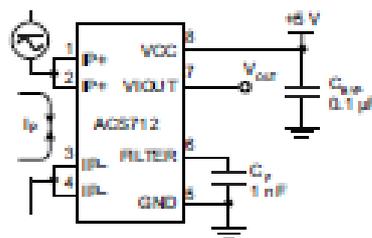
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($\Rightarrow V_{OUT} \propto I_p$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_p , within the range specified. C_p is recommended for noise management, with values that depend on the application.

ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Description (continued)

the device at up to 5x overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Packaging*	T _A (°C)	Optimized Range, I _p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	68

*Contact Allegro for additional packing options.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V _{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V _{RECC}		-0.1	V
Output Voltage	V _{OUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V _{REOUT}		-0.1	V
Output Current Source	I _{OUT(POS)}		3	mA
Output Current Sink	I _{OUT(NEG)}		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I _p	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T _A	Range E	-40 to 85	°C
Maximum Junction Temperature	T _{J(max)}		185	°C
Storage Temperature	T _{stg}		-65 to 170	°C

Isolation Characteristics

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Unit
Dielectric Strength Test Voltage*	V _{W0}	Agency type-tested for 60 seconds per UL standard 60950-1, 1st Edition	2100	VAC
Working Voltage for Basic Isolation	V _{W(B)}	For basic (single) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	354	VDC or V _{pk}
Working Voltage for Reinforced Isolation	V _{W(R)}	For reinforced (double) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	184	VDC or V _{pk}

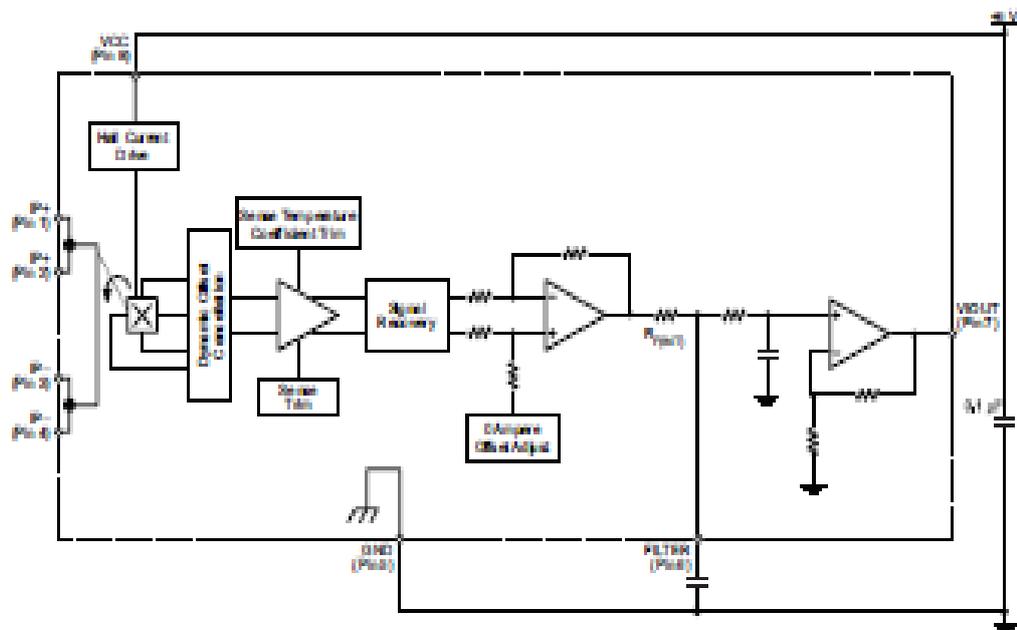
*Allegro does not conduct 60-second testing. It is done only during the UL certification process.

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001

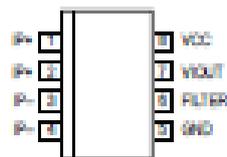
ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Functional Block Diagram



Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

ACS712

*Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC
with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS¹ over full range of T_A , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	VIOUT to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	VIOUT to GND	4.7	–	–	k Ω
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	1.2	–	m Ω
Rise Time	t_r	$I_p = I_p(\text{max})$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	–	3.5	–	μs
Frequency Bandwidth	f	–3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$; I_p is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_p	–	1.5	–	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_p	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_p = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	$V_{CC} \times 0.5$	–	V
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on leadframe	–	35	–	μs
Magnetic Coupling ²			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance ³	$R_{F(INT)}$			1.7		k Ω

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_p , and ambient, T_A , and internal leadframe temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$, is not exceeded.

²1G = 0.1 mT.

³ $R_{F(INT)}$ forms an RC circuit via the FILTER pin.

COMMON THERMAL CHARACTERISTICS¹

			Min.	Typ.	Max.	Units
Operating Internal Leadframe Temperature	T_A	E range	–40	–	85	$^\circ\text{C}$
					Value	Units
Junction-to-Lead Thermal Resistance ²	$R_{\theta JL}$	Mounted on the Allegro ASEK 712 evaluation board			5	$^\circ\text{C/W}$
Junction-to-Ambient Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Mounted on the Allegro 85-0322 evaluation board, includes the power consumed by the board			23	$^\circ\text{C/W}$

¹Additional thermal information is available on the Allegro website.

