

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERÍAS CONTROLADO
POR UN ALGORITMO DE MPPT Y ALIMENTADO POR PANELES SOLARES**

Jorge Eparquio Martínez Tibaduiza



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Tunja, Colombia

2021

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERÍAS CONTROLADO
POR UN ALGORITMO DE MPPT Y ALIMENTADO POR PANELES SOLARES**

Jorge Eparquio Martínez Tibaduiza

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de: Ingeniero
Electrónico**

DIRECTOR

Ing. Arnold Wiesner Hernández



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Tunja, Colombia
2021**

Notas de aceptación:

Firma del director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, junio de 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado se lo dedico a mis padres, especialmente a mi madre Luz Marina Tibaduiza Pinto, quien me ha guiado por el camino correcto, formándome como persona culta y emprendedora, brindándome su apoyo incondicional en cada una de las metas que me he propuesto, porque gracias a su motivación estos logros no hubiesen sido posibles.

También quiero dedicar este trabajo aquellos familiares y amigos que me han ayudado a salir adelante en mi formación como profesional. A Laura Guevara, por su apoyo, amor incondicional y la compañía que me ha brindado durante este proceso de formación. A la familia Zuluaga Reyes, quienes nos ayudaron desde un inicio y nos abrieron las puertas de su hogar haciéndonos sentir como integrantes de su familia. También a la familia García Sainea, en especial al profesor Óscar García por sus consejos y asesorías. A la familia Medina Uva, por ayudarnos a salir adelante con la financiación de este proyecto, al Padre Andrés Leonardo Malpica y la madre Ana Isabel Ángel, por ser tan incondicionales con sus sabios consejos y acompañamiento espiritual.

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente quiero darle las gracias a Dios por ser mi guía y permitirme crecer de manera personal y profesional, dándome lo necesario para poder sacar adelante este proyecto de grado.

A mi madre, quien siempre estuvo ahí dándome palabras de aliento, ayudándome a salir adelante a pesar de las adversidades que se nos presentaron en el camino, pero gracias a su paciencia, su apoyo incondicional y siempre creer en mí, logramos salir adelante. Muchas gracias madre.

A mi director el Ing. Arnold Wiesner Hernández, por su acompañamiento, asesoría en el desarrollo del proyecto de grado y por brindarme sus conocimientos, le expreso mis más sinceros agradecimientos por permitirme lograr el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Santo Tomás, especialmente a la facultad de Ingeniería Electrónica y todos sus docentes, gracias por el apoyo y los conocimientos que me han brindado durante mi formación como Ingeniero Electrónico, porque sin ustedes no habría sido posible llevar a cabo este proceso.

GRACIAS

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	3
LISTA DE FIGURAS	4
GLOSARIO DE TÉRMINOS	6
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. PROBLEMA	3
3.1. Formulación de las preguntas.....	3
3.2. Definición del problema.....	3
3.3. Delimitación del problema	3
4. OBJETIVOS.....	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos	5
5. MARCO REFERENCIAL	6
5.1. Panel fotovoltaico.....	6
5.2. Convertidores DC–DC.....	9
5.3. Métodos de carga.....	11
5.4. Algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracker).....	14
6. DISEÑO METODOLÓGICO	16
DESARROLLO DEL PROYECTO	18
7. CAPÍTULO 1: RECURSO SOLAR Y DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SOLARES	18
7.1. Radiación solar Tunja - Boyacá	18
7.2. Hora solar pico (HSP)	19
7.3. Módulo Solar.....	20
7.3.1. Dimensionamiento paneles solares.....	20
7.3.2. Energía generada por panel	21
7.3.3. Promedio de energía obtenida en los paneles solares.....	22
7.3.4. Análisis de la configuración mixta para los módulos solares.....	22
7.4. Simulación panel solar	24
8. CAPITULO 2: DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONVERTIDORES DC–DC	27
8.1. Análisis convertidor Buck	27
8.1.1. Gráficas del convertidor Buck.....	29
8.1.2. Ecuaciones convertidor Buck.....	30

8.1.3.	Diseño del convertidor Buck.....	31
8.1.4.	Simulación en lazo abierto del convertidor Buck.....	32
8.2.	Análisis del convertidor Sepic.....	35
8.2.1.	Gráficas del convertidor Sepic	37
8.2.2.	Ecuaciones convertidor Sepic.....	38
8.2.3.	Diseño del convertidor Sepic.....	39
8.2.4.	Simulaciones en lazo abierto	40
8.3.	Análisis del convertidor Zeta.....	43
8.3.1.	Gráficas del convertidor Zeta	45
8.3.2.	Ecuaciones convertidor Zeta	46
8.3.3.	Diseño del convertidor Zeta	47
8.3.4.	Simulaciones en lazo abierto	49
9.	CAPÍTULO 3: CONVERTIDORES & ALGORITMO MPPT	51
9.1.	Método Perturbación y Observación.....	51
9.1.1.	P&O implementado en el convertidor Buck.....	52
9.1.2.	P&O implementado en el convertidor Sepic	53
9.1.3.	P&O implementado en el convertidor Zeta.....	54
9.2.	Método de conductancia incremental.....	56
9.2.1.	Conductancia incremental implementado en el convertidor Buck.....	56
9.2.2.	Conductancia incremental implementado en el convertidor Sepic.....	57
9.2.3.	Conductancia incremental implementado en el convertidor Zeta	58
9.3.	Desarrollo del Algoritmo MPPT perturbación y observación.....	60
10.	CAPÍTULO 4: BATERÍA Y MÉTODO DE CARGA.....	62
10.1.	Batería Plomo – Ácido	62
10.2.	Método de carga Corriente constante / Voltaje constante	63
11.	CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL PROYECTO.....	65
11.1.	Etapa de selección de materiales	65
11.2.	Etapa de sensores.....	65
11.3.	Diseño del PCB	66
12.	CONCLUSIONES.....	68
13.	RECOMENDACIONES	70
	ANEXOS A: CÓDIGO EN C IMPLEMENTADO EN EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Promedio radiación solar diaria sobre Tunja - Boyacá 2020.	19
Tabla 2. Características Panel Solar.	20
Tabla 3. Datos obtenidos del circuito Buck.	28
Tabla 4. Parámetros del diseño para el convertidor Buck.	32
Tabla 5. Datos obtenidos del circuito Sepic.	35
Tabla 6. Parámetros del diseño para el convertidor Sepic.	40
Tabla 7. Datos obtenidos del circuito Zeta.	43
Tabla 8. Parámetros del diseño para el convertidor Zeta.	48
Tabla 9. Características de la batería.	62

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de bloques del cargador de baterías.	6
Fig. 2. Efecto fotoeléctrico. [18]	7
Fig. 3. Paneles solares conectados en serie.	8
Fig. 4. Paneles solares conectados en paralelo.....	8
Fig. 5. Paneles solares conectados en mixto.	8
Fig. 6. Batería, configuración básica. [47].	12
Fig. 7. Punto de máxima potencia. [55].	14
Fig. 8. Diagrama del desarrollo de trabajo de grado.	16
Fig. 9. Atlas Radiación Solar Colombia. [64]	18
Fig. 10. Hora Solar Pico. [65]	20
Fig. 11. Módulo APM-150.....	22
Fig. 12. Configuración mixta arreglo con 4 paneles solares.	23
Fig. 13. Configuración mixta 2.	24
Fig. 14. Curva características de Corriente Vs Voltaje de un panel fotovoltaico.	25
Fig. 15. Curva característica de Potencia Vs Voltaje de un panel fotovoltaico.	25
Fig. 16. Panel Sola Psim.....	26
Fig. 17. PSIM Voltaje y Potencia generada por cada panel.	26
Fig. 18. Convertidor DC–DC tipo Buck.	27
Fig. 19. Estados del convertidor Buck.	27
Fig. 20. Corriente del inductor en el tiempo.	28
Fig. 21. Formas de onda del Convertidor Buck.	29
Fig. 22. Circuito Buck Lazo Abierto PSIM.	33
Fig. 23. Señales de voltaje del convertidor Buck en lazo abierto.	33
Fig. 24. Señales de corriente del convertidor Buck en lazo abierto.	34
Fig. 25. Convertidor DC–DC Sepic.	35
Fig. 26. Estados del convertidor Zeta.....	35
Fig. 27. Formas de onda del convertidor Sepic.....	37
Fig. 28. Circuito Sepic Lazo Abierto PSIM.	41
Fig. 29. Señales de voltaje del convertidor Sepic en lazo abierto.	41
Fig. 30. Señales de corriente del convertidor Sepic en lazo abierto.....	42
Fig. 31. Convertidor DC–DC Zeta.	43
Fig. 32. Estados del convertidor Zeta.....	43
Fig. 33. Formas de onda del Convertidor Zeta.....	45
Fig. 34. Circuito Zeta Lazo Abierto PSIM.	49
Fig. 35. Señales de voltaje del convertidor Zeta en lazo abierto.....	49
Fig. 36. Señales de corriente del convertidor Zeta en lazo abierto.	50
Fig. 37. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O [68].....	51
Fig. 38. Convertidor Buck con algoritmo MPPT P&O.....	52
Fig. 39. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Buck	53
Fig. 40. Convertidor Sepic con algoritmo MPPT P&O.	53
Fig. 41. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Sepic.....	54

Fig. 42. Convertidor Zeta con algoritmo MPPT P&O.	55
Fig. 43. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Zeta.....	55
Fig. 44. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT Conductancia Incremental. [69].....	56
Fig. 45. Convertidor Buck con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.	57
Fig. 46. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Buck.	57
Fig. 47. Convertidor Sepic con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.	58
Fig. 48. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Sepic.	58
Fig. 49. Convertidor Zeta con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.	59
Fig. 50. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Zeta.....	59
Fig. 51. Sistema de cargador de baterías con algoritmo MPPT en C incorporado.	60
Fig. 52. Resultados del funcionamiento del sistema con el código C del algoritmo.	61
Fig. 53. Configuración baterías en serie.....	63
Fig. 54. Método de carga Corriente constante / Voltaje constante [70].....	63
Fig. 55. Diagrama de la incorporación del sensor de voltaje a la parte de potencia.	65
Fig. 56. Diagrama de la incorporación del sensor de corriente a la parte de potencia.....	66
Fig. 57. Capa I PCB.	67
Fig. 58. Capa II PCB.	67

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A: Amperio unidad de medida de la corriente.

AC: Corriente Alterna.

D: Porcentaje ciclo útil de las señales.

DC: Corriente Directa.

F: Frecuencia.

HSP: Hora Solar Pico.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

kWh: kilovatio hora.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PSIM: Software de simulación.

PWM: Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation).

V: Voltio unidad de medida del diferencial de potencial.

W: Unidad de potencia.

RESUMEN

En el actual documento se presenta una monografía con el estudio, diseño y simulación de un cargador de baterías alimentado por un sistema fotovoltaico, además se explican las diferentes etapas que hacen parte de este tipo de aplicaciones y la importancia que estas tienen para el funcionamiento del sistema.

También se presenta el análisis del potencial de radiación solar de la ciudad de Tunja – Boyacá. Seguidamente se estudian los modelos matemáticos que permiten hallar la cantidad de paneles solares requeridos para la aplicación; También se presenta una breve descripción de los convertidores de energía DC–DC ya que son parte importante del análisis de este trabajo, así que se presentarán algunas topologías a las cuales se les realizó su desarrollo matemático y simulación para observar y analizar su comportamiento, con el fin de determinar cuál es la topología que mejor presenta respuesta frente a las variaciones de radiación solar.

Asimismo, se presenta un análisis de los diferentes algoritmos MPPT y su incorporación al prototipo para hacer más eficiente la generación de energía eléctrica por parte de los paneles solares. Por último, se encontrará un apartado con las conclusiones obtenidas en el desarrollo del proyecto y anexos con el código en c.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución de la red eléctrica para las zonas rurales se ha convertido en un reto para las grandes empresas de energía interconectada debido a factores como: zonas de difícil acceso, baja economía por parte de las personas que viven en estas zonas, etc. [1, 2] y todo esto no resulta económicamente viable, además causa que las empresas de energía pierdan interés, dejando este problema exclusivamente al gobierno para mejorar el servicio de energía en el país. [3].

Así que, con el fin de entregar un suministro de energía eléctrica a estas zonas rurales, se hace rentable hacer uso de las energías renovables, como la energía solar; Este tipo de energía alternativa se obtiene por medio de paneles solares y se puede aprovechar con ayuda de convertidores potencia DC-DC y baterías de almacenamiento, las cuales tendrán conectadas un inversor de potencia que permite generar los 110 V AC que se necesitan en las viviendas.

El objetivo principal de este proyecto, es diseñar un cargador de baterías controlado por un algoritmo MPPT alimentado por un sistema fotovoltaico; Esto con la finalidad de suministrar una carga que ayude a mejorar las condiciones de vida en estas comunidades, pero como no se puede asegurar que la radiación solar siempre este en su punto de máxima radiación, se debió implementar a la aplicación estrategias de control que permitirán extraer el máximo rendimiento de tensión y corriente que pueden entregar los paneles en las horas que se tenga de luz solar.

Sin embargo, para poder aprovechar esta energía se hace necesario tener un convertidor DC-DC con las características de elevador y reductor de tensión, para cuando el arreglo de paneles solares lo requiera; Por esto se debe realizar un correcto análisis y diseño del convertidor de potencia, además de utilizar un software de simulación como PSIM para observar los resultados y poder modificar valores para evitar que se presenten fallos en su funcionamiento.

El sistema está diseñado para estar entregando durante las horas del día una potencia de 320 W, una corriente de 13,333 A y un voltaje de 24 V a la salida, los cuales irán variando dependiente de la carga en que se encuentre el arreglo de baterías, pero la aplicación no solo estará extrayendo el máximo rendimiento de los paneles solares, también estará protegiendo las baterías de las sobrecargas, pico altos de corriente que pueden causar daños en su vida útil y así poder ayudar con un suministro eléctrico a las zonas rurales.

2. JUSTIFICACIÓN

La dificultad de acceder al suministro eléctrico en zonas rurales donde las comunidades se encuentran alejadas de los centros urbanos es un problema que aún no se ha solucionado, así que estas comunidades para poder tener un sistema de iluminación suelen recurrir a la compra de velas, lámparas de gasolina, pilas, baterías, etc. [4], porque acceder al beneficio de energía eléctrica interconectada tiene un costo elevado que afecta a algunas comunidades [5, 6], pero en estas zonas el aprovechamiento de la energía solar es una opción muy buena y accesible que podría ayudar a obtener un suministro de energía eléctrica alternativa.

Por lo anterior se ve la necesidad de realizar un sistema capaz de adquirir parte de la energía emitida por el sol y convertirla en energía eléctrica para realizar su correcto aprovechamiento; Por tal motivo se decide desarrollar un prototipo de cargador de baterías alimentado por paneles solares que por medio de un convertidor DC–DC diseñado especialmente para este tipo de aplicación permita aprovechar esta energía. Pero teniendo en cuenta las intermitencias que se suelen presentar en los sistemas fotovoltaicos, se ve la necesidad de implementar un algoritmo MPPT para mejorar la eficiencia de los módulos solares y poder aprovechar las horas que se tengan de energía solar.

Los diferentes convertidores DC–DC, que se encuentran hoy en día en el mercado presentan buenas características de funcionamiento y se pueden utilizar para un gran número de aplicaciones debido a la eficiencia que estas tienen, pero como trabajo de investigación, se busca crear conocimiento basado en las tecnologías existentes que sirva como parte teórica para entender el funcionamiento de los convertidores de energía en sus diferentes topologías y práctica para el desarrollo de nuevas tecnologías que use energía fotovoltaica en la universidad Santo Tomás seccional Tunja, además este trabajo de grado hace parte del proyecto de investigación sistema de desinfección de agua UV con alimentación mediante energías renovables, dirigido hacia comunidades apartadas del sistema interconectado de Fodein 2021 de la Universidad Santo Tomás.

