

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera De Electricidad

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERÍAS CON ALGORITMO
MPPT Y CONVERTIDOR BUCK PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de grado de Ingeniero en Electricidad

Autor:

Anthony Javier Calderón Hurtado

Director:

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

Ibarra – Ecuador

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE

1. Identificación de la Obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1725276636		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Calderón Hurtado Anthony Javier		
DIRECCIÓN:	Pimampiro/Imbabura		
EMAIL:	ajacalderonh@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	06-2937-601	TELÉFONO MÓVIL:	0967445858


DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERIAS CON ALGORITMO MPPT Y CONVERTIDOR BUCK PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.
AUTOR (ES):	Calderón Hurtado Anthony Javier
FECHA: DD/MM/AAAA	01/12/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

2. Constancia

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor a terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 5 días del mes de diciembre de 2022

EL AUTOR:



Calderón Hurtado Anthony Javier.

Cédula:1725276636.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Gerardo Collaguazo en calidad del tutor del señor estudiante Calderón Hurtado Anthony Javier certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERÍAS CON ALGORITMO MPPT Y CONVERTIDOR BUCK PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO"**.

Para obtención del título de Ingeniero en Electricidad, aprobado la defensa, impresión y empastado.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Gerardo Collaguazo", is written over a horizontal line.

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa en especial a mis padres y mi hermana, a quien indudablemente dedico y comparto este trabajo de grado, porque han sido un pilar y una base fundamental para cada uno de mis logros, ya que gracias a su ejemplo, esfuerzo y dedicación diaria estuvieron pendientes de mi salud, educación, bienestar y encaminarme por el camino del bien.

A mis padres que me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades que presenta la realidad e la vida.

También quiero dedicar este trabajo a mi hermana Angie, por siempre estar presente, por siempre creer en mí, por su enorme apoyo tanto emocional como moral, siendo así mi mayor inspiración para continuar y superarme en el día a día de mi vida universitaria.

Agradecimientos

Todo el trabajo realizado fue posible gracias al apoyo incondicional de mi Familia, especialmente a mis padres, que estuvieron a mi lado en los momentos difíciles, quien me otorgaron todo el apoyo que necesite.

Gracias, también a mi hermana, una vez más, por haber sido siempre mi mayor motivación en cada etapa de mi vida.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. Este trabajo es el resultado de un sinfín de acontecimientos que poco se forjaron y convirtiéndose en un reto para poder cumplirlo.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
Introducción.....	XV
Contextualización.....	XV
Planteamiento del problema.....	XVI
Justificación.....	XVII
Alcance.....	XVII
Objetivo General.....	XVIII
Objetivos Específicos.....	XVIII

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO	1
1.1 Energía Solar Fotovoltaica	1
1.2 Ventajas de energía solar fotovoltaica.....	2
1.2.1 Ventajas medioambientales	2
1.2.2 Ventajas económicas.....	2
1.3 La energía solar en Ecuador	3
1.4 Sistemas Fotovoltaicos.....	4
1.5 Módulo fotovoltaico	5
1.6 Regulador de carga.....	6
1.7 Batería	7
1.8 Convertidores de energía	8
1.8.1 Convertidores DC-DC	9
1.9 Sistema de seguimiento de punto máximo de potencia (MPPT).....	12
1.10 Algoritmos de seguimiento MPPT	14
1.10.1 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O).....	14
1.10.2 Algoritmo conductancia incremental (ICT)	17
1.10.3 Algoritmo mediante lógica difusa (LD)	18
1.10.4 Algoritmo mediante redes neuronales.....	19
1.11 Aplicaciones de algoritmos MPPT en cargadores de batería.	20

CAPITULO II

DISEÑO DEL CARGADOR DE BATERÍAS	22
2.1 Metodología	22
2.2 Parámetros del sistema.....	23
2.3 Descripción del sistema.....	23
2.4 Funcionamiento de un convertidor Buck.....	24
2.5 Dimensionamiento del Inductor	25
2.6 Análisis de pequeña señal.....	28
2.7 Análisis de Bode del sistema.....	30
2.8 Diseño de los lazos de control.....	31
2.8.1 Lazo de control de corriente.....	32
2.8.2 Lazo de control de voltaje.....	37
2.9 Algoritmo MPPT	40

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	43
3.1 Implementación del prototipo de un cargador de baterías	43
3.1.1 Subsistema generación de pulsos	43
3.1.2 Subsistema del convertidor Buck.....	46
3.2 Resultados experimentales	54
3.2.1 Tiempo muerto.....	55
3.2.2 Control de corriente	56
3.2.3 Control de voltaje.....	58
3.2.4 Algoritmo P&O	59
Conclusiones	61
Recomendaciones	62
Referencias	63
Anexos	70

Índice de Figuras

Fig. 1. Mapa de radiación Solar del Ecuador.	3
Fig. 2. Componentes de una instalación fotovoltaica autónoma.....	5
Fig. 3. Regulador de voltaje MPPT.	7
Fig. 4. Convertidor Buck.	10
Fig. 5. Convertidor boost.....	10
Fig. 6. Convertidor Buck-Boost.	11
Fig. 7. Convertidor SEPIC.....	11
Fig. 8. Curva I-V de un panel fotovoltaico.	12
Fig. 9. Curvas I-V y P-V. a) Diferente irradiación a 25°C, b) Diferente temperatura con una irradiancia de 100 [W]/m ²	13
Fig. 10. Estructura general de un sistema MPPT.....	14
Fig. 11. Comportamiento del algoritmo P&O.....	15
Fig. 12. Algoritmo P&O con respecto al voltaje de referencia.....	15
Fig. 13. Algoritmo P&O con respecto a la corriente de referencia.	16
Fig. 14. Curva del algoritmo conductancia incrementa.....	17
Fig. 15. Algoritmo ICT.....	18
Fig. 16. Etapas del algoritmo mediante LD.	19
Fig. 17. Etapas mediante redes neuronales.....	20
Fig. 18. Metodología.....	22
Fig. 19. Descripción general del sistema.....	23
Fig. 20. Estructura del convertidor Buck.....	24
Fig. 21. Circuito equivalente cuando S=1.....	24
Fig. 22. Circuito equivalente cuando S=0.....	25
Fig. 23. Señal PWM.....	25
Fig. 24. Duty cycle de una señal PWM.	26
Fig. 25. Voltaje y corriente de salida del inductor.....	26
Fig. 26. Modelo lineal de la planta.	30
Fig. 27. Diagrama de Bode del sistema.	31

Fig. 28. Diagrama general de los lazos de control.	31
Fig. 29. Magnitud de la planta y control PI.	32
Fig. 30. Diagrama de Bode de la planta con el lazo de control PI.	34
Fig. 31. Control de corriente.....	34
Fig. 32. Control PI en la planta real.....	35
Fig. 33. Control PI discreto.	35
Fig. 34. Control PI discreto.	36
Fig. 35. Cargador de batería y control PI de corriente.....	36
Fig. 36. Voltaje suministrado a la batería.	37
Fig. 37. Modelo de una batería de Litio.	37
Fig. 38. Control de voltaje.	38
Fig. 39. Diagrama de Bode de planta y controlador de voltaje.	38
Fig. 40. Control PI de voltaje.....	40
Fig. 41. Algoritmo MPPT.....	41
Fig. 42. Algoritmo MPPT del sistema.	42
Fig. 43. Diagrama de bloques de un cargador de baterías.....	44
Fig. 44. Subsistemas del bloque cargador de baterías.....	45
Fig. 45. Plataforma LAUNCHXL-F28379D.	43
Fig. 46. a) Circuito electrónico, b) Placa PCB.	48
Fig. 47. Ecuación lineal del sensor de voltaje de 20 [V].	50
Fig. 48. Ecuación lineal del sensor de 30 [V].	51
Fig. 49. a) Esquema 3D de sensor de voltaje, b) Sensor 12 [V], C) Sensor 36 [V].	51
Fig. 50. Sensor de corriente ACS712 20A.	52
Fig. 51. Ecuación lineal del sensor de corriente.....	52
Fig. 52. Implementación de filtro para lectura de voltaje.	53
Fig. 53. Inductor del convertidor Buck.....	54
Fig. 54. Diagrama de conexión electrónico.	54
Fig. 55. Prototipo de un cargador de baterías.	55

Fig. 56. Conmutación de los mosfet del convertidor Buck.....	56
Fig. 57. Comparación control de corriente real vs simulación 2.3 [A] a 3[A].	57
Fig. 58. Control de corriente simulación vs real 2.3 [A] a 1.6 [A].	57
Fig. 59. Promediado de la señal de voltaje.	58
Fig. 60. Promediado de la señal de corriente.....	58
Fig. 61. Control de voltaje del prototipo.....	59
Fig. 62. Corriente en el panel fotovoltaico.	60
Fig. 64. Esquemático del convertidor en Proteus.....	81
Fig. 65 Prototipo del Cargador de Batería.....	81
Fig.66. Control de corriente real 2.3 [A] a 3[A].	82
Fig.67. Control de corriente real 2.3 [A] a 1.6[A].	82
Fig.68. Funcionamiento algoritmo MPPT.	83
Fig.69. Artículo científico.....	839

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Características de los diferentes tipos de módulos fotovoltaicos.....	6
Tabla 1.2 Características de los diferentes tipos de módulos solares fotovoltaicos.....	8
Tabla 2.1 Parámetros generales del Sistema	27
Tabla 2.2 Parámetros del sistema	33
Tabla 2.3 Parámetros del sistema	39
Tabla 2.4 Variables Algoritmo P&O.....	41
Tabla 2.5 Valores obtenidos	42
Tabla 3.1 Principales características de la placa LAUNCHXL-F28379D	46
Tabla 3.2 Elementos del convertidor Buck.....	47
Tabla 3.3 Características del mosfet SPT30N10F7	47
Tabla 3.4 Elementos para sensor de voltaje	49
Tabla 3.5 Características del optoacoplador ACPL-790B	49
Tabla 3.6 Valores de entrada y salida del sensor de 12 [V]	50
Tabla 3.7 Valores de entrada y salida del sensor de 36 [V]	50
Tabla 3.8 Valores de entrada y salida del sensor de corriente.....	52
Tabla 3.9 Tiempos de conmutación del microcontrolador LAUNCHXL-F28379D.....	55

Resumen

Usar fuentes de energía renovable para la generación de energía eléctrica se ha convertido en una alternativa prioritaria a nivel mundial, ya que mediante el uso de este tipo de energía se combate el calentamiento global y se reduce la producción de gases contaminantes. Aprovechar la energía proveniente del sol a través de paneles fotovoltaicos es una solución eficiente a la problemática que aqueja el planeta tierra. Actualmente, se pueden encontrar innumerables aplicaciones que tienen como fuente de alimentación a la energía solar y una de ellas son los convertidores de energía.

En el presente trabajo se desarrolla un sistema que capta la energía solar mediante dos paneles solares de 18 [V] con una potencia de 50 [W], esta energía ingresa a un convertidor reductor (Buck) que carga una batería de plomo ácido de 12 [V] y 35 [Ah]. Inicialmente se plantean definiciones de conceptos básicos como: calidad de energía en el país, tipos de convertidores DC y algoritmos de control usados en este tipo de aplicaciones. Posteriormente se realiza el dimensionamiento de componentes electrónicos y diseño de los lazos de control que regirán sobre la placa de procesamiento LAUNCHXL-F28379D. La validación de los valores obtenidos mediante análisis matemático se realiza mediante simulación en el software de Matlab/Simulink.

El trabajo concluye mediante la implementación del prototipo en el laboratorio de la institución, en el cual se puede observar la integración de un algoritmo P&O para el seguimiento del punto máximo de potencia en los paneles solares, así como, dos controladores del tipo Proporcional-Integral encargados de suministrar el voltaje y la corriente ideal para cargar la batería de 12 [V]. Finalmente, se realiza una comparación entre los valores reales y de simulación con la finalidad de analizar el desempeño del cargador de baterías desarrollado.

Palabras claves: batería, convertidor Buck, algoritmo P&O, control PI, PWM.

Abstract

The use of renewable energy sources for electricity generation has become a priority alternative worldwide, since the use of this type of energy combats global warming and reduces the production of polluting gases. The use of the solar energy through photovoltaic panels is an efficient solution to the problems that affect the planet earth. Currently, countless applications can be found that have solar energy as a power source and one of them are energy converters.

In this work develops a system that captures solar energy through two 18 [V] solar panels with a power of 50 [W], this energy goes to a Buck converter that charges a 12 [V] and 35 [Ah] lead acid battery. Initially, definitions of basic concepts such as: power quality in the country, types of DC converters and control algorithms used in this type of applications are presented. Subsequently, the sizing of electronic components and the design of the control loops that will govern the LAUNCHXL-F28379D processing board are carried out. The validation of the values obtained by mathematical analysis is performed by simulation in Matlab/Simulink software.

The work concludes with the implementation of the prototype in the laboratory of the institution, in which it is possible to observe the integration of a P&O algorithm for tracking the maximum power point in the solar panels, as well as two Proportional-Integral controllers in charge of supplying the ideal voltage and current to charge the 12 [V] battery. Finally, a comparison between real and simulation values is made in order to analyze the performance of the developed battery charger.

Keywords: battery, Buck converter, P&O algorithm, PI control, PWM.

Introducción

Contextualización

El crecimiento de las sociedades modernas se produjo como resultado del colosal uso de la energía. La mayor parte de energía empleada es proceden de la combustión de fósiles, los cuales son recursos no renovables, que con el pasar del tiempo terminarían agotándose. Al mismo tiempo, el desmesurado uso de energía a partir de combustibles fósiles ha originado una serie de inconvenientes en el entorno social (J. Gonzalez, 2015). La necesidad de buscar soluciones o alternativas al venidero desabastecimiento de energías ya mencionadas ha llevado a las personas a la utilización de nuevas energías. Unas energías que son capaces de regenerarse de manera natural y que se la puede encontrar en inmensidades (energías renovables) (Guiza et al., 2019). Entre las fuentes renovables más conocidas se encuentran: Eólica, Geotérmica, Hidráulica, Térmica, Solar, Biomasa, Mareomotriz, Termo solar, entre otras (Creus, 2014).

De todas las energías renovables existentes, la energía Solar fotovoltaica es una de las opciones más convenientes para sustituir gran parte de la demanda energética global, ya que produce una sustentable matriz energética y no genera contaminación ambiental (Tobajas, 2018). Esta energía ha sido instalada en gran cantidad de países, donde según proyecciones realizadas acerca de la energía fotovoltaica para el año 2050, se pretende utilizar este recurso entre 18 y 31 % de la generación fotovoltaica universal (World Energy Council, 2016).

En el territorio ecuatoriano, es factible obtener energía a partir de sol, debido a que registra alta radiación solar. La cifra promedio total de radiación solar en Ecuador es aproximadamente de $4.575\text{Wh}/m^2/\text{día}$. Lo que lo hace idóneo para aprovechar energía fotovoltaica (CONELEC, 2008; Muñoz et al., 2018). Y más aún, en la actualidad, en donde gracias al auge de la tecnología aplicada a la generación y almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, permite suministrar energía eléctrica en zonas remotas, donde aún no es posible la conexión de los sistemas eléctricos tradicionales. Es por eso que la energía fotovoltaica cumple un papel fundamental en este innovador sistema de generación y almacenamiento de energía (Colmenar & Borge, 2016).

Sin embargo, existen una serie de limitaciones para la generación fotovoltaica, Una de ellas es producida por las condiciones climáticas (Temperatura) y la naturaleza aleatoria de la irradiancia. Esto conlleva a provocar gran cantidad fluctuaciones en el voltaje y la corriente de salida de los paneles solares. Es decir, variaciones en la potencia generada (Ali et al.,

2020). Según (Sukhatme & Nayak, 2008), los comportamientos del voltaje y la corriente, se producen por el conjunto de configuraciones (serie-paralelo) de celdas solares que contienen los paneles, ya que por un lado permiten que voltaje incremente, manteniendo el flujo de corriente constante.

Y por el otro lado conservando el voltaje constante, incrementando el flujo de corriente. Debido a esta relación no lineal entre el voltaje y la corriente de salida del panel fotovoltaico, se ha creado una serie de modelos o algoritmos que aprovechan el único punto en donde la potencia es máxima (Ali et al., 2020). Este punto es conocido como Maximum Power Point Tracking (MPPT); entre las técnicas más utilizadas para poder obtener la potencia máxima se encuentran, conductancia incremental y Perturbar y Observar (P&O) (Argüello, Pozo, & Gallardo, 2020). En efecto, los módulos fotovoltaicos requieren de manera inevitable mecanismos de rastreo del punto máximo de potencia, que se realizan mediante la utilización de convertidores DC-DC, para así aprovechar toda su eficacia en diferentes condiciones de operación (Ali et al., 2020).

La segunda limitación a tomarse en cuenta en estos sistemas de generación fotovoltaica, son los desbalances que se produce entre la generación y la demanda. Es decir, cuando la generación es mucho mayor a la demanda, no se está aprovechando toda la energía generada. Este problema se produce específicamente en zonas remotas para autoconsumo, ya que existen momentos durante el día donde existe una baja demanda por parte del consumidor (horas valle), y momentos donde la demanda crece (horas pico de consumo). Con el propósito de no desaprovechar la energía generada, surgieron los sistemas de almacenamiento de energía. El más empleado para almacenamiento de energía fotovoltaica son las Baterías, que mediante reacciones químicas de sus elementos tienen la capacidad de carga y descarga (Espejo, 2004).

Es de esta manera como la generación fotovoltaica Permite el desarrollo rural y proporciona el acceso a la electricidad en zonas remotas para autoconsumo. Esto conlleva a la mejora de la calidad de vida. Y gracias a los métodos de control se puede aprovechar al máximo su generación y la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos (Díaz, 2003).

Planteamiento del problema

El auge de la generación de energía mediante recursos renovables se ha producido básicamente por el aumento de demanda eléctrica a nivel global, y por el impacto ambiental que producen las energías procedentes de la combustión de fósiles. La energía solar

fotovoltaica en la actualidad es una de las que presenta mayor explotación. Esto se debe a que puede ser utilizada en sistemas eléctricos de baja potencia, específicamente para zonas aisladas o zonas remotas del sistema eléctrico tradicional. Sin embargo, los parámetros de los cuales depende la generación fotovoltaica son las condiciones climáticas (Temperatura) y la naturaleza aleatoria de la irradiancia. Debido a estos parámetros variables en el tiempo se producen una serie de limitaciones para la eficiencia eléctrica, tales como, fluctuaciones de voltaje y corriente de salida del panel solar (variaciones de potencia), desbalances entre la generación y la demanda (esto se produce en sistemas para autoconsumo). En este sentido los sistemas de generación fotovoltaica no pueden ser aprovechados al máximo. Es decir, no se está utilizando toda la capacidad de producción.

¿Cómo implementar un cargador de baterías, que permita extraer la mayor cantidad de potencia disponible de un sistema fotovoltaico?

Justificación

La generación y almacenamiento de energía a pequeña escala son sistemas innovadores que en la actualidad cumplen un papel fundamental, debido a que su aplicación se encuentra en puntos cercanos al consumidor, y permite suministrar energía eléctrica en zonas remotas. El desarrollo de este prototipo es de gran utilidad en sistemas de autoconsumo, donde las personas que habitan en zonas aisladas pueden almacenar energía en horas de baja demanda durante día, para luego poder utilizar la energía a cualquier hora que se desee (horas de alta demanda). Cabe recalcar, que con la implementación del cargador de batería se puede almacenar la máxima energía disponible que generan los sistemas fotovoltaicos en esos momentos. Es decir, se puede aprovechar de manera eficiente la generación y almacenamiento de energía fotovoltaica.

Alcance

Para el diseño del cargador de baterías, se utilizará una herramienta de simulación (Matlab-Simulink), en donde se realizará el algoritmo MPPT (perturbar y observar P&O) para conseguir el seguimiento del máximo punto de potencia, junto con dimensionamiento de elementos de un convertidor Buck (Inductores, capacitores). Cabe señalar que será un convertidor reductor de 12 [V].

Para la implementación del prototipo, se utilizará dos paneles solares fotovoltaicos conectados en serie, con una capacidad de 50 [W] y un voltaje nominal 18 [V], una batería de

plomo ácido de 12 [V] y 35 [Ah]. Los dos paneles fotovoltaicos a emplear se encuentran en las instalaciones de la carrera de Electricidad de la Universidad Técnica Del Norte, en donde se realizará la implementación y las pruebas de funcionamiento.

El análisis del cargador de baterías se desarrollará a través de la interpretación de gráficas que resulten de mediciones durante la operación del sistema. Cabe recalcar, que el prototipo constara con un manual de funcionamiento para que el usuario puede manejar de manera segura el cargador de baterías.

Objetivo General

Implementar un cargador de baterías con algoritmo MPPT y convertidor Buck para el almacenamiento de energía eléctrica generada de un sistema fotovoltaico.

Objetivos Específicos

- Describir el comportamiento, los algoritmos de extracción de energía y los convertidores más utilizados en los sistemas fotovoltaicos.
- Realizar el diseño del cargador de baterías para proporcionar la máxima potencia disponible del sistema fotovoltaico a la batería.
- Implementar el cargador de baterías.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, se presenta una breve descripción de los beneficios de usar energía proveniente de fuentes renovables, y la cantidad de radiación solar que poseen las diferentes provincias del país. Se hace una revisión de los elementos que forman un sistema fotovoltaico y se describen cada uno de sus elementos. Se analiza también la estructura de los convertidores DC-DC y los algoritmos de control utilizados para el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT) que se utilizan en sistemas fotovoltaicos. Finalmente, se presentan aplicaciones similares que hayan sido desarrolladas por otros investigadores en los últimos cinco años.

1.1 Energía solar fotovoltaica

El sol es conocido como la fuente principal de energía natural, ya que puede ser aprovechado tanto de manera directa (fotovoltaica), como de manera indirecta (generación de vientos, biomasa, solar térmica, geotérmica entre otras). Este tipo de energías son conocidas como renovables, inagotables y no contaminantes (Nuñez et al., 2018). Con el pasar del tiempo, el aprovechamiento de la energía solar a través de paneles fotovoltaicos ha sufrido avances tecnológicos importantes. Esta energía se obtiene a través del efecto fotoeléctrico donde se absorben partículas de luz provenientes del sol y se liberan electrones para generar la energía eléctrica a través de un fino semiconductor conocido como célula solar (Donnet et al., 2010).

La energía fotovoltaica ofrece una solución segura, limpia, robusta y eficiente, sin mencionar que los costos de producción son cada vez más competitivos. La energía fotovoltaica es fácil de introducir e implementar en todas partes del mundo, tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, como es el caso del estado ecuatoriano (Gómez Ramírez et al., 2017).

Este tipo de energía no genera ruido, ni contaminación por gases tóxicos. A nivel mundial se está optando por producir este tipo de energía en grandes, medianas y pequeñas empresas incluso para uso residencial. La utilización de este tipo de energía ayuda a minimizar costos energéticos y lo más importante brinda este servicio a lugares aislados que carecen de un suministro energético confiable. Su impacto de producción ha hecho que este tipo de energía haya incrementado prestigio a través de los años, por ejemplo: en el

alumbrado público, radares de velocidad, semáforos y varios sistemas que requieren baja potencia (The Infinite Power of Texas, 2021).

1.2 Ventajas de energía solar fotovoltaica

El uso de energía solar presenta varias ventajas y desventajas a continuación se detallan las más importantes.

1.2.1 Ventajas medioambientales

Según (EnergySage, 2021) ,entre las ventajas que brinda este tipo de energía a la conservación del ambiente se encuentran:

- Por ser del tipo de energía renovable, su estructura no genera ruido ni contaminación ambiental.
- No hay emisiones de dióxido de carbono o algún otro contaminante del aire.
- La inversión en energía solar ayuda a eliminar la dependencia de los combustibles fósiles.
- Ayuda con la reducción de gases de efecto invernadero, por tanto, combate de manera activa el calentamiento global y cambios climáticos.
- Al ser energía renovable, proveniente del sol, no existe sobre explotación de recursos naturales.
- Este tipo de energía produce pocos contaminantes del aire. Se elimina el óxido de nitrógeno, dióxido de sulfuro, y todos aquellos gases que causan daños pulmonares y a la salud en general.

1.2.2 Ventajas económicas

El aprovechamiento de la energía solar también produce ventajas económicas como lo detalla en su investigación (SUNRUN, 2019), entre las más importantes se encuentran:

- Reducción de costos en las planillas de energía eléctrica.
- Se puede vender la energía solar fotovoltaica a la empresa eléctrica.

El costo de instalación suele ser costoso en un inicio, sin embargo, el sistema tiene un tiempo de duración aproximado de 20 a 30 años, con un mínimo de mantenimiento.

- La industria de energía solar incrementa las plazas de empleo.
- Al ser una energía amigable con el medio ambiente se ahorra a nivel mundial aproximadamente 259 billones de dólares invertidos en el cambio climático.

1.3 La energía solar en Ecuador

El valor promedio aproximado de radiación solar varía desde $2.9 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ día a $6.3 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ día. Un valor por encima de la radiación que se produce en otros países tal es el caso de España que recibe una radiación de $1.4 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ día, en la parte peninsular. Sin embargo, por la gran diversidad de escenarios atmosféricos, topográficos y diferentes rangos de latitud que presenta el Ecuador, se producen diferentes rangos de radiación. Las provincias ubicadas en elevada altitud tienen niveles de radiación mayores. Las provincias de Pichincha, Imbabura, Loja y Galápagos tienen un alto potencial. El alto potencial de Pichincha e Imbabura ($4.5 - 5.7 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ día) son importantes ya que, una buena parte de la industria y población del país se asienta en estas regiones (Revelo Vaca et al., 2019). La figura 1 muestra el mapa de radiación solar anual en Ecuador.

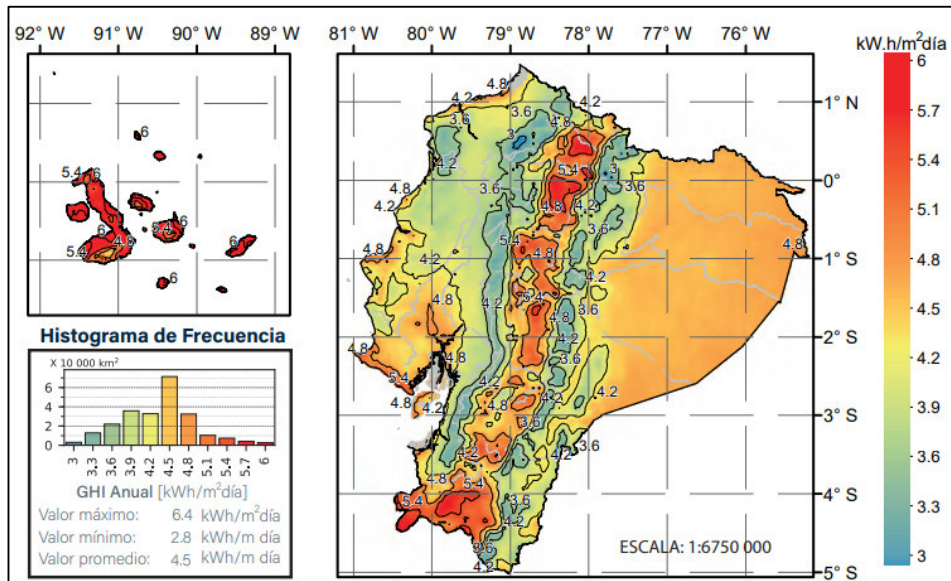


Fig. 1. Mapa de radiación Solar del Ecuador.
Fuente: (Revelo Vaca et al., 2019)

En Ecuador actualmente el 92% de la generación energética proviene de centrales hidráulicas, el 7% de térmicas y el 1% de fuentes no convencionales (fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás, geotermia, entre otras). Para aprovechar al máximo los recursos energéticos que brinda la naturaleza en este país es necesario la implementación y puesta en marcha de proyectos que incluyan a las energías renovables como fuentes de generación energética. La inversión en este campo permitiría generar empleo digno, promover el desarrollo social, incorporar nuevas tecnologías y dinamizar la economía (MERNNR, 2020).

1.4 Sistemas Fotovoltaicos

La palabra fotovoltaico proviene de “foto” que significa ligero y de “voltaico” que significa producción de electricidad, es decir producción de electricidad a través de la radiación solar. Los paneles fotovoltaicos (PV) por sus siglas en inglés, están formados por tecnologías que tiene por objetivo la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación es posible a través del efecto fotovoltaico que se produce mediante una célula solar (The Infinite Power of Texas, 2021).