²The Allegro evaluation board has 1500 mm² of 2 oz. copper on each side, connected to pins 1 and 2, and to pins 3 and 4, with thermal vias connecting the layers. Performance values include the power consumed by the PCB. Further details on the board are available from the Frequently Asked Questions document on our website. Further information about board design and thermal performance also can be found in the Applications Information section of this datasheet.

ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_p		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_p , $T_A = 25^\circ\text{C}$	180	185	190	mV/A
Noise	$V_{\text{Noise(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT}(0)}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	-0.26	-	mV/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	0.054	-	mV/A/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.008	-	mV/A/°C
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_p = \pm 5\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_p , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_p , with $I_p = 5\text{ A}$. Output filtered.

x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_p		-20	-	20	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_p , $T_A = 25^\circ\text{C}$	96	100	104	mV/A
Noise	$V_{\text{Noise(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	11	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT}(0)}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	-0.34	-	mV/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.07	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	0.017	-	mV/A/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.004	-	mV/A/°C
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_p = \pm 20\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_p , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_p , with $I_p = 20\text{ A}$. Output filtered.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

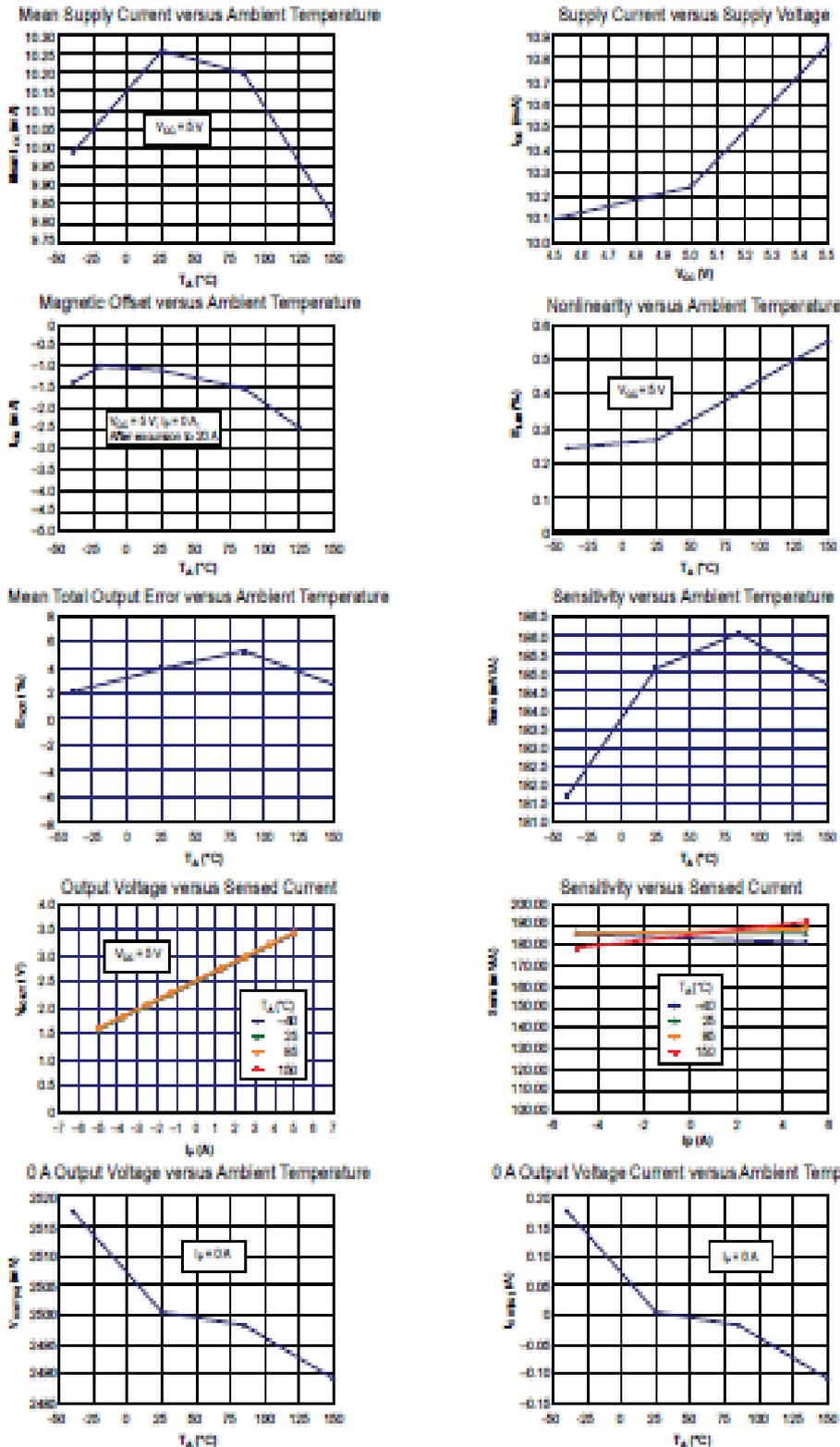
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_p		-30	-	30	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_p , $T_A = 25^\circ\text{C}$	63	66	69	mV/A
Noise	$V_{\text{Noise(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT}(0)}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	-0.35	-	mV/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	-	0.007	-	mV/A/°C
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	-	-0.002	-	mV/A/°C
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_p = \pm 30\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_p , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_p , with $I_p = 30\text{ A}$. Output filtered.