Adicionalmente se resalta el hecho que en el mercado ya se encuentran controladores del tipo MPPT para paneles solares, estos suelen trabajar con una potencia mayor que requiere un arreglo de baterías más grande que aumentaría el presupuesto para realizar su implementación; Además, estos controladores están diseñados para edificaciones grandes y se perdería parte de su potencial ya que se busca es implementarlo en viviendas rurales con menor demanda de electricidad, también su costo es una desventaja frente al que se propone que es más accesible a habitantes de sectores rurales.

El software que se utilizó para el desarrollo de este proyecto es PSIM, porque es una herramienta para el diseño y simulación de electrónica de potencia, su interfaz permite obtener simulaciones robustas y trabajar con sistemas de energías renovables, algo que softwares como Proteus 8 o Multisim no lo permiten; Además la empresa POWERSIM da la posibilidad a los estudiantes de obtener una licencia provisional para hacer uso de su software.

3. PROBLEMA

3.1. Formulación de las preguntas

¿Qué tipo de sistema ayudaría a mejorar la eficiencia en la adquisición de energía desde los paneles solares y optimizar el sistema de carga que garantice el correcto funcionamiento del convertidor de energía sin afectar la vida útil de las baterías?

3.2. Definición del problema

En la actualidad los sistemas encargados de generar energía eléctrica son bastante costosos, poco eficientes y no muy amigables con el medio ambiente [7, 8], además el poder llevar el sistema eléctrico a lugares donde la población es pequeña y alejada de los centros urbanos resulta muy costoso [9, 10] y la única opción es tomar una fuente de energía alternativa. Entre este tipo de sistemas los más populares son los sistemas fotovoltaicos debido a la disponibilidad de la fuente de energía, por esto se hace necesario buscar un sistema que permita a las comunidades anteriormente descritas, tener acceso al suministro de energía eléctrica y además que lo hagan de una manera eficiente y amigable con el medio ambiente.

Sin embargo, como los módulos solares por sí solos cuentan con una eficiencia energética comercial baja entre 12% y 17% [11] para el aprovechamiento de los fotones emitidos por el sol, de igual manera se debe tener en cuenta factores que alteran esa eficiencia, como: las variaciones presentadas por la radiación solar, las condiciones atmosféricas o climáticas que pueden producirse en el lugar donde se encuentre instalado el arreglo de paneles solares, porque esto afectaría la producción de corriente del sistema, ya que cuanto más sea la luz captada por los paneles solares, mayor será la intensidad eléctrica que se producirá a través de las celdas solares.

Adicionalmente, los sistemas fotovoltaicos generalmente están conformados por: un convertidor DC-DC, el arreglo de baterías, el inversor de voltaje y en la mayoría de los casos un algoritmo MPPT [12], esto con el propósito de encontrar el mejor punto de operación del sistema según las condiciones climáticas que se estén presentando, logrando de esta manera, tener un sistema eficiente que estará aprovechando la radiación solar que se tenga disponible.

3.3. Delimitación del problema

Estas zonas rurales a pesar de que cuentan con la energía del sol, los sistemas fotovoltaicos presentan inconvenientes debido a la disponibilidad que esta tiene porque solo está presente durante unas horas del día, por tanto, se hacen necesarios sistemas con almacenamiento para poder utilizar la energía eléctrica cuando se requiera.

Sin embargo, debido a las variaciones de la radiación solar que se puedan presentar durante el día, no es posible asegurar siempre el mismo potencial eléctrico o la misma intensidad de corriente en estos sistemas, lo que hace necesario la implementación de un convertidor DC–DC que asegure el suministro de energía eléctrica para lograr alimentar la mayoría de las cargas en estas viviendas, pero con este prototipo se busca principalmente cargar un arreglo de baterías de tipo plomo – ácido con una corriente de 13,333 A, 24 V y una potencia de 320 W. Para esta aplicación se utilizarán este tipo de baterías porque es una de las que más se usa en este tipo de aplicaciones y además son más accesibles económicamente teniendo en cuenta que el proyecto va dirigido a personas de bajos recursos que se encuentran ubicadas en las zonas rurales.

Por último y debido a la dificultad y tiempo que se requiere para hacer el diseño y simulación de un inversor solar completo, de acuerdo con el director del trabajo se decidió limitar el alcance del proyecto a solo el convertidor DC–DC, las partes adicionales como el inversor y protecciones se dejan para trabajos futuros, así que se considera que el convertidor DC–DC es suficiente para un trabajo de grado con un tiempo de 6 a 8 meses.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

- ✓ Diseñar un cargador de baterías controlado por un algoritmo MPPT alimentado por un sistema fotovoltaico para la obtención de energías en lugares que no se encuentran conectados a la red de suministro eléctrico.

4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un análisis de al menos tres topologías de los convertidores para determinar cuál será la indicada para este tipo de aplicación.
- ✓ Dimensionar correctamente el cargador de baterías.
- ✓ Diseñar el sistema de control el cual incremente la eficiencia del sistema.
- ✓ Simular el sistema fotovoltaico para anticipar el comportamiento del mismo y ajustar el diseño.
- ✓ Simular el sistema de control que permite obtener la máxima potencia de los paneles usando el código que se implementará en el controlador.

5. MARCO REFERENCIAL

Para la realización de este proyecto, es necesario conocer las diferentes etapas que hacen parte de este, en la Fig. 1 se muestra un diagrama de bloques de esta aplicación, generalmente está compuesta por un arreglo de paneles solares encargados de la conversión de radiación solar a energía eléctrica, acompañados por un sistema de conversión de energía (convertidor DC-DC) diseñado para transferir la energía eléctrica a un conjunto de baterías y para lograr obtener una mayor eficiencia en la aplicación, es necesario implementar un algoritmo MPPT, porque este permitirá mejorar la eficiencia del sistema garantizando que a la salida del convertidor DC-DC siempre se esté obteniendo la máxima cantidad de energía posible.

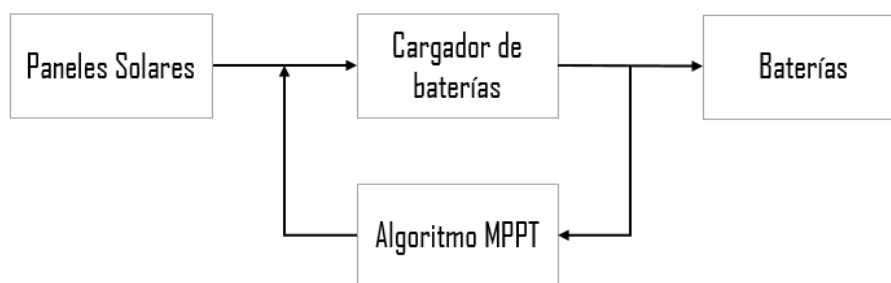


Fig. 1. Diagrama de bloques del cargador de baterías.

En Primer lugar, se va analizar la configuración del arreglo de paneles solares y ver que configuración conviene más al sistema, en segundo lugar, se analizaran los convertidores de energía que dependiendo de las características que se necesiten se elegirá la topología que más se ajuste a esta aplicación y, en tercer lugar, se hablará de los algoritmos MPPT para determinar cuál es el más adecuado para implementar al cargador de baterías.

5.1. Panel fotovoltaico.

Para aprovechar parte de la energía emitida por el sol, una de las opciones es la utilización de paneles solares dado que permiten convertir fotones en energía eléctrica, esto sucede debido a que los paneles fotovoltaicos están compuestos por muchas células, celdas y demás componentes que hacen parte de esta transformación de energía [13].

Los módulos solares para lograr obtener energía eléctrica, están fabricados con celdas solares fundamentalmente compuestas por dos láminas (carga negativa tipo N y carga positiva tipo P) semiconductoras de Silicio [14], encargadas de generar un diferencial de potencial debido al principio fotoeléctrico que las representa, en la Fig. 2 se puede observar un diagrama sencillo de la descripción del efecto fotoeléctrico, este principio es posible debido a que el sol constantemente está enviando fotones a la tierra [15, 16] los cuales al chocar con una superficie como los módulos solares, causa que los electrones se desprendan de los átomos de Silicio, permitiendo que se desplacen de un material semiconductor a otro, formando una diferencia de cargas lo que genera

un campo eléctrico el cual, por medio del convertidor DC–DC, se podrá aprovechar almacenándolo en un arreglo de baterías [17].

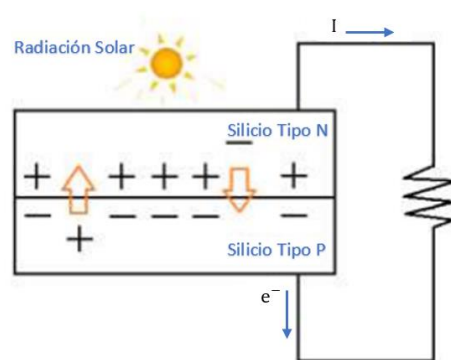


Fig. 2. Efecto fotoeléctrico. [18]

De igual modo se debe tener en cuenta que existen diferentes tipos de paneles solares y los más comercializados son:

- Panel Monocristalino: Están conformados por un único cristal de silicio, su estructura es completamente uniforme, no presenta tantas imperfecciones, por esa razón es un buen conductor de alta eficiencia, cuenta con un rendimiento del 15 % y el 18 %, por lo tanto, es considerado como una tecnología costosa, pero ideal para implementarse en diseños fotovoltaicos [19, 20].
- Panel Policristalino: Estas células fotovoltaicas están compuestas por silicio, su estructura no es uniforme y su eficiencia esta entre 12 % y 14 %, este tipo de panel es ideal para instalaciones en donde se realice un bajo consumo de energía, debido a que es menos eficiente, su tecnología tiene un costo menor con respecto a los paneles monocristalinos [21].

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los paneles solares tienen unas especificaciones técnicas en donde se determina el valor de voltaje, corriente y potencia que pueden suministrar, las cuales se deben considerar para realizar el dimensionamiento de los sistemas y así poder diseñar el arreglo fotovoltaico para las aplicaciones, considerando si se necesita un sistema para subir voltaje o corriente.

Otro aspecto a tener en cuenta son las conexiones para los paneles solares, porque existen diferentes tipos, en donde se encuentra:

Conexiones en serie, se suma el valor de voltaje y la corriente se mantiene constante, para esta configuración es fundamental que los paneles tengan las mismas especificaciones técnicas y modelos para evitar fallos en el sistema [22] su configuración se muestra en la Fig. 3.

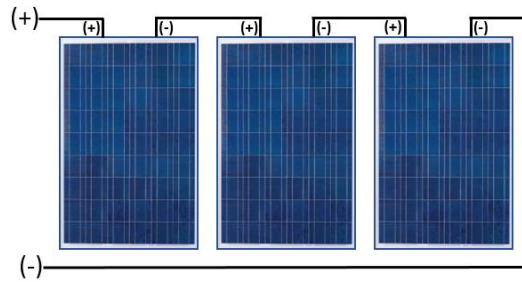


Fig. 3. Paneles solares conectados en serie.

Conexiones en paralelo, se mantiene estable el voltaje y la corriente aumenta [23] su conexión se muestra en la Fig. 4.

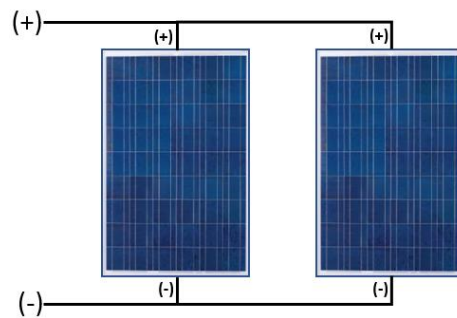


Fig. 4. Paneles solares conectados en paralelo.

Conexión mixta, aumenta el voltaje como la corriente del sistema. Por lo general, los arreglos de paneles solares son implementados con las mismas especificaciones, debido a que esto permite obtener un valor ideal de voltaje y corriente [24, 25], en la Fig. 5 se presenta su conexión.

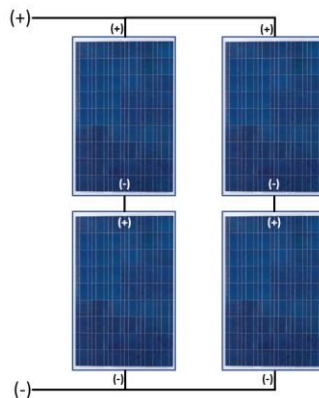


Fig. 5. Paneles solares conectados en mixto.

Para la configuración de paneles solares que tendrá el sistema de cargador de baterías, se encuentra la conexión en serie ya que permite elevar el voltaje y mantener constante la corriente, pero uno de sus inconvenientes tiene que ver con estar conectados todos los paneles solares en serie, porque solo existirá un cable que los unirá y si por algún caso un panel llegara a quedar fuera de servicio,

esto afectaría a todo el sistema reduciendo la eficiencia y desaprovechando gran parte de la energía solar.

Con respecto a la configuración en paralelo, cuando uno de los paneles se llegará a dañar u obstruir por nubes, árboles, aves etc., el rendimiento de los demás no se verá afectado, porque esta conexión permite que los paneles que están conectados sean independientes de los demás, brindando una mejor fiabilidad para el sistema, el único inconveniente que presenta esta conexión es con respecto a la corriente, porque a medida que aumentan las filas de los paneles aumentará la corriente y esto afectará al momento de diseñar el circuito, porque se deberán adquirir componente más costosos que soporten esos niveles altos de corriente.

Igualmente, si se quisiera aumentar tanto la tensión como la corriente del sistema, se deberá optar por una configuración mixta, esta configuración es la más indicada para este tipo de aplicaciones, porque permite controlar la corriente y el voltaje, adaptándose a las características que tendrán las baterías.

5.2. Convertidores DC–DC.

Este tipo de convertidores son circuitos que permiten modificar niveles de voltaje y corriente, con la finalidad de poder alimentar modernos sistemas electrónicos con el objetivo de mejorar su eficiencia, por este motivo, han sido un gran avance para el área de la electrónica de potencia, donde tienen un fuerte campo de investigación que busca mejorar sus diseños y técnicas de control con la finalidad de proporcionar potencias lo más estables posibles [26].

Con la llegada de nuevas tecnologías, surgió la necesidad de utilizar fuentes de energía eficientes y limpias, como las energías renovables que proporciona la naturaleza y que podemos transformar en energía eléctrica, pero en ocasiones esta energía no es lo suficientemente constante para lograr obtener la tensión requerida, así que es necesario hacer uso de los convertidores DC–DC para lograr regular la tensión de salida frente a las variaciones de carga que se logren presentar en la línea [27].

Entre las topologías clásicas de convertidores DC–DC se encuentran:

- a) Convertidores DC–DC no aislados: Son aquellos que no tienen un aislamiento físico o galvánico dentro del circuito, son usados en el punto de carga para crear las salidas de tensión que requieren los sistemas de alimentación.
 - Chopper: Son utilizados para aumentar o reducir potencias DC y crear una fuente variable a partir de una fuente constante DC para lograr suministrarla a los dispositivos la potencia requerida [28, 29].