Se conoce a un sistema fotovoltaico como el conjunto de elementos eléctricos, mecánicos y electrónicos que son capaces de captar y transformar la energía procedente del sol en energía eléctrica. Su principal componente son los paneles o módulos fotovoltaicos. Cabe recalcar, que la energía genera es corriente continua (DC), de tal manera que puede ser utilizada como tal o también puede ser transformada en corriente alterna (AC) mediante un inversor. Dependiendo de su función se clasifican en sistemas fotovoltaicos autónomos y sistemas conectados a la red (Alonso, 2018).

Sin embargo, la investigación de este proyecto se realizó el enfoque para los sistemas fotovoltaicos autónomos (sistemas para autoconsumo), donde se requiere de manera necesaria un sistema de almacenamiento (batería). Por otra parte, los sistemas fotovoltaicos están compuestos básicamente por: módulo fotovoltaico, regulador o controlador, batería, convertidores de energía y la demanda de carga (ver figura 2) (Días & Carmona, 2019).

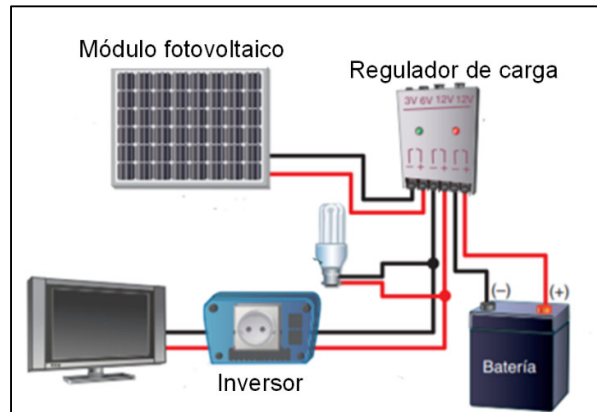


Fig. 2. Componentes de una instalación fotovoltaica autónoma.
Fuente: (Días & Carmona, 2019).

1.5 Módulo fotovoltaico

El conjunto de células solares conectadas eléctricamente entre sí formando una sola estructura se conoce como módulo solar fotovoltaico. Están diseñados para suministrar electricidad a un cierto voltaje siendo el más común el de 12 [V]. La corriente producida depende directamente del alcance que tenga la intensidad de luz en el módulo solar. Muchos módulos pueden ser conectados para formar una matriz fotovoltaica. Los módulos y matrices fotovoltaicas producen electricidad de corriente directa. Estos pueden ser conectados en serie y en arreglos eléctricos paralelos para producir cualquier requerimiento de voltaje y combinación de corriente (Ramos, 2017a).


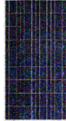

La mayoría de los módulos solares disponibles en el mercado son hechos de silicio cristalino. Los módulos constan de múltiples cadenas de células solares, cableadas en serie y montadas en un marco de aluminio. Cada célula solar es capaz de producir 0,5 [V]. Un módulo compuesto por 36 células solares es capaz de producir 18 [V]. Existe alrededor de 60 y 72 células solares en el marco de un módulo con más tamaño. Cuanto más grande sea la célula solar mayor será el amperaje (Franklin, 2018).

Los módulos monocristalinos están conformados de cristal de silicio con una estructura uniforme y no presenta demasiadas imperfecciones. Cuenta con un rendimiento del 15% y 18%, por lo tanto, es considerado como una tecnología costosa, pero apropiada para la implementación de diseños fotovoltaicos. Por otro lado, los módulos policristalinos poseen una estructura no uniforme y el promedio de su eficiencia se encuentra entre el 12% y 14%,

son usados generalmente en aplicaciones con bajo consumo de energía y debido a sus características tiene un costo menor con respecto a los monocristalinos (Franklin, 2018).

En la tabla 1.1 se puede observar las características principales de los diferentes tipos de módulos.

Tabla 1.1 Características de los diferentes tipos de módulos fotovoltaicos.

Células	Silicio	Rendimiento Laboratorio	Rendimiento Directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24%	15-18%	-Azules homogéneos -Conexión de las células individuales entre sí.	Silicio fundido y dopado con Boro.
	Policristalino	19-20%	12-14%	-Superficie estructurada en cristales. -Distintos tonos azules.	Silicio fundido y dopado con Boro. Disminuye el número de fases de cristalización
	Amorfo	16%	<10%	-Color homogéneo. -No hay conexión visible entre las células.	Lámina delgada sobre vidrio y plástico.

Fuente: (Franklin, 2018)(Domínguez, 2014).

El módulo monocristalino funciona con mayor eficiencia para climas fríos, o con niebla porque tienden a absorber mejor la radiación solar en bajas temperaturas y soportan menos el sobrecalentamiento, además optimiza la potencia de salida del sistema. Debido a estas características para el desarrollo de esta investigación se utiliza un módulo monocristalino.

1.6 Regulador de carga

Tienen como función principal proteger a las baterías del sobrecalentamiento alargando la vida útil del equipo. Los circuitos del regulador miden el voltaje de la batería y cuando la batería llega a su punto máximo el regulador se encarga de limitar la carga de batería (Solar Electric Supply, 2020).

Existen dos tipos de reguladores de carga: modulación de ancho de pulso y seguimiento del punto de máxima potencia (MATCH, 2021). Dependiendo del diseño que tenga el regulador podrá compensar los cambios en las pérdidas de voltaje en la variabilidad de carga o voltaje del suministro (Bright, 2008). A continuación, se muestra en la figura 3 un ejemplo de regulador de batería.



Fig. 3. Regulador de voltaje MPPT.
Fuente: (Solar Electric Supply, 2020).

1.7 Batería

Una batería es un elemento importante del sistema fotovoltaico porque almacena la energía que no es utilizada para evitar desperdicios. Como la energía almacenada no se consume de inmediato puede ser usada cuando existan días donde no hay mucha radiación solar, días nublados, lluviosos o en la noche. Incluir una batería al sistema fotovoltaico incrementa la eficiencia en el uso de la energía en un 80% (MATCH, 2021).

Según (Reforma et al., 2013) la batería cumple con cuatro funciones principales que ayuda a la optimización del sistema.

- Almacena la energía.
- Provee de energía cuando existe menor cantidad de radiación solar.
- Brinda una potencia alta instantánea.
- Asigna la tensión con la que se opera la instalación.

Existen varios tipos de baterías con diferentes características, en la tabla 1.2 se muestran los diferentes tipos existentes en el mercado con sus respectivas características.

Las baterías de plomo-ácido es un tipo de batería que se encuentra fácilmente en el mercado, reciben ese nombre porque están compuestas por electrolitos de ácido sulfúrico.

Son muy utilizadas para armar instalaciones fotovoltaicas solares aisladas y son las que se eligieron para la realización de este proyecto.

Tabla 1.2 Características de los diferentes tipos de módulos solares fotovoltaicos

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga	Auto descarga por mes	Nº de ciclos	Capacidad (por Tamaño) Wh/kg	Precio
Plomo- ácido	2	8-16 horas	< 5%	Medio	30-50	Bajo
Ni-Cd	1,2	1 hora	20%	Elevado	50-80	Medio
Ni-Mh	1,2	2-4 horas	20%	Medio	60-120	Medio
Li ion	3,6	2-4 horas	6%	Medio-bajo	110-160	Alto

Fuente: (Vergara, 2012).

1.8 Convertidores de energía

Los convertidores de energía son los encargados de transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía dependiendo de la tarea a realizar. Según (Siwakoti et al., 2018) los convertidores de energía se clasifican en:

- Convertidores / rectificadores AC-DC (rectificadores controlados). - La implementación de estos convertidores es simple y se la realiza mediante diodos y un filtro para obtener el nivel DC deseado.
- Convertidores AC-AC (controladores de voltaje AC). – Permiten la modificación de su amplitud y frecuencia de entrada generalmente son ocupados en sistemas de iluminación.
- Inversores / convertidores DC-AC (inversores). – Producen un voltaje AC a partir de voltaje DC, se aplican especialmente en aplicaciones industriales y fuentes de alimentación.
- Convertidores DC-DC (convertidores). – Son utilizados de manera frecuente para elevar o disminuir tensiones en DC, mediante las diferentes topologías.

1.8.1 Convertidores DC-DC

El principio de funcionamiento de los convertidores DC-DC, es a partir de una fuente de voltaje continuo (este puede ser fijo o variable), se busca conseguir un valor estable de voltaje a su salida. Este proceso se consigue con la aplicación de una serie de señales de control, los cuales actúan como conmutadores que convierten un determinado nivel de voltaje en otro distinto (Ramos, 2017b).

Según (V. Gonzalez & Alzate, 2010) señala que los convertidores DC-DC están compuestos por tres subsistemas.

- a) Conmutación: Encargado de dividir la señal que ingresa al convertidor según la frecuencia y duty cycle que se desea obtener.
- b) Acumulación de energía: Este bloque está directamente relacionado con la conmutación, debido a que es aquí donde determina en qué momento se entrega la energía hacia la carga.
- c) Filtrado: Este último bloque es encargado de reducir la cantidad de ruido y filtrar la señal.

Los convertidores de potencia tienen un gran campo de aplicaciones, las principales están encaminadas a fuentes de poder, sistemas de potencia para generación fotovoltaica, vehículos híbridos, entre otros. Es importante señalar que el voltaje de salida junto con la dirección del flujo de potencia pueden ser elevadores, reductores o reductor-elevador, esto depende de las condiciones de operación y su ciclo de trabajo (Siwakoti et al., 2018).

A continuación, se presentan los diferentes tipos de convertidores DC-DC.

- **Convertidor Buck**

También conocido como conversor reductor, tiene la capacidad de transformar un voltaje de entrada en un nivel de voltaje inferior. El convertidor Buck está conformado de un semiconductor de potencia (S), un diodo (D), un inductor (L1) y un capacitor (C1). En la figura 4 se ilustra el circuito equivalente de un convertidor Buck, donde V_e (voltaje de entrada) y V_o (Voltaje de salida) (Cuestas & Lebus, 2012).

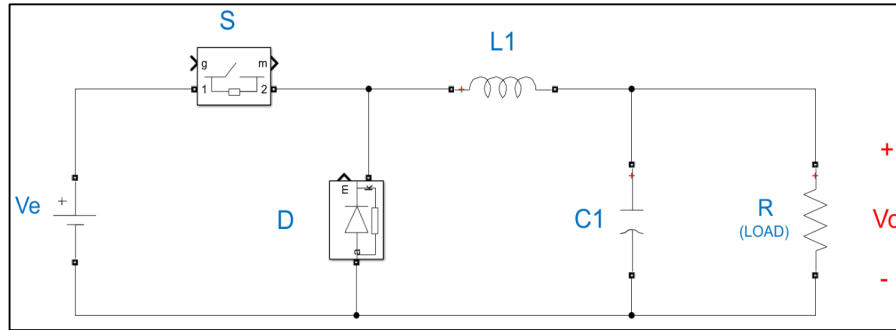


Fig. 4. Convertidor Buck.
Fuente: (Cuestas & Lebus, 2012).

Su funcionamiento se basa en dos estados, cuando el semiconductor de potencia está cerrado o abierto. Si el conmutador (S) permanece cerrado, el diodo (D) se encuentra inversamente polarizado haciendo que la corriente circule por la bobina (en este estado se transfiere la potencia de entrada a la salida). Mientras que, si el conmutador (S) permanece abierto, el diodo (D) actúa directamente polarizado y como consecuencia del almacenamiento de energía en la bobina (L1) se genera un flujo de corriente que pasa por el diodo y brinda cierta cantidad de energía a la carga (Ramos, 2017b).

- **Convertidor Boost**

También conocido como conversor elevador, como su nombre lo menciona este conversor eleva el voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada (ver figura 5). El ruido que genera a su salida es alto debido a los pulsos de corriente que proporciona el capacitor (C1). Este convertidor está conformado de un semiconductor de potencia (S), un diodo (D), un inductor (L1), un capacitor (C1), V_e (voltaje de entrada) y V_o (Voltaje de salida) (Cuestas & Lebus, 2012).

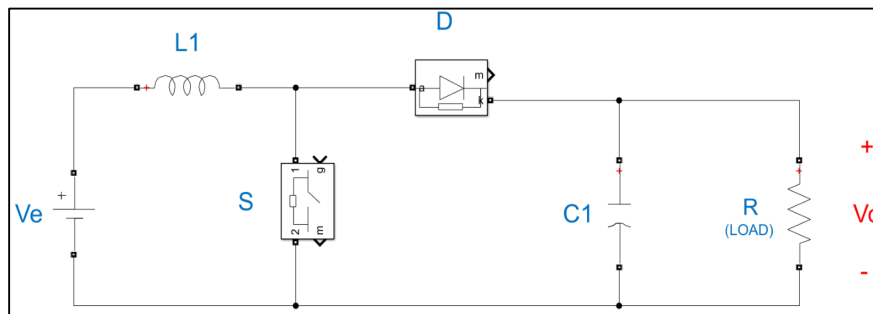


Fig. 5. Convertidor Boost.
Fuente: (Flores et al., 2014).

- **Convertidor Buck-Boost.**

Este convertidor es la combinación de los conversores ya mencionados, permite elevar y reducir el voltaje de salida. Además, tiene una polaridad inversa en el voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada. Este convertidor está compuesto de un semiconductor de potencia (S), un diodo (D), un inductor (L1) y un capacitor (C1) (F. Torres et al., 2019). En la figura 6 se representa el convertidor Buck-Boost con sus respectivos elementos. El resultado es la conexión en cascada del convertor Buck y el convertor Boost.

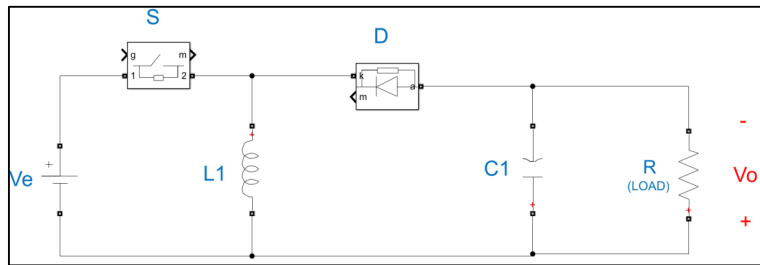


Fig. 6. Convertidor Buck-Boost.
Fuente: (F. Torres et al., 2019).

- **Convertidor Sepic**

Este convertor a diferencia del Buck-Boost conserva la misma polaridad de entrada con respecto a la salida, de igual manera tiene la capacidad de aumentar o disminuir el voltaje de salida. Este convertidor está conformado de un semiconductor de potencia (S), un diodo (D), dos inductores (L1, L2) dos capacitores (C1, C2) (Valle Rodríguez, 2014). El circuito equivalente del convertidor Sepic se puede ver en la figura 7.

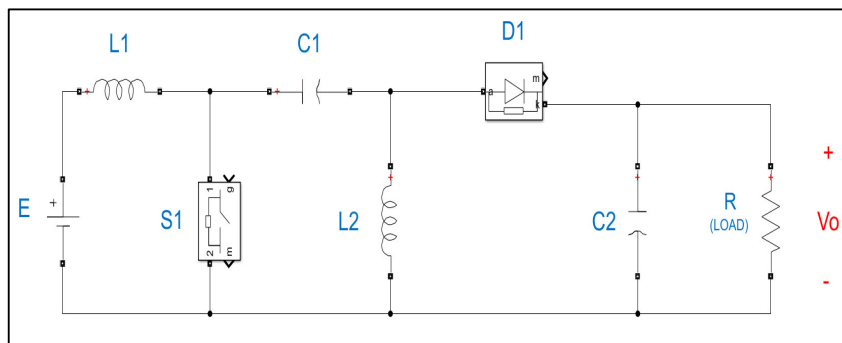


Fig. 7. Convertidor SEPIC.
Fuente: (Valle Rodríguez, 2014)

Para objetivos de esta investigación se hará uso del convertidor reductor Buck, esto se debe a que el voltaje de entrada proporcionado por los paneles fotovoltaicos es de 18 [V] y la batería a cargar es de 12 [V]

1.9 Sistema de seguimiento de punto máximo de potencia (MPPT)

Los paneles fotovoltaicos poseen curvas características que varían dependiendo de la radiación incidente y temperatura en el panel. Las curvas características son I-V y P-V, en donde I es la corriente, V es el voltaje y P la potencia producida. La radiación a lo largo del día no es constante, por tanto, las curvas tampoco lo son, provocando que el MPPT sea variable. Es por esta razón que para obtener un rendimiento óptimo del sistema se necesita realizar un sistema de seguimiento del punto máxima de potencia (Cuestas & Lebus, 2012).

Lo ideal de un sistema fotovoltaico es operar en este punto ya mencionado, logrando de esta manera transferir toda la potencia generada a la carga. Cabe recalcar que este valor se modifica continuamente, ya que este ligado directamente con las aleatorias variables como temperatura, radiación, etc. (Espinoza et al., 2013). La figura 8 presenta la curva característica I-V de los sistemas fotovoltaicos.

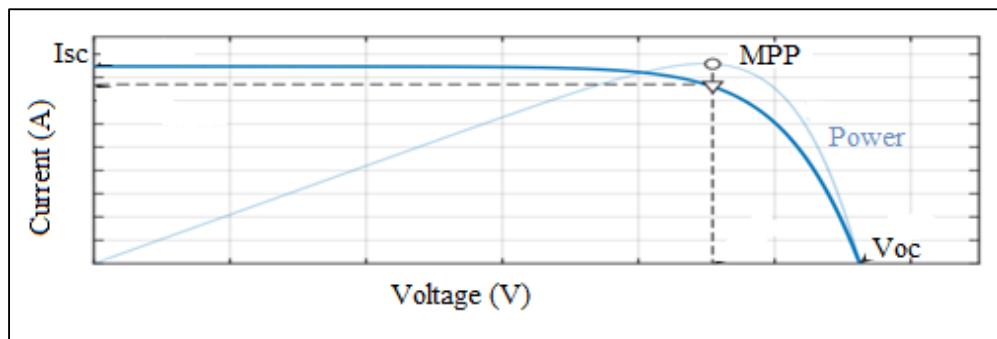


Fig. 8. Curva I-V de un panel fotovoltaico.
Fuente: (Zapata, 2018).

En la figura 8 se observa que cuando el voltaje disminuye la corriente es mayor. Es decir, cuando existe 0 [V] la corriente llega a su máximo valor, este punto es conocido como corriente de cortocircuito I_{sc} . Por otro lado, cuando la corriente disminuye el voltaje aumenta, por lo cual si la corriente es 0A se obtiene el voltaje de circuito abierto V_{oc} . Se puede concluir que existe una relación no lineal entre voltaje y corriente de un panel fotovoltaico (Argüello et al., 2020). El comportamiento de las curvas V-I o P-V depende también de otros factores

como la irradiancia y temperatura. En la figura 9 se observa las curvas características del panel fotovoltaico a diferentes temperaturas e irradiancia.

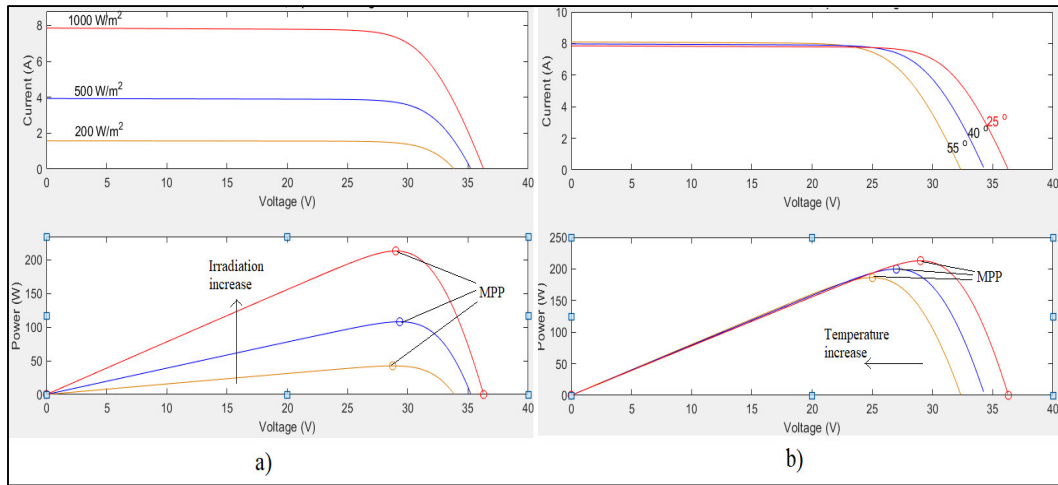


Fig. 9. Curvas I-V y P-V. a) Diferente irradiancia a 25°C, b) Diferente temperatura con una irradiancia de 100 [W]/m². Fuente: (Argüello et al., 2020).

En el primer caso se puede observar que la corriente es directamente proporcional a la cantidad de irradiancia captada, es decir, a más irradiancia más corriente. Además, se puede ver que el MPPT es mayor cuando la temperatura se incrementa. Por otro lado, al variar la temperatura el comportamiento del voltaje y el MPPT son inversamente proporcionales a la temperatura, es decir, a menor temperatura mayor voltaje y el MPPT será mayor también.

El sistema propuesto se compone de un convertor DC-DC conectado al panel fotovoltaico, mediante la lectura de sus valores de salida se ejecuta en un controlador el algoritmo de seguimiento MPPT. Este sistema genera una señal PWM con determinado ciclo de trabajo (δ) que será el encargado de encender o apagar los conmutadores del convertidor en determinados intervalos de tiempo y con la finalidad de obtener el voltaje de salida deseado (Torres et al, 2017).

La figura 10 muestra de forma general como actúa el algoritmo MPPT en un sistema fotovoltaico conectado a convertidor DC-DC.

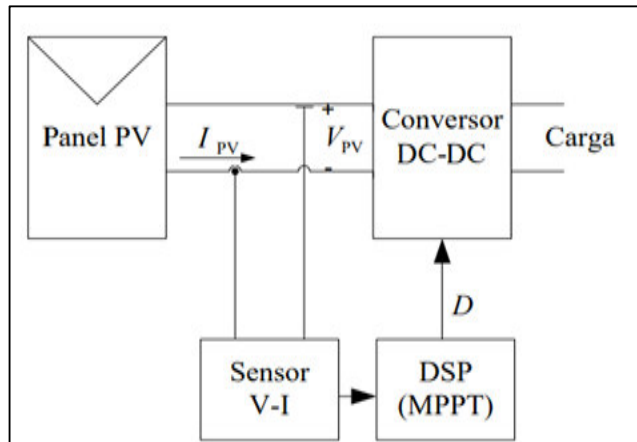


Fig. 10. Estructura general de un sistema MPPT.
Fuente: (Torres et al, 2017).

1.10 Algoritmos de seguimiento MPPT

Trabajar en el MPPT en los paneles fotovoltaicos permite obtener la mayor eficiencia que los mismo producen. Es importante desarrollar un algoritmo de control que independientemente de las condiciones de temperatura, irradiación o carga opere en este punto. Existen varias técnicas para la realización de estos algoritmos que se diferencian por su funcionamiento, velocidad de convergencia, complejidad, implementación y variables utilizadas (Enrique, 2011).

Entre los algoritmos MPPT más utilizados se encuentran:

- Algoritmo perturbar y observar (P&O).
- Algoritmo conductancia incremental.
- Algoritmo mediante control difuso.
- Algoritmo mediante redes neuronales (RN).

1.10.1 Algoritmo perturbar y observar (P&O)

El funcionamiento básico de este algoritmo MPPT se basa en medir los valores de voltaje y corriente del módulo fotovoltaico, dando como resultado la potencia producida a cada instante. El valor de potencia calculado se compara luego con el valor de potencia calculado previamente. De esta manera, se toma una decisión aplicando un aumento o disminución del voltaje para poder alcanzar el MPP (punto

máximo de potencia). Una vez que se logra alcanzar este punto, el algoritmo P&O permitirá que el punto de máxima potencia fluctúe en sus proximidades como se indica en la figura 11 (G. Y. Aguirre et al., 2014).

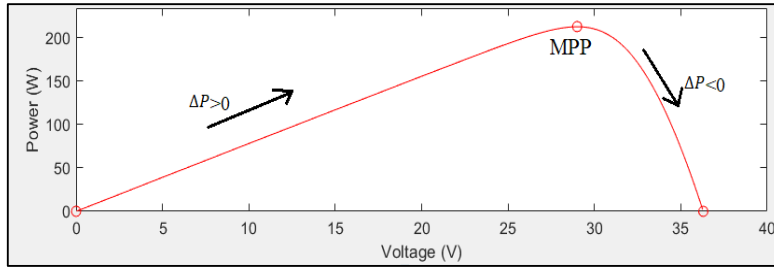


Fig. 11. Comportamiento del algoritmo P&O.
Fuente: (G. Y. Aguirre et al., 2014).

Si la variación de la potencia es menor a cero entonces el valor se encuentra a la derecha del MPP, mientras que, si el valor de la variación de potencia es mayor a cero se encuentra a la izquierda del MPP. El algoritmo P&O está representado mediante un diagrama de flujo que se describe en la figura 12.

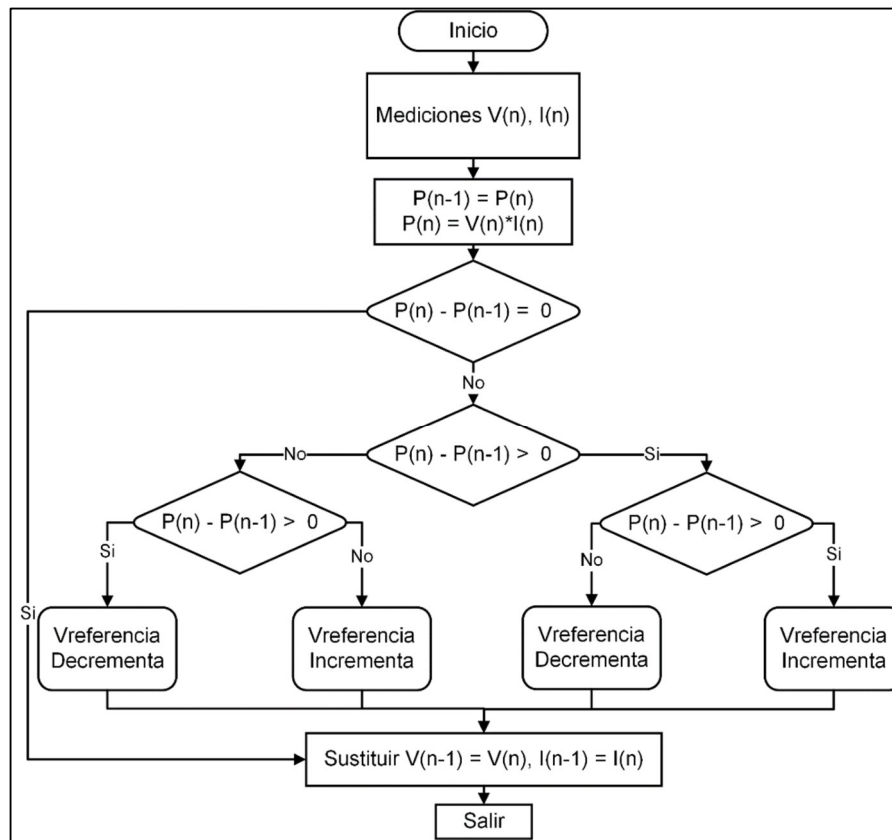


Fig. 12. Algoritmo P&O con respecto al voltaje de referencia.
Fuente: (Chinna Kullay Reddy et al., 2018).

Donde:

- $V_{(n)}$: Medición de voltaje actual.
- $I_{(n)}$: Medición de corriente actual.
- $P_{(n)}$: Cálculo de potencia actual.
- $V_{(n-1)}$: Medición de voltaje anterior.
- $P_{(n-1)}$: Medición de potencia anterior.
- $V_{referencia}$ Voltaje de referencia que se desea

En diagrama de flujo se observa que, si las dos variaciones ($\Delta P, \Delta V$) son verdaderas o si las dos variaciones ($\Delta P, \Delta V$) son falsas, se incrementa el voltaje de referencia. Mientras que, si una variación ($\Delta P, \Delta V$) es verdadera y la otra falsa, el voltaje de referencia deseado decrementa.