Characteristic Performance

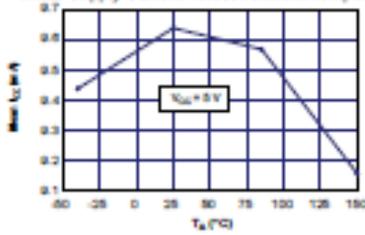
$I_p = 5A$, unless otherwise specified



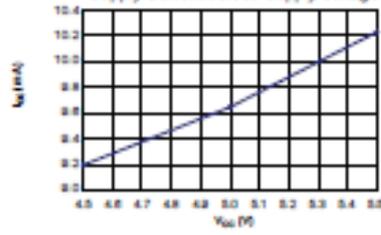
Characteristic Performance

$I_p = 20\text{ A}$, unless otherwise specified

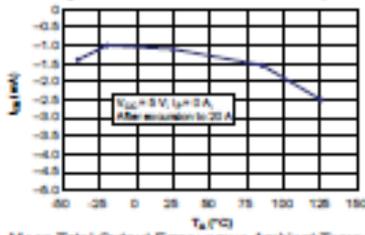
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



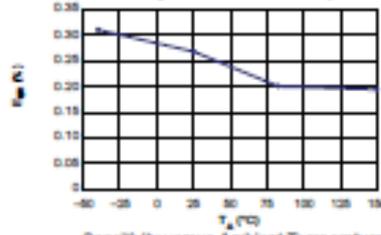
Supply Current versus Supply Voltage



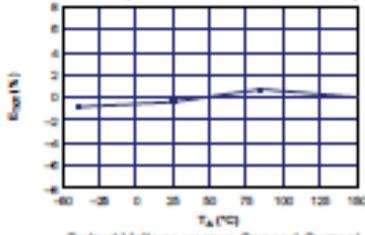
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



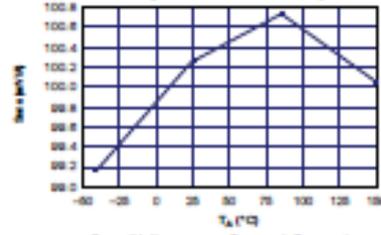
Nonlinearity versus Ambient Temperature



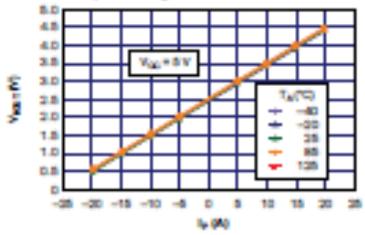
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



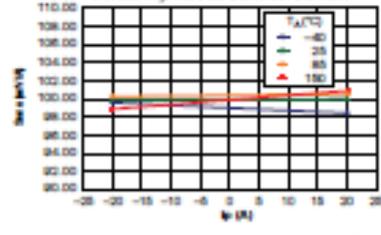
Sensitivity versus Ambient Temperature



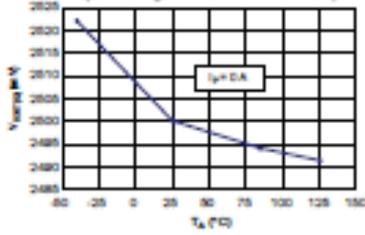
Output Voltage versus Sensed Current



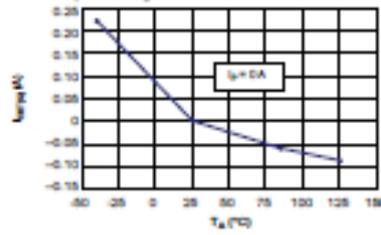
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature



ENERPOWER

only positive energy

Enerpower 24V Akku ZL07010-F

Allgemein

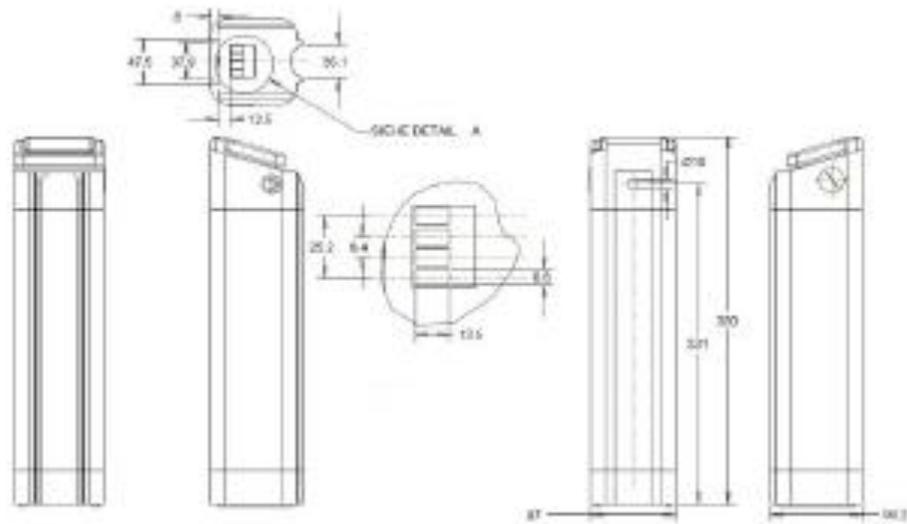
Der Akku 24V wird in ein Gehäuse der Fa. ZhenLong, Modell ZL07010-F gefertigt. Dieses Gehäuse findet man u.a. bei Marken wie Prophete und Alurex in Aldi, Praktiker, Hagebaumarkt, Obi und mehr. Enerpower Akkus werden in Berlin-Adlershof mit Markenzellen gefertigt (bspw. Samsung SDI, Panasonic, Sanyo, LG Chem).



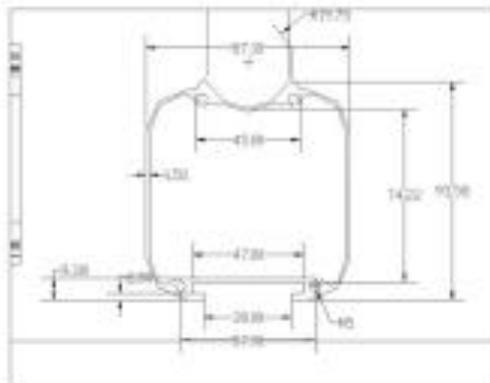
Modelle

Modell	Zelle	Kapazität
SF24V10Ah	Samsung ICR18650-26J	10,4 Ah
SF24V11,6Ah	Samsung INR18650-29E	11,6 Ah
SF24V11,6Ah	Sony US18650NC1	11,6Ah
SF24V13Ah	Samsung ICR18650-26J	13Ah
SF24V14,5Ah	Samsung INR18650-29E	14,5Ah
SF24V16,75Ah	Sanyo NCR18650BL	16,75Ah
SF24V17Ah	Panasonic NCR18650B	17Ah
SF24V17,25Ah	Samsung INR18650-35E	17,25Ah

Dimensionen



Boden



Technische Daten

- Li-Ion-Zelle: 18650 zylindrische Zelle
- Spannung (nominal): 24V (25,9V)
- Kapazität: 10,40Ah – 17,25Ah
- Energie: 250Wh – 414Wh
- Konfiguration: 7S4P / 7S5P
- Interner Widerstand: < 75 mOhm
- Ladespannung: 29.4V
- Dauerentladestrom: 18A
- 10 Min. Entladestrom: 20A
- 5 Sekunden Entladestrom: 35A

Sicherheit

- Temperaturüberwachung
 - Laden: 0-40 Grad Celsius
 - Entladen: 0-65 Grad Celsius
- Schutz gegen Überladung: 29,75V
- Schutz gegen Tiefentladung: 17,50V
- Integriertes Zellen-Balancer

Kontakt Daten

ENERdan GmbH
Zentrum für Mikrosysteme und Materialien
Max-Planck-Str. 3
12489 Berlin

Telefon: +49 - (0)30 - 6392-80400

Fax: +49 - (0)30 - 6392-80402

E-Mail: sales [at] enerdan.de

www.enerpower.de

**Power MOSFET**

PRODUCT SUMMARY	
V_{DS} (V)	100
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$ 0.077
Q_g (Max.) (nC)	72
Q_{gs} (nC)	11
Q_{gd} (nC)	32
Configuration	Single

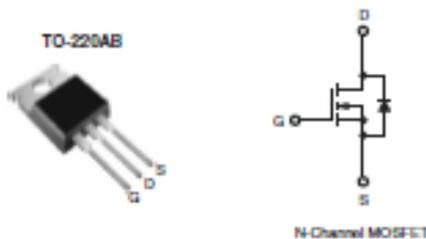
FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

RoHS
COMPLIANT**DESCRIPTION**

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF540PbF SiHF540-ES
SnPb	IRF540 SiHF540

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	V_{DS}	100	V
Gate-Source Voltage	V_{GS}	+20	V
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	28
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	20
Pulsed Drain Current ^a	I_{DM}	110	A
Linear Derating Factor		1.0	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	230	mJ
Repetitive Avalanche Current ^c	I_{AR}	28	A
Repetitive Avalanche Energy ^c	E_{AR}	15	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_D	150
Peak Diode Recovery dV/dt ^d		dV/dt	5.5
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +175	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10
			1.1