- Buck: Este tipo de convertidor tiene una característica muy importante porque tiene la capacidad de reducir los niveles de tensión de manera eficiente para poder suministrarla en las diferentes aplicaciones que lo necesiten [30, 31] .
 - Boost: Es un tipo de topología que se encarga de aumentar el voltaje de entrada frente a variaciones que se puedan presentar, logrando de esta manera que se pueda obtener a la salida un voltaje constante que estará alimentando diferentes sistemas electrónicos [32, 33].
 - Buck-Boost: Este tipo de convertidor actúa como un elevador y reductor, combina las funciones que tiene el Buck y Boost para lograr mantener un mejor control en las variaciones de voltaje que se lleguen a presentar en las líneas de tensión, pero en la salida se obtiene un voltaje negativo [34, 35].
 - Sepic: La característica que tiene este convertidor es permitir que la tensión suministrada en el circuito genere un salida mayor o menor, es similar a la topología tradicional del Buck-Boost, pero este circuito generará una polaridad de voltaje dependiendo de la entrada [36, 37].
 - Cúk: El convertidor tiene la función de trabajar como elevador y reductor de voltaje, tiene la característica de acumular energía en los capacitores y no en los inductores, además a la salida va a presentar una polaridad invertida [38, 39].
 - Zeta: Al igual que el convertidor Sepic, entrega un voltaje dependiendo de la polaridad que se le suministre, además actúa como un elevador y reductor de tensión. [40, 41]
- b) Convertidores DC–DC aislados: Son los que tienen aislamiento físico o galvánico dentro del circuito, esto permite que este tipo de convertidores sean utilizados en aplicaciones donde la normatividad eléctrica requiera que los convertidores sean aislados por motivos de seguridad.
- Flyback: Este tipo de topología está distribuido con un aislamiento galvánico entre la entrada y salida del circuito, tiene una estructura similar al boost solo que no tiene inductancia porque implementa un transformador y es muy utilizado en aplicaciones de baja potencia [42, 43].
 - Forward: Es uno de los convertidores que más se utiliza para poder realizar conexiones directas a la red, funciona como un convertidor Buck destacando que este circuito cuenta con un transformador que se encarga de realizar las funciones de aislamiento [44].

Dado que el sistema no requiere un convertidor aislado y para no aumentar el presupuesto con los transformadores, en el presente proyecto se va a trabajar con convertidores DC–DC no aislado; Las topologías de los convertidores no aislados como el Buck-Boost y Cúk no se van a utilizar debido

a que entregan un voltaje negativo. Dentro de la selección de las topologías que sobresalen para implementarlas en el cargador de baterías se tiene el convertidor Buck, Boost, Sepic y Zeta.

La topología del convertidor Buck es una buena opción, porque estará reduciendo el voltaje de entrada a cualquier momento, permitiendo proteger el sistema cuando los paneles estén trabajando en su punto máximo y asegurando un suministro de carga constante para el arreglo de baterías.

Otra opción que se tiene es el convertidor Boost, pero como es una topología que se encarga de elevar el voltaje de entrada, obliga a tener un arreglo de baterías muy grande que con respecto al tamaño de la aplicación no es necesario.

Por lo anterior, las mejores opciones son las topologías Buck ya que permite disminuir el voltaje de entrada, también Sepic y Zeta, porque permite tanto aumentar como disminuir el voltaje y corriente de entrada, además de poder asegurar una potencia constante que permitirá cargar correctamente las baterías y evitar que éstas inicien a perder su vida útil.

5.3. Métodos de carga.

La batería es un elemento indispensable el cual se debe implementar en un sistema fotovoltaico que se encuentre aislado de la red, porque de esta manera se logrará el correcto aprovechamiento de parte de la energía solar, debido a que sin las baterías solo se tendría energía a partir de cierta hora [45, 46] teniendo en cuenta de que el clima no esté lluvioso o se presenten sombras que podrían afectar el correcto funcionamiento de los paneles solares.

Dentro de los tipos de baterías se tiene:

- Estacionarias: Este tipo de baterías se encuentran en lugares fijos, como estaciones solares y almacenan energía para después suministrarla en periodos largos de tiempo, son muy utilizadas en instalaciones fotovoltaicas.
- Arranque: Son implementadas en automóviles debido a que generan corrientes altas en cortos periodos de tiempo y están destinadas a suministrar carga y descarga constantemente, esto genera que su vida útil sea corta.
- Tracción: Suele implementarse en coches eléctricos y requieren de un gran suministro de energía durante periodos cortos de tiempo.

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes tipos de baterías, pero para la aplicación de paneles solares se utiliza comúnmente baterías estacionarias, porque no piden corrientes elevadas y son de uso cotidiano.

Finalmente, estos tipos de baterías se clasifican en:

- Plomo – Ácido (Pb-acido).
- Níquel – Cadmio (Ni-Cd).
- Níquel – Hidruro metálico (Ni-MH).
- Ion – Litio (Li-ion).
- Polímero – Litio (Li-Po).
- Zinc – aire.
- Celdas de combustible.

Una de las baterías más implementadas en la industria es la de Plomo – Ácido, en la Fig. 6 se observa un sencillo esquema que representa como está distribuido internamente una batería, esta se encuentra compuesta por dos placas, una de dióxido de plomo que actúa como el cátodo (-) y la otra de plomo que actúa como el ánodo (+), en medio de estas placas se encuentra una solución de ácido, también llamada electrolito [47], por ende, el método de descarga de una batería se produce cuando estas dos placas entran en contacto (cierra el circuito por una carga) y una corriente eléctrica inicia a fluir causando una oxidación que permite a los electrones de la placa de Plomo (ánodo) trasladarse a la placa de dióxido de Plomo (cátodo), este proceso causa que la placa de Plomo (ánodo) se oxide hasta llegar al punto de no tener electrones causando la descarga completa de la batería, este mismo proceso sucede cuando se logra cargar nuevamente la batería, lo que sucede es que se invierte esa oxidación, permitiendo que los electrones vuelvan al ánodo logrando que se cargue esta placa nuevamente de electrones para que estén disponibles una vez más para el proceso de oxidación-reducción [48].

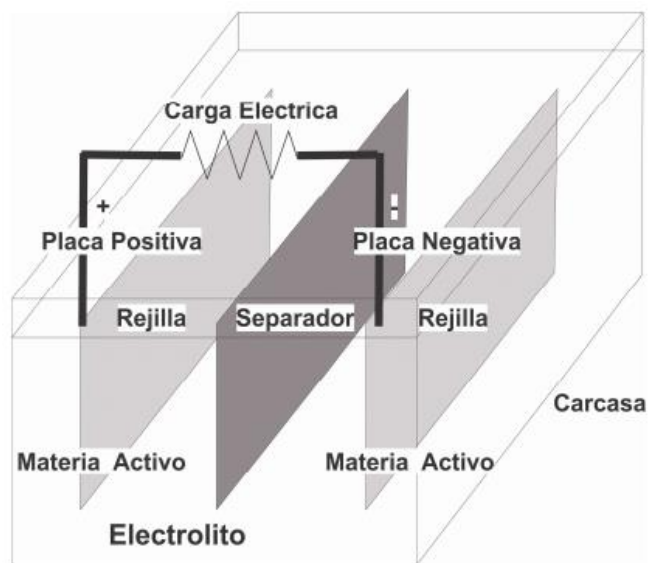


Fig. 6. Batería, configuración básica. [47].

Dentro de los métodos de carga de una batería se tiene:

- A. Método de recarga lenta: Consiste en aplicar constante una cantidad pequeña de corriente, permitiendo evitar el sobrecalentamiento en las baterías y protegiendo su vida útil, por tal motivo es considerado uno de los mejores métodos ya que permite recargar una batería completamente, pero el tiempo estimado variará respecto a la corriente que se le esté suministrando a la batería, este método es utilizado para baterías que estén conectadas en mixto (serie-paralelo) [49].
- B. Método de recarga rápida: Este método es implementado en ciertas ocasiones donde sea necesario la recarga rápida de las baterías, este método no es recomendable utilizarlo porque no permite cargar completamente el arreglo de baterías y lo único que causa, es el deterioro y reducción de la vida útil de estas [50, 51] .
- C. Método de carga voltaje constante: Este procedimiento consiste en aplicar un voltaje constante a las baterías y a medida que va aumentando la energía en la carga, el voltaje disminuirá, así mismo la corriente aumentará hasta llegar al punto límite que es cuando la batería alcanzará su carga máxima. Este método es bastante apropiado porque ayuda a proteger la vida útil de las baterías [52].
- D. Método de carga corriente constante: Este método de carga consiste en entregar una corriente constante a la batería sin considerar el estado de carga que esta tiene, además, esto causa sobrecalentamiento si se llega a sobrecargar, por tal motivo este método es adecuado, pero para cargar baterías que sean de Ni-MH [53, 54].
- E. Corriente constante / Voltaje constante: Este tipo de método de carga es considerado como uno de los más apropiados para lograr realizar una carga completa de un arreglo de baterías, porque permite realizar una carga inicialmente con corriente constante hasta que las baterías llegan a cierto punto de carga (80%) [55], después la corriente disminuirá gradualmente y se ingresará un voltaje constante que permitirá cargar las baterías [56].

Referente a los diferentes métodos de carga de una batería mencionados anteriormente, se resalta el método de corriente constante / Voltaje constante, porque es el método que más presenta fiabilidad para este tipo de aplicaciones (cargador de baterías con paneles solares) y además que permite cargar una batería de manera eficiente y protegerlas de las sobrecargas.

5.4. Algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracker).

Este tipo de algoritmos, son un método que se implementa para lograr obtener una mejor eficiencia en los paneles solares, ya que pueden rastrear el punto de máxima potencia que estos tienen, logrando que los sistemas trabajen mejor y así aprovechar las horas que se tenga al día de energía solar.

En la Fig. 7 se observa el punto de máxima potencia que tienen los paneles solares, este punto es el que se representa cuando la carga logra coincidir con la resistencia que tienen los paneles solares a cierto nivel de temperatura y permite analizar el comportamiento que estos tienen, determinando que a medida que aumenta el voltaje por los fotones emitidos del sol, la potencia aumentará.

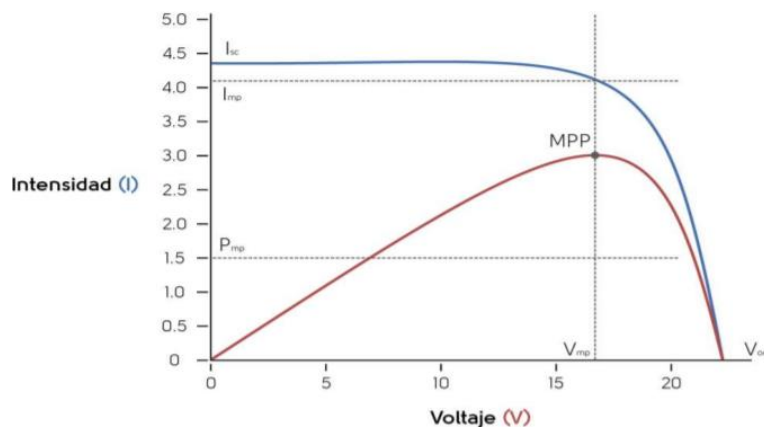


Fig. 7. Punto de máxima potencia. [55].

En la actualidad existe gran variedad de algoritmos MPPT enfocados en mejorar la generación y carga de energía en los sistemas, donde se obtiene:

- Método de perturbación y observación (P&O): Es un algoritmo que se encarga de generar perturbaciones en la tensión obtenida de los paneles solares, garantizando que se esté obteniendo la potencia máxima. Este algoritmo es una técnica que se puede implementar fácilmente, porque permite realizar una buena extracción de potencia, pero puede fallar en condiciones atmosféricas donde constantemente se presente sombras, ya que tiene una baja velocidad de seguimiento del punto de máxima potencia [57, 58].
- Método de conductancia incremental (ICT): Este algoritmo aplica una metodología más compleja que P&O y siempre tendrá presente el punto de máxima potencia de los paneles solares y la derivada de potencia con respecto al voltaje será nula [59], aunque no es muy probable lograr esta condición debido a varios factores, pero este algoritmo aumenta o reduce el valor de tensión que se esté obtenido para lograr alcanzar ese punto de máxima potencia y cuando logra llegar a la tensión requerida por el sistema, esta permanecerá constante.

- Método de referencia constante (Constant Reference): Se utiliza para indicarle al convertidor que debe variar constantemente los niveles de tensión y corriente para poder alimentar la carga correctamente, este algoritmo es simple, no es muy preciso, no considera las variaciones de temperatura en los paneles y tiene gran dificultad para elegir el punto de máxima potencia [60].
- Current-Based Maximum Power Point Tracker (CMPPT): Es un método que agrega un interruptor adicional a los convertidores DC–DC con el propósito de poder generar un corto circuito en el campo fotovoltaico, el único inconveniente que tiene esta técnica es que reduce la potencia de salida afectando el diseño que se haya realizado para la aplicación [61].
- Voltage-Based Maximum Power Point Tracker (VMPPT): Este algoritmo tiene la característica que, al iniciar el procedimiento de conversión de fotones a energía eléctrica, enviar una potencia errónea por un periodo de tiempo donde se puede llegar a quemar el circuito, además puede apagar instantáneamente el convertidor DC–DC causando pérdidas de energía [62].

6. DISEÑO METODOLÓGICO

La realización del presente proyecto, parte principalmente en buscar una solución de energía alternativa que permita ayudar a comunidades alejadas de las ciudades el tener acceso a un suministro eléctrico, debido a esto surgió la idea de desarrollar un cargador de baterías alimentado por paneles solares, conformado por un convertidor DC–DC encargado de realizar la correcta transferencia de energía al arreglo de baterías.

En la Fig. 8 se presenta un diagrama de bloques con los procesos que se llevarán a cabo en el desarrollo del proyecto.



Fig. 8. Diagrama del desarrollo de trabajo de grado.

- El primer proceso se desarrollará de manera teórica, en donde se dimensionan los convertidores de energía, teniendo en cuenta el voltaje de entrada que estará definido por el arreglo de paneles solares, el voltaje de salida definido por el arreglo de baterías y la potencia dada por el diseñador.
- En el segundo proceso se simularán los convertidores para observar su funcionamiento eléctrico y realizar un análisis técnico con los resultados obtenidos, así determinar si las topologías están entregando la carga necesaria.
- El tercer proceso consiste en comparar dos algoritmos, estos se agregarán a las topologías para observar cómo actúan frente a las variaciones de radiación solar y temperatura.
- En el cuarto proceso se seleccionará el convertidor con base a los resultados obtenidos de simulación, poder determinar que convertidor es el que mejor presenta balance entre el funcionamiento y los costos para iniciar con el diseño de la PCB.
- En el quinto proceso se realizarán las pruebas del convertidor junto con el algoritmo en el software de simulación PSIM, estas pruebas se harán para comprobar que el convertidor esté

funcionando y entregando la potencia con la que fue diseñado, esto con el objetivo de determinar si el convertidor está funcionando correctamente y si el algoritmo está actuando frente a las perturbaciones que se le agregaron a la simulación.

- Y el quinto proceso consiste en agregar el análisis de resultados y conclusiones que se han obtenido en el desarrollo del proyecto.

Dentro de los principales parámetros que se deben tener en cuenta para lograr un eficiente sistema, encontramos:

- Irradiación Solar.
- Número total de paneles solares.
- Voltaje y Corriente Nominal del módulo.
- Voltaje del Sistema.
- Voltaje y Corriente sobre cada componente.
- Eficiencia de las baterías.
- Capacidad requerida por el arreglo de Baterías.
- Potencia total del sistema.

DESARROLLO DEL PROYECTO

7. CAPÍTULO 1: RECURSO SOLAR Y DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SOLARES

Para realizar el diseño del sistema fotovoltaico, se inicia con determinar los niveles de tensión, corriente y potencia que pueden suministrar los paneles solares que se piensan utilizar, este análisis se hace para iniciar con el modelamiento matemático que permitirá determinar la cantidad de paneles que serán necesarios para el funcionamiento de la aplicación, además con ayuda de la herramienta de simulación PSIM, se podrá observar el funcionamiento del arreglo de paneles solares para determinar si están generando la carga suficiente para alimentar a todo el sistema.