Sin embargo, en este trabajo se realizó el control con respecto a la corriente de referencia. Es decir, lo que se busca es el control de la corriente. En la figura 13 se presenta el diagrama de flujo utilizado para el cargador de batería.

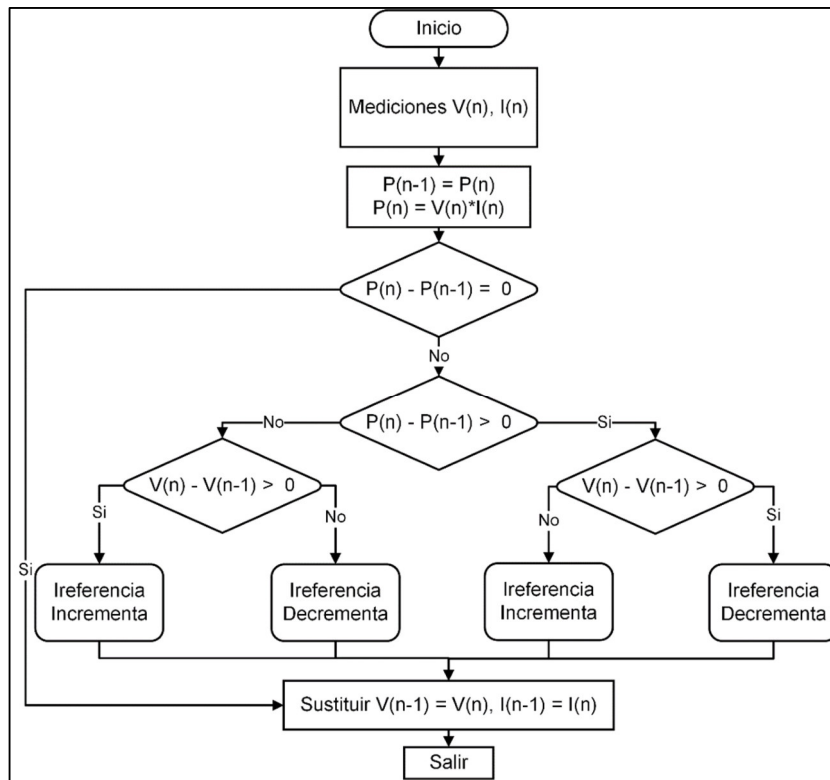


Fig. 13. Algoritmo P&O con respecto a la corriente de referencia.
Fuente: (Killi & Samanta, 2015).

Donde, *Ireference* es la corriente de referencia deseada.

Con diferencia al anterior diagrama de flujo ilustrado. Si las dos variaciones son verdaderas ($\Delta V, \Delta P$) o si las dos variaciones ($\Delta V, \Delta P$) son falsas, la corriente de referencia disminuye. Mientras que si una variación ($\Delta V, \Delta P$) es verdadera y la otra falsa, se incrementa la corriente de referencia deseada.

1.10.2 Algoritmo conductancia incremental (ICT)

El algoritmo de conductancia incremental se basa en el hecho de que la pendiente de la curva de potencia es cero cuando alcanza MPP. Si la pendiente es positiva está a la izquierda del MPP y si la pendiente es negativa está a la derecha del MPP (ver figura 14) (Echeverría et al., 2014).

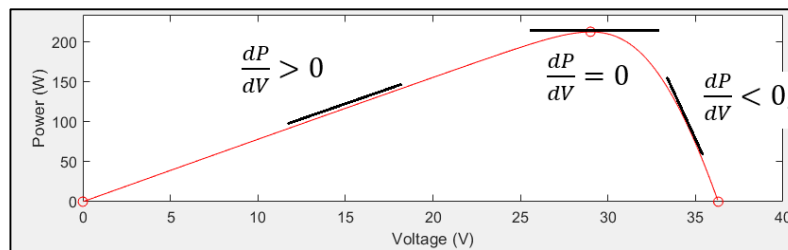


Fig. 14. Curva del algoritmo conductancia incremental.
Fuente: (Echeverría et al., 2014).

Cuando se logra alcanzar el MPP (punto máximo de potencia), el algoritmo continúa trabajando de forma continua en aquel punto, esto lo realiza hasta que exista cierta variación de la corriente. La corriente depende directamente de la radiación que se produce en ese instante, si la radiación aumenta el MPP se trasladara a la derecha, mientras que si la radiación es menor el MPP se traslada hacia la izquierda. Para contrarrestar estos sucesos se aumenta o disminuye el voltaje de referencia (Ávila, 2017).

Este algoritmo posee un grado de complejidad mayor con respecto al P&O, en donde el análisis realizado en el MPP se considera a la derivada de la potencia con respecto al voltaje como nula. Sin embargo, no es muy probable cumplir con esta condición debido a las diferentes condiciones que influyen durante su operación. Cuando el algoritmo logra llegar a la tensión deseada esta permanecerá constante.

En la figura 15, se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental.

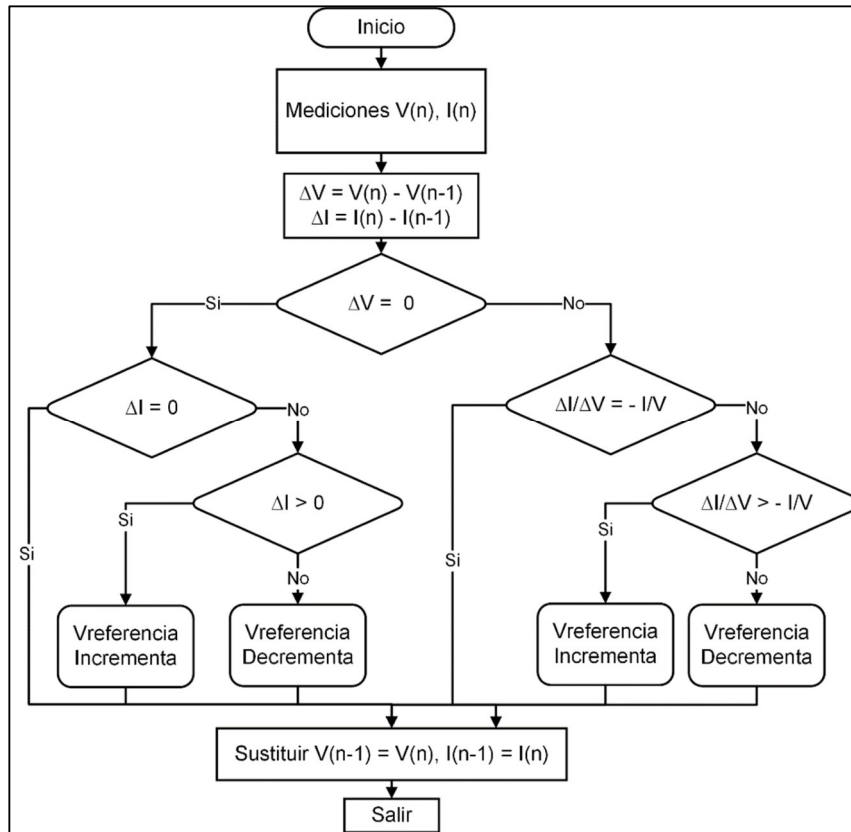


Fig. 15. Algoritmo ICT.
Fuente: (Ávila, 2017).

Donde:

- $V_{(n)}$: Medición de voltaje actual.
- $I_{(n)}$: Medición de corriente actual.
- $P_{(n)}$: Cálculo de potencia actual.
- $V_{(n-1)}$: Medición de voltaje anterior.
- $P_{(n-1)}$: Medición de potencia anterior.
- Vreference* Voltaje de referencia que se desea

1.10.3 Algoritmo mediante control difuso (LD)

Este algoritmo está conformado por una serie de etapas que transforman señales de entradas en salidas que dependen de la necesidad del sistema (Jiménez, 2012). En la figura 16 se indica las diferentes etapas del algoritmo mediante lógica difusa.

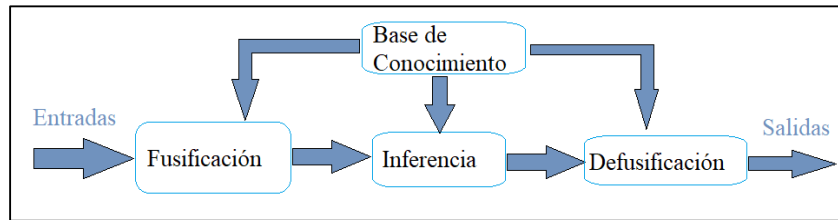


Fig. 16. Etapas del algoritmo mediante LD.
Fuente: (Jiménez, 2012).

Eta de Fusificación: Esta etapa es la encargada de transformar las señales de entrada en variables difusas, estas variables son asignadas a un grado de pertenencia en ciertos conjuntos difusos a través de funciones de membresía (J. Aguirre et al., 2018).

Eta de Inferencia: En esta etapa se definen a los valores difusos mediante unas reglas lingüísticas que son aplicadas a las variables de entradas (J. Aguirre et al., 2018).

Base de Conocimiento: Como su nombre lo menciona contiene una base de datos junto con las reglas de funcionamiento del sistema, en esta base de datos se encuentran las definiciones lingüísticas de las variables de entrada y salida, las reglas logran combinar los conjuntos difusos tanto de entrada (premisas), como los conjuntos difusos de salida (consecuente) (J. Aguirre et al., 2018).

Eta de Defusificación: En esta etapa se realiza lo contrario a la etapa de fusificación, ya que se transforma los valores difusos en una salida de valores numéricos, esto se obtienen mediante una serie de modelos matemáticos de defusificación (J. Aguirre et al., 2018).

Los valores de salida de este algoritmo son alcanzados por la señal de control que es la encargada de realizar la conmutación en el elemento semiconductor del convertidor. Una de las mayores ventajas de utilizar este algoritmo es que tiene repuesta dinámica rápida y también menos fluctuaciones en estado estable (Jiménez, 2012).

1.10.4 Algoritmo mediante redes neuronales

Este algoritmo basado en redes neuronales artificiales simula procesos matemáticos que homologan el comportamiento y la forma de pensar de los humanos. Su funcionamiento se constituye de tres etapas como se ilustra en la figura 17. La

primera capa está constituida por las entradas del sistema (irradiancia y temperatura), que son las que influyen directamente con la generación del sistema. La segunda etapa es conocida como oculta, debido a que no tiene acceso del exterior, solo está constituida por neuronas ocultas que son capaces de transformar variables recibidas en otras variables de salida. La última etapa es la de salida que es la que produce la señal de control que ayuda a obtener el PMP (González & Cárdenas, 2016).

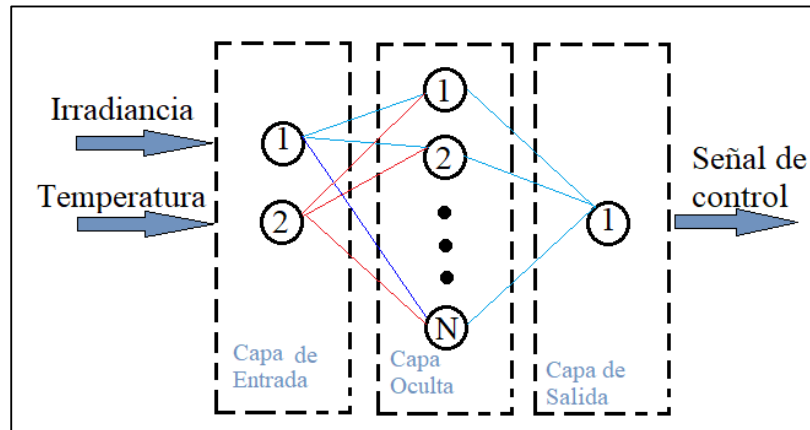


Fig. 17. Etapas mediante redes neuronales.
Fuente: (González & Cárdenas, 2016).

Este algoritmo con respecto a los anteriores tiene la ventaja de una respuesta dinámica con más rapidez y menor fluctuaciones cuando está cercano al MPP. Sin embargo, su desventaja es se incrementa el costo del sistema.

1.11 Aplicaciones de algoritmos MPPT en cargadores de batería.

En (Zerouali et al., 2020) se realiza un control lógico difuso para alcanzar MPP de los paneles solares. El cargador de baterías contiene un convertidor boost-Buck. Se implementa un control PID y un control óptimo PI. Los resultados presentados se realizan en simulación utilizando Simulink/Matlab y también se analiza el sistema en condiciones reales de funcionamiento.

(Singh & Kumar, 2020) y (Ramesh & Vanitha, 2018) presentan diferentes técnicas de control para seguimiento del máximo punto de potencia de un arreglo fotovoltaico para un cargador de baterías de vehículos eléctricos. Se usan sensores para las mediciones del controlador y convertidores CUK. Finalmente, los resultados se presentan mediante simulación en MATLAB/Simulink.

(Dileep & Bharath, 2018) diseñaron un controlador que controla el proceso de carga y evita la sobrecarga de baterías de plomo-ácido. El algoritmo MPPT implementado es de circuito abierto fraccional avanzado. Los resultados de la estrategia de control propuesta en el convertidor Buck se presenta mediante simulación.

En (Hussain et al., 2019) se hace un modelado dinámico del controlador de carga solar basado en un convertidor Buck para mejorar el rendimiento del algoritmo MPPT. Para alcanzar el MPP se implementa el algoritmo P&O en el convertidor con la finalidad de aumentar la eficiencia durante la conversión de energía.

El control de voltaje en el bus del panel fotovoltaico se presenta en (Venkatramanan & John, 2019). En esta investigación se implementa un esquema MPPT P&O basado en voltaje y los resultados son presentados mediante la experimentación en un sistema real.

En la investigación realizada por (Pathak & Yadav, 2019). Se diseña un circuito de carga de batería a través de un algoritmo MPPT discreto PID basado en lógica difusa inteligente. El objetivo de esta investigación es operar el sistema fotovoltaico en el MPP, bajo condiciones ambientales variables y así, lograr una mayor eficacia, minimizar costos y obtener valores de voltaje y corriente adecuados para la carga de la batería y mejorar la vida útil de la misma.

(Premkumar et al., 2021), desarrollaron un controlador PSO optimizado mediante PI de un convertidor Buck para probar el MPP y el algoritmo de carga de la batería. Se emula una celda de combustible de membrana en diferentes condiciones de operación, como temperatura variable, presión de combustible y condiciones de presión de aire variables. Los resultados son presentados mediante simulación y experimentos.

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL CARGADOR DE BATERÍAS

En este capítulo se presenta la metodología de la investigación, se hace una descripción de lo siguiente: parámetros que rigen el sistema, modelado matemático del convertidor Buck, y dimensionamiento de sus elementos. Además, se diseñan los controladores de corriente, voltaje y el algoritmo MPPT. Los resultados obtenidos se exponen en el software MATLAB/Simulink.

2.1 Metodología

El desarrollo e implementación de un cargador de baterías a través de un convertidor Buck, parten de la metodología descrita en la figura 18.

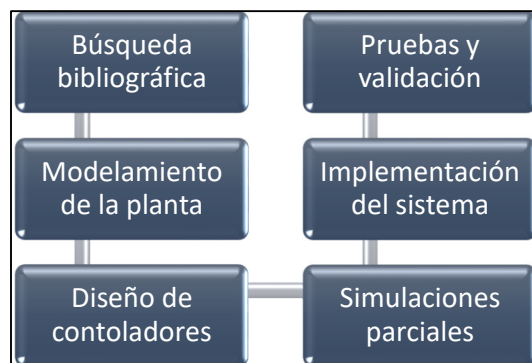


Fig. 18. Metodología.
Fuente: (Autor).

- Indagar en gestores bibliográficos sobre el uso de convertidores Buck para cargar baterías, el análisis matemático que rige el sistema y las diferentes técnicas de control que le permiten al convertidor tener un buen desempeño en diferentes escenarios de prueba. Entre los gestores bibliográficos que se utilizó para la búsqueda de información están: Google académico, IEEExplorer, WebOfScience, Springer, entre otros.
- El modelamiento de la planta permite conocer el funcionamiento del sistema en sus diferentes modos de operación, analizar el comportamiento en estado estable y transitorio. Finalmente, con los requerimientos del sistema se procedió con el dimensionamiento de sus elementos, sustentados mediante cálculos matemáticos y pruebas de simulación.

- Los controladores son los encargados de gestionar las acciones a realizarse durante la operación y funcionamiento del cargador de baterías. Por tanto, es indispensable realizar un algoritmo que permita trabajar en el máximo punto de potencia, para este caso se desarrolla un algoritmo P&O. También se precisa la realización de dos controladores PI para el control de corriente y voltaje.
- El desarrollo de cada controlador está sustentado mediante un análisis matemático y las simulaciones se realizan de forma parcial.

2.2 Parámetros del sistema

El cargador de baterías estará compuesto por dos paneles fotovoltaicos conectados en serie con capacidad de 50 [W] y voltaje nominal de 18 [V], una batería de plomo ácido de 12 [V] y 35 [Ah] y un convertidor reductor que a su salida proporcionará 12 [V].

2.3 Descripción del sistema

En la figura 19, se puede observar los elementos que forman el cargador de baterías en donde, I_p y V_p son la corriente y el voltaje de salida del panel solar, I_b y V_b , son la corriente y voltaje de salida de convertidor *Buck*, V_{ref} es el voltaje de referencia que ingresa al control de voltaje, y P_o es la potencia de salida que ingresa al algoritmo MPPT.

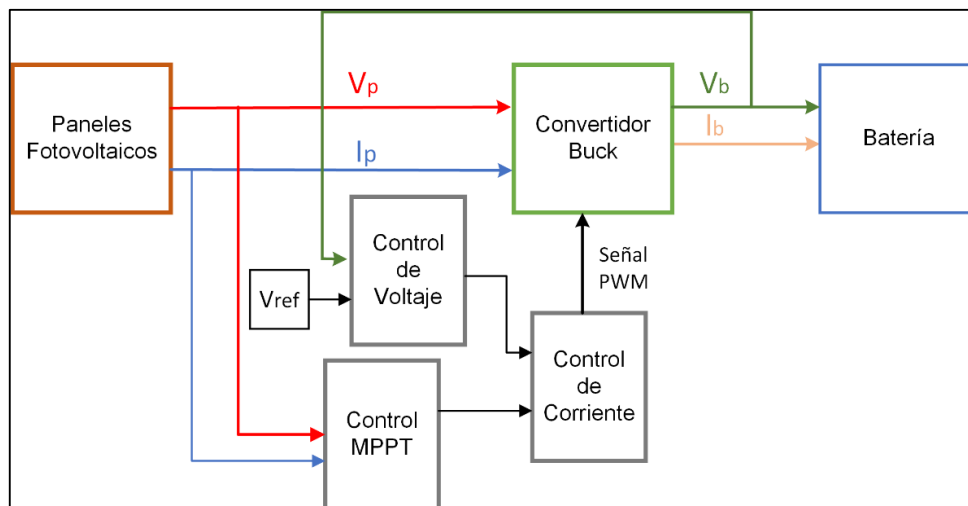


Fig. 19. Descripción general del sistema.
Fuente: (Autor).

2.4 Funcionamiento de un convertidor Buck

La estructura del convertidor Buck se detalla en la figura 20. El convertidor se compone por: un par de conmutadores S y \bar{S} , donde \bar{S} es complementario de S , un inductor L_o , R representa a la carga, V_p es la fuente de alimentación y V_b corresponde al voltaje de la batería.

A continuación, la ecuación (1) representa la ley de voltajes y (2) representa el funcionamiento del convertidor Buck cuando $S=1$. Por otro lado, la ecuación (3) y (4) muestran el funcionamiento del convertidor cuando $S=0$.

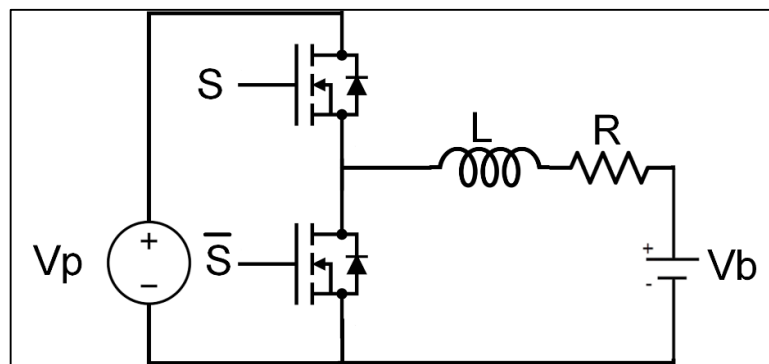


Fig. 20. Estructura del convertidor Buck.
Fuente: (Diponegoro, 2020).

Cuando $S = 1$ y $\bar{S} = 0$ se obtiene el circuito equivalente mostrado en la figura 21.

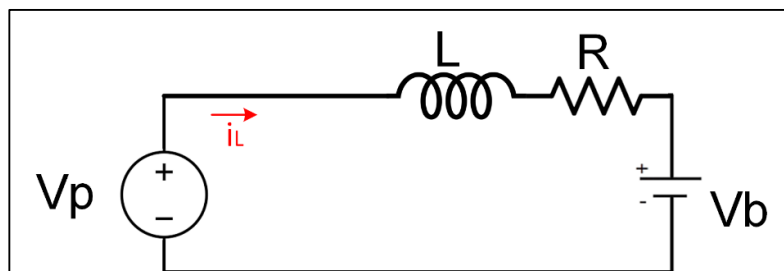


Fig. 21. Circuito equivalente cuando $S=1$.
Fuente: (Yang et al., 2013).

$$v_p = v_l + v_R + v_b \quad (1)$$

$$l(\dot{i}_l) = v_p - i_l(R) - v_b \quad (2)$$

Cuando $S = 0$ y $\bar{S} = 1$ se obtiene el circuito equivalente mostrado en la figura 22.

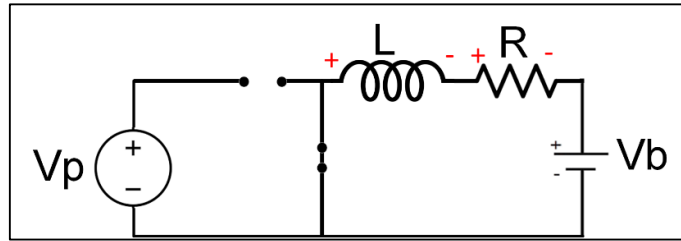


Fig. 22. Circuito equivalente cuando $S=0$.
Fuente: (Diponegoro, 2020).

$$v_l + v_R + v_b = 0 \quad (3)$$

$$l(\dot{i}_l) = -i_l(R) - v_b \quad (4)$$

Uniendo las ecuaciones (2) y (4) se obtiene la ecuación (5) que representa el modelo dinámico del convertidor. S representa el estado de conmutación del interruptor.

$$l(\dot{i}_l) = Sv_p - i_l(R) - v_b \quad (5)$$

2.5 Dimensionamiento del Inductor

Una vez analizado el comportamiento del convertidor Buck en sus dos modos de operación se procede con el dimensionamiento del inductor. Una de las técnicas de modulación más utilizadas en convertidores DC es la PWM, la señal que activa/desactiva los transistores resulta de la comparación entre una señal portadora v_p y una señal moduladora v_m como se muestra en la ecuación (6). La figura 23 muestra la señal v_{pwm} resultante.

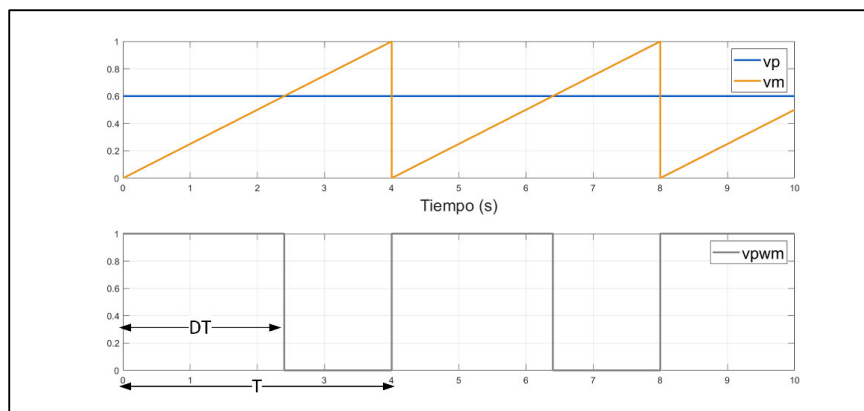


Fig. 23. Señal PWM.
Fuente: (Autor).

$$v_{pwm} = \begin{cases} \text{si } v_p > v_m ; 0 \\ \text{si } v_p \leq v_m ; 1 \end{cases} \quad (6)$$

El *duty cycle* se presenta en la ecuación (8) y se obtiene de la semejanza de triángulos existente entre la señal moduladora y portadora, como se indica en la figura 24, donde T es el periodo y DT es el porcentaje del periodo en el cual v_{pwm} es igual a 1.

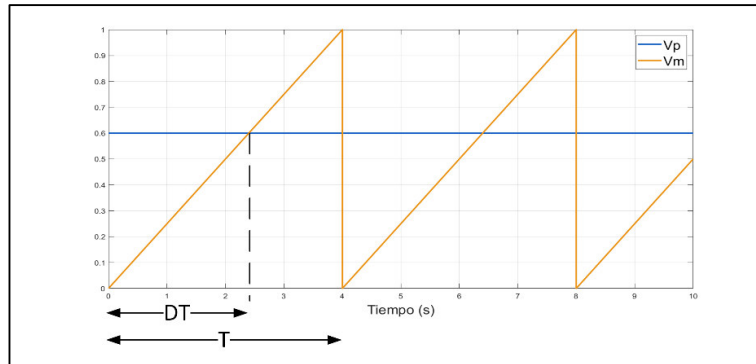


Fig. 24. Duty cycle de una señal PWM.
Fuente: (Autor).

$$\frac{v_p}{T} = \frac{v_m}{DT} \quad (7)$$

$$D = \frac{v_m}{v_p} \quad (8)$$

- **Análisis de la corriente del inductor**

Mediante la ecuación (5) que representa el voltaje del inductor en los dos modos de operación; se puede determinar la onda del voltaje v_L como se muestra en la figura 25.

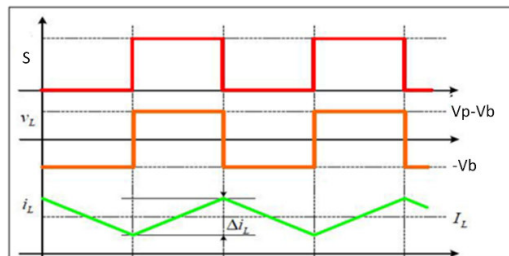


Fig. 25. Voltaje y corriente de salida del inductor.
Fuente: (Álamos, 2007).

Se conoce que la corriente del inductor i_L es la integral de su voltaje, por lo tanto, al integrar una constante positiva ($V_p - V_b$) se obtiene una recta con pendiente positiva y la pendiente de la recta será negativa si la constante es negativa ($-V_b$). El dimensionamiento del inductor presentado en la ecuación (13), se hace cuando i_L es positiva, ya que en ese momento el inductor comienza a cargarse el análisis del inductor en la carga se aprecia en las ecuaciones (11)-(14).

$$v_b = Dv_p \quad (9)$$

$$v_L = \begin{cases} \text{cuando } S = 1; v_L = v_p - v_b = v_p - (Dv_p); \text{ entonces } v_L = v_p(1 - D) \\ \text{cuando } S = 0; v_L = -v_b; \text{ entonces } v_L = -Dv_p \end{cases} \quad (10)$$

Analizando la corriente del inductor en la carga ($i_L > 0$) se tiene:

$$v_L = L \frac{\partial i_L}{\partial t} \quad (11)$$

$$v_p(1 - D) = L \frac{\Delta_{iL}}{DT} \quad (12)$$

$$L = \frac{v_p(1 - D)DT}{\Delta_{iL}} \quad (13)$$

Reemplazando los valores presentados en la tabla 2.1, en la Ecuación (13), se tiene como resultado el valor del inductor.

$$L = 38[\mu H] \quad (14)$$

Tabla 2.1 Parámetros generales del Sistema

Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Frecuencia	f	5000	[Hz]
Periodo	T	2	[ms]
Duty cycle	D	0.33	
Voltaje de entrada	v_p	36	[V]
Voltaje de la batería	v_b	12	[V]
Resistencia	R	0.2	[Ω]
Rizado de la corriente del inductor	Δ_{iL}	5%	[A]

Fuente: (Autor).