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = 25\text{ V}$, starting $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 440\text{ }\mu\text{H}$, $R_{\theta JC} = 25\text{ }^\circ\text{C/W}$, $I_{AS} = 28\text{ A}$ (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 28\text{ A}$, $dI/dt \leq 170\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DS} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 175\text{ }^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91021
S11-0610-Rev. B, 21-Mar-11

www.vishay.com
1

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc291000

IRF540, SIHF540

Vishay Siliconix

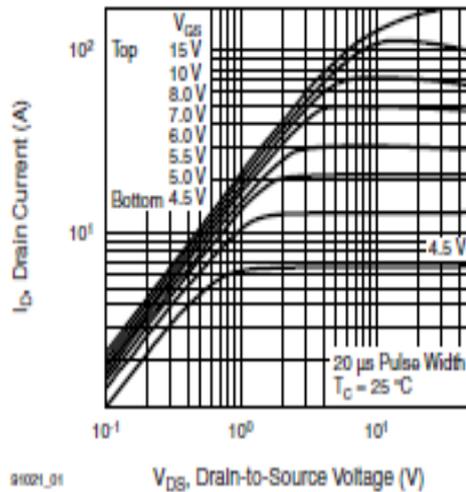


THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	1.0	

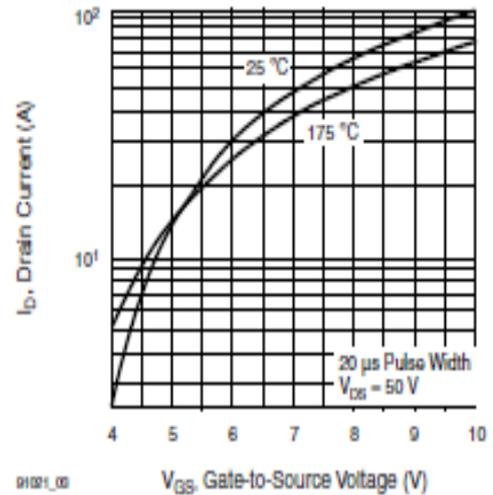
SPECIFICATIONS ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)							
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	
Static							
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	100	-	-	V	
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ mA}$	-	0.13	-	V/°C	
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V	
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA	
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{GS} = 100\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA	
		$V_{GS} = 80\text{ V}, V_{DS} = 0\text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250		
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	-	-	0.077	Ω	
Forward Transconductance	g_m	$V_{GS} = 50\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	8.7	-	-	S	
Dynamic							
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V},$ $V_{DS} = 25\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz, see fig. 5}$	-	1700	-	pF	
Output Capacitance	C_{oss}		-	560	-		
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	120	-		
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}$	$I_D = 17\text{ A}, V_{DS} = 80\text{ V},$ see fig. 6 and 13 ^a	-	-	72	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}			-	-	11	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}			-	-	32	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{GS} = 50\text{ V}, I_D = 17\text{ A},$ $R_g = 0.1\ \Omega, R_D = 2.0\ \Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	11	-	ns	
Rise Time	t_r		-	44	-		
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	53	-		
Fall Time	t_f		-	43	-		
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	4.5	-	nH	
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-		
Drain-Source Body Diode Characteristics							
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode	-	-	28	A	
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	110		
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 28\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	2.5	V	
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 17\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	180	360	ns	
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	1.3	2.8		μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)					

Notes

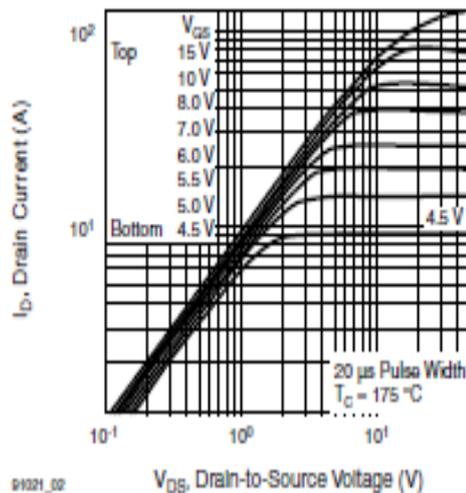
- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11)
- b. Pulse width $\leq 300\ \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)