7.1. Radiación solar Tunja - Boyacá

Colombia al contar con niveles significativos de radiación solar, permite que se postule como una fuente alternativa de generación de energía eléctrica que podría competir contra las fuentes fósiles y de combustible encargadas de distribuir energía eléctrica a todo el mundo [63]. En la Fig. 9 se presenta el mapa de Colombia con los niveles de radiación solar disponible por la página IDEAM y proporciona los niveles que se obtienen durante el año, pero no indica cuál es la radiación que día a día se está obteniendo en la ciudad de Tunja – Boyacá.

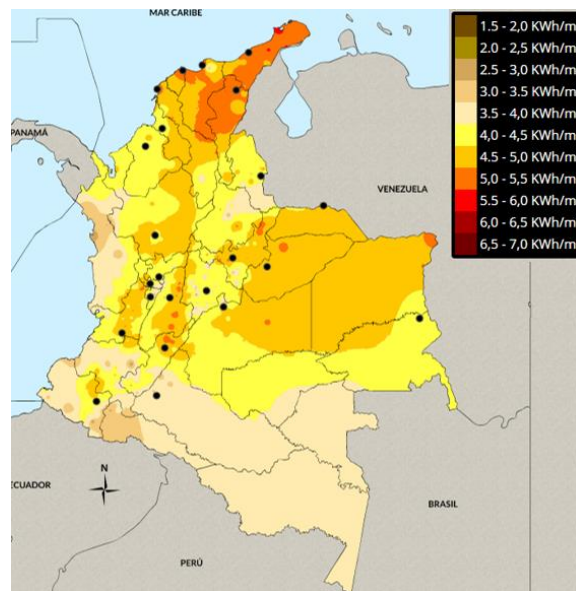


Fig. 9. Atlas Radiación Solar Colombia. [64]

A causa de que la página IDEAM no facilita los datos diarios de radiación solar, se hizo uso de la página web “Weather Spark” donde se obtuvieron los niveles que día a día se están presentando en la ciudad de Tunja – Boyacá desde enero del 2020; En la Tabla 1 se observa los niveles de radiación solar que se están obteniendo en la ciudad, con los cuales se procederá a realizar un análisis

matemático para obtener la cantidad de módulos solares que se necesitarán para generar los 320 W que se requieren para la aplicación.

Wh												
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	790	830	820	770	760	750	780	820	850	810	730	730
2	790	840	820	770	760	750	780	820	850	800	730	730
3	800	840	820	770	760	750	780	820	850	800	720	730
4	800	840	810	770	760	750	780	820	850	800	720	730
5	800	840	810	770	750	750	780	830	860	790	720	740
6	800	840	810	770	750	750	780	830	860	790	720	740
7	800	840	810	770	750	760	780	830	850	790	720	740
8	800	840	810	770	750	760	780	830	860	780	720	740
9	800	830	810	760	750	760	780	830	860	780	720	740
10	810	830	800	760	750	760	780	830	860	780	710	750
11	810	830	800	770	750	760	780	830	850	770	720	750
12	810	830	800	770	740	760	780	840	860	770	720	750
13	810	830	800	760	740	770	780	840	860	770	720	750
14	810	830	800	760	740	770	790	840	850	760	720	760
15	810	830	800	760	740	770	790	840	850	760	720	760
16	810	830	800	760	740	770	790	840	850	750	720	760
17	810	830	800	760	740	770	790	850	850	750	710	760
18	820	830	790	760	740	770	790	850	850	750	710	770
19	820	830	790	760	740	770	790	850	840	740	710	770
20	820	830	790	750	740	770	800	850	840	740	710	780
21	820	830	790	750	740	770	800	850	840	740	710	780
22	820	830	790	750	750	770	800	850	840	740	710	780
23	820	830	790	750	750	770	800	850	830	740	720	780
24	820	830	790	750	750	780	800	850	830	740	720	780
25	820	830	790	750	750	780	810	850	830	740	720	780
26	820	830	780	750	740	780	810	850	830	740	720	790
27	820	830	780	760	740	780	810	850	820	730	720	790
28	820	830	780	760	740	780	810	850	820	730	720	790
29	830	820	770	760	740	780	810	850	820	730	720	790
30	830		770	760	740	780	810	850	810	730	720	790
31	830		770		750		820	850		730		790
Total	25.170	24.130	24.690	22.830	23.140	22.990	24.560	26.040	25.320	23.570	21.550	23.620
Promedio	811,94	832,07	796,45	761,00	746,45	766,33	792,26	840,00	844,00	760,32	718,33	761,94

Tabla 1. Promedio radiación solar diaria sobre Tunja - Boyacá 2020.

7.2. Hora solar pico (HSP)

La HSP corresponde a la cantidad de horas en donde se presenta la irradiación solar ideal correspondiente a $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ en donde se puede obtener el máximo potencial que pueden entregar los paneles solares cuando el sol se encuentre situado en el punto más alto, en la Fig. 10 se encuentra un diagrama en donde se visualiza que la mayor irradiación se encuentra en las horas centrales al medio día y la ecuación que se utiliza para realizar el cálculo de las horas pico se encuentra en (1).

$$\text{HSP} = \frac{\text{Irradiación Global}}{1\ 000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (1)$$

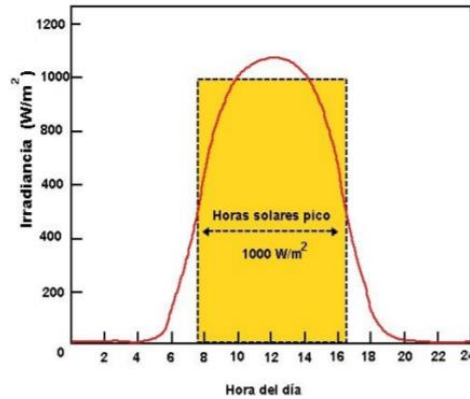


Fig. 10. Hora Solar Pico. [65]

7.3. Módulo Solar

Los paneles solares que se utilizarán en la aplicación serán de tipo de celda policristalina, adquiridos por la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja y disponibles para la facultad de ingeniería electrónica, estos paneles son de modelo APM – 150, con una potencia máxima de 150W y una tensión de 18V con la que se realizará el diseño de la planta, teniendo en cuenta la cantidad de potencia que se necesitará para poder cargar el arreglo de baterías; En la Tabla 2 se encuentran las características correspondientes al panel que se deben tener presente al dimensionar el sistema.

PANEL SOLAR	
Modelo	APM-150
Número de celdas (Ns)	36
Potencial Nominal (Pmax)	150,0 W
Voltaje Máximo (Vmp)	18,0 V
Corriente Máxima (Imp)	8,34 A
Voltaje circuito abierto (Voc)	23,2 V
Corriente circuito abierto (Isc)	8,87 A
Temperatura Coef. de Voc	-0.38
Temperatura Coef. de Isc	0,05
Condiciones de prueba estándar	1 000 W/m ²
Temperatura (Tref)	25°C
Tipo de celda	Policristalina

Tabla 2. Características Panel Solar.

7.3.1. Dimensionamiento paneles solares

En el título “MARCO REFERENCIAL” del presente documento, se ha explicado cómo está conformado un módulo solar y algunos tipos de paneles que se encuentran en el mercado actualmente. En este apartado, se presentará el respectivo estudio y análisis matemático que se realizó para definir cuál será la configuración de paneles solares que se implementará en el sistema.

Es necesario realizar este estudio porque la principal fuente de generación de energía es el arreglo de paneles solares, es decir, si queda mal un cálculo matemático se podría estar obteniendo una carga que el convertidor no podría soportar, ocasionando pérdidas que generarían gastos innecesarios afectando el presupuesto y tiempo del trabajo.

A continuación, se inicia con el procedimiento para determinar la cantidad de paneles que se necesitará el sistema.

Tomando el dato de irradiación de la Fig. 9 y la ecuación (1), se obtiene:

- Irradiación Global: $4,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$

$$\text{HSP} = \frac{\text{Irradiación Global}}{1\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\text{HSP} = \frac{4,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{1\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$\text{HSP} = 4,5 \text{ h} \quad (2)$$

La ecuación (2), expresa aproximadamente el número de horas en las que el sol se encontraría en su punto más alto, en donde se obtendría la potencia máxima de los módulos solares, con ayuda de la ecuación (3) se podrá determinar la potencia que estaría generando un panel en esas 4,5 horas disponibles.

7.3.2. Energía generada por panel

- Pmax: 150 W

$$E_{pt} = P_{\text{max}} * \text{HSP} * \left(\frac{V_{p\text{max}}}{V_p} \right) \quad (3)$$

$$E_{pt} = 150 \text{ W} * 4,5 \text{ h} * \left(\frac{23,2 \text{ V}}{18 \text{ V}} \right)$$

$$E_{pt} = 870 \text{ Wh} \quad (4)$$

En la ecuación (4), se obtiene la cantidad de potencia que cada panel estaría generando en esas 4,5 horas disponibles de mayor intensidad de radiación solar.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en la ciudad de Tunja – Boyacá por motivos de cambios climáticos, obstrucción de nubes u objetos, no se puede asegurar que siempre se esté obteniendo esos 870 Wh, por tal motivo se hace un promedio para poder asegurar que se obtenga a la salida

del convertidor la potencia con la que se ha diseñado el sistema, evitando generar pérdidas que podrían afectar su correcto funcionamiento.

7.3.3. Promedio de energía obtenida en los paneles solares

Haciendo uso del resultado obtenido en la ecuación (4), se procede a reemplazar el dato en la ecuación (5) para obtener el promedio de potencia que generaría cada panel:

$$E_{pt_{prom}} = \frac{E_{pt}}{2} \quad (5)$$

$$E_{pt_{prom}} = \frac{870Wh}{2}$$

$$E_{pt_{prom}} = 435 Wh \quad (6)$$

Y como resultado se obtiene la ecuación (6), que indica la potencia que entregaría cada panel durante las horas de máxima radiación solar.

7.3.4. Análisis de la configuración mixta para los módulos solares

Como fue mencionado en el título de “Panel fotovoltaico.” existen diferentes conexiones que se pueden realizar para conectar entre si diferentes módulos solares, además se explicó cada configuración y se concluyó que la conexión más adecuada para este tipo de aplicación es la mixta.

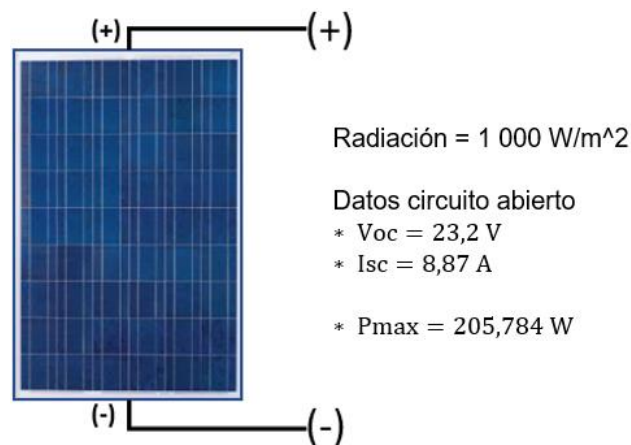


Fig. 11. Módulo APM-150.

En la Fig. 11 se observa el panel que se va a utilizar con sus especificaciones en circuito abierto que entrega el fabricante, con los cuales se va a dimensionar el sistema.

- Configuración mixta con dos filas y 4 paneles solares.

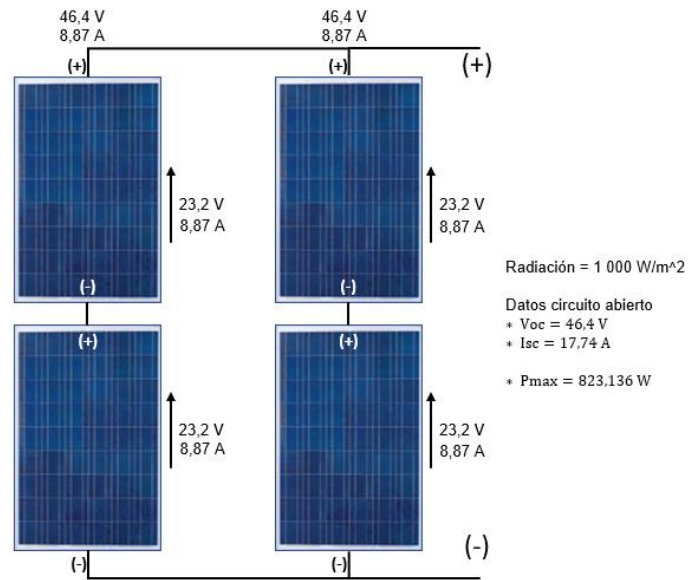


Fig. 12. Configuración mixta arreglo con 4 paneles solares.

- Configuración mixta con 2 filas y 6 paneles solares.

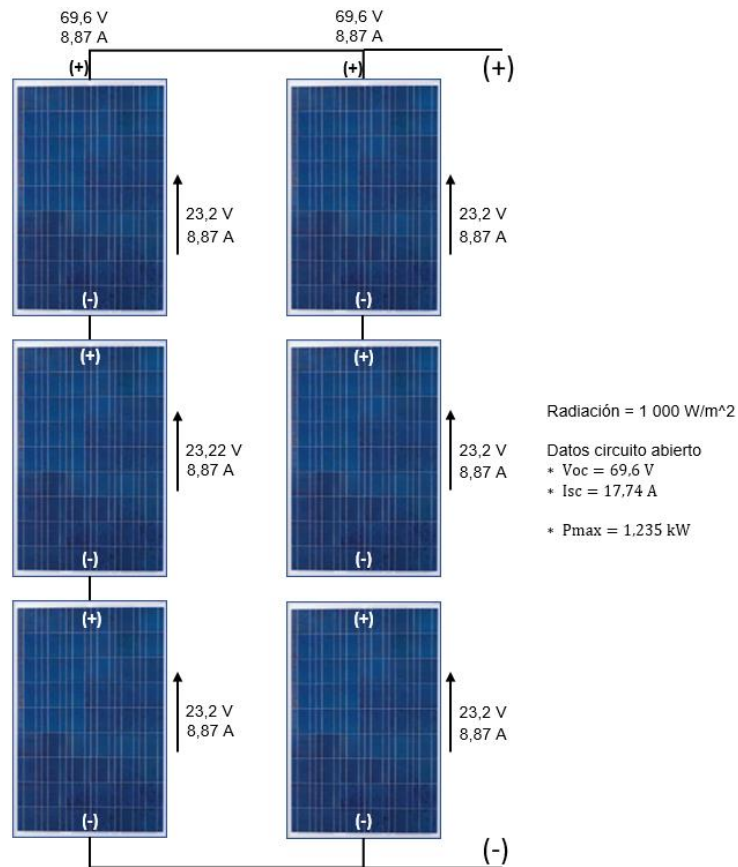


Fig. 8. Configuración mixta 1.

- Configuración mixta con 3 filas y 4 paneles solares

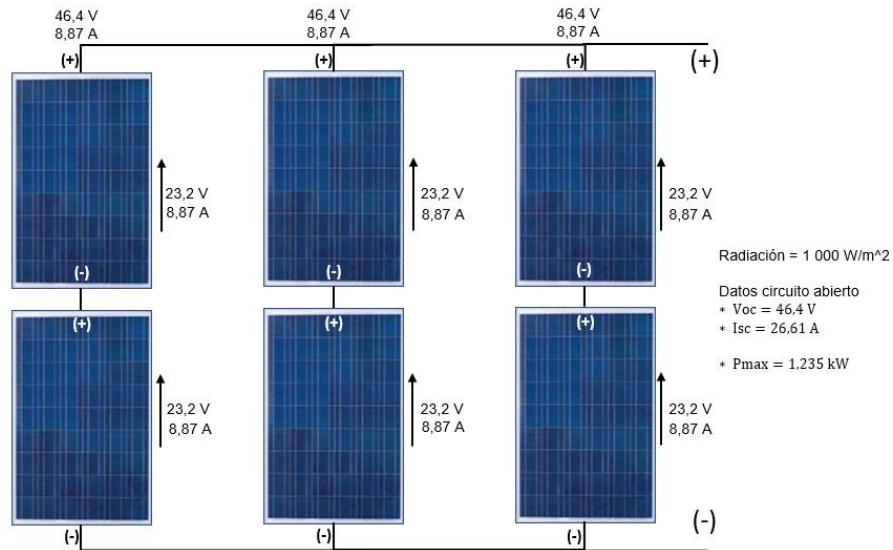


Fig. 13. Configuración mixta 2.