2.6 Análisis de pequeña señal

Para el análisis de pequeña señal se toma como referencia la ecuación (5), que representa al convertidor en sus dos modos de operación. La ecuación (15), es el resultado de reemplazar el estado del switch S por el *duty cycle* D .

$$l(\dot{i}_l) = Dv_p - i_l(R) - v_b \quad (15)$$

Para el análisis del sistema en estado estable es necesario realizarlo con los valores promedios de cada elemento e igualando la derivada a cero. El resultado de esta operación da como resultado la ecuación (16).

$$\bar{D} = \frac{\bar{i}_l(R)}{\bar{v}_p} + \frac{\bar{v}_b}{\bar{v}_p} \quad (16)$$

La linealización del sistema se realizó mediante el análisis de pequeña señal en el modelo dinámico obtenido, el análisis de pequeña señal resulta de la suma entre el valor promedio y su pequeña señal como se muestra a continuación en las ecuaciones (17), (18), (19) y (20).

$$D = \bar{D} + \hat{D} \quad (17)$$

$$v_p = \bar{v}_p + \hat{v}_p \quad (18)$$

$$i_l = \bar{i}_l + \hat{i}_l \quad (19)$$

$$v_b = \bar{v}_b + \hat{v}_b \quad (20)$$

Reemplazando las ecuaciones (17)-(20) en (15) se obtiene la siguiente ecuación:

$$l(\dot{i}_l) = \bar{D}\hat{v}_p + \hat{D}\bar{v}_p - \hat{i}_l R - \hat{v}_b \quad (21)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (21) se tiene que:

$$I_l(s) = \frac{\bar{D}V_p(s) + D(s)\bar{V}_p - V_b(s)}{Ls + R} \quad (22)$$

Finalmente, la ecuación (22) se puede representar en función de sus polos y ganancias que da como resultado la siguiente ecuación.

$$I_l(s) = \frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \left(\frac{1}{R} \right) \left(\bar{V}_p D(s) + \bar{D} V_p(s) - V_b(s) \right) \quad (23)$$

Donde: $D(s)$ es una variable controlable, $V_p(s)$ es una variable intrínseca en el sistema que no se puede controlar ni observar y $V_b(s)$ es una variable observable correspondiente al estado de la batería.

Para reducir el modelo matemático existen diferentes métodos. En este caso se asume que las variaciones de voltaje de entrada son muy pequeñas, por tanto, se igualan a cero ($V_p = 0$).

Aplicando la estrategia *Feedforward* se tiene la ecuación (24):

$$D(s) = U(s) + \frac{V_b(s)}{\bar{V}_p} \quad (24)$$

Donde, $U(s)$ representa a la señal de control. El voltaje proveniente de la batería resulta ser de mucha utilidad para este lazo de control, debido a que estima el estado de carga. Por consiguiente, reemplazando la ecuación (24) en (23) se tiene que:

$$I_l(s) = \frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \left(U(s) \frac{\bar{V}_p}{R} + V_p(s) \frac{\bar{D}}{R} \right) \quad (25)$$

Para el diseño de este control las perturbaciones se igualan a cero ($V_p(s) = 0$). Entonces la función de transferencia de la planta sin perturbaciones es la mostrada en la ecuación (26).

$$I_l(s) = \left(\frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \right) k_o * U(s) \quad (26)$$

Donde: $\frac{\bar{V}_p}{R}$ es una constante k_o y $U(s)$ es la señal de control.

La representación de un sistema de primer orden sin retardo tiene la siguiente forma:

$$\frac{H(s)}{U(s)} = \left(\frac{K}{\tau s + 1} \right) \quad (27)$$

Donde K es la ganancia estática del sistema y τ es el tiempo en el que el sistema alcanza el 63,2% del valor en estado estable. En consecuencia, la función de transferencia del convertidor en su forma general se puede ver en la ecuación (28).

$$\frac{I_l(s)}{U(s)} = \left(\frac{k_o}{\frac{L}{R}s + 1} \right) \quad (28)$$

El tiempo de subida está definido por $t_s = 4\tau$, para este sistema $t_s = 7,68 [ms]$. La figura 26, muestra el modelo lineal de la planta y el tiempo de subida encontrados mediante cálculos matemáticos.

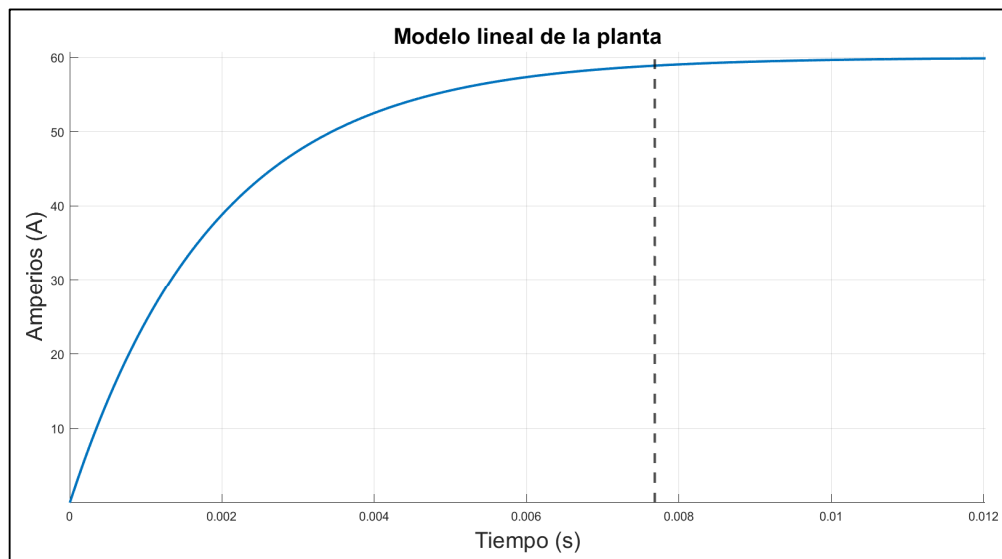


Fig. 26. Modelo lineal de la planta.
Fuente: (Autor).

2.7 Análisis de Bode del sistema

Una vez obtenida la función de transferencia de la planta se procede a realizar el análisis de Bode del sistema que sirve principalmente para observar la respuesta en

frecuencia de la planta y con base en lo obtenido se procede a realizar el controlador de corriente.

En la figura 27, se observa el comportamiento de la planta con respecto a la frecuencia, el polo de la planta es el punto en el cual el sistema comienza a decaer $-20 \frac{dB}{Dec}$.

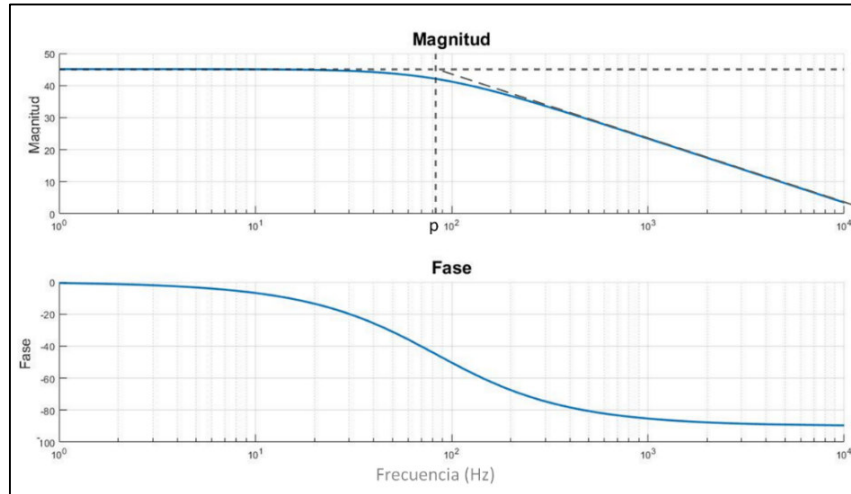


Fig. 27. Diagrama de Bode del sistema.
Fuente: (Autor).

2.8 Diseño de los lazos de control

La investigación está compuesta por los lazos de control que se muestran en la figura 28. Donde $G(s)$ es la función de transferencia de la planta, $G_c(s)$ es el lazo de control de corriente, $G_v(s)$ es el lazo de control de voltaje y finalmente, el algoritmo MPPT.

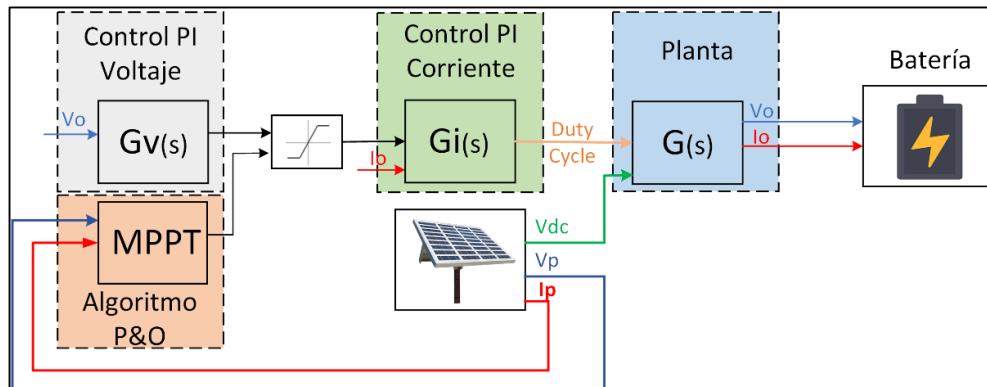


Fig. 28. Diagrama general de los lazos de control.
Fuente: (Autor).

2.8.1 Lazo de control de corriente

Con el objetivo de simplificar el cálculo matemático para los controladores se realizará el análisis del sistema en lazo abierto. Para el control de corriente se utiliza un controlador Proporcional-Integral (PI) y se representa por la ecuación (29).

$$G_c(s) = \frac{k_p \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{s} \quad (29)$$

Con base en este criterio de estabilidad se realiza el cálculo de los parámetros k_p y k_i . Obtenidos los parámetros del controlador se realiza la representación de la planta y el control PI en diagramas de Bode (ver figura 29).

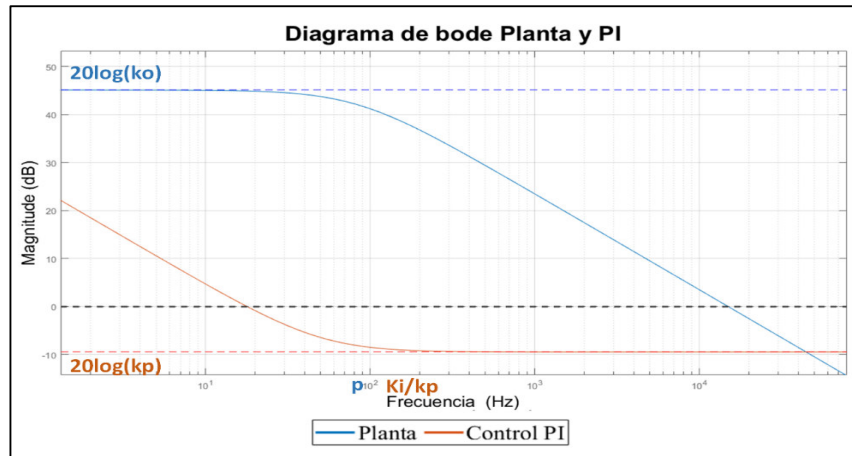


Fig. 29. Magnitud de la planta y control PI.
Fuente: (Autor).

Para determinar los parámetros del controlador y considerando la alternativa con mejor rendimiento se estableció colocar los valores de frecuencia en el siguiente orden: $p < \frac{k_p}{k_i} < \omega_b$. Las ecuaciones (30)-(36) permiten obtener las ecuaciones de k_p y k_i son representadas por (33) y (37) respectivamente.

$$\frac{20 \log \left(\frac{k_o}{x} \right)}{20 \log \left(\frac{k_i}{k_p * p} \right)} = 20 \quad (30)$$

$$x = \frac{k_p * p * k_o}{k_i} \quad (31)$$

$$\frac{20 \log(x) + 20 \log(kp)}{\log\left(\frac{wb}{\frac{ki}{kp}}\right)} = 20 \quad (32)$$

$$kp = \frac{wb}{ko * p} \quad (33)$$

Considerando:

$$\frac{ki}{kp} = \frac{wb}{10} \quad (34)$$

$$kp = 10 * \frac{ki}{wb} \quad (35)$$

Reemplazando (35) en (33) se tiene:

$$10 * \frac{ki}{wb} = \frac{wb}{p * ko} \quad (36)$$

$$ki = \frac{wb^2}{10 * p * ko} \quad (37)$$

Sustituyendo las en las ecuaciones (33) y (37). Los valores de kp y ki se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros del sistema

Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Frecuencia	f	5000	[Hz]
Ancho de banda	wb	5	[kHz]
Polo	p	82.89	[Hz]
Resistencia	R	0.2	[Ω]
Inductor	L	38	[μ H]
Constante	ko	180	[A]
Ganancia Proporcional	kp	0.3351	
Ganancia Integral	ki	0.3404	

Fuente: (Autor).

El diagrama de Bode de la figura 30, muestra que efectivamente el ancho de banda cruza por 0 [dB] a la frecuencia de 5 [kHz] tal como dicta el criterio de estabilidad en

lazo abierto. Además, el valor de $\frac{k_i}{k_p}$ es el 10% de w_b como se había planteado en la ecuación (34).

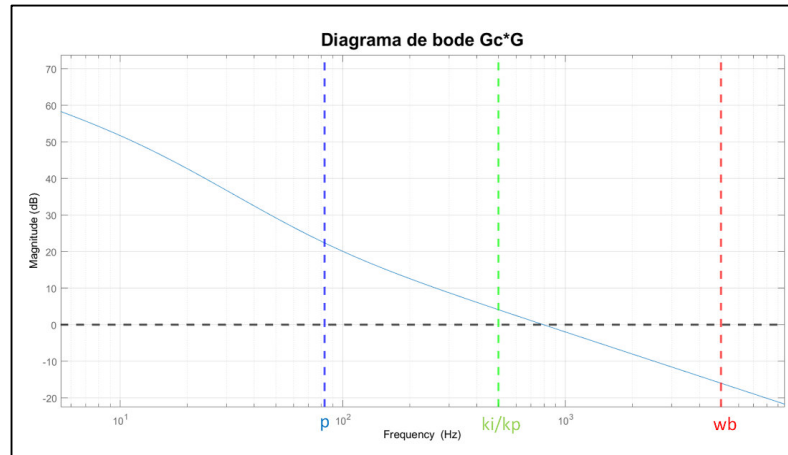


Fig. 30. Diagrama de Bode de la planta con el lazo de control PI.
Fuente: (Autor).

En la figura 31, se puede ver el funcionamiento de la planta con el lazo de control de corriente en condiciones ideales. Inicialmente el valor de referencia es de 5 [A], y el desempeño del controlador es bueno debido a que el sistema está sobre amortiguado no posee sobre impulso y según la gráfica alcanza la referencia en tiempo estimado de 800 [μ s], luego de un intervalo de tiempo se aumenta la corriente a 9 [A] y el controlador actúa inmediatamente y sigue efectivamente el nuevo valor establecido. De esta manera se valida el funcionamiento del controlador de corriente sobre la planta en tiempo continuo.

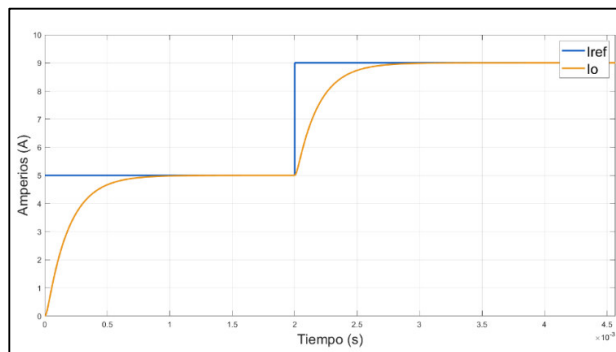


Fig. 31. Control de corriente.
Fuente: (Autor).

La figura 32 es la representación del control PI de corriente en la planta real. En cuanto a tiempos y desempeño el comportamiento es idéntico a la planta ideal. Sin embargo, se

muestra la corriente oscilando entre su valor de referencia. De esta forma se valida el desempeño del controlador de corriente en tiempo continuo.

La técnica utilizada para discretizar el controlador PI es la denominada *Backward*. El control PI en tiempo discreto está representado por la ecuación (38)

$$U_k = U_{k-1} + (kp + ki * Ts)e_k - kp * e_{k-1} \quad (38)$$

Donde U_k es el controlador de la planta, U_{k-1} es el valor anterior del controlador, e_k el error actual y e_{k-1} el error anterior.

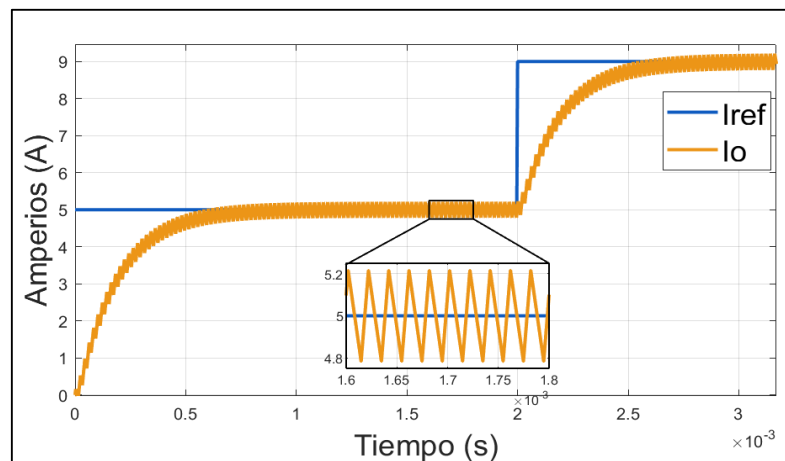


Fig. 32. Control PI en la planta real.
Fuente: (Autor).

La ecuación (38) es representada mediante un diagrama de bloques, como se muestra en la figura 33. Donde $a_1 = kp + ki * Ts$; $a_0 = kp$ y $k_{02} = \frac{v_b + i_L R}{v_p}$

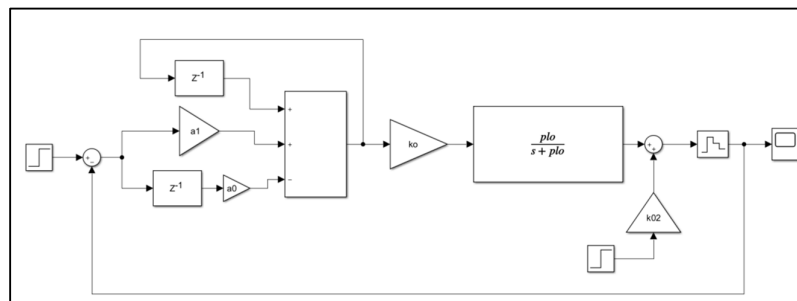


Fig. 33. Control PI discreto.
Fuente: (Autor).

En la figura 34 se observa el comportamiento del control PI discreto, se puede apreciar que la señal de salida es semejante a la de tiempo continuo, sin embargo, se evidencia como se comportaría el controlador sobre la planta de forma real.

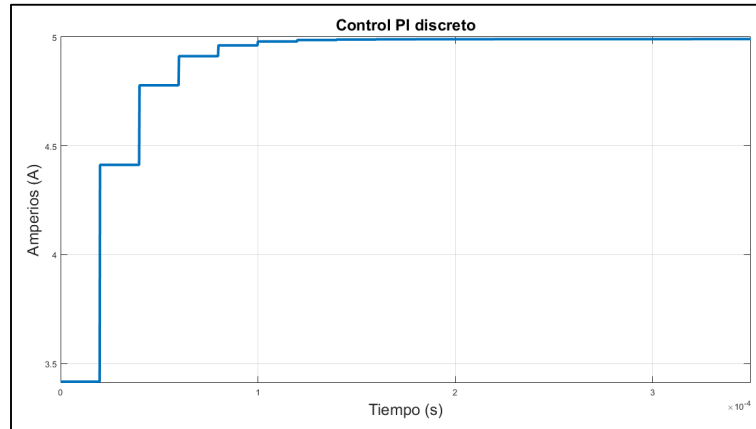


Fig. 34. Control PI discreto.
Fuente: (Autor).

La figura 35 representa el control PI de corriente junto al convertidor *Buck*, la batería y las mediciones de los sensores en tiempo discreto. Al inicio se establece una corriente de referencia $I_{ref} = 8.33 [A]$, cómo se observó en pruebas anteriores inicialmente alcanza su referencia en un tiempo estimado de 800 $[\mu s]$ y a los 0.012 [s] se añade una carga de 2 [A]. Se puede ver que el controlador actúa de forma rápida y vuelve alcanzar la referencia aproximadamente en 100 $[\mu s]$, la corriente de salida I_o presenta un valor de rizado y oscila alrededor del valor de referencia.

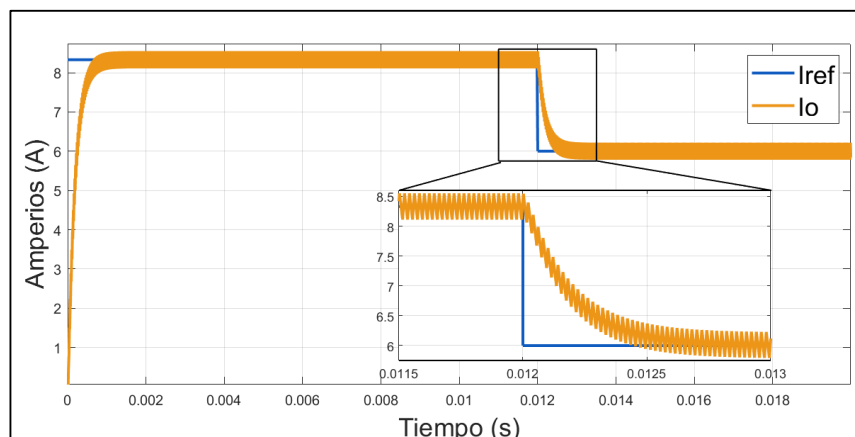


Fig. 35. Cargador de batería y control PI de corriente.
Fuente: (Autor).

En la figura 36 se observa como la batería comienza a cargarse en función de la corriente generada, para efectos de simulación inicialmente la batería está al 40% de su voltaje total. Al añadir una carga a los 0.012 [s] el voltaje decae en un intervalo corto de tiempo y posteriormente la batería continúa cargándose lentamente hasta alcanzar el valor máximo. Al igual que la corriente, el voltaje de salida presenta rizado en su valor de salida.

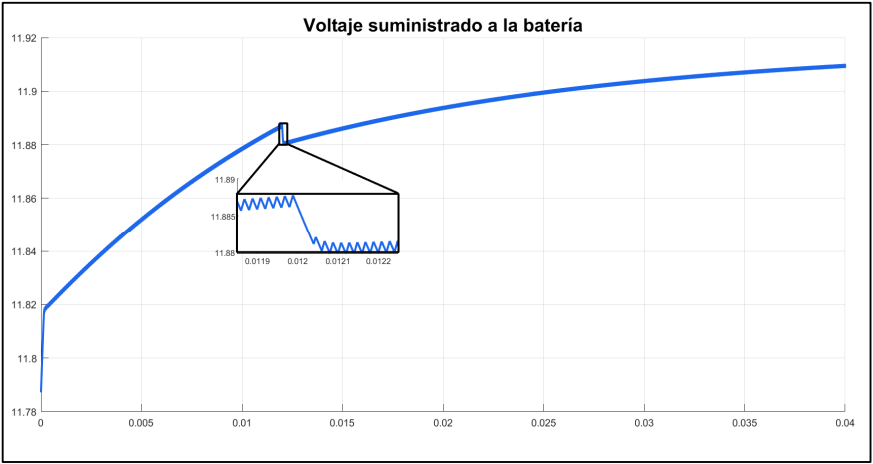


Fig. 36. Voltaje suministrado a la batería.
Fuente: (Autor).

2.8.2 Lazo de control de voltaje

El control de voltaje es mucho más lento que el control de corriente analizado, además, cuando se añade corriente, el tiempo de carga de la batería se reduce aún más. Por lo tanto, el voltaje de la batería depende directamente de la corriente suministrada, reduciendo el modelo de la planta al presentado en la figura 37 y la representación como función de transferencia se muestra en la ecuación (39).

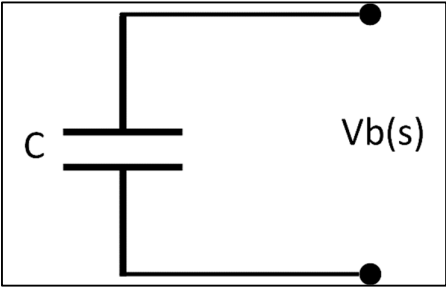


Fig. 37. Modelo de una batería de Litio.
Fuente: (Autor).

$$V_b(s) = \frac{1}{sC} I_b(s) \quad (39)$$

El diagrama de bloques del control de voltaje es el presentado en la figura 38. En el cual se incluye un saturador que evita que la corriente suministrada a la planta no sea mayor a la corriente máxima establecida.

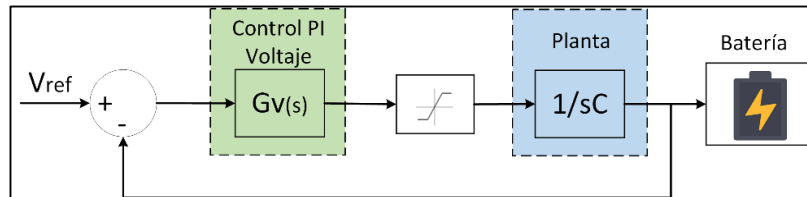


Fig. 38. Control de voltaje.
Fuente: (Autor).

Para determinar los parámetros del controlador y considerando la alternativa con mejor rendimiento se estableció colocar los valores de frecuencia en el siguiente orden: $\frac{kp_v}{ki_v} < \omega_b < C$. C representa el modelo de la batería de plomo ácido. El resultado de kp_v y ki_v se representa en las ecuaciones (44) y (47) respectivamente. La figura 39, representa el diagrama de Bode de la planta y el controlador PI de voltaje.

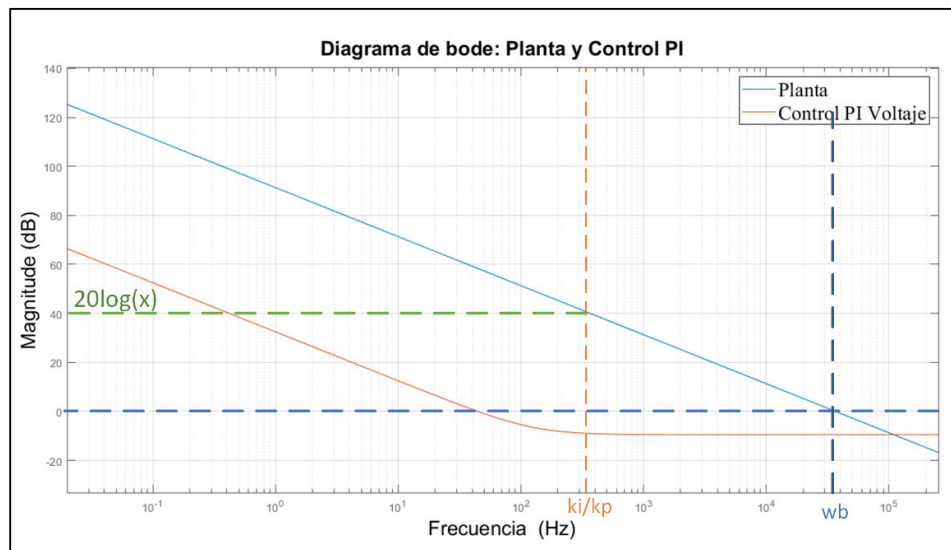


Fig. 39. Diagrama de Bode de planta y controlador de voltaje.
Fuente: (Autor).

$$\frac{20 \log(x) - 20 \log(0)}{20 \log\left(\frac{kp_v}{ki_v * C}\right)} = 20 \quad (40)$$

$$x = \frac{kp_v}{ki_v * C} \quad (41)$$

$$\frac{20 \log(x) + 20 \log(kp_v)}{\log\left(\frac{wb * kp_v}{ki_v}\right)} = 20 \quad (42)$$

$$\frac{20 \log\left(\frac{kp_v}{ki_v * C} * kp_v\right)}{\log\left(\frac{wbkp_v}{ki_v}\right)} = 20 \quad (43)$$

$$kp_v = wb * C \quad (44)$$

Considerando:

$$\frac{ki_v}{kp_v} = \frac{wb}{10} \quad (45)$$

$$ki_v = \frac{kp_v * wb}{10} \quad (46)$$

Reemplazando (44) en (46):

$$ki_v = \frac{wb^2 * C}{10} \quad (47)$$

Sustituyendo las en las ecuaciones (44) y (47). Los valores de kp_v y ki_v se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros del sistema

Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Frecuencia	f	5000	[Hz]
Ancho de banda	wb	10	[s]
Carga Eléctrica	Q	126000	[C/s]
Capacitor	C	9130.4	[F]
Voltaje de referencia	V_{ref}	13.8	[V]
Ganancia Proporcional	kp_v	91304	
Ganancia Integral	ki_v	91304	

Fuente: (Autor).