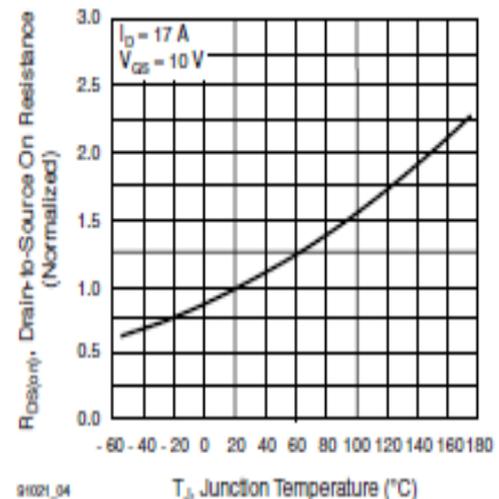
91021_01

Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$


91021_03

Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics


91021_02



91021_04

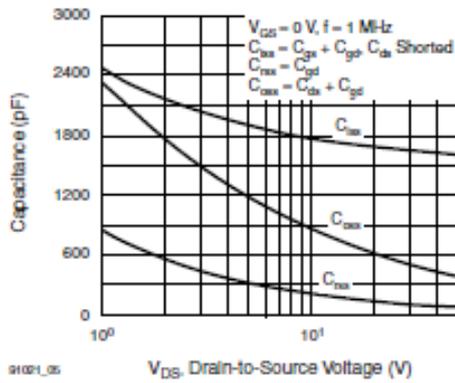


Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage

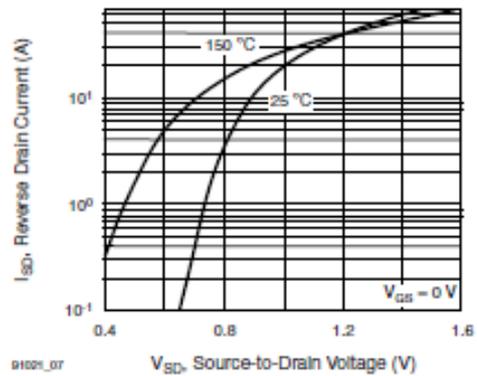


Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

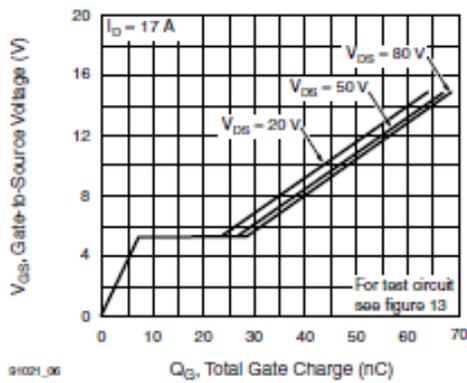


Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage

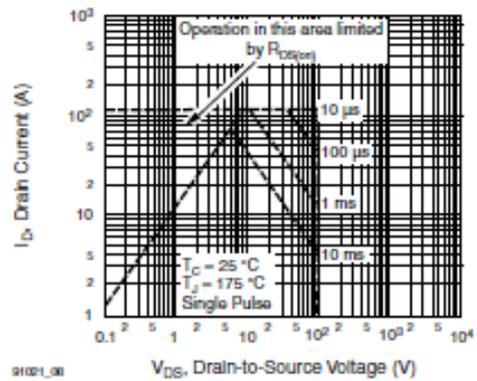


Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

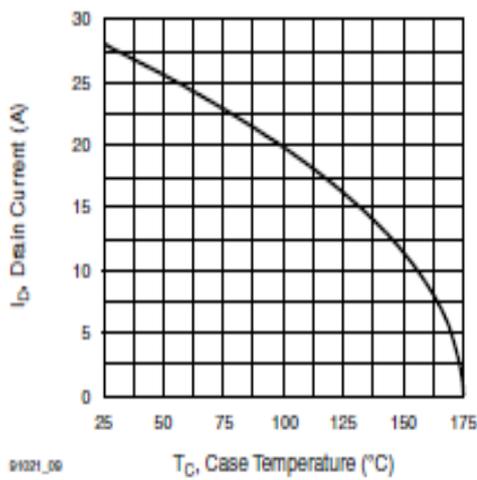


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

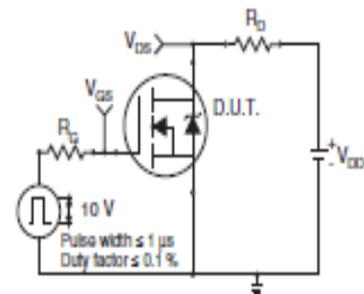


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

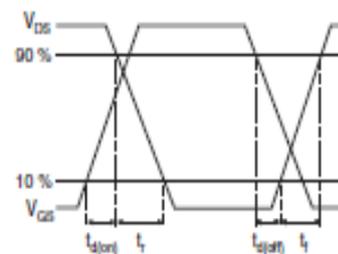
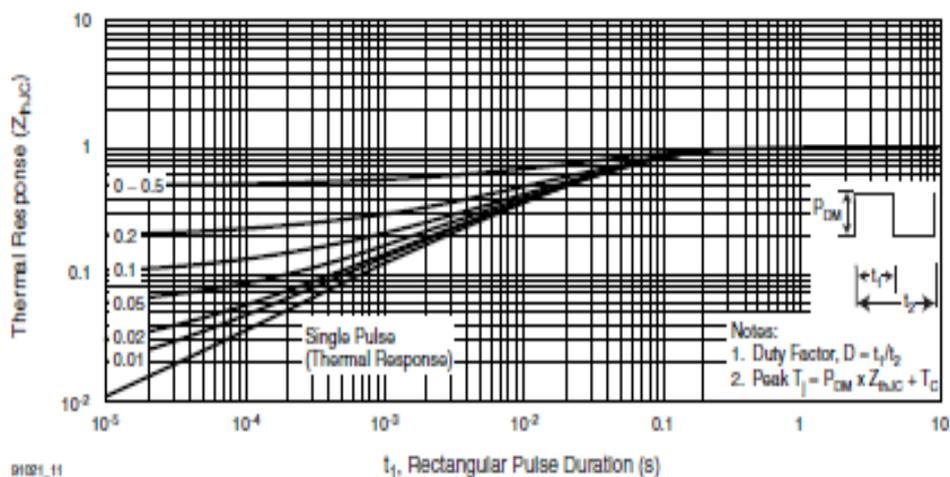
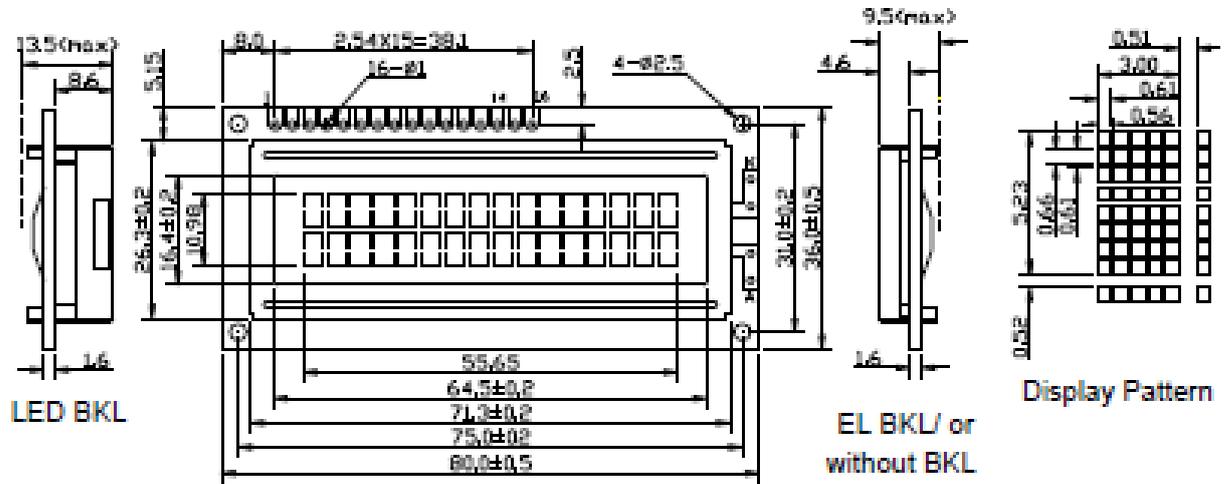


Fig. 10b - Switching Time Waveforms



91021_11

t_1 , Rectangular Pulse Duration (s)



Feature

1. 6X8 dots with cursor
2. Built-in controller (KS0066U or Equivalent)
3. +5V power supply(Also available for +3.0V)
4. 1/16 duty
5. BKL to be driven by pin1,pin2,or pin15,pin16,or A,K
6. N.V.optional