En la Fig. 12, Fig. 12 y Fig. 13, se evidencia el análisis que se realizó para poder definir la configuración que tendrá el arreglo de paneles solares en la aplicación, sin embargo hay que tener en cuenta que se requerirá sacar constantemente la potencia que necesitará el sistema, a pesar de que la radiación solar no esté en su punto más alto; Por este motivo se eligió la distribución de paneles que se encuentra en la Fig. 13, pero a pesar de que el sistema quedará sobredimensionado, permitirá asegurar que durante las horas del día se esté generando la potencia necesaria para cargar el arreglo de baterías.

7.4. Simulación panel solar

El análisis y simulación del panel solar permitirá identificar cuál es su punto de máxima potencia, esto se realizará con los datos registrados en la Tabla 2 para simular su funcionamiento y poder analizar las gráficas de:

Corriente Vs Voltaje.

Potencia Vs Voltaje.

La Fig. 14 permite visualizar la característica curva de Corriente – Voltaje que presenta un módulo solar y se destacan 3 puntos importantes, en esta parte del análisis se resalta el punto de máxima transferencia de potencia, porque este trabajo tiene como un objetivo específico diseñar un sistema de control el cual incremente la eficiencia del sistema, esto para ayudar al arreglo de paneles solares a operar siempre en su punto de máxima potencia, garantizando un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

- Cortocircuito (0, I_{sc}).
- Máxima transferencia de potencia (V_{mp} , I_{mp}).
- Circuito abierto (V_{oc} , 0).

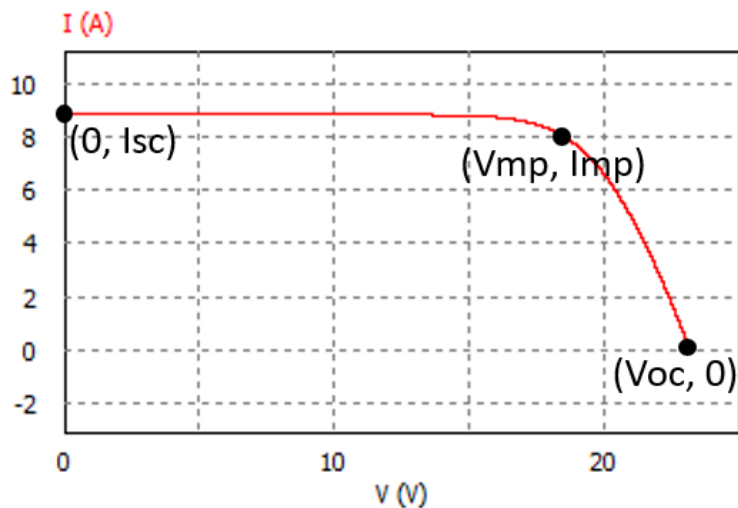


Fig. 14. Curva características de Corriente Vs Voltaje de un panel fotovoltaico.

La Fig. 15 muestra el comportamiento que presentará el panel solar a medida que vaya adquiriendo fotones emitidos por el sol, además indica su punto de máxima potencia que será de 150 W y también se observa que dependiendo de las condiciones climáticas esta potencia irá variando.

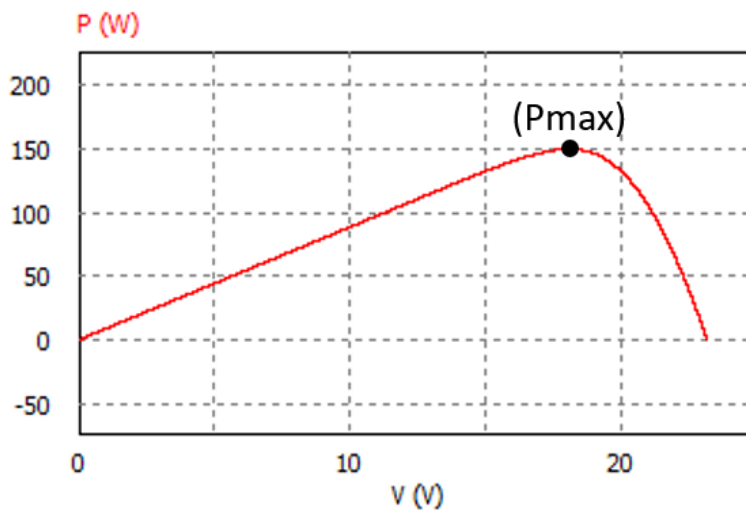


Fig. 15. Curva característica de Potencia Vs Voltaje de un panel fotovoltaico.

Para realizar la simulación del módulo solar, se hizo uso del software de simulación PSIM y su librería de energías renovables (Renewable Energy) para seleccionar el módulo solar. Este software de simulación de igual manera permite modificar los diferentes datos para adaptarlo al panel seleccionado; En la Fig. 16 se evidencia el modelo del panel solar para realizar las diferentes pruebas de simulación.

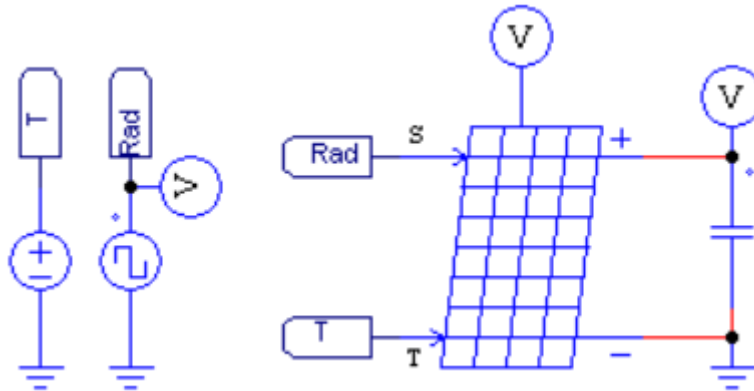


Fig. 16. Panel Sola Psim.

Las señales que se evidencian en la Fig. 17 representan la radiación solar, salida de voltaje y potencia del módulo solar, también se puede observar cómo la variación de la radiación solar afecta los niveles de potencia y voltaje del panel solar. A causa de esto surgió la necesidad de implementar un sistema para los paneles solares que permita controlar esos cambios de potencia sin afectar el funcionamiento del sistema.

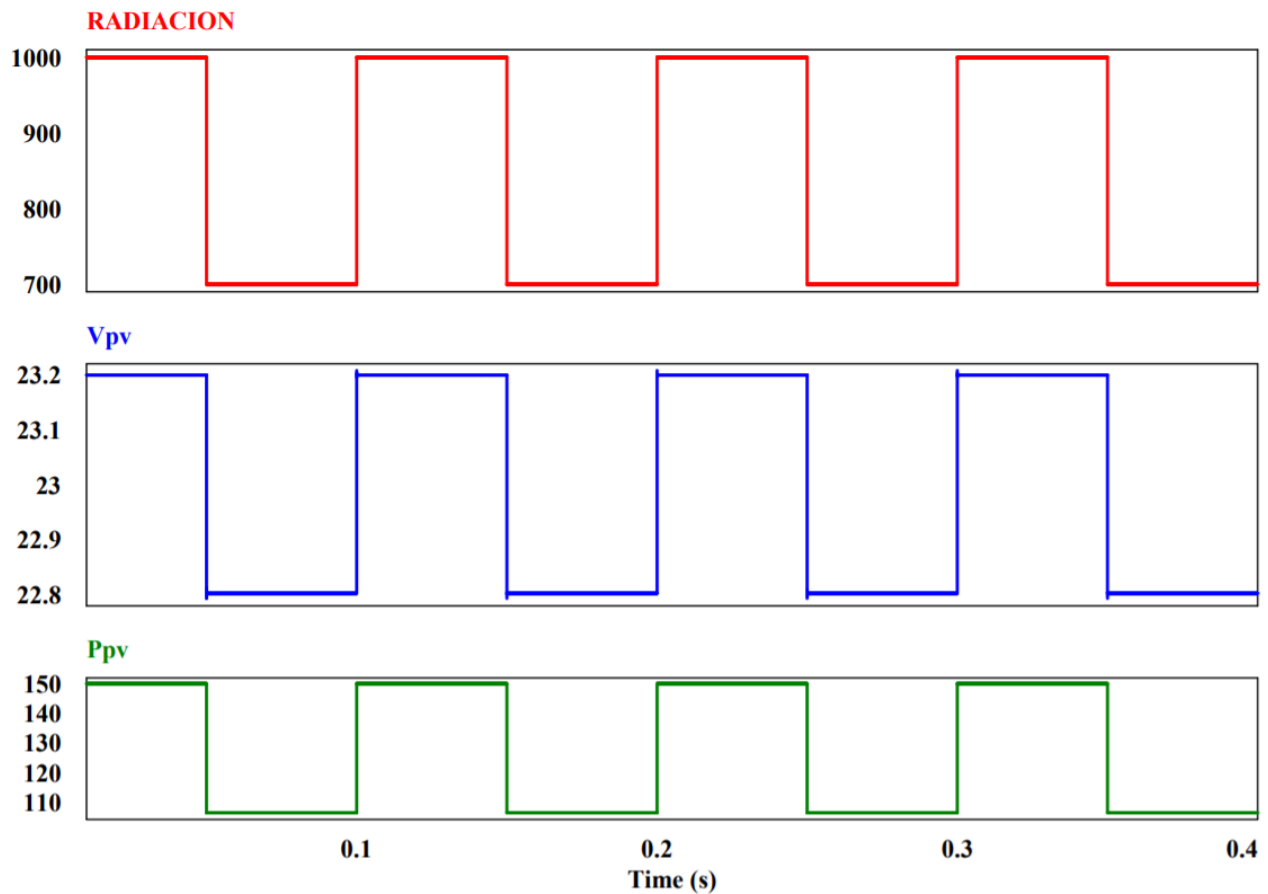


Fig. 17. PSIM Voltaje y Potencia generada por cada panel.

8. CAPITULO 2: DIMENSIONAMIENTO DE LOS CONVERTIDORES DC-DC

En el siguiente apartado, se procederá a realizar un estudio y análisis de las topologías seleccionadas en el título “Convertidores DC-DC.”, las cuales son: Convertidor Buck, Sepic y Zeta. Este análisis se realizó para poder observar el funcionamiento de cada convertidor y así determinar que topología presenta mejor resultado para la aplicación.

Este estudio consiste en desarrollar el modelo matemático que representa a cada convertidor DC-DC y así poder obtener las ecuaciones que permitirán hallar los valores de inductancias, condensadores, además de la selección del Mosfet y Diodo adecuado para su implementación.

8.1. Análisis convertidor Buck

En la Fig. 18 se presenta el circuito del convertidor DC-DC reductor o Buck, con el que se realizará el análisis del circuito y con ayuda de la ecuación (7) poder representar los dos cambios de estado en los que se encontrará el convertidor:

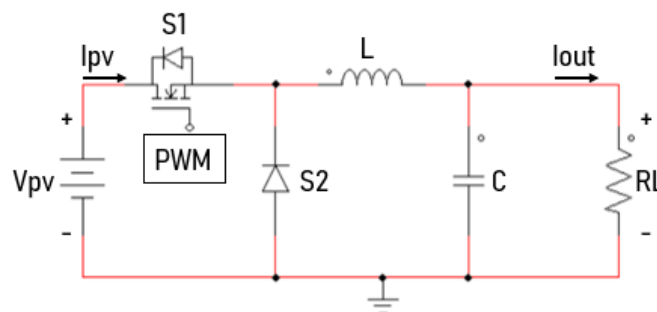


Fig. 18. Convertidor DC-DC tipo Buck.

$$\begin{aligned} S1 \text{ (ON)} & 0 \leq t \leq t_1 \\ S2 \text{ (ON)} & t_1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (7)$$

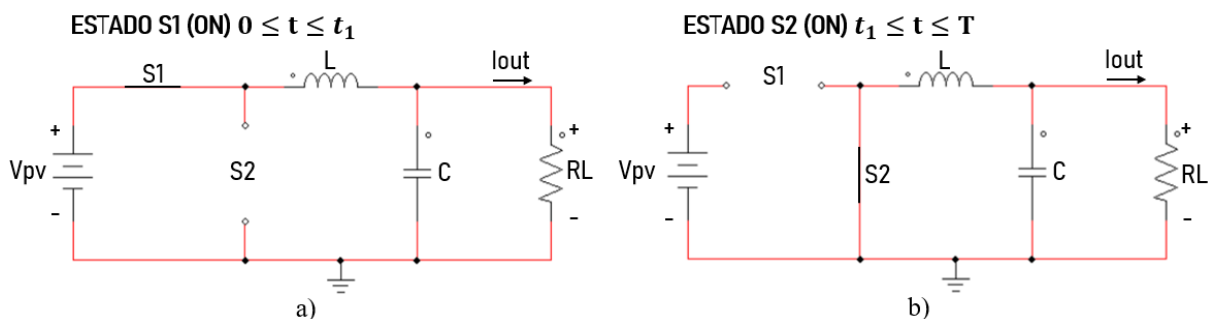


Fig. 19. Estados del convertidor Buck.

Analizando el circuito de la Fig. 19 se obtiene:

Estado S1 (ON)	Estado S2 (ON)
$V_L = V_{in} - V_{out}$	$V_{L1} = -V_{out}$
$I_c = I_L - I_{out}$	$I_c = I_L - I_{out}$

Tabla 3. Datos obtenidos del circuito Buck.

Conociendo las consideraciones del circuito (ecuación (7)) y los cambios de estado del convertidor Fig. 19, se dará paso al desarrollo a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_L(t) dt = 0 \quad (8)$$

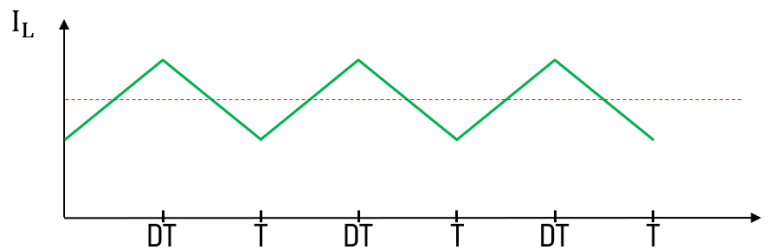


Fig. 20. Corriente del inductor en el tiempo.

La ecuación (8) representa el balance de flujo de la inductancia, está ecuación se obtiene con ayuda de la Fig. 20 y, la forma que realiza el inductor en el tiempo se debe porque la inductancia no almacena energía.

El reemplazo mostrado previamente hace referencia a la suma de las integrales en los dos tiempos que presenta el circuito de la Fig. 19.

$$\int_0^{t_1} (V_{in} - V_{out}) dt + \int_{t_1}^T -V_{out} dt = 0$$

$$V_{in}t_1 - V_{out}t_1 - V_{out}T + V_{out}t_1 = 0$$

$$t_1 = DT$$

$$V_{in}DT - V_{out}DT - V_{out}T + V_{out}DT = 0$$

$$V_{in}D = V_{out}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (9)$$

Y finalmente la ecuación (9) correspondiente a la función de transferencia a partir de la cual se hallará el ciclo útil del convertidor Buck.