La figura 40 muestra el control de voltaje en tiempo continuo presenta sobre impulso y logra alcanzar la referencia después de los 5s, posteriormente se realizó una prueba de robustez bajando un voltio a la referencia y el control rastrea la referencia de manera efectiva.

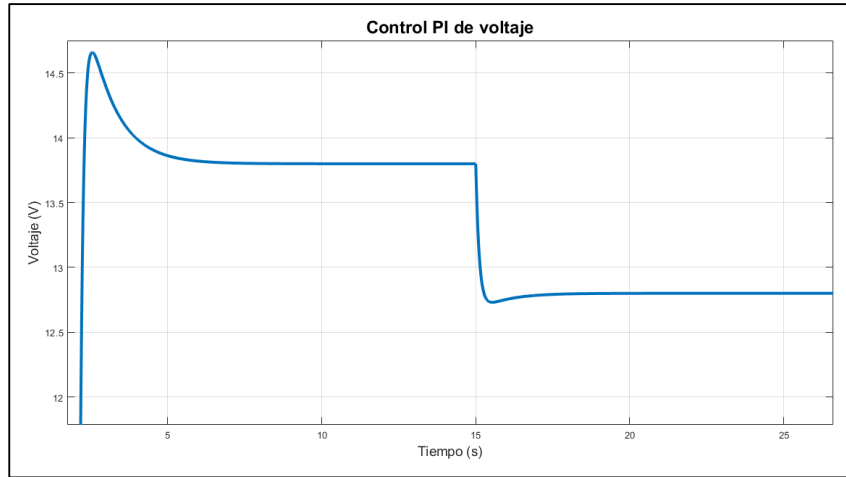


Fig. 40. Control PI de voltaje.
Fuente: (Autor).

2.9 Algoritmo MPPT

El algoritmo perturbar y observar es muy utilizado debido a su fácil implementación, este algoritmo consiste básicamente en ajustar de manera continua la impedancia observada por el arreglo fotovoltaico con la finalidad de mantener funcionando al sistema en el punto de potencia máximo o cerca de él sin importar las condiciones cambiantes que se presenten.

La estructura del algoritmo MPPT en función de la corriente se puede apreciar mediante la ecuación (48) y posteriormente representada por el diagrama de bloques de la figura 41. La tabla 2.4 describe las variables del algoritmo.

$$I_k = I_{k-1} - ctesign(\Delta P)sign(\Delta V) \quad (48)$$

Tabla 2.4 Variables Algoritmo P&O

Descripción	Parámetro	Unidades
Corriente de salida	I_k	[A]
Corriente de salida anterior	I_{k-1}	[A]
Variación de Potencia	ΔP	[W]
Variación de Voltaje	ΔV	[V]
Función para arreglos	<i>sign</i>	
Constante	<i>cte</i>	

Fuente: (Autor).

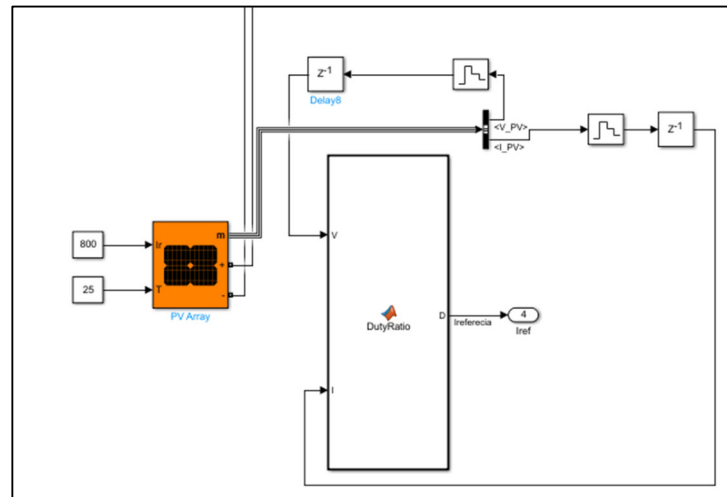


Fig. 41. Algoritmo MPPT.

Fuente: (Autor).

Una vez implementado el algoritmo P&O, en la figura 42 se observa que el algoritmo trabaja en el MPPT que entrega el panel fotovoltaico en este caso 213 [W], a pesar de existir una variación en la irradiancia a los 10 [s] el panel sigue trabajando en su MPP.

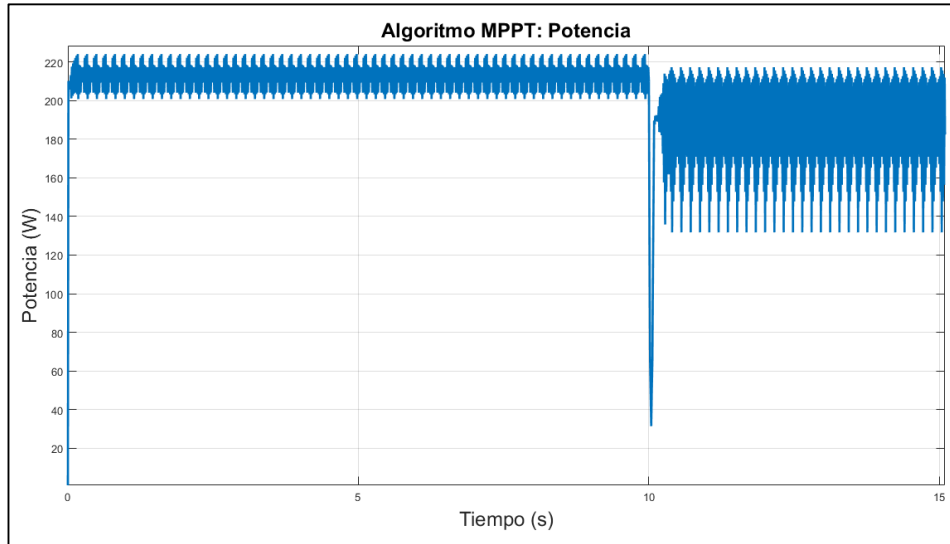


Fig. 42. Algoritmo MPPT del sistema.
Fuente: (Autor).

En este capítulo se ha realizado el modelamiento de la planta, el dimensionamiento del inductor y se obtuvieron las constantes proporcionales e integrales para el control de corriente y voltaje respectivamente. Finalmente, se implementó el algoritmo P&O para el seguimiento del punto máximo de potencia. Es importante mencionar que en este capítulo el análisis de cada controlador se realizó de forma independiente y se valida mediante simulaciones parciales. A continuación, en la tabla 2.5 se resume los valores importantes obtenidos en el desarrollo de este capítulo.

Tabla 2.5 Valores obtenidos

Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Inductor	L	380	[μ H]
Voltaje de entrada	v_p	36	[V]
Voltaje de salida	v_b	12	[V]
Ancho de banda corriente	w_b	5000	[Hz]
Ancho de banda voltaje	w_{b_v}	0.1	[Hz]
Ganancia Proporcional Corriente	k_p	0.3351	
Ganancia Integral Corriente	k_i	0.3404	
Ganancia Proporcional Voltaje	k_{p_v}	91304	
Ganancia Integral Voltaje	k_{i_v}	91304	

Fuente: (Autor).

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se presenta la implementación de un cargador de baterías con algoritmo MPPT. Se describe el hardware y software utilizado para el desarrollo del sistema, así como los resultados experimentales en las 3 etapas de funcionamiento: lazo de control de corriente, lazo de control de voltaje y algoritmo MPPT.

3.1 Implementación del prototipo de un cargador de baterías

La figura 43 muestra los diferentes diagramas de bloques que forman el prototipo de un cargador de baterías, basado en un convertidor Buck con un algoritmo P&O, además, se implementaron dos controladores externos de corriente y voltaje respectivamente.

En la figura 44 se puede apreciar los subsistemas que se encuentran internamente en el bloque cargador de baterías.

3.1.1 Subsistema generación de pulsos

Este subsistema tiene como entradas las señales de *duty cycle* encargadas de generar las señales PWM que activarán o desactivarán los interruptores del convertidor Buck.

Para la generación de señales PWM se optó por la placa LAUNCHXL-F28379D (ver figura 45) que tiene como procesador a F28379D con MCU Delfino C2000. Esta placa de desarrollo desarrollada por *Texas Instruments* (TI) presenta una plataforma económica orientada aplicaciones de control digital con alto rendimiento. Este sistema embebido se usa en aplicaciones como: diseño embebido y desarrollo, industrial, automatización y control de procesos (Instruments, 2022). Las principales características se detallan en la tabla 3.1.

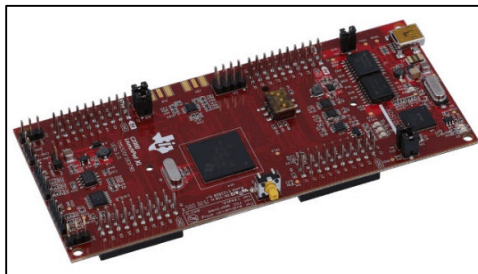


Fig. 45. Plataforma LAUNCHXL-F28379D.
Fuente: (Instruments, 2022)

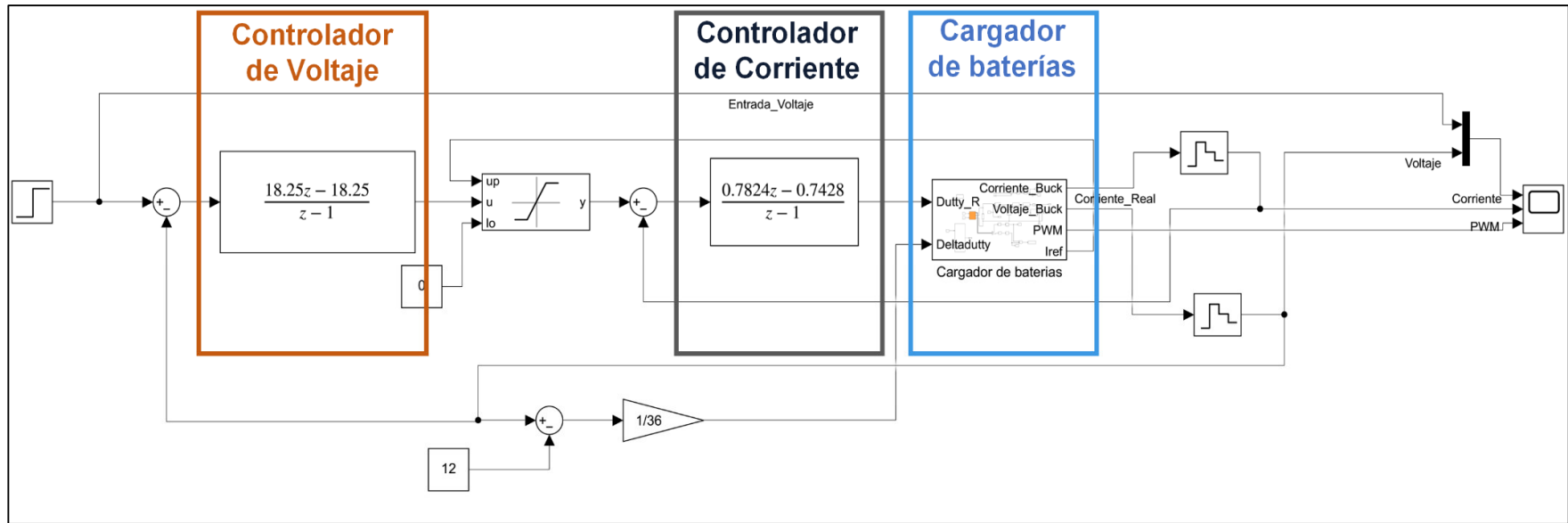


Fig. 43. Diagrama de bloques de un cargador de baterías.
Fuente: (Autor).

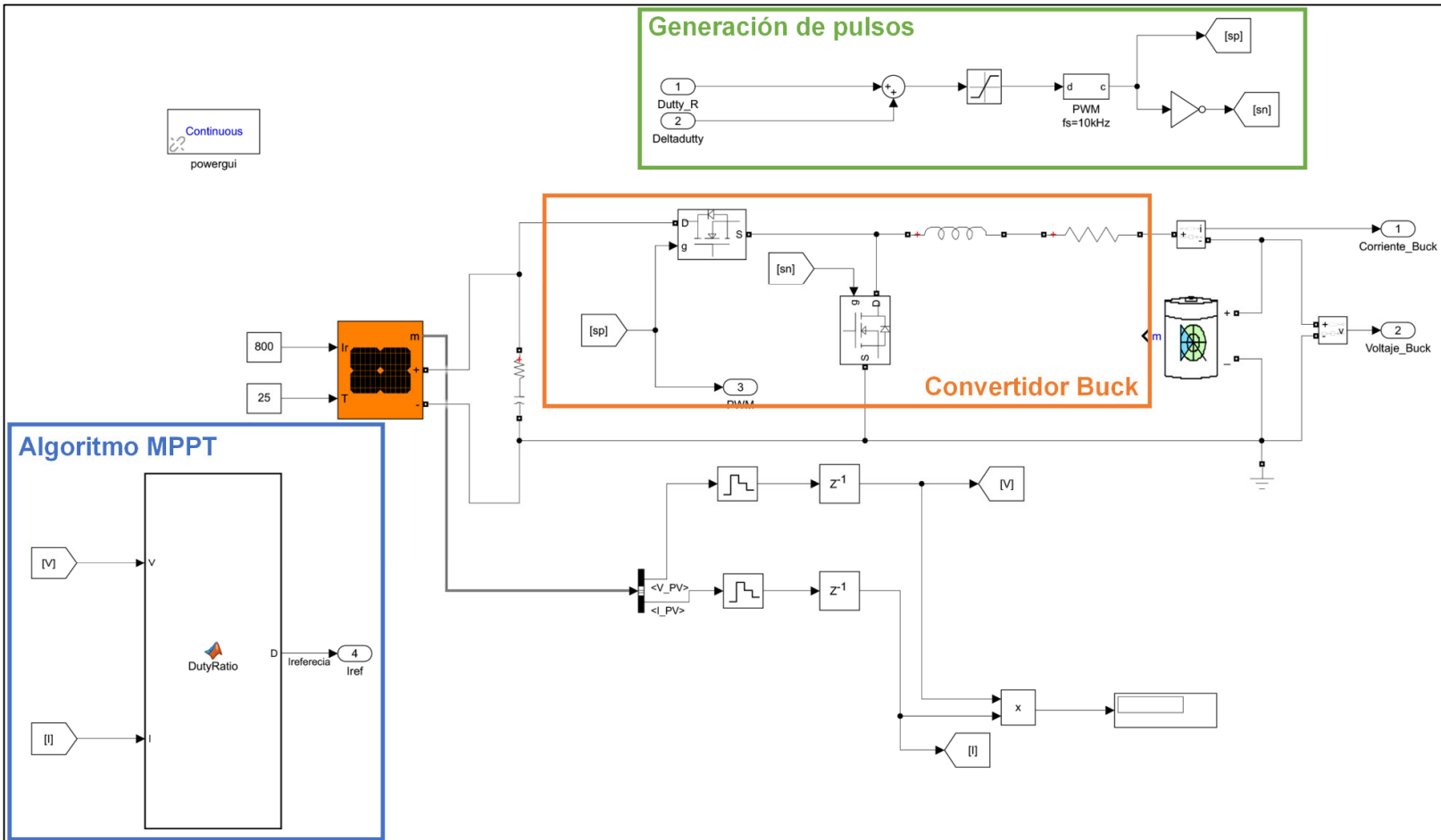


Fig. 44. Subsistemas del bloque cargador de baterías.
Fuente: (Autor).

Tabla 3.1 Principales características de la placa LAUNCHXL-F28379D

Parámetros	Descripción
Conector USB	XDS100v2
Pines	4x20
Frecuencia	200 MHz
Memoria Flash	1 MB
PWM	24 canales
Dual core	32 bits
Periféricos ADC	16/12 bits

Fuente: (Instruments, 2022)

La programación de la placa LAUNCHXL-F28379D se realizó mediante el entorno de desarrollo integrado *Code Composer Studio*, que es compatible con microcontroladores y procesadores integrados de TI. El software integra varias herramientas que permiten desarrollar, depurar, optimizar y muchas otras funciones. El IDE posee una interfaz de usuario intuitiva con herramientas sencillas que hacen posible trabajar de una forma más rápida y eficiente. El software *Code Composer Studio* contiene las ventajas del marco de trabajo del software Eclipse y las funciones avanzadas de depuración integrada de TI, por consiguiente, el resultado es un entorno de desarrollo con muchas funciones para desarrolladores integrados (Instruments, 2021).

3.1.2 Subsistema del convertidor Buck

El convertidor Buck se encarga de transformar los 36 [V] provenientes de los paneles solares a 12 [V] correspondientes al voltaje necesario para cargar la batería de plomo ácido. Los elementos utilizados para la elaboración del convertidor Buck se describen en la tabla 3.2.

La integración de los componentes mencionados anteriormente da como resultado la PCB mostrada en la figura 46. El driver UCC5320 es el encargado de enviar los pulsos de activación/desactivación a cada mosfet, este driver necesita voltajes de +15 [V] y -5 [V] para su funcionamiento es por eso que se añadieron fuentes aisladas que conviertan el voltaje de entrada en el requerido para este driver.

Tabla 3.2 Elementos del convertidor Buck

Código	Descripción	Valor
PEME1-S5-S5-S	Convertidor DC/DC	5 [V] 1 [W]
PEME1-S5-S15-S	Convertidor DC/DC	15 [V] 1 [W]
CRM1206AJW-222ELF	Resistencia	2.2[K Ω] 5% ½ [W]
ESR18EZPJ221	Resistencia SMD	220 [Ω] 5% ½ [W]
CL21B224KBFNFNE	Capacitor cerámico	0.22 [μF] 50 [V]
GCD21BR71H104KA01L	Capacitor cerámico	0.1[μF] 50 [V]
ERJ-P06J510V	Resistencia SMD	51 [Ω] 5% ½ [W]
ERJ-14YJ100U	Resistencia SMD	10 [Ω] 5% ½ [W]
GRM21BC81H475KE11L	Capacitor cerámico	4.7 [μF] 50 [V]
GRM21BR6YA106ME43L	Capacitor cerámico	10 [μF] 50 [V]
STP30N10F7	mosfet N-CH	100 [V] 32 [A]
UCC5320	Driver	2 [A] / 2 [A]

Fuente: (Autor).

El mosfet de potencia canal N utilizado para la implementación del cargador de batería, posee una resistencia muy baja ya que utiliza tecnología STripFET que permite reducir la capacitancia interna logrando así una conmutación más rápida y eficiente. Las características del mosfet SPT30N10F7 se describen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características del mosfet SPT30N10F7

Código	Descripción	Valor
V_{DS}	Voltaje Drain-Source	100 [V]
V_{GS}	Voltaje Gate-Source	± 20 [V]
I_D	Corriente Drain (continua) para $T_C = 25^\circ C$	32 [A]
I_D	Corriente Drain (continua) para $T_C = 100^\circ C$	23 [A]
P_{TOT}	Potencia total para $T_C = 25^\circ C$	50 [W]
T_J	Rango de temperatura de funcionamiento	-55 hasta 175 $^\circ C$
$t_{d(on)}$	Retardo al tiempo de encendido	12 [ns]
$t_{d(off)}$	Retardo al tiempo de apagado	22 [ns]
t_f	Falla tiempo	17.5 [ns]
t_f	Tiempo falla	5.6 [ns]

Fuente: (Instruments, 2022)

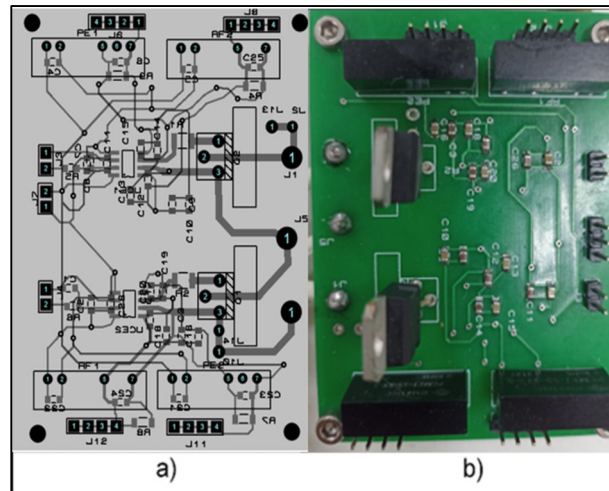


Fig. 43. a) Circuito electrónico, b) Placa PCB.
Fuente: (Autor).

- **Sensor de voltaje**

Para lograr un buen lazo de control se requiere que las señales medidas por los sensores a la salida del convertidor tengan poco ruido, por lo tanto, en el caso del voltaje se realizaron dos sensores de voltaje: el primero con rango de medición de 0-12 [V] que mide el voltaje en la batería y el segundo con un rango de 0-36 [V] que mide el voltaje proveniente de los paneles solares.

El valor de cada componente se muestra en la tabla 3.4 y es idéntico en ambos sensores la diferencia radica en el valor de R1, debido a que de esta resistencia depende el valor máximo que podrá leer el sensor. Para obtener el valor de R1 para cada caso se procedió a realizar el cálculo por división de voltaje ya que se diseñó para un voltaje máximo que lea el optoacoplador de 0.2 [V], para evitar sobrevoltajes que puedan dañar el amplificador. Además, es necesario realizar pruebas que permitan encontrar una ecuación lineal, la misma que será ingresada a la lectura del ADC.

El elemento primordial para la lectura análoga de señales de voltaje es el amplificador aislado (Optoacoplador ACPL-790B) que fue diseñado en este caso para la detección de voltaje en convertidores electrónicos de potencia.

Tabla 3.4 Elementos para sensor de voltaje

Elemento	Valor
Capacitor C1	22 [ηF]
Capacitores C2, C5	100 [ηF]
Capacitores C3, C4	10 [μF]
Capacitor C6	4.7 [ηF]
Capacitores C7, C8	0.1 [μF]
Resistencia R2	220 [Ω]
Resistencias R3, R4	10 [Ω]
Resistencia R5	2 [k Ω]
Regulador de voltaje	7805
Optoacoplador	ACPL-790B

Fuente: (Instruments, 2022)

Sin embargo, contiene un gran campo de aplicaciones como: detección de corriente y voltaje, inversores solares o de turbinas eólicas, adquisición de datos en procesos de control industrial, entre otros (Instruments, 2022). Las características de ACPL-790B se muestran en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Características del optoacoplador ACPL-790B

Descripción	Valor
Ancho de banda	200 [kHz]
Dinámica de rendimiento	62 [dB]
Rango de suministro para el lado de salida	3 a 5.5 [V]
Tiempo de respuesta	1.6 [μs]
Voltaje máximo de lectura	0.2 [V]
Impedancia interna equivalente	27 [k Ω]
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 a 105 [$^{\circ}C$]
Voltaje de compensación.	0.4 [mV]
Precisión de ganancia	± 0.5 %

Fuente: (Instruments, 2022)

A continuación, se detalla los valores experimentales para el sensor de 12 [V] (ver tabla 3.6), en donde R1 tiene un valor de 22 [k Ω], dando como resultado la ecuación lineal mostrada en la figura 47.

Tabla 3.6 Valores de entrada y salida del sensor de 12 [V]

Entrada	Salida
1,374	3,57
1,415	4,57
1,435	5,07
1,475	6,07
1,531	7,47
1,595	9,07
1,719	12,15

Fuente: (Autor).

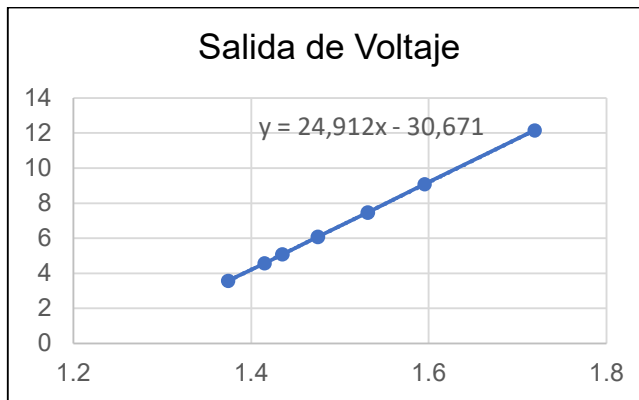


Fig. 44. Ecuación lineal del sensor de voltaje de 20 [V].

Fuente: (Autor).

Para el sensor de 36 [V] R1 tiene un valor de 54 [KΩ], los valores de entrada y salida se muestran en la tabla 3.7, por otro lado, la gráfica de la ecuación lineal se representa en la figura 48.

Tabla 3.7 Valores de entrada y salida del sensor de 36 [V]

Entrada	Salida
1,237	0
1,273	2
1,308	4
1,342	6
1,377	8
1,415	10
1,447	12
1,482	14
1,516	16
1,55	18
1,586	20
1,62	22
1,656	24
1,689	26
1,724	28
1,76	30

Fuente: (Instruments, 2022)

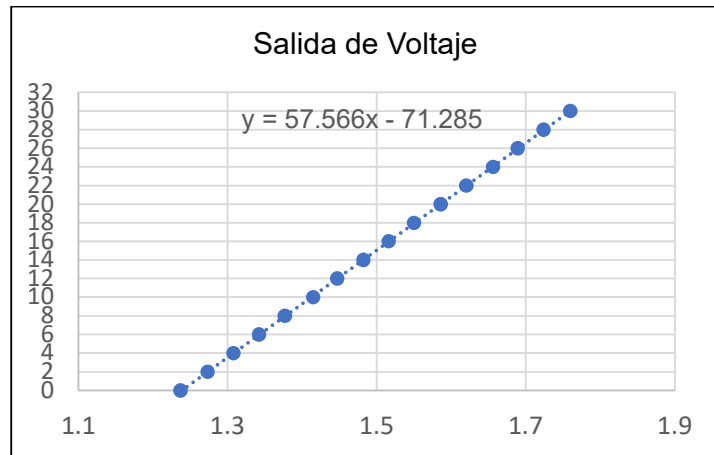


Fig. 45. Ecuación lineal del sensor de 30 [V].
Fuente: (Autor).

En la figura 49 se aprecia el esquemático realizado en software y luego las PCB de los sensores de voltaje con todos sus componentes.

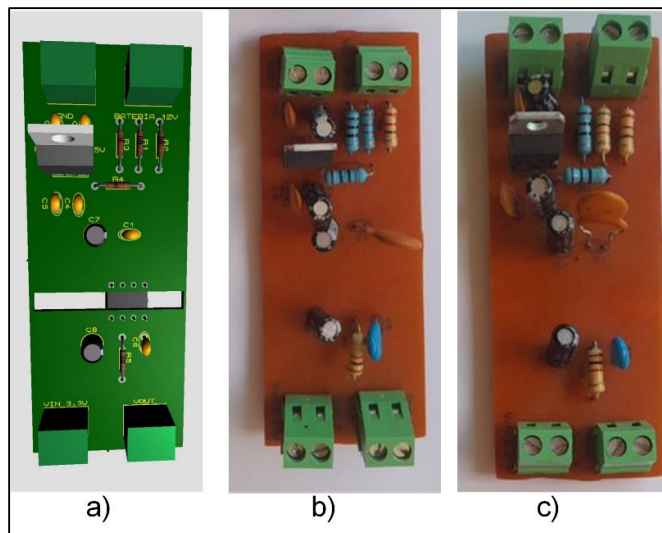


Fig. 46. a) Esquema 3D de sensor de voltaje, b) Sensor 12 [V], c) Sensor 36 [V].
Fuente: (Autor).