PIN NO	Symbol	Fuction
1	VSS	GND
2	VDD	+5V
3	VO	Contrast adjustment
4	RS	H/L Register select signal
5	R/W	H/L Read/Write signal
6	E	H/L Enable signal
7	DB0	H/L Data bus line
8	DB1	H/L Data bus line
9	DB2	H/L Data bus line
10	DB3	H/L Data bus line
11	DB4	H/L Data bus line
12	DB5	H/L Data bus line
13	DB6	H/L Data bus line
14	DB7	H/L Data bus line
15	A	+4.2V for LED
16	K	Power supply for BKL(0V)

Mechanical Data

Item	Standard	Unit
Module dimension	80.0x38.0	mm
Viewing area	64.5x16.4	mm
Dot size	0.56x0.61	mm
Character size	3.00x5.23	mm

Absolute Maximum Rating

Item	Symbol	Standard			Unit
		Min	Typ	Max	
Power supply	VDD-VSS	-0.3	-----	5.5	V
Input voltage	VI	-0.3	-----	VDD	V

Electronical characteristics

Item	Symbol	Condition	Standard			Unit
			Min	Typ	Max	
Input voltage	VDD	+5V	4.7	5.0	5.5	V
		+3.3V	2.7	3.0	3.3	V
Supply current	I _{cc}	VDD=5V	-----	1.5	4	mA
Recommended LCD driving voltage for normal temp version module	VDD-Vo	-20°C	-----	-----	-----	V
		0 °C	4.7	5.0	5.5	
		25°C	4.3	4.5	4.7	
		50°C	4.1	4.3	4.5	
		70°C	-----	-----	-----	
LED forward voltage	VF	25°C	-----	4.2	4.8	V
LED forward current	IF	25°C	-----	120	160	mA
EL power supply current	I _{EL}	V _o =110V AC 60Hz	-----	-----	-----	mA