8.1.1. Gráficas del convertidor Buck

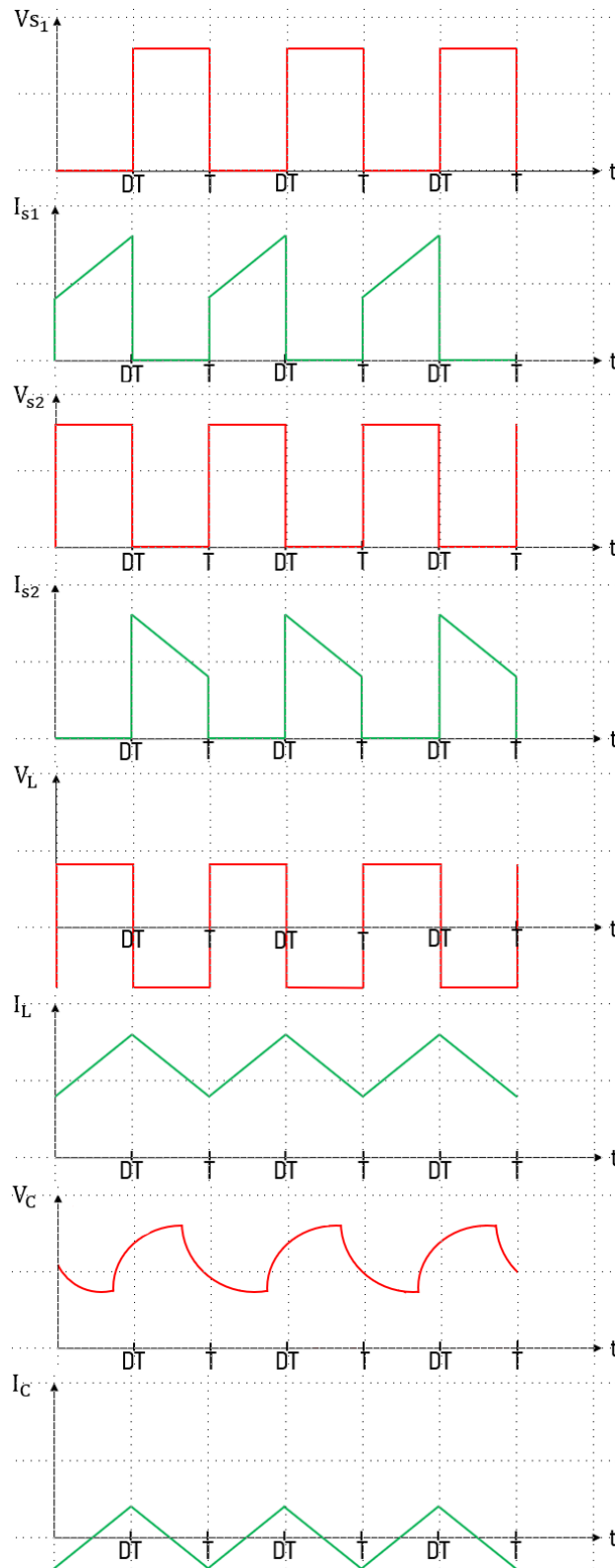


Fig. 21. Formas de onda del Convertidor Buck.

8.1.2. Ecuaciones convertidor Buck

Para realizar el diseño del convertidor Buck se debe hacer uso de las siguientes ecuaciones:

En la ecuación (9) se definió el ciclo útil de trabajo del convertidor.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Para obtener la ecuación que permita hallar el valor de la inductancia, se hace uso de la Fig. 21, analizando la pendiente de corriente de la inductancia (I_L):

$$\begin{aligned} 2\Delta_{iL} &= \frac{V_o}{L} (T - DT) \\ \Delta_{iL} &= \frac{V_o}{2Lf} (1 - D) = \frac{V_{in} - V_o}{2Lf} D \\ L &= \frac{V_o}{2f\Delta_{iL}} (1 - D) \end{aligned} \quad (10)$$

Como resultado se obtiene la ecuación (10), con la que se puede calcular la inductancia, pero se debe tener en cuenta:

- V_o : Voltaje de Salida
- f : Frecuencia
- Δ_{iL} : Ripple (Rango entre 5% y 10%)
- D : Ciclo Útil

Para el caso del condensador, nuevamente se hace uso de la Fig. 21 con la gráfica de corriente del condensador (I_C), obtenido:

$$\begin{aligned} V_C &= \frac{T}{2} \cdot \Delta_{iL} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \\ \Delta_{Vc} &= \frac{\Delta_{iL}}{4fC} \\ C &= \frac{\Delta_{iL}}{4f\Delta_{Vc}} \end{aligned} \quad (11)$$

Con ayuda de la ecuación (11) se calcula el valor del condensador, teniendo en cuenta:

- Δ_{iL} : Ripple (Rango entre 5% y 10%)
- f : Frecuencia
- Δ_{Vc} : Ripple del Condensador (Rango entre 1% y 2%)

De esta manera, se puede definir el valor que tendrán los componentes que conformarán al convertidor Buck y evitar generar inconvenientes con su implementación.

8.1.3. Diseño del convertidor Buck

Para empezar con el diseño del convertidor, inicialmente se deben definir las características que este tendrá, después se realizará un análisis en lazo abierto para determinar si los componentes calculados pueden soportar la carga que se le exige al sistema y así poder iniciar a diseñar el sistema de control. Todo esto se hace para verificar por medio de un software de simulación si los valores obtenidos son funcionales.

A continuación, empleando las ecuaciones anteriormente definidas, se procede a obtener los valores de Ciclo útil, Inductancia y Capacitancia para el diseño del controlador:

- Voltaje de entrada: 70 V
- Voltaje de salida: 24 V
- Potencia: 320 W
- Frecuencia: 50 kHz

Ciclo útil.

$$D = \frac{24 \text{ V}}{70 \text{ V}} = 0.3428 \approx 34 \%$$

Corriente de salida y entrada.

$$i_{\text{in}} = \frac{P}{V_{\text{in}}} = \frac{320 \text{ W}}{70 \text{ V}} = 4,57 \text{ A}$$

$$i_{\text{out}} = \frac{P}{V_{\text{out}}} = \frac{320 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 13,33 \text{ A}$$

Valor de la Inductancia.

$$\Delta_{iL} = \text{ripple} \cdot i_{\text{out}}$$

$$\Delta_{iL} = 6,6665$$

$$L = \frac{V_{\text{out}}}{2f\Delta_{iL}} (1 - D)$$

$$L = 23,659 \mu\text{H}$$

Valor del Condensador.

$$\Delta_{Vc} = \text{ripple} \cdot V_{\text{out}}$$

$$\Delta_{V_c} = 0,24$$

$$C = \frac{\Delta_{i_L}}{4f\Delta_{V_c}}$$

$$C = 138,88 \mu\text{F}$$

Valor resistencia de Carga.

$$R = \frac{V_{out}}{i_{out}}$$

$$R = \frac{24 \text{ V}}{13,33 \text{ A}} = 1,8 \Omega$$

En la Tabla 4 se presentan los parámetros obtenidos de manera teórica para la implementación del convertidor Buck.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Voltaje de entrada, circuito abierto (V_{in})	70 V
Voltaje de entrada, circuito cerrado (V_{in})	54 V
Voltaje de salida (V_{out})	24 V
Potencia (P)	320 W
Frecuencia (f)	50 kHz
Ciclo útil (D)	34%
Corriente de entrada (i_{in})	4,57 A
Corriente de salida (i_{out})	13,333 A
Valor inductancia (L)	23,659 μH
Valor condensador (C)	138,88 μF
Resistencia de carga (R_L)	1,8 Ω

Tabla 4. Parámetros del diseño para el convertidor Buck.

8.1.4. Simulación en lazo abierto del convertidor Buck

En Psim, se ha implementado el circuito del convertidor Buck con los datos obtenidos en la Tabla 4. obteniendo el circuito de la Fig. 22.

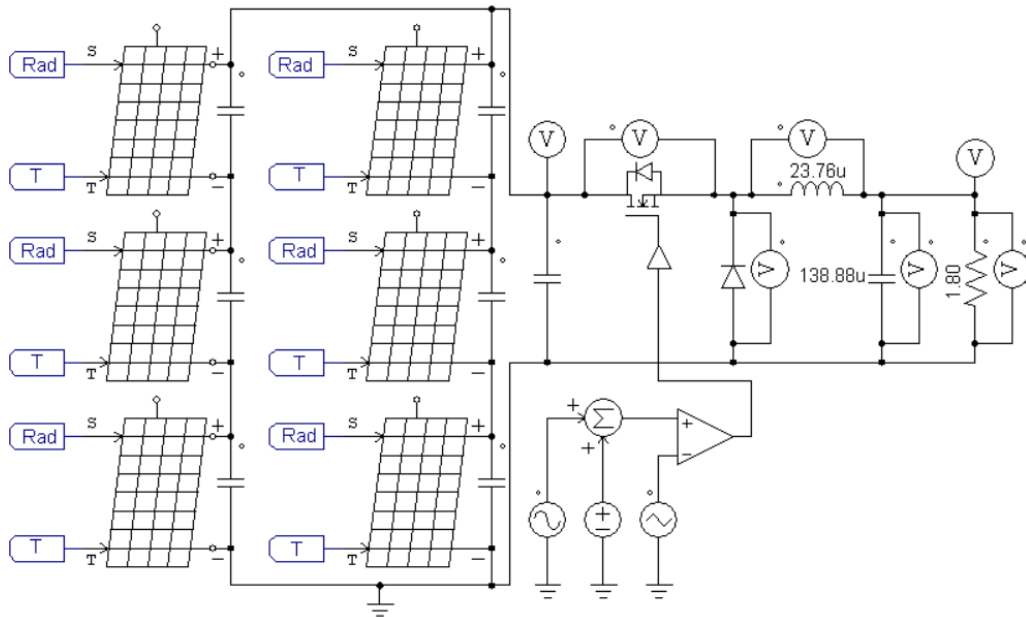


Fig. 22. Circuito Buck Lazo Abierto PSIM.

De esta manera, se puede observar en la Fig. 23 y Fig. 24 que el circuito se está comportando según lo esperado y no está presentando picos elevados de voltaje y corriente que pueden alterar su funcionamiento.

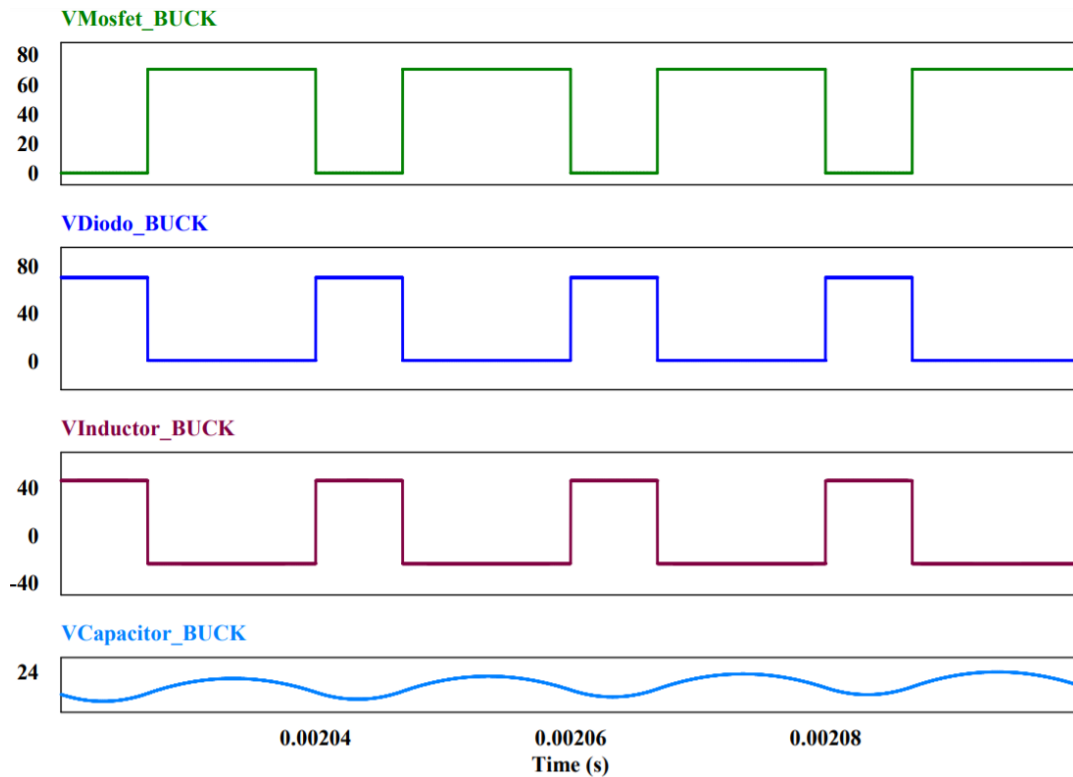


Fig. 23. Señales de voltaje del convertidor Buck en lazo abierto.

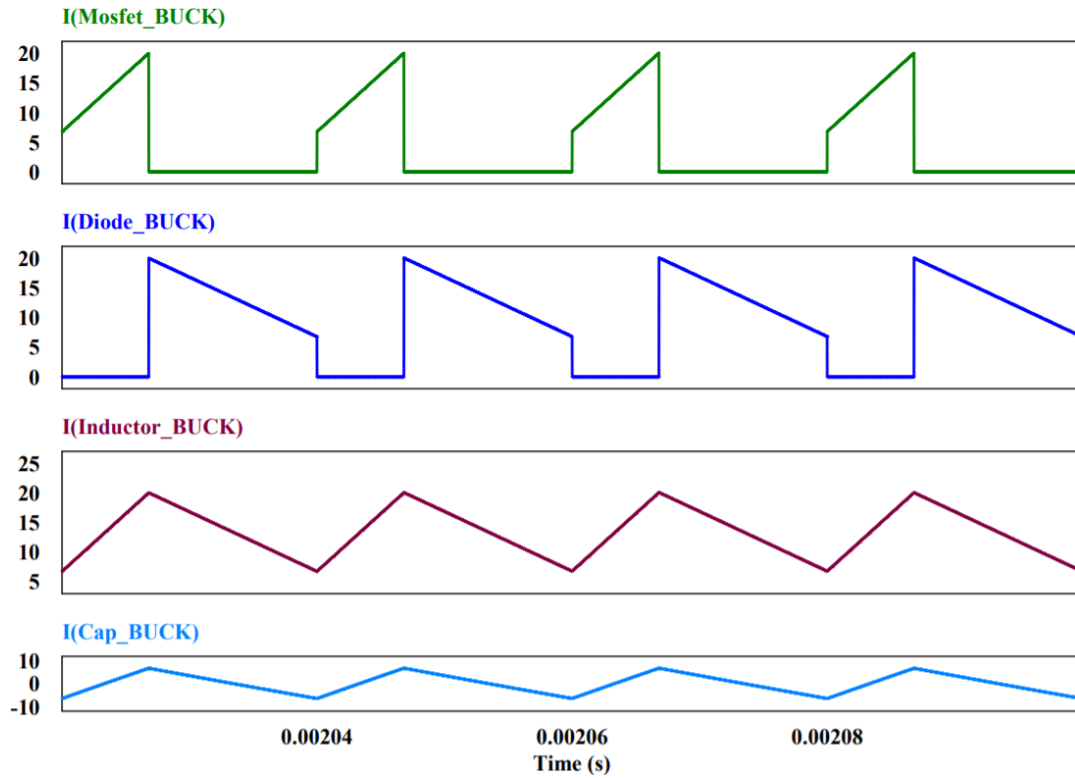


Fig. 24. Señales de corriente del convertidor Buck en lazo abierto.

El anterior análisis ha permitido observar que el convertidor están funcionando correctamente, porque las gráficas de la Fig. 23 y Fig. 24 son muy similares a comparación de la Fig. 21 que representa las formas de onda del convertidor Buck, por lo tanto, estos resultados están garantizando que el circuito está funcionando según lo esperado con los valores hallados.

8.2. Análisis del convertidor Sepic

En la Fig. 25 se presenta el circuito del convertidor Sepic, con el que se realizará el análisis matemático para obtener las ecuaciones que permitirán modelar el convertidor.

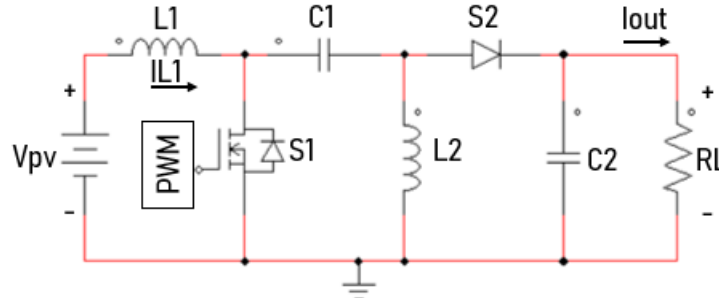


Fig. 25. Convertidor DC-DC Sepic.

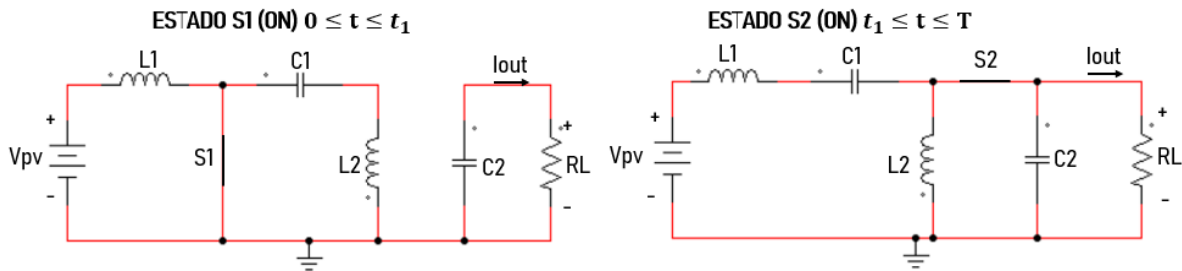


Fig. 26. Estados del convertidor Zeta.

Analizando el circuito de la Fig. 26 se obtiene:

Estado S1 (ON)	Estado S2 (ON)
$V_{L1} = V_{in}$	$V_{L1} = V_{in} - V_{c1} - V_{out} = 0$
$V_{L2} = -V_{c1}$	$V_{L2} = V_{out}$
$I_{c1} = I_{L2}$	$I_{c1} = I_{L1}$
$I_{c2} = -I_{out}$	$I_{c2} = I_{L1} - I_{L2} - I_{out}$

Tabla 5. Datos obtenidos del circuito Sepic

Haciendo uso de la ecuación (8) y reemplazando los datos, se obtiene la ecuación de balance de voltaje para L1 y L2:

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_{L1}(t) dt \approx V_{in} * D + (V_{in} - V_{c1} - V_{out}) * (1 - D) = 0$$

Despejando V_{c1}

$$V_{c1} = \frac{V_{in}}{1 - D} - V_{out}$$

Obteniendo la ecuación de L2:

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_{L2}(t) dt \approx -V_{c1} * D + (V_{out}) * (1 - D) = 0$$

Reemplazando V_{c1} en la ecuación L2:

$$-\left(\frac{V_{in}}{1 - D} - V_{out}\right) * D + (V_{out}) * (1 - D) = 0$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \tag{12}$$

Como resultado del primer análisis se obtuvo la función de transferencia en la ecuación (12) del convertidor Sepic.

8.2.1. Gráficas del convertidor Sepic

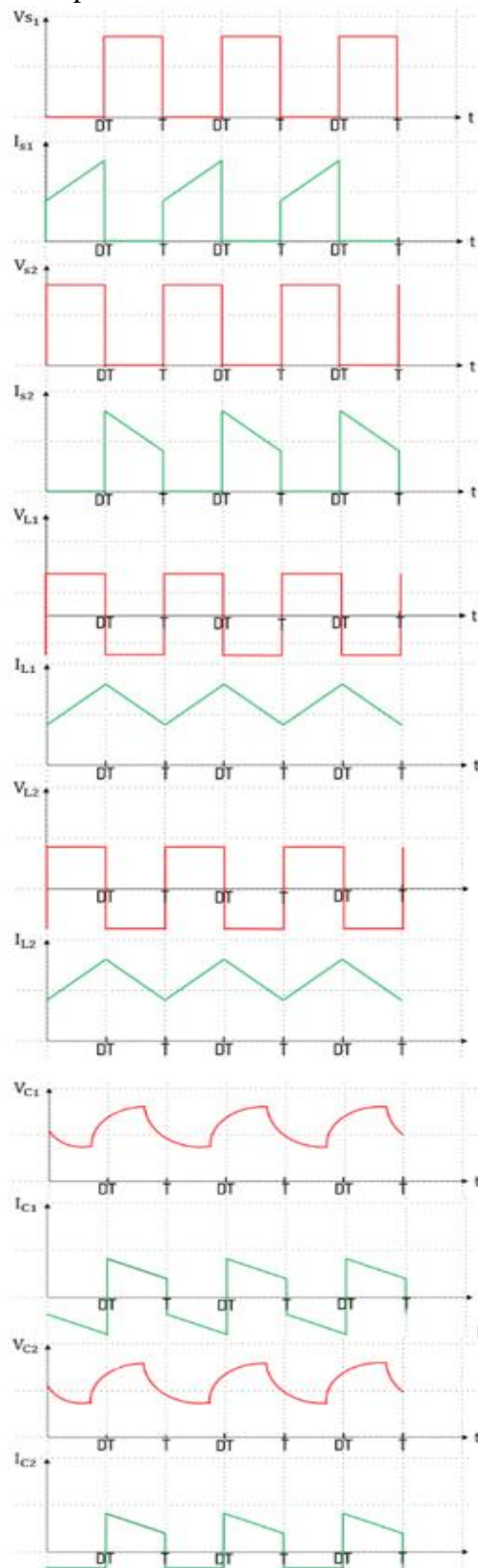


Fig. 27. Formas de onda del convertidor Sepic.

8.2.2. Ecuaciones convertidor Sepic

Para diseñar el convertidor Sepic se debe hacer uso de las siguientes ecuaciones:

En la ecuación (12) se definió el ciclo útil de trabajo del convertidor Sepic.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D}$$

Para realizar el cálculo de las inductancias se debe hacer uso de la Fig. 27 (V_L) para observar el balance de carga:

$$L = \frac{V_{in} * D}{\Delta i_L * f} \quad (13)$$

Como resultado se obtuvo la ecuación (13), con la que se puede calcular la inductancia, considerando:

- V_{in} : Voltaje de Entrada
- f : Frecuencia
- Δi_L : Ripple (Rango entre 5% y 10%)
- D : Ciclo Útil

Para el caso del condensador C_1 , se deberá considerar un ripple de voltaje para cada uno:

$$\Delta V_{cin} = \text{Ripple} * (V_{in} + V_{out})$$
$$C_1 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cin} * R * f} \quad (14)$$

Con la ecuación (14) se puede calcular el valor del condensador C_1 , teniendo en cuenta:

- Ripple: Rango entre 5% y 10%
- f : Frecuencia
- R : Resistencia de carga

Para el caso del condensador C_2 :

$$\Delta V_{cout} = \text{Ripple} * V_{out}$$
$$C_2 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cout} * R * f} \quad (15)$$

8.2.3. Diseño del convertidor Sepic

A continuación, empleando las ecuaciones anteriormente definidas, se procede a obtener los valores de Ciclo útil, Inductancia y Capacitancia para el diseño del convertidor Sepic:

- Voltaje de entrada: 70 V
- Voltaje de salida: 24 V
- Potencia: 320 W
- Frecuencia: 70 kHz

Ciclo útil.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D}$$
$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in}}$$
$$D = \frac{24 \text{ V}}{24 \text{ V} + 70 \text{ V}} = 0.255$$

Corriente de salida y entrada.

$$i_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{320 \text{ W}}{70 \text{ V}} = 4,57 \text{ A}$$
$$i_{out} = \frac{P}{V_{out}} = \frac{320 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 13,33 \text{ A}$$

Valor de la Inductancia.

$$\Delta_{iL} = \text{ripple} \cdot i_{in}$$
$$\Delta_{iL} = 0.22855$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f}$$
$$L1 = L2 = L = 1,1157 \text{ mH}$$

Valor del Condensador C1.

$$\Delta V_{cin} = \text{Ripple} \cdot (V_{in} + V_{out})$$
$$\Delta V_{cin} = 0.94$$

$$C_1 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cin} * R * f}$$

$$C_1 = 51,67 \mu F$$

Valor del Condensador C2.

$$\Delta V_{cout} = \text{Ripple} * V_{out}$$

$$\Delta V_{cin} = 0.24$$

$$C_2 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cout} * R * f}$$

$$C_2 = 202,38 \mu F$$

Valor resistencia de Carga.

$$R = \frac{V_{out}}{i_{out}}$$

$$R = \frac{24 V}{13,33 A} = 1,8 \Omega$$

En la Tabla 6 se presentan los parámetros hallados para realizar la implementación del convertidor Sepic.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Voltaje de entrada, circuito abierto (V_{in})	70 V
Voltaje de entrada, circuito cerrado (V_{in})	54 V
Voltaje de salida (V_{out})	24 V
Potencia (P)	320 W
Frecuencia (f)	70 kHz
Ciclo útil (D)	25%
Corriente de entrada (i_{in})	4,57 A
Corriente de salida (i_{out})	13,333 A
Valor inductancia (L1, L2)	1,1157 mH
Valor condensador (C_1)	51,67 μF
Valor condensador (C_2)	202,38 μF
Resistencia de carga (R_L)	1,8 Ω

Tabla 6. Parámetros del diseño para el convertidor Sepic.

8.2.4. Simulaciones en lazo abierto

En Psim, se ha implementado el circuito del convertidor Sepic con los datos obtenidos de manera teórica, este se puede observar en la Fig. 28.

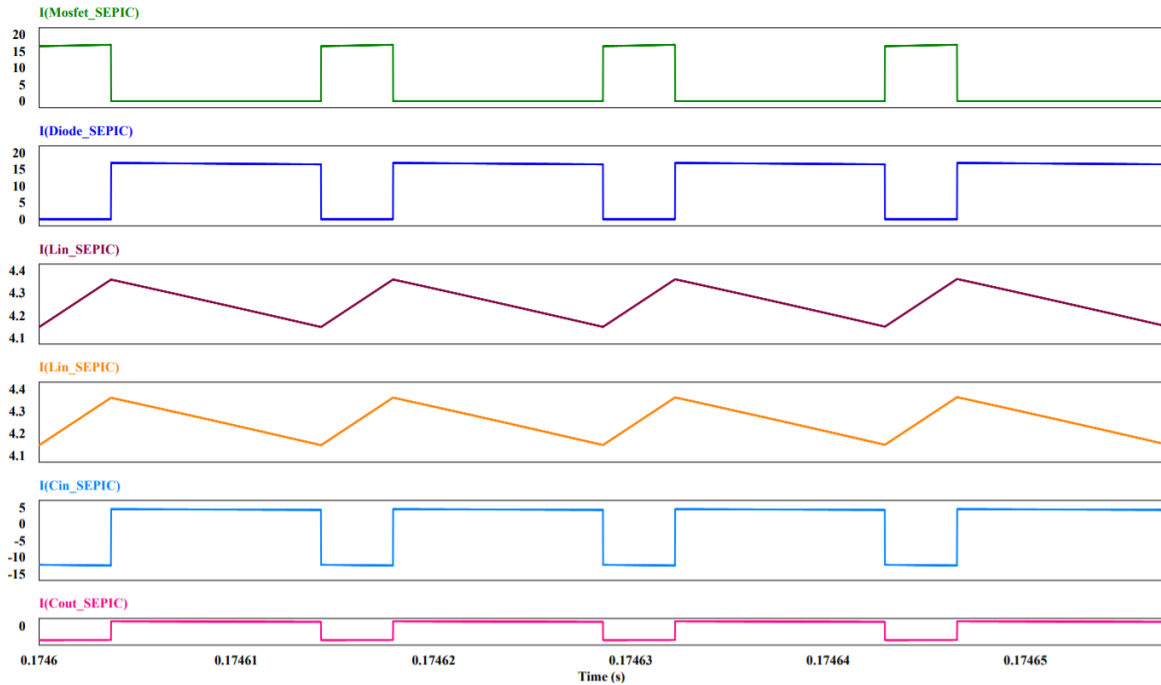


Fig. 30. Señales de corriente del convertidor Sepic en lazo abierto.

Al igual que el convertidor Buck, el anterior análisis ha permitido observar que el convertidor Sepic están funcionando correctamente y las gráficas de la Fig. 29 y Fig. 30 son muy similares a comparación de la Fig. 27 que representa las formas de onda del convertidor Sepic, por lo tanto, estos resultados están mostrando que el circuito está funcionando según lo esperado con los valores hallados.

8.3. Análisis del convertidor Zeta

En la Fig. 31 se presenta el circuito del convertidor Zeta al cual se le realizará su respectivo análisis matemático para poder hallar las ecuaciones y así modelar el convertidor.

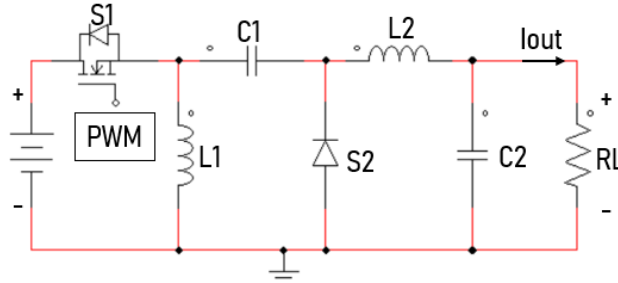


Fig. 31. Convertidor DC-DC Zeta.

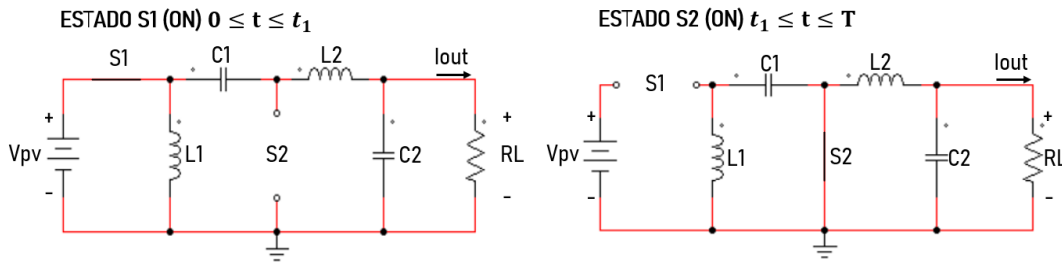


Fig. 32. Estados del convertidor Zeta.

Analizando el circuito de la Fig. 32 se obtiene:

Estado S1 (ON)	Estado S2 (ON)
$V_{L1} = V_{in}$	$V_{L1} = V_{c1}$
$V_{L2} = V_{in} - V_{c1} - V_{out}$	$V_{L2} = -V_{out}$
$I_{c1} = I_{L2}$	$I_{c1} = -I_{L1}$
$I_{c2} = I_{L2} - I_{out}$	$I_{c2} = I_{L2} - I_{out}$

Tabla 7. Datos obtenidos del circuito Zeta.