- **Sensor de corriente**

Al igual que en el voltaje se necesitan dos sensores de corriente para medir a la entrada del convertidor y en el inductor, en este caso se empleó el módulo ACS712ELCTR-20A-T mostrado en la figura 50. Las características y especificaciones de trabajo se detallan en (Allegro, 2021).

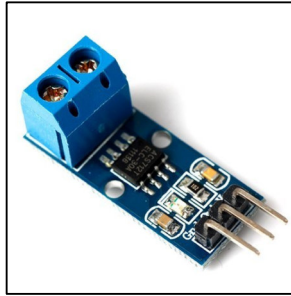


Fig. 50. Sensor de corriente ACS712 20A.
Fuente: (Allegro, 2021).

Para determinar la ecuación lineal que ingresará al pin ADC se realizaron pruebas de medición en el sensor variando el voltaje de entrada (ver tabla 3.8). Finalmente, la ecuación obtenida se observa en la figura 51.

Tabla 3.8 Valores de entrada y salida del sensor de corriente

Entrada	Salida
1,587	0,02
1,597	0,17
1,607	0,32
1,617	0,47
1,627	0,62
1,637	0,77
1,647	0,92
1,657	1,07
1,667	1,22

Fuente: (Autor).

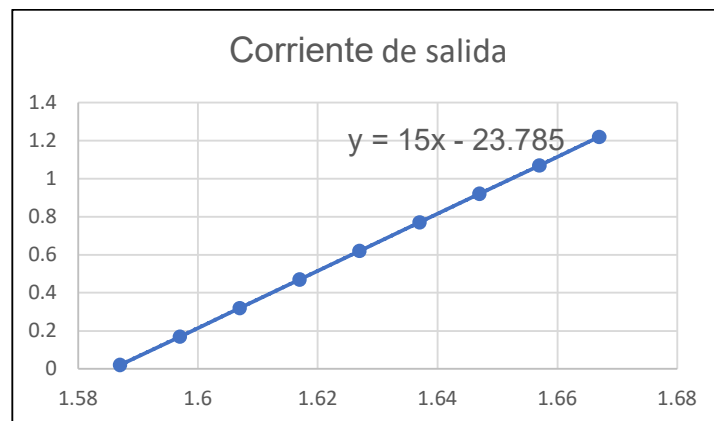


Fig. 51. Ecuación lineal del sensor de corriente.
Fuente: (Autor).

- **Filtrado de ruido en sensores de voltaje y corriente**

Por lo general, en la medición de señales analógicas los sensores suelen estar sujetos a ruido. Para eliminar este ruido existen varias técnicas, sin embargo, un filtro fácil de implementar y utilizado para este tipo de sensores es el filtro de media móvil exponencial (EMA, Exponential Moving Average) (Arduino, 2022). Este filtro pasa bajo está definido por la siguiente ecuación:

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_{n-1} \quad (49)$$

Donde: A_n es el valor filtrado, α es un factor que va de 0 a 1, A_{n-1} representa al valor filtrado anterior y M es el valor muestreado de la señal a filtrar.

La ecuación que representa a este filtro se implementa en las lecturas de los sensores de voltaje y corriente en el software *Code Composer* (ver figura 52) que posteriormente será cargado a la placa de LAUNCHXL-F28379D. El código implementado sobre la placa se presenta en la sección de anexos.

```
//voltaje load
vload_sinfiltro=(((float)(AdcaResultRegs.ADCRESULT1)*3.1)*0.0002442)*24.912)-30.671;
vload_confiltro=((0.1*vload_sinfiltro)+((1.0-0.1)*vload_confiltro));
vload_redondeado=((round)(vload_confiltro*10.0));
vload_flotante=((float)(vload_redondeado))*0.1;
//corriente load
```

Fig. 52. Implementación de filtro para lectura de voltaje.
Fuente: (Autor).

- **Diseño del inductor**

Según (Sánchez, 2009) para diseñar un inductor se debe primero calcular el calibre del conductor, esto es posible aplicando la ecuación (51).

$$s = \frac{I}{D} = \frac{7 [A]}{2.5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]} = 2.8 mm^2 \quad (50)$$

Donde, I es la corriente máxima soportada por el inductor y D es la densidad de corriente eléctrica para pequeños transformadores va entre valores de 2.5 – 3 $\left[\frac{A}{mm^2} \right]$. Al realizarse dos bobinados en paralelo el diámetro se divide a la mitad

dando como resultado un diámetro de 1.4mm^2 . Por lo tanto, el cable utilizado para el bobinado es el calibre 14 AWG (*American Wire Gauge*).

Determinado el calibre del conductor se procedió a diseñar el inductor de forma manual, enrollando el alambre hasta obtener la inductancia requerida en este caso $L = 380 [\mu\text{H}]$, el resultado se puede ver en la figura 53.

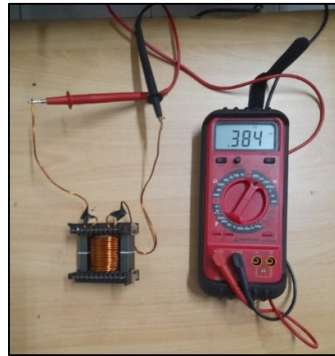


Fig. 53. Inductor del convertidor Buck.
Fuente: (Autor).

3.2 Resultados experimentales

El diagrama de conexión electrónico del prototipo con todos sus elementos se muestra en la figura 54.

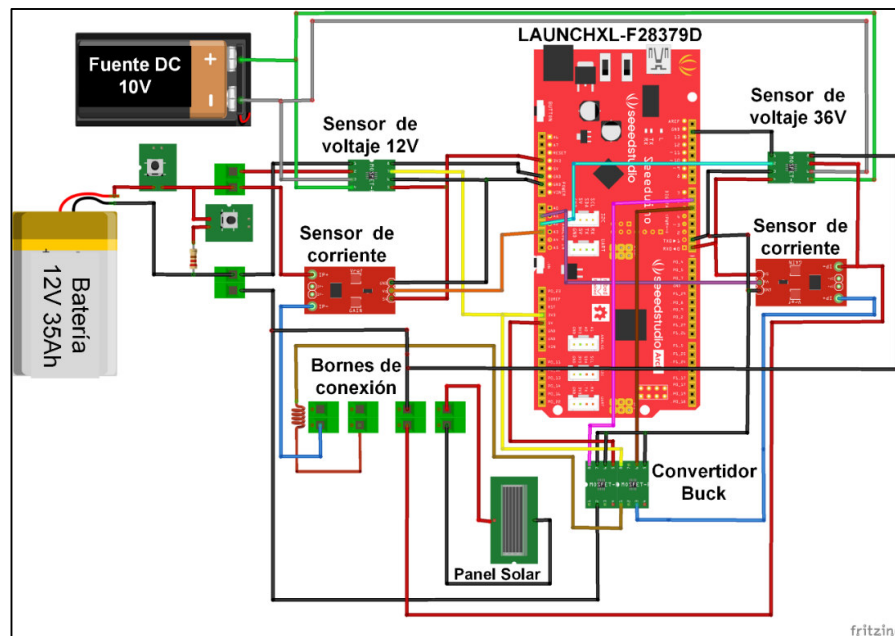


Fig. 47. Diagrama de conexión electrónico.
Fuente: (Autor).

La figura 55 muestra el prototipo implementado con los componentes reales, y listo para realizar las pruebas de control que validen la investigación realizada.



Fig. 55. Prototipo de un cargador de baterías.
Fuente: (Autor).

3.2.1 Tiempo muerto

Establecer el tiempo muerto al momento de activar y desactivar cada mosfet es indispensable para que el convertidor funcione adecuadamente, ya que calcular mal el tiempo muerto provocaría un cortocircuito y el daño definitivo de sus componentes. Por lo tanto, el tiempo muerto se calcula tomando en cuenta la programación del PWM en el microcontrolador LAUNCHXL-F28379D. En la tabla 3.9 se especifica los tiempos de retardo proporcionados por la hoja de datos del microcontrolador LAUNCHXL-F28379D.

Tabla 3.9 Tiempos de conmutación del microcontrolador LAUNCHXL-F28379D

Valor de tiempo muerto (Entrada y Salida).	Registro de retardo de reloj PWM 1
1	0.01 [<i>us</i>]
10	0.1 [<i>us</i>]
100	1 [<i>us</i>]
400	4 [<i>us</i>]
600	6 [<i>us</i>]
800	8 [<i>us</i>]
1000	10 [<i>us</i>]

Fuente: (STMicroelectronics, 2022).

El valor de tiempo muerto de los mosfet utilizado en este trabajo es de $0.1 \text{ [}\mu\text{s]}$, con la finalidad para asegurar el correcto funcionamiento cuando se realice el proceso de conmutación y evitar cortocircuitos o daños en los componentes del circuito.

Establecido el tiempo de muerto se procede a realizar la activación y desactivación de los mosfet mediante *Code Composer Studio*, en la figura 56 se observan las señales PWM que activan/desactivan los mosfet del convertidor Buck, el voltaje de salida dependerá del *duty cycle* que entregue el control de corriente.

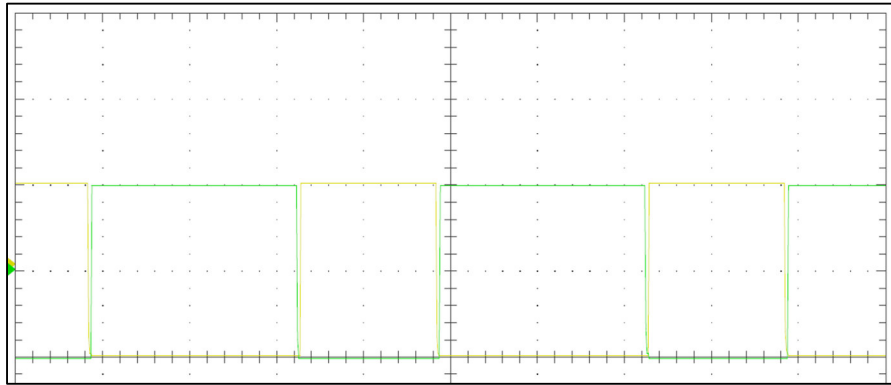


Fig. 56. Conmutación de los mosfet del convertidor Buck.
Fuente: (Autor).

3.2.2 Control de corriente

La figura 57 muestra el desempeño del lazo de control PI de corriente obtenida mediante simulación ($i_{simulacion}$) y la corriente de salida del prototipo implementado (i_{real}). En el primer escenario de prueba se plantea una referencia inicial de 2.3 [A] y a los 0.0167 [s] se aumenta la referencia de corriente a 3 [A] . Se puede apreciar que la señal de i_{real} sigue la referencia de manera correcta y a diferencia de $i_{simulacion}$ posee un pequeño sobre impulso y tarda más tiempo en estabilizarse, no obstante, el valor de rizado cumple con los requerimientos de diseño y es menor que el de simulación.

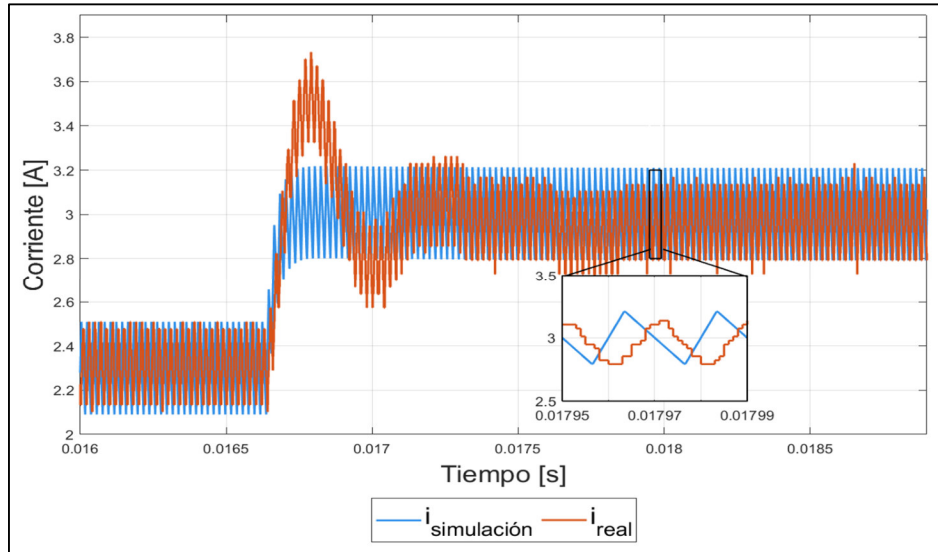


Fig. 48. Comparación control de corriente real vs simulación 2.3 [A] a 3[A].
Fuente: (Autor).

Se puede apreciar también que la frecuencia de las señales tanto en simulación como en el prototipo cumple con lo establecido es decir 50 [kHz] o un periodo de 20 [μ s].

En el segundo escenario la corriente de referencia empieza en 2.3 [A] y se reduce a 1.6 [A] luego de 0.18 [s]. El comportamiento de i_{real} es similar al de $i_{simulacion}$, el control PI de corriente rastrea de manera efectiva al cambio de referencia y la forma de onda de ambas señales es semejante. Al igual que en el caso anterior difieren en el tiempo de estabilización y valor de rizado (ver figura 58).

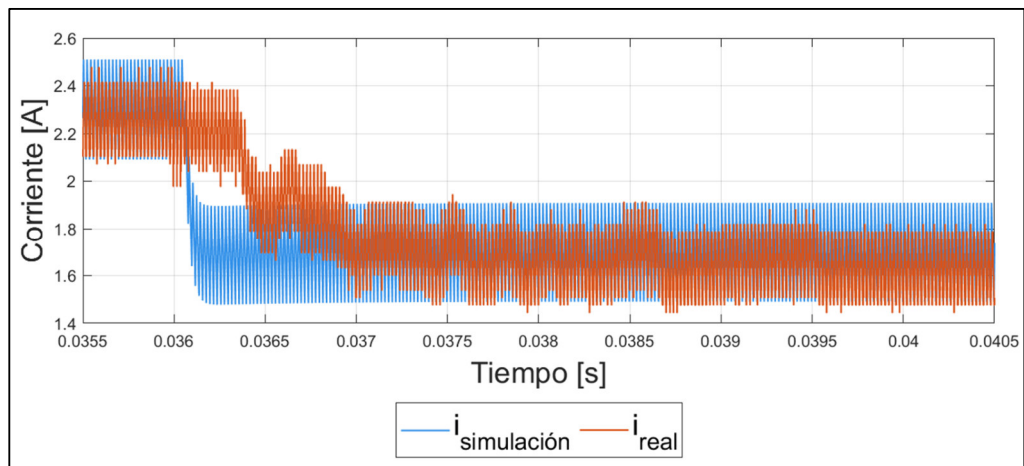


Fig. 49. Control de corriente simulación vs real 2.3 [A] a 1.6 [A].
Fuente: (Autor).

3.2.3 Control de voltaje

En el control de voltaje se puede apreciar que existe demasiado ruido especialmente en la señal de voltaje, impidiendo así, que se pueda identificar el cambio en la referencia. Por lo tanto, se procedió a realizar el promediado de las señales originales. Las figuras 59 y 60 presentan las formas de onda de las señales originales y las señales promediadas de voltaje y corriente, la obtención de las señales promediadas se realizó mediante el software de *Matlab*.

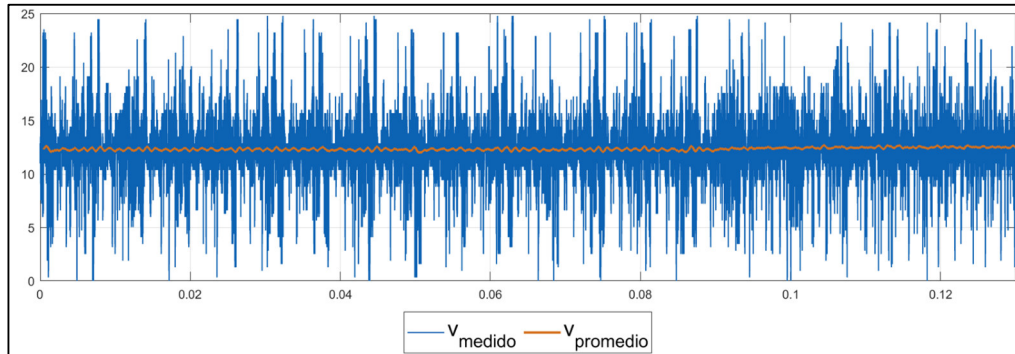


Fig. 50. Promediado de la señal de voltaje.
Fuente: (Autor).

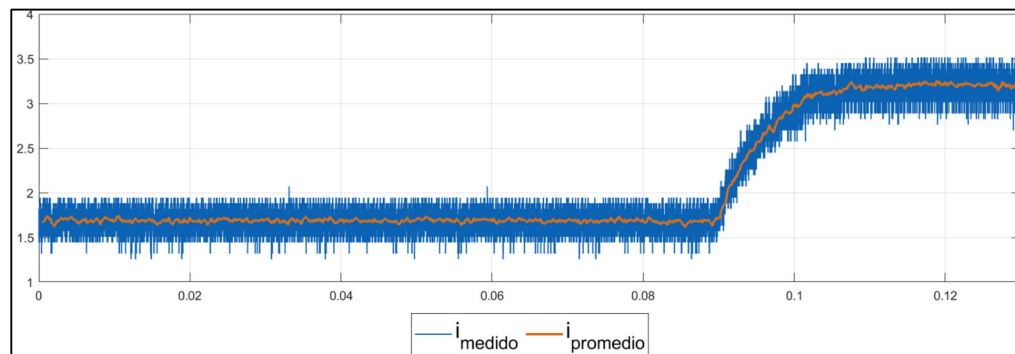


Fig. 60. Promediado de la señal de corriente.
Fuente: (Autor).

El filtro que se utilizó en las señales es conocido como promedio móvil, que se emplea para el análisis de un grupo de series de datos ordenados, donde su principal función es eliminar fluctuaciones transitorias, logrando así resaltar cambios que se produzcan. Este promedio es recalculado continuamente, utilizando para cada cálculo un subconjunto de datos en los que cada nuevo dato es remplazado al más antiguo o se agrega al subconjunto. (Peña, 1982). Este filtro promedio móvil pasa bajo está definido por la siguiente ecuación

$$\widehat{X}_{(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t X_{(t)} dt \quad (51)$$

$$\widehat{X}_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{m=n-N}^n x(n) \quad (52)$$

Para validar el desempeño del control de voltaje inicialmente se coloca una referencia de 12.3 [V] y después de un tiempo se aumenta a 12.5 [V]. En la figura 61, se puede ver como el valor de corriente incrementa lo necesario para que el voltaje se también incremente y alcance el valor de referencia establecido. Como se explicó en la sección anterior el control de voltaje es lento en comparación del control de corriente y depende de la inyección de corriente que realice el sistema.

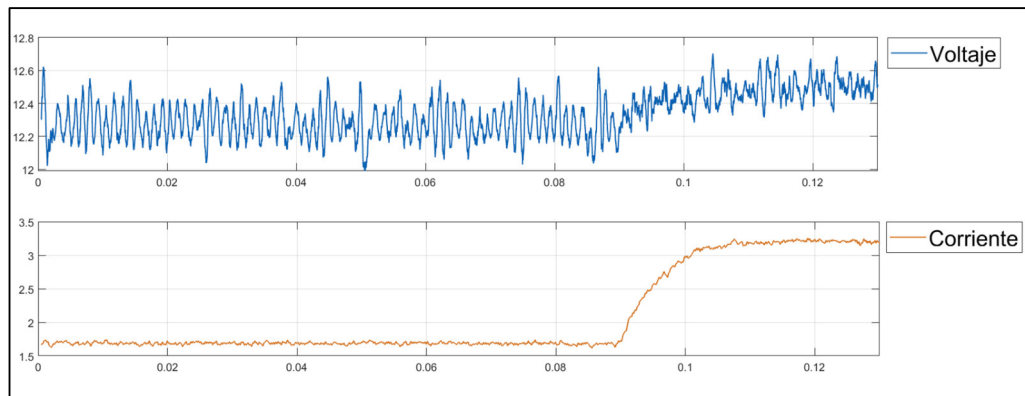


Fig. 61. Control de voltaje del prototipo.
Fuente: (Autor).

El lazo de control de voltaje empieza su funcionamiento cuando la batería deja de requerir corriente, es decir, cuando la batería llega a la etapa de flotación, la última etapa de carga, cuando el voltaje llega al valor establecido y la corriente disminuye por completo.

3.2.4 Algoritmo P&O

Con respecto al algoritmo MPPT se implementó el algoritmo P&O de corriente, para esta prueba se estableció una saturación de 3 [A], como se observa en la figura 62, el panel fotovoltaico provee los 3 [A] hasta que se produce un cambio en la irradiancia. Cuando existe una menor irradiancia la corriente producida por el panel tiende a bajar, no obstante, cuando la irradiancia vuelva a los valores nominales proveerá la corriente de saturación establecida como referencia en el algoritmo desarrollado.

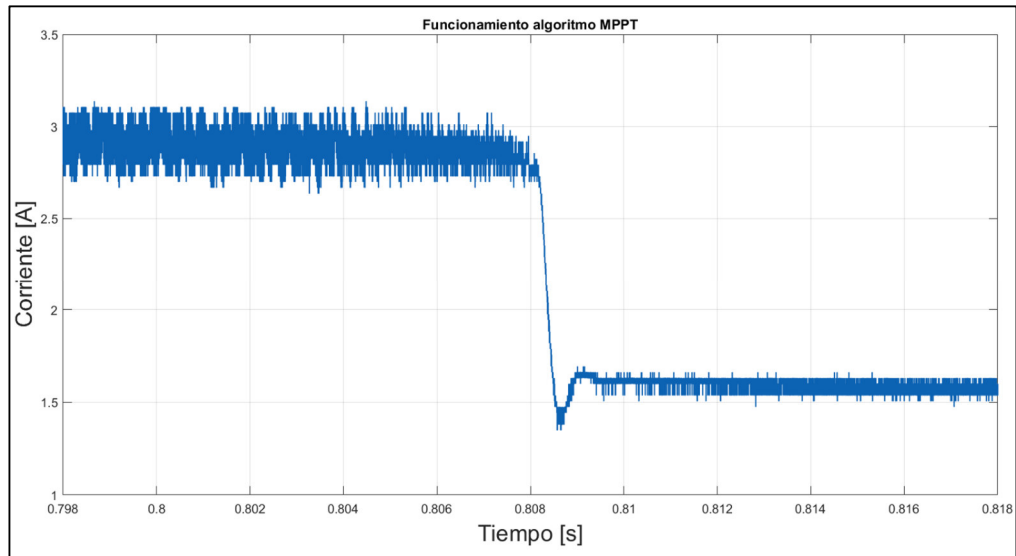


Fig. 62. Corriente en el panel fotovoltaico.
Fuente: (Autor).

Este trabajo a diferencia de las investigaciones analizadas en el marco teórico tiene un enfoque práctico, ya que los resultados mostrados no se limitan a simulaciones, por el contrario, se implementó en un sistema real. El prototipo realizado permite contrastar el desempeño que tienen los controladores cuando se implementan en la vida real, representando un aporte importante en el ámbito académico y de investigación.

Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un prototipo de cargador de baterías compuesto por dos paneles fotovoltaicos con capacidad de 50 [W], una batería de plomo ácido de 12 [V] y un convertidor reductor (*Buck*) que internamente posee controladores del tipo Proporcional-Integral para voltaje y corriente. Finalmente, se implementó un algoritmo MPPT del tipo perturbar & observar (P&O) que basa su control en función de la corriente de referencia.

Se analizó las principales características y disponibilidad en el mercado de los componentes necesarios para un cargador de baterías. Como resultado de este análisis se optó por el uso de dos paneles solares monocristalinos de 18 [V] y 50 [W] y un convertidor Buck que entrega 12 [V] a una batería de plomo-ácido.

El diseño de los controladores PI de voltaje y corriente se realizó mediante el análisis de Bode a partir, del modelo matemático obtenido. El resultado del control de corriente en el prototipo real presenta excelentes resultados tomando en cuenta que en el circuito real intervienen más componentes de control y el desempeño se ve afectado por otras variables como pérdidas de conmutación, conducción y procesamiento, presenta un sobre impulso, los mosfet trabajan a la frecuencia deseada y le tiempo de estabilización ante un cambio en la referencia es mínimo.

El control de voltaje es mucho más lento con respecto al de corriente, y dependerá de la cantidad de corriente que inyecte el sistema. Este control rastrea de manera efectiva el cambio de referencia, la señal es sobre-amortiguada y cumple con los requerimientos de rizado establecidos en el diseño del controlador.

Recomendaciones

Para próximos estudios se podría implementar un cargador de baterías con algoritmo MPPT y convertidor Buck-Boost, con la finalidad de que el sistema tenga la capacidad reducir o aumentar el voltaje, dependiendo del voltaje de entrada otorgado por módulos fotovoltaicos.

Referencias

- Aguirre, G. Y., Marteniuk, J. A., & Botterón, F. (2014). Implementación de estrategias de MPPT para sistemas de generación fotovoltaicos en un convertidor boost CC-CC. *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 352–357. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2014.6868519>
- Aguirre, J., Agundis, A., Segura, E., & Nolasco, J. (2018). Control Difuso para un Convertidor CD-CD Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos en los Modos MPPT y CV. *Pistas Educativas*, 39(128).
- Álamos, A. (2007). *Análisis de Pérdidas del Convertidor Buck Sincrono para Aplicaciones Móviles*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, M. H., Shafiullah, M., & Malik, M. Z. (2020). Investigation of MPPT Techniques under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition-A Retrospection. *IEEE Access*, 8, 127368–127392. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007710>
- Allegro, M. (2021). ACS712. <https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712>
- Alonso, M. (2018). Energía Solar Fotovoltaica [CIEMAT]. In *Ciemat* (Vol. 1, Issue 1). http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf
- Arduino. (2022). *Exponential Moving Average*. file:///D:/Documentos/Tesis/DIY Mechatronics/Tesis Calderon/Bibliografia/Capitulo 3/filtro.mhtml
- Argüello, D. C., Pozo, M., & Gallardo, C. (2020). Análisis del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia Global (GMPPT) con Perfiles de Sombras para una Granja Fotovoltaica. *Journal Ideas*, 75–90.
- Ávila, E. P. (2017). *Diseño y simulación de un control en cascada(PI-Deslizante), para convertidores DC-DC presentes en una planta de generación eléctrica*. 40–50.
- Bright, R. (2008). Selecting cable strain reliefs. *Electronic Products (Garden City, New York)*, 50(3).
- Chinna Kullay Reddy, D., Satyanarayana, S., & Ganesh, V. (2018). Design of hybrid solar wind energy system in a microgrid with MPPT techniques. *International Journal of*

Electrical and Computer Engineering, 8(2), 730–740.
<https://doi.org/10.11591/ijece.v8i2.pp730-740>

Colmenar, A., & Borge, D. (2016). *Generacion distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. UNED - Universidad Nacional de Educacion a Distancia.
<https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/48819>

CONELEC. (2008). Atlas solar del ecuador. In *Conelec* (pp. 1–51).
http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf

Creus, A. (2014). *Energias renovables (2a. ed.)*. Cano Pina.
<https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43075>

Cuestas, S., & Lebus, L. (2012). *Diseño de un seguidor de punto máximo de potencia*. 37–42.

Días, T., & Carmona, G. (2019). *Componentes de una instalación solar fotovoltaica 1*.

Díaz, P. (2003). *Sistemas Fotovoltaicos Autónomos : Aplicación a La*. Universidad Politécnica de Madrid.

Dileep, D. K., & Bharath, K. R. (2018). Conditional battery charging in solar PV based system. *2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2018 - Proceedings*, 953–958.
<https://doi.org/10.1109/RTEICT42901.2018.9012406>

Diponegoro, U. (2020). Model Matematis Buck Converter / Mathematical Modelling of Buck Converter. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 1(February), 1226–1229.

Domínguez, D. (2014). *Autoconsumo en los sistemas fotovoltaicos*. Universidad Carlos III de Madrid.

Donnet, B., Baynat, B., & Friedman, T. (2010). Improving retouched Bloom filter for trading off selected false positives against false negatives. In *Computer Networks* (Vol. 54, Issue 18). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.07.003>

Echeverría, N., Judewicz, M., Murcia, G., Strack, J., & González, S. (2014). Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental con Doble Cota. *Aadeca*, September, 9.
<https://doi.org/10.13140/2.1.2604.6720>

- EnergySage. (2021). Environmental benefits of solar. *6 de Junio*, 2.
- Enrique, J. (2011). *Diseño, modelado y optimización de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos mediante convertidores CC/CC*. Universidad de Huelva.
- Espejo, C. (2004). La energía eólica en España. *Investigaciones Geográficas*, 35(35), 45. <https://doi.org/10.14198/ingeo2004.35.03>
- Espinoza, D., Campos, D., De-Angelo, C., Compéan, I., Pecina, J., & Valdez, A. (2013). Control por Linealización Entrada-Salida para un Seguidor del Punto de Máxima Potencia en Sistemas Fotovoltaicos. *Congreso Nacional de Control Automático*, 674–680.
- Flores, J. L., Sanjuan, J. J. V., & Mendoza, E. Y. (2014). *Control de corriente por modos deslizantes del convertidor cd/cd Buck-Boost*. February, 1–6.
- Franklin, E. (2018). *Solar Photovoltaic (PV) System Components*. May, 1–8.
- Gómez Ramírez, J., Murcia Murcia, J. D., & Cabeza Rojas, I. (2017). La Energía Solar Fotovoltaica en Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas [Universidad Santo Tomás]. In *Universidad Santo Tomás*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/10312#.Xpdvj3oYcAl.mendeley>
- Gonzalez, J. (2015). *Energías renovables*. Editorial Reverte. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/46748>
- González, J. A., & Cárdenas, X. A. (2016). *Análisis e implementación de un sistema electrónico para alcanzar el punto máximo de potencia en los paneles solares de la Univerisad Politécnica Salesiana* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12243>
- Gonzalez, V., & Alzate, A. (2010). *Diseño estático de un convertidor DC / DC reductor-elevador bidireccional*. 7–14.
- Guiza, L., Rodas, J. C., & Cifuentes, J. A. (2019). *Energías renovables no convencionales y cambio climático: un analisis para Colombia*. Editorial Universidad del Rosario. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/124382>
- Hussain, I., Zohaib, M., & Babaei, E. (2019). Modeling, Simulation of Buck Boost Converter

with MPPT and Control of Battery Charging Application. *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932883>

Instruments, T. (2022). *Launch-F28379D Overview*. https://octopart.com/launchxl-f28379d-texas+instruments-75530201?gclid=CjwKCAjw9NeXBhAMEiwAbaY4locSriLo_qIDBWqSxkd7eNICDFjVA4lOF_5nBkysd2vEFuvilNVRARoCy50QAvD_BwE

Intruments, T. (2021). CCSTUDIO IDE, configuration, compiler or debugger | TI.com. In *Ccstudio*. <https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>

Jiménez, I. (2012). Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa. *Disponibile En: Jupiter. Utm. Mx/~ Tesis_dig/11597. Pdf.[Consultado 11 de Noviembre Del 2013]*.

Killi, M., & Samanta, S. (2015). Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5549–5559. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2407854>

MATCH, G. (2021). Photovoltaic System. *04 de Junio*, 2.

MERNNR. (2020). *Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables – Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables*. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>

Muñoz, J. patricio, Rojas, M. V., & Barreto, C. (2018). Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 19, 60–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.06>.

Núñez, M., Correa, J., Herrera, G., Gómez, P., Morón, S., Fonseca, N., Caliz, A., & Banco, E. (2018). Study of Perceptions on Clean and Self-Sustainable Energy. *Ijmsor*, 3(1), 11–15.

Pathak, P. K., & Yadav, A. K. (2019). Design of battery charging circuit through intelligent MPPT using SPV system. *Solar Energy*, 178(December 2018), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.018>

Peña, H. G. (1982). Modelos Autorregresivos Integrados Con Promedio Móvil Y Su Aplicación

A Observaciones De Temperatura Ambiente De La Zona N. Oeste De México. *Ciencias Marinas*, 8(1 SE-Articles), 30–48. <https://doi.org/10.7773/cm.v8i1.383>

Premkumar, K., Vishnupriya, M., Thamizhselvan, T., Sanjeevikumar, P., & Manikandan, B. V. (2021). PSO optimized PI controlled DC-DC Buck converter-based proton-exchange membrane fuel cell emulator for testing of MPPT algorithm and battery charger controller. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(2), 1–23. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12754>

Ramesh, N., & Vanitha, V. (2018). Solar Powered Battery Charging System with Maximum Power Point Tracking. *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2018, Cccv*, 364–368. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8442362>

Ramos, C. (2017a). Analisis de un convertidor DC/DC destinado al almacenamiento hibrido de energia [Universidad Politécnica de Madrid]. In *Industriales ETSH UPM. Acondicionamiento de un inversor, mediante una propuesta de sistema audiovisual auxiliar para comunidades indígenas*.

Ramos, C. (2017b). *Análisis de un convertidor DC/DC destinado al almacenamiento híbrido de energía*. 93.

Reforma, P. D. E. L. a, Piso, C., Garza, S. a N. N. D. E. L. O. S., Leon, N., & León, N. (2013). *Universidad autonoma de nuevo leon. li*, 4682.

Revelo Vaca, D., Ordóñez, F., & Villada, J. (2019). *Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables*. MERNNR Ecuador. https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf

Sánchez, J. (2009). Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro. *Scientia et Technica*, 41, 19–24.

Singh, H. K., & Kumar, N. (2020). Current controlled charging scheme for off board electric vehicle batteries from solar PV array. *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2020*, 935–940. <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9071160>

Siwakoti, Y. P., Forouzesh, M., & Ha Pham, N. (2018). Power electronics converters-an overview. In *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Elsevier Inc.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805245-7.00001-9>

- Solar Electric Supply, I. (2020). Solar Electric Supply. *Solar Charge Controllers*, 2.
- STMicroelectronics. (2022). *STP30N10F7*. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/932515/STMICROELECTRONICS/STP30N10F7.html>
- Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2008). *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage* (McGraw Hill (ed.); 3rd. ed.).
- SUNRUN. (2019). Top 10 Reasons Why Home Solar Really Pays Off. 3 de Agosto, 1.
- The Infinite Power of Texas. (2021). *Learning About Photovoltaic Systems*. 1–4.
- Tobajas, C. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. Cano Pina. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/45047>
- Torres, F., David, Á., Jaime, E. C., Téllez, J. D., Ramírez, S. G., & Pérez, J. P. (2019). *Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost*. 8(2), 65–80.
- Torres, L. R., Magaldi, G., Torres, L. R., Magaldi, G. L., Catuogno, G. R., & Garcia, G. O. (2017). *Implementación de Control Difuso para Optimización de Energía en Sistema Implementación de Control Difuso para Optimización de Energía en Sistema Fotovoltaico*. September.
- Valle Rodríguez, J. (2014). *Análisis y diseño de un controlador para un convertidor dc-dc tipo SEPIC*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Venkatramanan, D., & John, V. (2019). Dynamic Modeling and Analysis of Buck Converter Based Solar PV Charge Controller for Improved MPPT Performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6234–6246. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2937856>
- Vergara, M. (2012). Artículo: Tecnología de Baterías. *Universidad Técnica Federico Santa María - Departamento de Electrónica*, 1–2.
- Word Energy Council. (2016). Variable Renewables Integration in Electricity Systems: How to Get It Right. *Renewables Integration*.
- Yang, J., Zhang, W., Al-Naemi, F., & Chen, X. (2013). Analysis and Modeling of Buck Converter in Discontinuous-Output-Inductor-Current Mode Operation. *Energy and Power*

Engineering, 05(04), 850–856. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54b163>

Zerouali, M., El Ougli, A., Tidhaf, B., & Zrouri, H. (2020). Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions. *2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science, ICECOCS 2020*, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICECOCS50124.2020.9314531>

Anexos

A. Código Code Composer

```
/*
 * Peripheral_Setup.h
 *
 * Author: Anthony
 */

#ifndef PERIPHERAL_SETUP_H_
#define PERIPHERAL_SETUP_H_
#include "F28x_Project.h"

void Setup_GPIO(void);
void ConfigureADC(void);
void SetupADCEpwm(void);
void ConfigureEpwm1(void);

#endif /* PERIPHERAL_SETUP_H_ */
/*
 * Peripheral_Setup.c
 *
 */
#include "Peripheral_Setup.h"
#define M_PI 3.14159265358979323846 /* pi */
#define tope 500//50kHz
#define hdiv 0
#define div 0

void Setup_GPIO(void)
{
    EALLOW;
    //se configura el pin 31 y 34 con GPIO
    GpioCtrlRegs.GPAGMUX2.bit.GPIO31 = 0;//GPIO led configuro que se comporte
como GPIO0 (fijarse en la tabla de gpiomux)
```

```

GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO31 = 0;

GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO4 = 0;//GPIO led configuro que se comporte como
GPI (fijarse en la tabla de gpiomux)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0;// SE CONFIGURA CON GPIO

GpioCtrlRegs.GPBGMUX1.bit.GPIO34 = 0;
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO34 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO31 = 1;//solo sirve para entradas la resistencia del
PUI ald (0 es activo 1 es desactivo)
GpioCtrlRegs.GPBPUD.bit.GPIO34 = 1;
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO4 = 1;

GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO31 = 1;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO4 = 1;
GpioCtrlRegs.GPBCSEL1.bit.GPIO34 = GPIO_MUX_CPU1;
GpioCtrlRegs.GPACSEL4.bit.GPIO31 = GPIO_MUX_CPU1;
GpioCtrlRegs.GPACSEL1.bit.GPIO4 = GPIO_MUX_CPU1;

//PWM 1A e 1B
//se configura el pwm A
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO0 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1;//se configura como pwm
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO0 = 1;//desabilito resistencia de pulup

//se configura el pwm B
GpioCtrlRegs.GPAGMUX1.bit.GPIO1 = 0;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 1;
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO1 = 1;
EDIS;
}
void ConfigureADC(void)
{
EALLOW;
CpuSysRegs.PCLKCR13.bit.ADC_A = 1; //ADC_A Clock Enable bit

```

```

    CpuSysRegs.PCLKCR13.bit.ADC_B = 1;
    //Si desea trabajar con los demas ADC se debe activarlos tambien.

    AdcaRegs.ADCCTL2.bit.PRESCALE = 0; //set ADCCLK divider to /4
    AdcSetMode(ADC_ADCA, ADC_RESOLUTION_12BIT,
ADC_SIGNALMODE_SINGLE);

    //Activación de pulsos canal A
    AdcaRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1;
    AdcaRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDNZ = 1;
    AdcbRegs.ADCCTL2.bit.PRESCALE = 0; //set ADCCLK divider to /4
    AdcSetMode(ADC_ADCB, ADC_RESOLUTION_12BIT,
ADC_SIGNALMODE_SINGLE);
    AdcbRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1;
    AdcbRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDNZ = 1;
        DELAY_US(1000);
        EDIS;
}
void SetupADCEpwm(void)
{

    Uint16 acqps=14;
    if(ADC_RESOLUTION_12BIT == AdcaRegs.ADCCTL2.bit.RESOLUTION)
    {
        acqps = 14; //75ns
    }
    else //resolution is 16-bit
    {
        acqps = 63; //320ns    10señales de reloj
    }

    if(ADC_RESOLUTION_12BIT == AdcbRegs.ADCCTL2.bit.RESOLUTION)
    {
        acqps = 14; //75ns
    }
    else //resolution is 16-bit

```

```

{
    acqps = 63; //320ns
}
EALLOW;

AdcaRegs.ADCSOC0CTL.bit.CHSEL = 0;
AdcaRegs.ADCSOC0CTL.bit.ACQPS = acqps;
AdcaRegs.ADCSOC0CTL.bit.TRIGSEL =5;
AdcaRegs.ADCSOC1CTL.bit.CHSEL = 1; // bat2
AdcaRegs.ADCSOC1CTL.bit.ACQPS = acqps;
AdcaRegs.ADCSOC1CTL.bit.TRIGSEL = 5; //trigger on ePWM1 SOCA/C
AdcaRegs.ADCSOC2CTL.bit.CHSEL = 2; // bat2
AdcaRegs.ADCSOC2CTL.bit.ACQPS = acqps; //ventana de 75 nano segundos
AdcaRegs.ADCSOC2CTL.bit.TRIGSEL = 5; //trigger on ePWM1 SOCA/C
AdcaRegs.ADCSOC3CTL.bit.CHSEL = 3; // bat2
AdcaRegs.ADCSOC3CTL.bit.ACQPS = acqps; //ventana de 75 nano segundos
AdcaRegs.ADCSOC3CTL.bit.TRIGSEL = 5; //trigger on ePWM1 SOCA/C
AdcaRegs.ADCSOC4CTL.bit.CHSEL = 4; // bat2
AdcaRegs.ADCSOC4CTL.bit.ACQPS = acqps; //ventana de 75 nano segundos
AdcaRegs.ADCSOC4CTL.bit.TRIGSEL = 5; //trigger on ePWM1 SOCA/C
AdcbRegs.ADCSOC2CTL.bit.CHSEL=2 ; // 2
AdcbRegs.ADCSOC2CTL.bit.ACQPS = acqps; //ventana de 75 nano segundos
AdcbRegs.ADCSOC2CTL.bit.TRIGSEL =5; //trigger on ePWM1 SOCA
TRIG_SEL_EPWM1_SOCA
AdcbRegs.ADCSOC3CTL.bit.CHSEL=3 ; // 2
AdcbRegs.ADCSOC3CTL.bit.ACQPS = acqps; //ventana de 75 nano segundos
AdcbRegs.ADCSOC3CTL.bit.TRIGSEL =5; //trigger on ePWM1 SOCA
TRIG_SEL_EPWM1_SOCA
AdcaRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1SEL = 3;
AdcaRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1E = 1; //enable INT1 flag(habilita las
interrupciones)
AdcaRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
AdcbRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1SEL = 3;
AdcbRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1E = 1; //enable INT1 flag(habilita las
interrupciones)
AdcbRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;

```

```

    EDIS;
}
void ConfigureEpwm1(void)
{
    EALLOW;// Habitar la modificacion de registros EPWM
    CpuSysRegs.PCLKCR2.bit.EPWM1 = 1; // Habilita el reloj del EPWM1 A y B
    CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0; // Sincronizacion del EPWM
deshabilitada
    EPwm1Regs.TBPRD = tope; // Se ajusta el alo del PRD
    EPwm1Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0x0000;
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000; // Clear counter(Inicializa el contador en
cero).
    // Setup TBCLK
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div;
    EPwm1Regs.CMPA.bit.CMPA = 50; //se guarda el valor por el que cruza CMPA duty del
25%
    EPwm1Regs.CMPB.bit.CMPB = 50;//duty del 25%
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW; // Load registers every
ZERO
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO_PRD;
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWBMODE = CC_SHADOW; // Load registers every
ZERO
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO_PRD;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;// se enciende la señal
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_CLEAR; // Set PWM2A on Zero
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_SET;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 1;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC ;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;// TODOS ESTE REFERENCIADO A
LA SEÑAL A

```



```

EPwm1Regs.DBRED.bit.DBRED = 10;// RETARDO A LA ENTRADA
EPwm1Regs.DBFED.bit.DBFED = 10;//RETARDO A LA SALIDA 1u =100;10=0.1u;
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1;          // Enable SOC on A group
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = ET_CTR_PRDZERO; // Dispara ADC PAa
triangular.
    EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = ET_1ST;    // Trigger on every event
    CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Sincronizacion del EMWM Habilitada
EDIS;
}
#include "F28x_Project.h"
#include "Peripheral_Setup.h"
#include "math.h"
// Definición de variables globales 459
Uint16 duty=625;// PWM
uint32_t cuenta=0;
float32 v_load=0;
float32 v_panel=0;
float32 i_panel=0;
float32 i_load=0;
Uint16 test1=0;
float32 adc_confiltro=0;
float32 adc_sinfiltro=0;
float32 vload_confiltro=0;
float32 vload_sinfiltro=0;
float32 iload_confiltro=0;
float32 iload_sinfiltro=0;
Uint16 vload_redondeado=0;
float32 vload_flotante=0;
Uint16 iload_redondeado=0;
float32 iload_flotante=0;
//panel vpanel
float32 vpanel_confiltro=0;
float32 vpanel_sinfiltro=0;
Uint16 vpanel_redondeado=0;
float32 vpanel_flotante=0;
Uint16 ipanel_redondeado=0;

```

```

float32 ipanel_flotante=0;
float32 ipanel_confiltro=0;
float32 ipanel_sinfiltro=0;
#define alpha 0.1;
//Variables de la planta
uint32_t k=0;
float32 yk=0; //salida
float32 yk_1=0;//valor anterior
float32 uk=0;//control
float32 ukl=0;
float32 uk_1=0;//valor anterior
float32 gyk[320];
float32 ek=0;
float32 ek_1=0;
//float32 spk=0.3;
float32 ac_sp=0.0;//acondicionamiento poin
uint16 int_sp=0;//eneo
float32 setpoint=0.0;
//control corriente
float32 a0=0.3404;
float32 a1=0.3351;
//mppt
float32 spkmax=2.8;
float32 spkmin=0;
float32 spkinit=1.0;//spk inicia ojo
float32 deltaD=0.05;
float32 Vold=0;
float32 Pold=0;
//float32 spkold=spkinit;
float32 spkold=1.0;
float32 P=0;
float32 Vact=0;
float32 dV=0;
float32 dP=0;
float32 spk=0;
float32 spkmanual=0.3;

```

```

Uint16 activacion=0;
__interrupt void adca1_isr(void);
__interrupt void isr_cpu_timer0(void);
void main(void)//programa principal donde se ejecuta todo.
{
  InitSysCtrl();
  EALLOW;
  CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.CPUTIMER0 = 1;
  CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;
  DINT;// Desabilitar todas las interrupciones globales
  InitPieCtrl();
  IER = 0x0000;//Desabilitar las interrupciones CPU
  IFR = 0x0000;//desabilitar las interrupciones de bandera
  InitPieVectTable();
  Setup_GPIO();
  ConfigureADC();
  SetupADCEpwm();
  ConfigureEpwm1();
  EALLOW;
  PieVectTable.TIMER0_INT = &isr_cpu_timer0;
  PieVectTable.ADCA1_INT = &adca1_isr;
  PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
  PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx1 = 1;
  EDIS;
  IER |= M_INT1; // Habilito toda la interrupcion 1 (Fila 1)459
  InitCpuTimers();
  ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 200, 50000);
  CpuTimer0Regs.TCR.all = 0x4001; //Habilita la interrupcion del timer0 TIE=1
  EINT;
  ERTM;//HABILITACION DE INTERRUPTACIONES GLOBALES
  GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO31=0;
  GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO4=0;
  GpioDataRegs.GPBDAT.bit.GPIO34=0;
  while(1){
    for (cuenta=0;cuenta<0x00FFFFFF;cuenta++){
      }
    }
}

```

```

        GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO34=1;
    }
}
__interrupt void isr_cpu_timer0(void){// se ejecuta al tiempo que se especifica donde se
configuro el Timmer
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; //Limpia la bandera de interrupcion del
timer0
    }
interrupt void adca1_isr(void)
{
    //voltaje load

vload_sinfiltro=(((float)(AdcaResultRegs.ADCRESULT1)*3.133)*0.0002442)*24.912)-
30.671;
    vload_confiltro=((0.1*vload_sinfiltro)+((1.0-0.1)*vload_confiltro));
    vload_redondeado=((round)(vload_confiltro*10.0));
    vload_flotante=((float)(vload_redondeado))*0.1;
    //corriente carga
    iload_sinfiltro=(((float)(AdcbResultRegs.ADCRESULT2)*2.69)*0.0002442)*15.0)-
23.785;
    iload_confiltro=((0.1*iload_sinfiltro)+((1.0-0.1)*iload_confiltro));
    iload_redondeado=((round)(iload_confiltro*10.0));
    iload_flotante=((float)(iload_redondeado))*0.1;

vpanel_sinfiltro=(((float)(AdcaResultRegs.ADCRESULT2)*2.98)*0.0002442)*57.566)-
70.285;//71.285
    vpanel_confiltro=((0.1*vpanel_sinfiltro)+((1.0-0.1)*vpanel_confiltro));
    vpanel_redondeado=((round)(vpanel_confiltro*10.0));
    vpanel_flotante=((float)(vpanel_redondeado))*0.1;
    //corriente del panel
    ipanel_sinfiltro=(((float)(AdcaResultRegs.ADCRESULT0)*2.66)*0.0002442)*15.0)-
23.785;
    ipanel_confiltro=((0.1*ipanel_sinfiltro)+((1.0-0.1)*ipanel_confiltro));
    ipanel_redondeado=((round)(ipanel_confiltro*10.0));
    ipanel_flotante=((float)(ipanel_redondeado))*0.1;
    if (activacion==1){

```

```

//Algoritmo Mppt p&O
k=k+1;//
if (k==10000){
    P=(vpanel_flotante*ipanel_flotante);
    dP=(P-Pold);
    Vact=vpanel_flotante;
    dV=(Vact-Vold);
    if (dP!= 0) {
        if (dP< 0){
            if (dV<0){
                spk= spkold+deltaD;
            }
            else {
                spk= spkold-deltaD;
            }
        }
        else {
            if (dV<0){
                spk= spkold-deltaD;
            }
            else {
                spk= spkold+deltaD;
            }
        }
    }
    else {
        spk=spkold;
    }
    if (spk>=spkmax ||spk<=spkmin ){
        spk=spkold;
    }
    spkold= spk ;
    Vold=Vact;
    Pold=P;
    setpoint=spk;
    k=0;
}

```

```

    }
    }
    else {
        setpoint=spkmanual;
    }
//control de corriente
ek=setpoint-iload_flotante;
uk=uk_1+(a0*ek)-(a1*ek_1);
if (uk>=0.95){
    uk=0.95;
}
if (uk<=0.0){
    uk=0.0;
}
if (setpoint==0.0){
    uk=0.0;
}
uk_1=uk;
ek_1=ek;
ukl=(vload_flotante*0.025)+uk;//=1/40
if (ukl>=0.95){
    ukl=0.95;
}
test1=(uint16_t)((float)(500.0*ukl));
EPwm1Regs.CMPA.bit.CMPA = test1;
EPwm1Regs.CMPB.bit.CMPB = test1;
GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO4 = 1;
AdcaRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1; //clear INT1 flag
AdcbRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
AdccRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

```

B. Diseño del Esquemático del Convertidor en Proteus

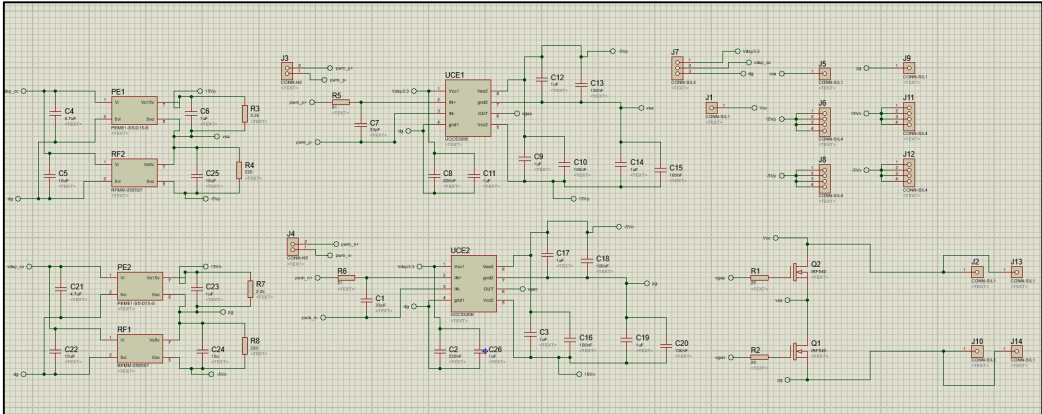


Fig. 64. Esquemático del convertidor en Proteus.
Fuente: (Autor).

C. Prototipo Cargador de Baterías

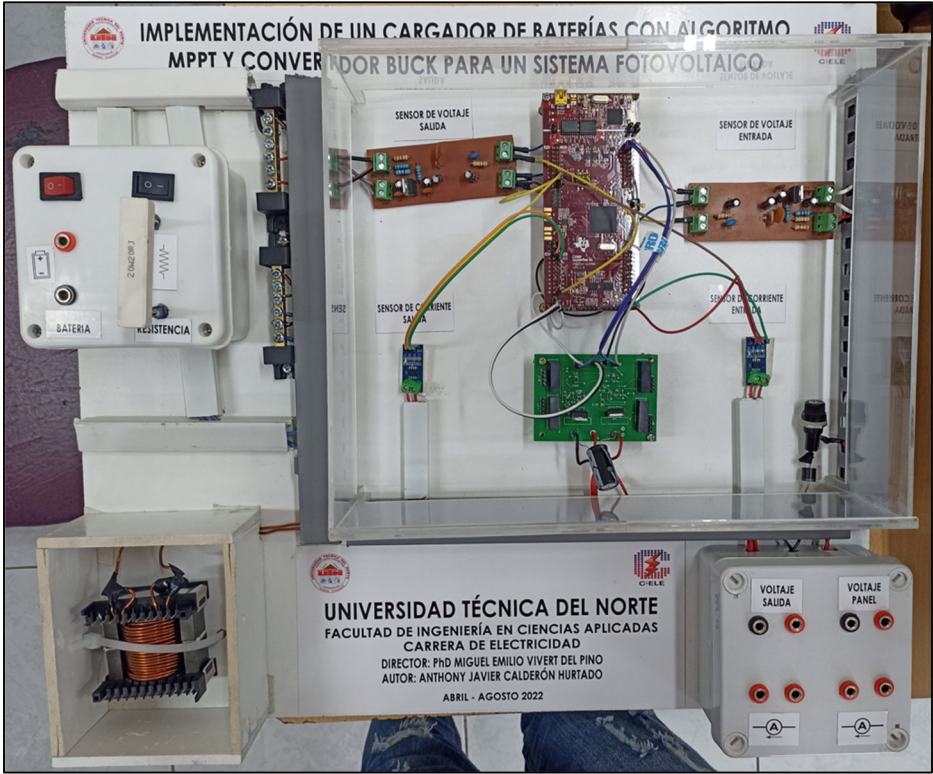


Fig. 65 Prototipo del Cargador de Batería.
Fuente: (Autor).

D. Control de corriente osciloscopio Hantek-6022BE

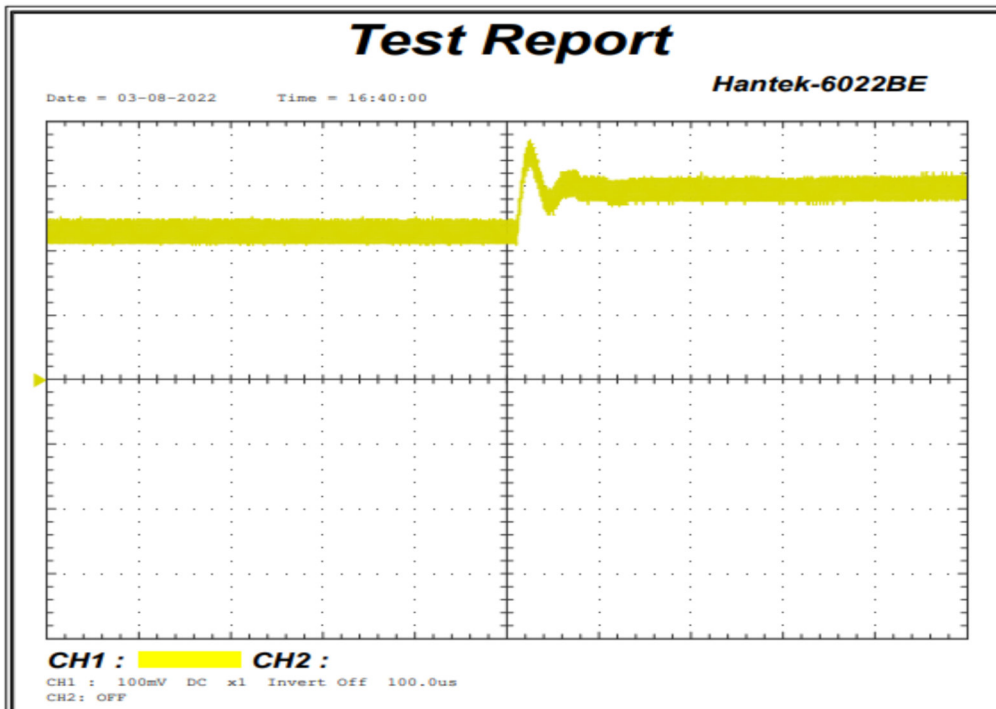


Fig.66. Control de corriente real 2.3 [A] a 3[A].
Fuente: (Autor).