Display character address code:

Display position

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DDRAM address	00	01	02	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0FH
EDRAM address	40	41	42	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4FH



SR502 THRU SR510

5.0 AMPS. Schottky Barrier Rectifiers

	Voltage Range 20 to 100 Volts Current 5.0 Amperes DO-201AD
<p>Features</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Low forward voltage drop ◆ High current capability ◆ High reliability ◆ High surge current capability <p>Mechanical Data</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Cases: DO-201AD molded plastic ◆ Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant ◆ Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed ◆ Polarity: Color band denotes cathode end ◆ High temperature soldering guaranteed: 250°C/10 seconds/.375"(.95mm) lead lengths at 5 lbs., (2.3kg) tension ◆ Weight: 1.1 grams 	<p style="text-align: center;">Dimensions in inches and (millimeters)</p>

Maximum Ratings and Electrical Characteristics
 Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.
 Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
 For capacitive load, derate current by 20%

Type Number	SR 502	SR 503	SR 504	SR 505	SR 506	SR 509	SR 510	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	20	30	40	50	60	90	100	V
Maximum RMS Voltage	14	21	28	35	42	63	70	V
Maximum DC Blocking Voltage	20	30	40	50	60	90	100	V
Maximum Average Forward Rectified Current See Fig. 1	5.0							A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	150					200		A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @5.0A	0.55		0.70			0.8		V
Maximum D.C. Reverse Current @ T _a =25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T _a =100°C	0.5 50					0.2 10		mA mA
Typical Thermal Resistance (Note 1) R _{θJA}	15			10				°C/W
Typical Junction Capacitance (Note 2)	500			380		112		pF
Operating Junction Temperature Range T _J	-85 to +125			-85 to +150				°C
Storage Temperature Range T _{STG}	-85 to +150							°C

Notes: 1. Thermal Resistance from Junction to Ambient Vertical P.C. Board Mounting, 0.375"(9.5mm) Lead Length
 2. Measured at 1 MHz and Applied Reverse Voltage of 4.0V D.C.

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES (SR502 THRU SR510)

FIG.1- MAXIMUM FORWARD CURRENT DERATING CURVE

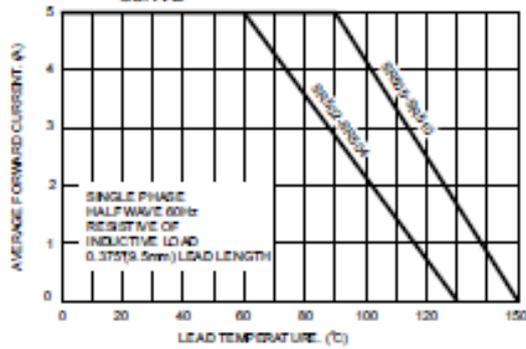


FIG.2- MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

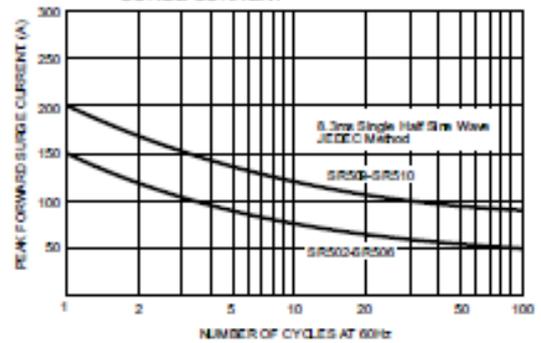


FIG.3- TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

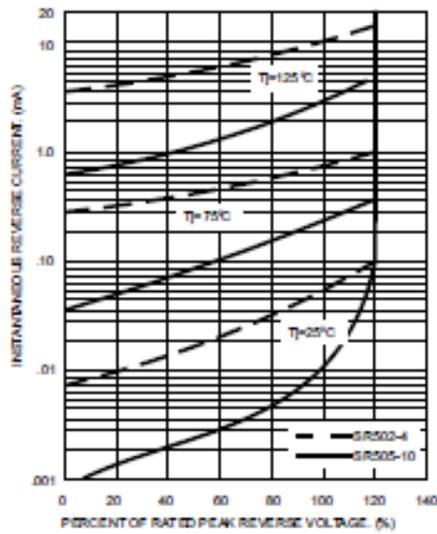


FIG.4- TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS

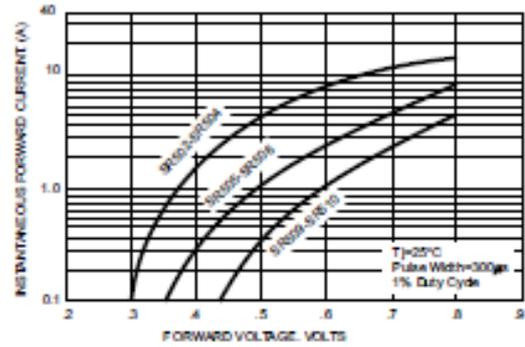


FIG.5- TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE