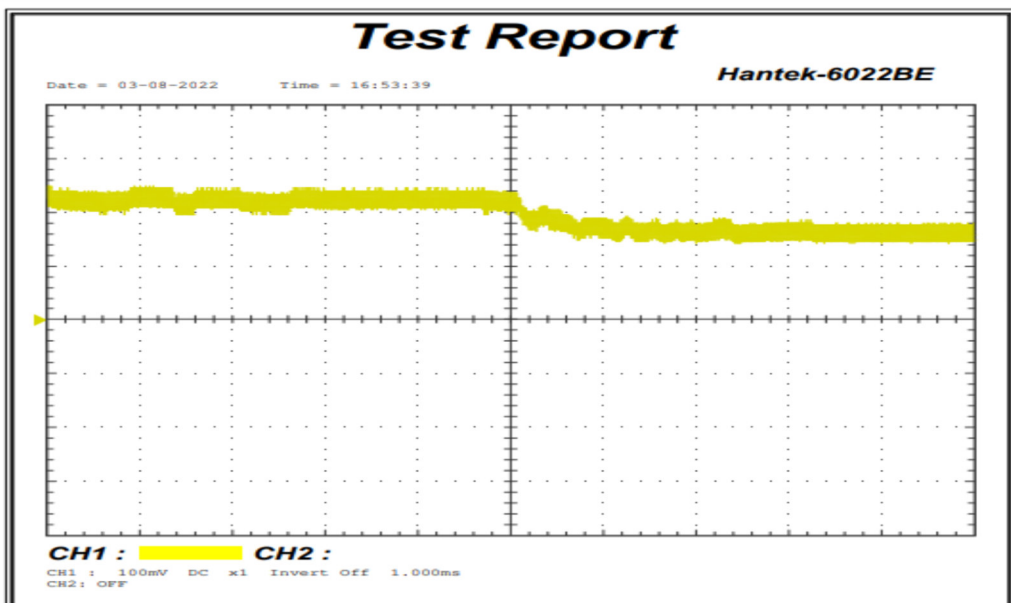


Fig.67. Control de corriente real 2.3 [A] a 1.6[A].
Fuente: (Autor).

E. Algoritmo MPPT osciloscopio Hantek-6022BE

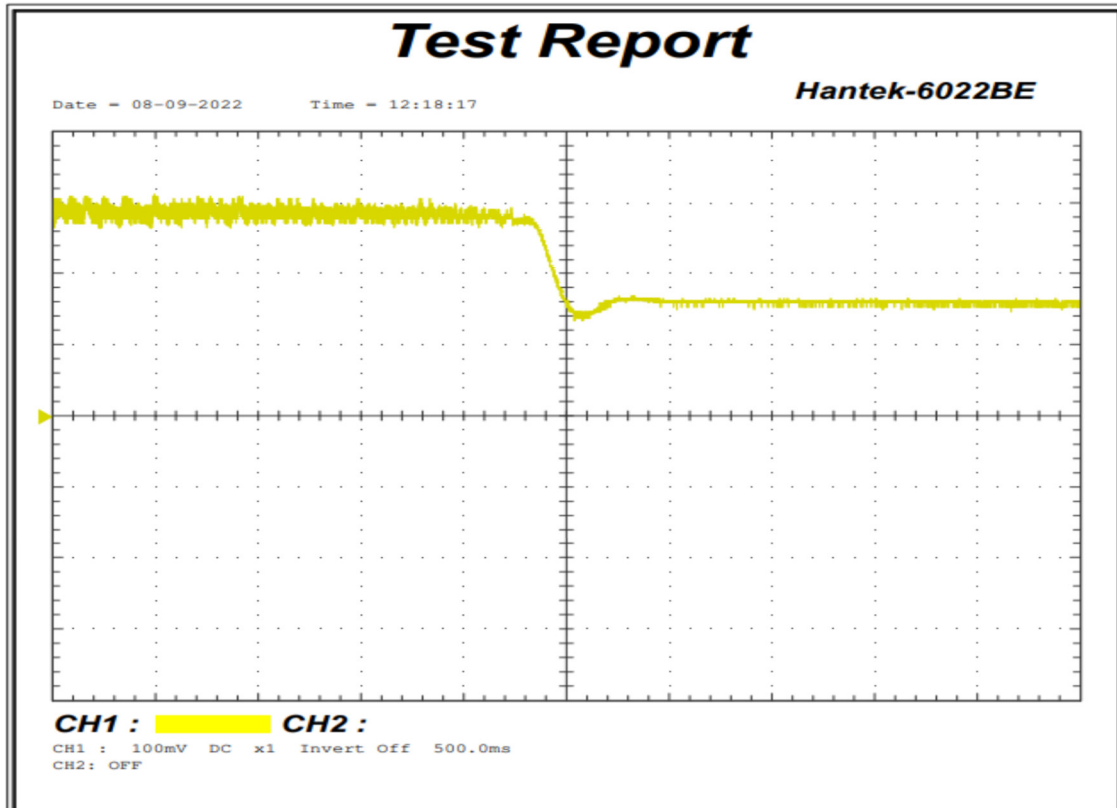


Fig.68. Funcionamiento algoritmo MPPT.
Fuente: (Autor).

Implementation of a battery charger with MPPT algorithm and buck converter for a photovoltaic system.

1st Anthony Calderón
 Universidad Técnica Del Norte
 Ibarra, Imbabura
 ajcalderonh@utn.edu.ec

Abstract—This paper consists of developing a system that receives solar energy by two 18V solar panels with a power of 50W, this energy is fed into a buck converter that charges a 12V, 35Ah lead-acid battery. Initially, the sizing of electronic components and design of the control loops that will govern the LAUNCHXL-F28379D processing board is performed. The work concludes with the implementation of the prototype in a laboratory, in which the integration of a perturb and observe algorithm can be observed (P&O) for maximum power point tracking (MPPT) on the photovoltaic panels, as well as two Proportional-Integral controllers to provide the ideal voltage and current to charge the 12V battery. Finally, a comparison is made between the real values and the simulation results in Matlab/Simulink software, in order to analyze the performance of the developed battery charger.

Index Terms—battery charger, buck converter, P&O algorithm, PI control, PWM.

I. INTRODUCTION

The use of renewable energy sources for electricity generation has become a priority alternative worldwide, since the use of this type of energy combats global warming and reduces the production of polluting gases. The use of solar energy through photovoltaic panels is an efficient solution to the problems afflicting the planet earth [1]. Applications using renewable energy include power converters. Power converters are typically used in areas such as: switching power supplies, process control and automation, transportation and energy conservation, and energy conservation [2]. In this specific case it is oriented to the use of renewable energy together with a buck converter to charge a battery, in the literature there are several researches that use control algorithms to obtain high performance in this type of devices, for instance. In [3] a fuzzy logic control is performed to achieve MPP of the solar panels. The battery charger contains a boost-buck converter, PID control and PI optimal control are implemented. [4] y [5] present different control techniques for tracking the maximum power point of a photovoltaic array for an electric vehicle battery charger. Sensors are used for controller measurements and CUK converters. In [6] they designed a controller for the charging process that prevents overcharging of lead-acid batteries. The implemented MPPT algorithm is an advanced

fractional open circuit in a buck converter. In [7] a PI-optimized PSO controller of a buck converter was realized to test the MPP and battery charging algorithm. A membrane fuel cell is emulated under different operating conditions, such as varying temperature, fuel pressure and air pressure conditions. However, the common feature of these investigations is that the results are presented only by simulation.

Therefore, in this research it is proposed to implement a battery charger with MPPT algorithm, and voltage and current control loops for a buck converter to store electrical energy generated by a photovoltaic system.

The paper is organized as follows: Section II presents the mathematical modeling of the buck converter. Section III describes the design of the control loops and MPPT algorithm. Section IV presents the implementation of the battery charger and Section V shows the results. Finally, Section VI presents the conclusions.

II. MATHEMATICAL MODELING

Figure 1 shows the general diagram of the system, you can see the voltage, current control loops and the P&O algorithm, a buck converter, a 12V lead acid battery and the 18V photovoltaic panels. Where I_p and V_p are the output current and voltage of the panel, I_b and V_b represent the current and voltage values of the buck converter.

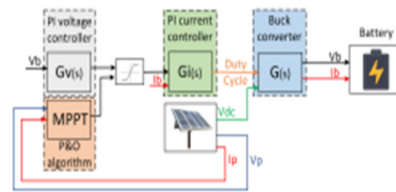


Fig. 1. General diagram of control loops

A. Operation of the buck converter

The buck converter shown in figure 5 2 consists of: a couple of switches S and \bar{S} , where \bar{S} is complementary to S , an

inductor L and a load R . V_p is the power supply coming from the PV panels and V_b corresponds to the output voltage of the converter.

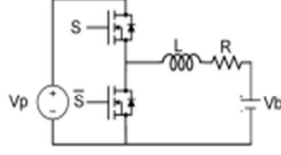


Fig. 2. Structure of buck converter

The buck converter has two modes of operation when $S = 1$ and $S = 0$. Equation (1) represents the analysis of the circuit when $S = 1$ and (2) with $S = 0$.

$$l(i_l) = v_p - i_l(R) - v_b \quad (1)$$

$$l(i_l) = -i_l(R) - v_b \quad (2)$$

Finally, the dynamic model of the buck converter represented in (3), is a function of the two modes of operation, where S represents the switching state of the transistor.

$$l(i_l) = S v_p - i_l(R) - v_b \quad (3)$$

Figure 3 illustrates the voltage and current signals of buck converter in the two modes of operation. In addition, PWM modulation was chosen for transistor on/off. Consequently, the duty cycle is given by $D = \frac{v_b}{v_p}$.

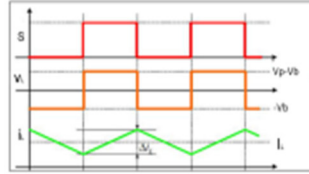


Fig. 3. Voltage and current of buck converter

The sizing of the inductor in this type of converter is done at the load, i.e. when the slope of i_L is positive. Equation (4) represents the voltage value when the inductor starts charging, (5) results from replacing the duty cycle value in (4) and finally, equation (6) allows sizing the inductor that will be used in this application.

$$v_p - v_b = L \frac{\partial i_L}{\partial t} \quad (4)$$

$$v_p(1 - D) = L \frac{\Delta i_L}{DT} \quad (5)$$

$$L = \frac{v_p(1 - D)DT}{\Delta i_L} \quad (6)$$

B. Small-signal analysis

Initially (3) is placed in function of the duty cycle, i.e. the variable S is replaced by the duty cycle D . Then, this equation becomes

$$l(i_l) = D v_p - i_l(R) - v_b \quad (7)$$

To get the small-signal linear model the continuous variables and the duty cycle have been perturbed and are represented by (8), where \bar{D} , \bar{v}_p , \bar{i}_l , \bar{v}_b are the average values and \hat{D} , \hat{v}_p , \hat{i}_l , \hat{v}_b represent disturbances.

$$D = \bar{D} + \hat{D}$$

$$v_p = \bar{v}_p + \hat{v}_p \quad (8)$$

$$i_l = \bar{i}_l + \hat{i}_l$$

$$v_b = \bar{v}_b + \hat{v}_b$$

The linear model (9) is obtained by substituting the small-signal values into (7).

$$l(i_l) = \bar{D}\bar{v}_p + \hat{D}\bar{v}_p - \bar{i}_l R - \hat{v}_p \quad (9)$$

Then, applying the Laplace transform (9) becomes

$$I_l(s) = \frac{\bar{R}}{s + \frac{\bar{R}}{L}} \frac{1}{R} (V_p D(s) + D V_p(s) - V_b(s)) \quad (10)$$

where $D(s)$ corresponding to the duty cycle is the controllable variable, $V_p(s)$ representing the PV panel voltage, is an intrinsic variable of the system that cannot be controlled or observed and $V_b(s)$ is an observable variable corresponding to the battery state. In order to simplify the mathematical model it is assumed that the input voltage variations are too small, i.e. $V_p(s) = 0$. Finally, applying the Feedforward strategy the duty cycle is given by

$$D(s) = U(s) + \frac{V_b(s)}{V_p} \quad (11)$$

where $D(s)$ is the result of a control signal $U(s)$, added to the ratio of battery and PV panel voltages. Replacing (11) and approaching $V_p(s) = 0$ in (10) the linearized model representing the buck converter is given by

$$I_l(s) = \left(\frac{\bar{R}}{s + \frac{\bar{R}}{L}} \right) \left(\frac{\bar{V}}{\bar{R}} \right) U(s) \quad (12)$$

Table I shows the general parameters of the system that allow the behavior of the system to be represented graphically. Lastly, the figure 4 shows that the mathematical model obtained has the same dynamics as the real model.

III. CONTROL LOOPS DESIGN

A. Current control loop

In purpose of simplifying the mathematical calculation for the controllers, the system analysis will be carried out in open loop, and the type of control used is the Proportional-Integral (PI) type presented in (13).

$$G_c(s) = \frac{kp(s + \frac{ki}{kp})}{s} \quad (13)$$

TABLE I
GENERAL SYSTEM PARAMETERS

Parameters	Symbol	Value	Units
Frequency	f	50000	[Hz]
Period	T	2	[μ s]
Duty cycle	D	0.33	
Input voltage	v_p	36	[V]
Battery voltage	v_b	12	[V]
Load	R	0.2	Ω
Current ripple	Δi_l	5%	[A]
Inductor	L	380	[μ H]

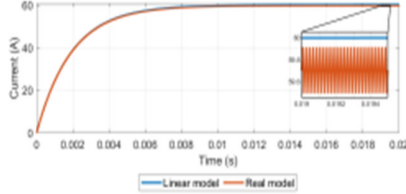


Fig. 4. Linear model vs real model

There are different ways to find the parameters of a PID controller such as: the Ziegler-Nichols (ZH) method, mathematical methods or by frequency analysis using a bode diagram. There are different ways to find the parameters of a PID controller such as: the Ziegler-Nichols (ZH) method, mathematical methods or by frequency analysis using a bode diagram. For this work, it was decided to perform the open-loop bode analysis, the criterion for open loop systems says that a system is stable as long as the step by 0 dB of its magnitude has a slope of $-20 \frac{dB}{Dec}$, with a positive phase margin.

For the current controller, the frequency values were set as follows $p < \frac{kp}{ki} < \omega b$, where p is the pole of the system equal to 82.89 [Hz], kp and ki are the gains of the controller and ωb is the bandwidth which in this case is equal to 5[KHz]. Figure 5 shows the bode diagrams of the plant and of a PI controller, this representation is important because after a geometrical analysis and mathematical calculation it is possible to obtain the linear equations that represent the gains (14) and (16) of the current controller.

$$k_p = \frac{\omega b}{k_o * p} = 0.3351 \quad (14)$$

where k_o equals the coefficient of $\frac{V_e}{R}$ i.e. 180 [A]. Considering ki/kp to be 10% of the bandwidth ωb the value of kp is given by

$$k_p = 10 \frac{ki}{\omega b} \quad (15)$$

replacing (15) in (14) the result is (16)

$$k_i = \frac{\omega b^2}{10 * k_o * p} = 0.3404 \quad (16)$$

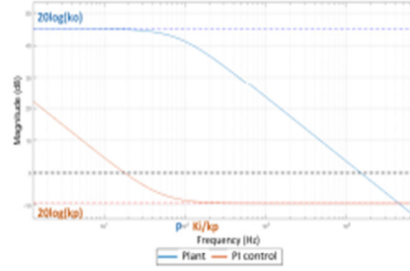


Fig. 5. Linear model vs real model

B. Voltage control loop

Voltage control is considerably slower than current control, and when current is added, the battery charging time is further reduced. Therefore, the battery voltage is directly dependent on the current supplied. Therefore, the plant model for the voltage control design is reduced to the one presented in figure 6 and the transfer function representing this circuit is the equivalent of the one shown in (17).

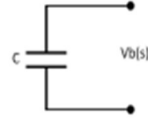


Fig. 6. Plant model of the voltage control

$$V_b(s) = \frac{1}{sC} I_b(s) \quad (17)$$

For the design of the voltage controller, the same procedure is performed as in the previous case, first the frequency values are considered as follows $\frac{kp_v}{ki_v} < \omega b_v < C$. kp_v and ki_v are the gains of the PI voltage controller, ωb_v is the bandwidth which in this controller is considered to be 10 [s] and C represents the capacitance of the lead acid battery used, in this case it has a value of 9130.4 [F] with an electrical charge Q of 126000 [C/s]. The gains of the PI voltage controller (18) and (19) are obtained after the analysis of the bode diagrams of the battery model and the PI controller (see figure 7).



Fig. 7. Bode plot of the plant with PI controller

$$kp_v = \omega b_v * C = 91304 \quad (18)$$

Substituting (15) in (18) gives (19)

$$ki_v = \frac{kp_v * \omega b_v}{10} = 91304 \quad (19)$$

C. MPPT algorithm

The MPPT algorithm used in this research is the P&O algorithm due to its easy implementation and excellent results in this type of applications. This algorithm basically consists of continuously adjusting the impedance observed by the PV array in order to keep the system operating at or near its maximum power point regardless of changing conditions during operation. The P&O algorithm implemented is the one presented in [8], which follows the maximum power point by increasing or decreasing the reference current. The algorithm implemented in a Matlab function responds to the flowchart shown in the figure 8.

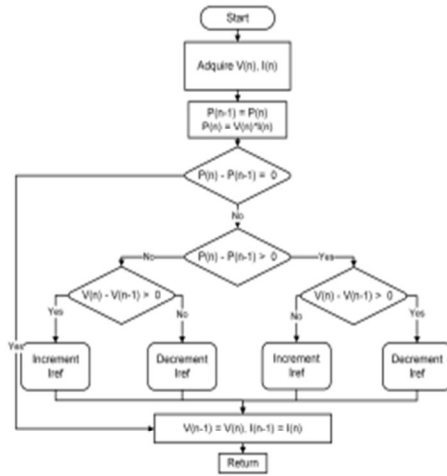


Fig. 8. Schematic of the MPPT-P&O algorithm

IV. EXPERIMENTAL SET-UP

The system is composed of a battery charger and the external current and voltage control loops respectively. The battery charger internally consists of three subsystems which are: gate signals, buck converter and MPPT algorithm (see figure 9). Each subsystem has an important function which is detailed below.

A. Gate signals

This subsystem has as inputs the duty cycle signals in charge of generating the PWM signals that activate or deactivate the buck converter switches. For PWM signal generation, the LAUNCHXL-F28379D board was chosen, which has the F28379D processor with the Delfino C2000 MCU. This development board developed by Texas Instruments (TI) presents an economical platform for high performance digital control applications. This embedded system is used in applications such

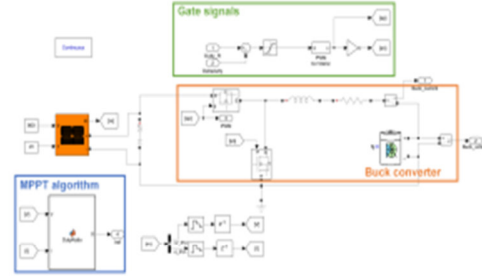


Fig. 9. Battery charger subsystem

as: embedded design and development, industrial, automation and process control [9].

B. Buck converter

The PCB board developed for the buck converter can be seen in the figure 10 and it is in charge of transforming the 36 [V] coming from the photovoltaic panels into 12 [V] corresponding to the voltage needed to charge the lead acid battery. The UCC5320 driver is in charge of sending the on/off pulses to the STP30N10F7 Mosfets, this driver needs voltages of +15V and -5V for its operation that is why isolated sources were added to provide the desired voltage at the different inputs of the driver.



Fig. 10. Buck converter

1) *Inductor Design:* According to [10] to design an inductor one must first calculate the conductor gauge, this is possible by applying (20). Where, I is the maximum current supported by the inductor and D is the electric current density, for small transformers it goes between values of $2.5 - 3[A/(mm^2)]$.

$$s = \frac{I}{D} = \frac{7[A]}{2.5[\frac{A}{mm^2}]} = 2.8[mm^2] \quad (20)$$

When two parallel windings are made the diameter is halved resulting in a diameter of $1.4[mm^2]$. Therefore, the wire used for the winding is 14 AWG (American Wire Gauge). At last, the designed inductor of the figure 11 has an inductance of μH value obtained by the mathematical analysis in section II.



Fig. 11. Inductor

C. Sensors

The control loops need the voltage and current measurements at the output of the photovoltaic panels and the buck converter. For the current sensors the ACS712 20A model was used, on the other hand, the voltage sensors were designed according to the needs of this research.

1) *Voltage sensors*: To achieve a good control loop it is required that the signals measured by the sensors have low noise, therefore, in the case of voltage two sensors were made: the first with a measurement range of 0-12 [V] that will measure the voltage in the battery and the second with a range of 0-36 [V] that will measure the voltage coming from the PV panels, the electrical diagram of the voltage sensors is presented in figure 12.

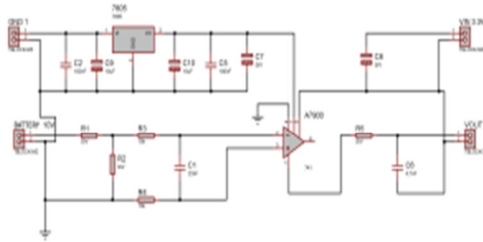


Fig. 12. Electrical diagram of voltage sensor

2) *Current Sensors*: As with the voltage, two current sensors are needed to measure at the input of the converter and at the inductor, in this case the ACS712ELCTR-20A-T module shown in figure 13.



Fig. 13. Current sensor ACS712 20A

3) *Signal filtering*: In general, in the measurement of analog signals, sensors are often subject to noise. The exponential moving average (EMA) filter was used to remove this noise [11]. This low-pass filter is defined as follows

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_{n-1} \quad (21)$$

where A_n is the filtered value, α is a factor ranging from 0 to 1, A_{n-1} represents the previous filtered value and M is the sampled value of the signal to be filtered. The equation (21) is implemented on the voltage and current sensor readings in the Code Composer software that will later be uploaded to the LAUNCHXL-F28379D board.

D. Results

Functional tests were performed on the prototype shown in figure 14. It consists of a DSP board for signal processing, voltage and current sensors, a buck converter with its respective inductor, a 10 [V] dc source, a lead acid battery, two 18 [V] PV panels and connection terminals for voltage and current measurements.

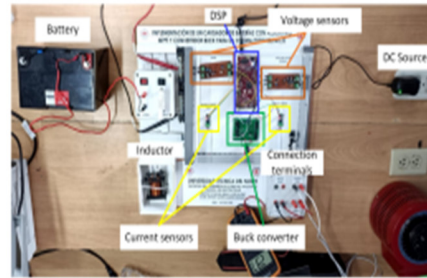


Fig. 14. Battery charger prototype

The performance of the current PI control loop obtained by simulation ($i_{simulation}$) and the output current of the implemented prototype (i_{real}) is shown in figure 15. In this scenario an initial reference of 2.3 [A] is set and at 0.0167 [s] the current reference is increased to 3 [A]. It can be seen that the i_{real} signal follows the reference correctly and unlike $i_{simulation}$ has a small overshoot and takes longer to stabilize, however, the ripple value meets the design requirements and is lower than the simulation. It can also be seen that the frequency of the signals both in simulation and in the prototype complies with what was established, i.e. 50 [KHz] or a period of 20 [μ s].

To visualize the results of the voltage controller it was necessary to apply the moving average filter proposed by [12], this type of filter is used for the analysis of a group of ordered data series, where its main function is to eliminate transient fluctuations. The moving average filter is represented by (22).

$$X_t = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t X(t) dt \quad (22)$$

In this case, a reference of 12.3 [V] is initially set and after a while it is increased to 12.5 [V]. Figure 16, shows how the

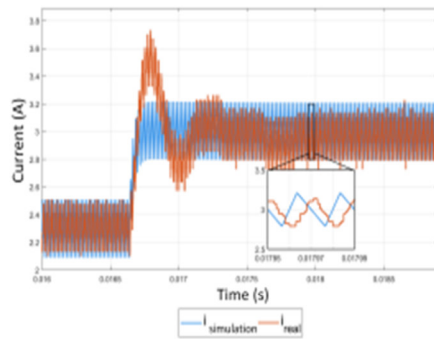


Fig. 15. Current control loop

current value increases as necessary for the voltage to also increase and reach the set reference value. As explained in the previous section, the voltage control is slow compared to the current control and depends on the current injection of the system.

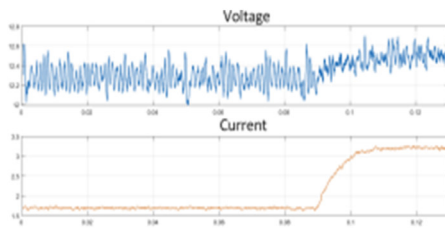


Fig. 16. Voltage control loop

Regarding the MPPT algorithm, the current P&O algorithm was implemented, for this test a saturation of 3 [A] was established, as shown in figure 17, the PV panel provides the 3 [A] until there is a change in irradiance. When there is a lower irradiance the current produced by the panel tends to drop, however, when the irradiance returns to the nominal values it will provide the saturation current established as a reference in the developed algorithm.

V. CONCLUSIONS

In this work it has been implemented a prototype battery charger, with a P&O algorithm that takes full advantage of the power supplied by the photovoltaic panels, in addition, several test scenarios were presented that allowed contrasting the results obtained in real operating conditions with the simulation results, it was observed that the performance of the controllers is very similar in both cases, since they regulate the amount of current and voltage at the output, meet the design requirements and successfully follow the reference changes during its operation. In this way, theory is supported

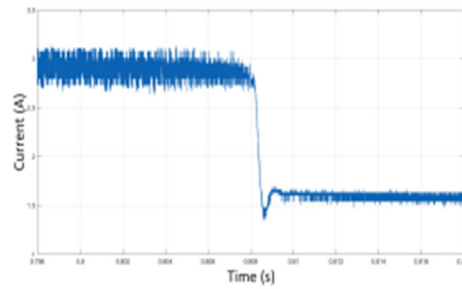


Fig. 17. Algoritmo P&O

by practice, obtaining a prototype ready to work in real life applications.

REFERENCES

- [1] M. Nuñez, J. Correa, G. Herrera, P. Gómez, S. Morón, N. Fonseca, A. Caliz, & E. Banco. "Study of Perceptions on Clean and Self-Sustainable Energy". *Ijmsor*, 3(1), 2018, 11-15.
- [2] N. Mohan, T. Undeland & W. Robbins. "Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño". McGraw-Hill: Educación, 2009, isbn=9789701072486.
- [3] M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidhaf, & H. Zroui. "Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions". *IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science, ICECOCS 2020*, 2-6.
- [4] H. Singh & N. Kumar. "Current controlled charging scheme for off board electric vehicle batteries from solar PV array". *7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2020*, 935-940.
- [5] N. Ramesh & V. Vanitha. "Solar Powered Battery Charging System with Maximum Power Point Tracking". *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2018, Cccv*, 364-368.
- [6] D. Dileep & K. Bharath. "Conditional battery charging in solar PV based system". *3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2018 - Proceedings*, 953-958.
- [7] K. Premkumar, M. Vishupriya, T. Thamizhselvan, P. Sanjeevikumar & B. Manikandan. "PSO optimized PI controlled DC-DC buck converter-based proton-exchange membrane fuel cell emulator for testing of MPPT algorithm and battery charger controller". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(2), 1-23.
- [8] F. Oliveira, S. Oliveira da Silva, F. Durand & L. Sampaio. "Application of PSO method for maximum power point extraction in photovoltaic systems under partial shading conditions". in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference*.
- [9] T. Instruments. "CCSTUDIO IDE, configuration, compiler or debugger TL.com," Ccstudio. 2021, [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>.
- [10] J. Sánchez. "Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro". *Scientia et Technica*, 2009, (41), 19-24.
- [11] Arduino. "Exponential Moving Average," 2022, [Online]. Available: <https://forum.arduino.cc/t/implementing-exponential-moving-average-filter/428637>.
- [12] H. Peña. "Modelos Autorregresivos Integrados Con Promedio Móvil Y Su Aplicación A Observaciones De Temperatura Ambiente De La Zona N. Oeste De México". *Ciencias Marinas*, 8(1 SE-Articles), 1982, 30-48.