Con ayuda de la ecuación (8) se procederá a obtener la ecuación de balance de voltaje para L1 y L2:

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_{L1}(t) dt \approx V_{in} * D + V_{c1} - V_{c1} * D = 0$$

Obteniendo la ecuación de L2:

$$\frac{1}{L} \int_0^T V_{L2}(t) dt \approx V_{in} * D - V_{c1} * D - V_{out} = 0$$

Despejando V_{c1}

$$V_{c1} = \frac{V_{in} * D - V_{out}}{D}$$

Reemplazando V_{c1} en la ecuación L1:

$$V_{in} * D + V_{c1} - V_{c1} * D = 0$$

$$V_{in} * D + \left(\frac{V_{in} * D - V_{out}}{D} \right) - \left(\frac{V_{in} * D - V_{out}}{D} \right) * D = 0$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \tag{16}$$

Como resultado del análisis se obtuvo la función de transferencia en la ecuación (16) del convertidor Zeta.

8.3.1. Gráficas del convertidor Zeta

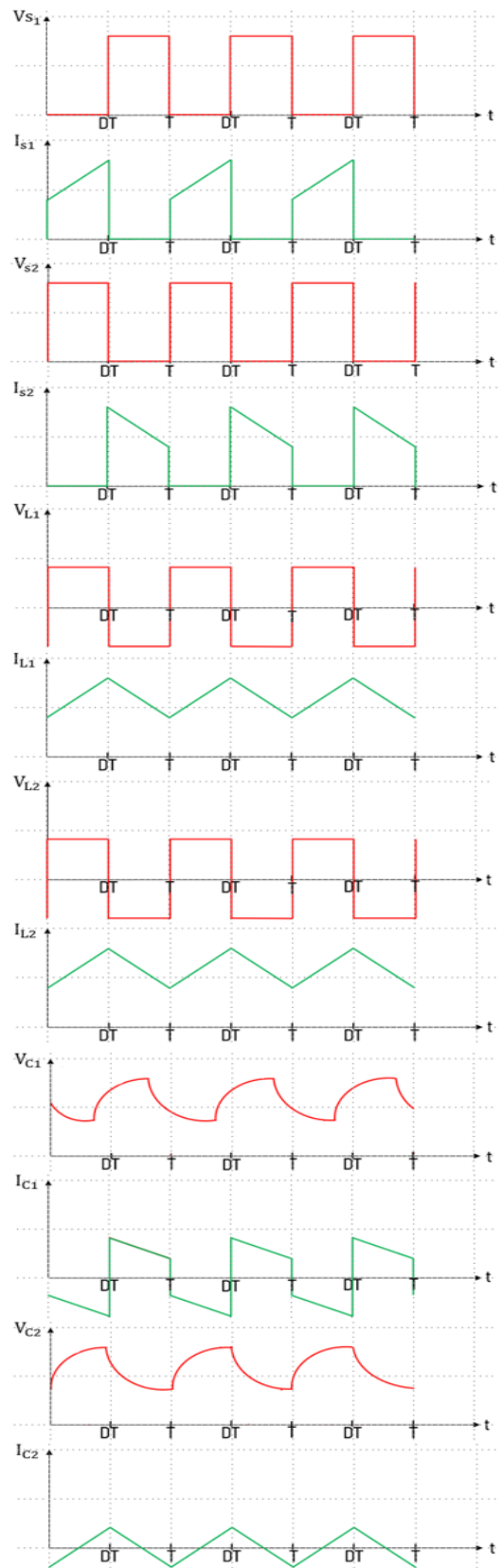


Fig. 33. Formas de onda del Convertidor Zeta.

8.3.2. Ecuaciones convertidor Zeta

Para realizar el convertidor Zeta se hace uso de las siguientes ecuaciones:

En la ecuación (16) se definió el ciclo útil de trabajo con el que operará este convertidor.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D}$$

Para realizar el cálculo de las inductancias se debe hacer uso de la Fig. 33 (V_L) para observar el balance de carga:

$$L = \frac{V_{in} * D}{\Delta i_L * f} \quad (17)$$

Como resultado se obtiene la ecuación (17), con la que se logrará calcular la inductancia, considerando:

- V_{in} : Voltaje de Entrada
- f : Frecuencia
- Δi_L : Ripple (Rango entre 5% y 10%)
- D : Ciclo Útil

Para el caso del condensador C_1 , se deberá tomar un ripple de voltaje para cada uno, obteniendo:

$$\Delta V_{cin} = \text{Ripple} * (V_{in} + V_{out})$$

$$C_1 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cin} * R * f} \quad (18)$$

Con la ecuación (18) se puede calcular el valor del condensador C_1 , teniendo en cuenta:

- Ripple: Rango entre 5% y 10%
- f : Frecuencia
- R : Resistencia de carga

Para el caso del condensador C_2 :

$$C_2 = \frac{(1 - D) * V_{out}}{8 * \Delta V_{cout} * L * f} \quad (19)$$

8.3.3. Diseño del convertidor Zeta

Empleando las ecuaciones anteriormente definidas, se procede a obtener los valores de Ciclo útil, Inductancia y Capacitancia para el diseño del convertidor Zeta:

- Voltaje de entrada: 70 V
- Voltaje de salida: 24 V
- Potencia: 320 W
- Frecuencia: 70 kHz

Ciclo útil.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D}$$
$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in}}$$

$$D = \frac{24 \text{ V}}{24 \text{ V} + 70 \text{ V}} = 0.255$$

Corriente de salida y entrada.

$$i_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{320 \text{ W}}{70 \text{ V}} = 4,57 \text{ A}$$

$$i_{out} = \frac{P}{V_{out}} = \frac{320 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 13,33 \text{ A}$$

Valor de la Inductancia.

$$\Delta i_L = \text{ripple} \cdot i_{in}$$

$$\Delta i_L = 0.22855$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f}$$

$$L1 = L2 = L = 1,580 \text{ mH}$$

Valor del Condensador C1.

$$\Delta V_{cin} = \text{Ripple} \cdot (V_{in} + V_{out})$$

$$\Delta V_{cin} = 0.94$$

$$C_1 = \frac{V_{out} * D}{\Delta V_{cin} * R * f}$$

$$C_1 = 51,67 \mu F$$

Valor del Condensador C2.

$$\Delta V_{cout} = \text{Ripple} * V_{out}$$

$$\Delta V_{cin} = 0.24$$

$$C_2 = \frac{(1 - D) * V_{out}}{8 * \Delta V_{cout} * L * f}$$

$$C_2 = 84,199 \mu F$$

Valor resistencia de Carga.

$$R = \frac{V_{out}}{i_{out}}$$

$$R = \frac{24 V}{13,33 A} = 1,8 \Omega$$

En la Tabla 8 se presentan los parámetros hallados para la implementación del convertidor Zeta.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
Voltaje de entrada, circuito abierto (V_{in})	70 V
Voltaje de entrada, circuito cerrado (V_{in})	54 V
Voltaje de salida (V_{out})	24 V
Potencia (P)	320 W
Frecuencia (f)	70 kHz
Ciclo útil (D)	25%
Corriente de entrada (i_{in})	4,57 A
Corriente de salida (i_{out})	13,333 A
Valor inductancia (L1, L2)	1,580 mH
Valor condensador (C_1)	51,67 μF
Valor condensador (C_2)	84,19 μF
Resistencia de carga (R_L)	1,8 Ω

Tabla 8. Parámetros del diseño para el convertidor Zeta.

8.3.4. Simulaciones en lazo abierto

En Psim, se ha implementado el circuito del convertidor Zeta con los datos obtenidos de manera teórica, este se puede observar en la Fig. 34.

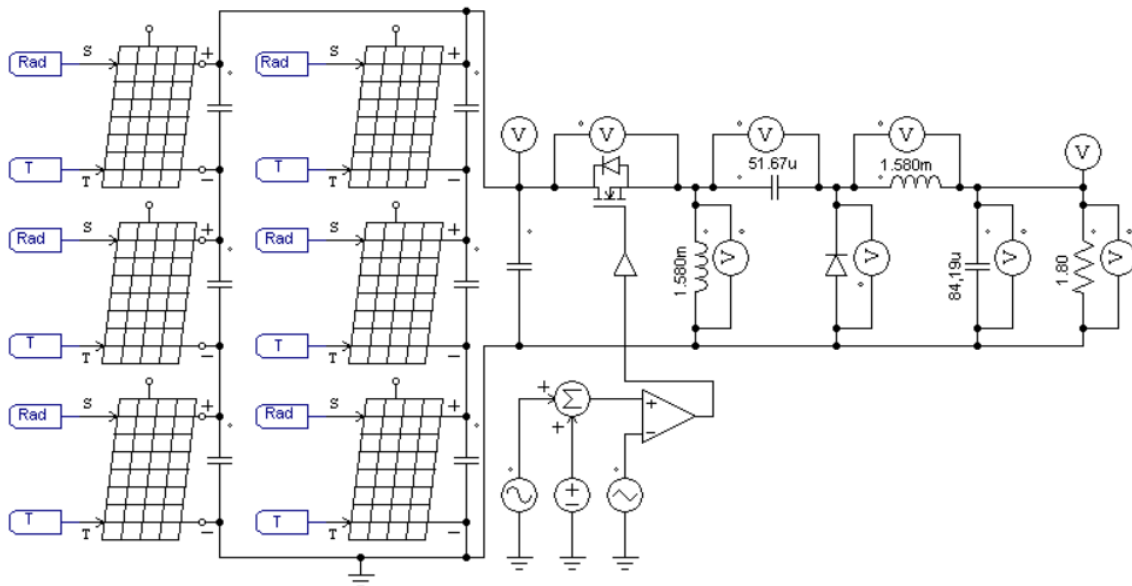


Fig. 34. Circuito Zeta Lazo Abierto PSIM.

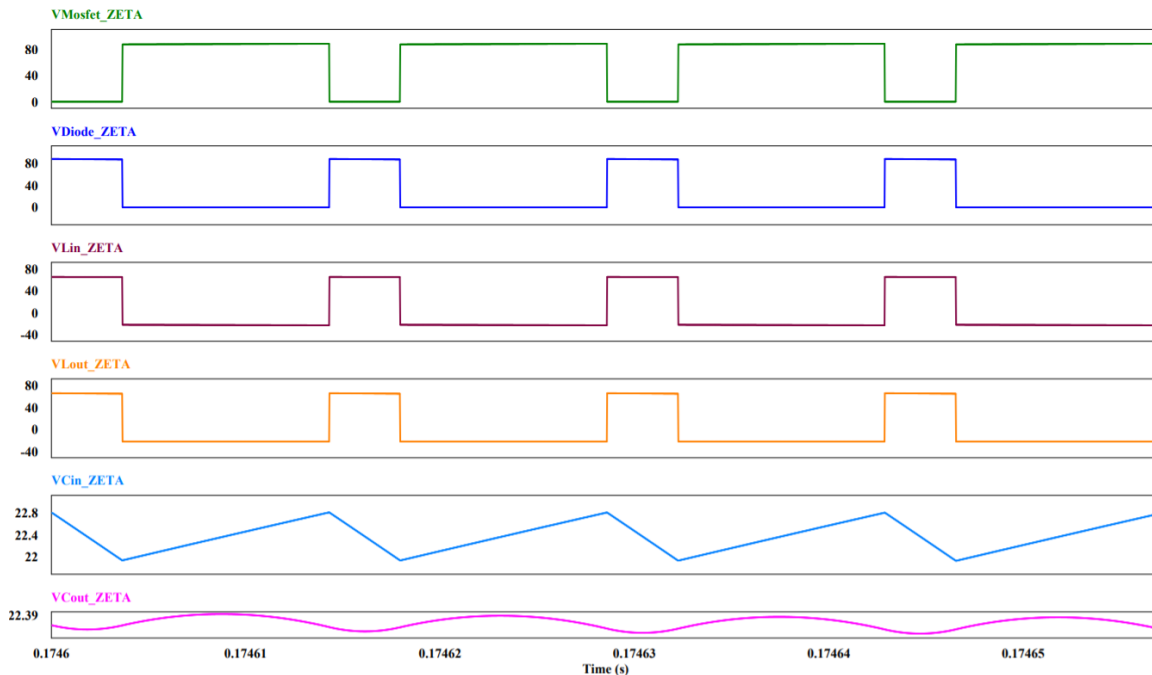


Fig. 35. Señales de voltaje del convertidor Zeta en lazo abierto.

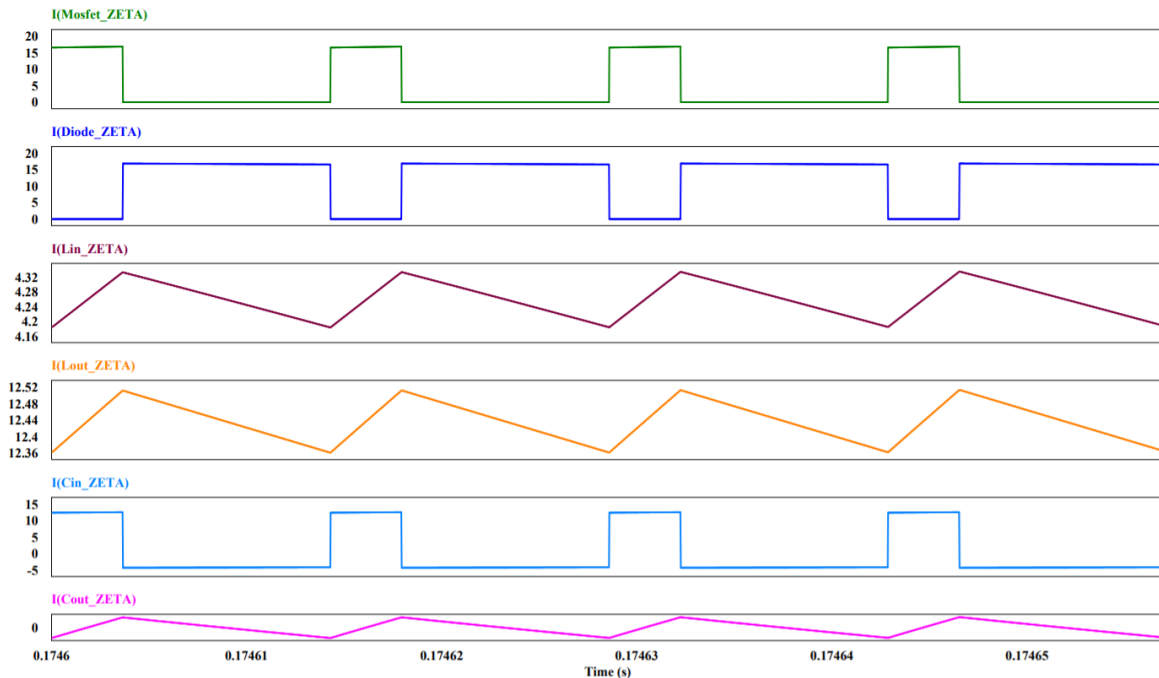


Fig. 36. Señales de corriente del convertidor Zeta en lazo abierto.

Al igual que los convertidores Buck y Sepic, el anterior análisis ha permitido observar que el convertidor Zeta están funcionando correctamente y las gráficas de la Fig. 35 y Fig. 36 son muy similares a comparación de la Fig. 33 que representa las formas de onda del convertidor Zeta, por lo tanto, estos resultados están mostrando que el circuito está funcionando según lo esperado con los valores hallados.

9. CAPÍTULO 3: CONVERTIDORES & ALGORITMO MPPT

En la siguiente sección, se procede a añadir el algoritmo MPPT a las tres topologías de convertidores que anteriormente se han diseñado, simulado y analizado en lazo abierto, todo esto para observar que el comportamiento de los convertidores frente a las variaciones de la radiación solar sea el adecuado y se garantice una salida de voltaje estable que ayude con el desarrollo de este trabajo de grado.

La implementación del algoritmo MPPT se realiza con el propósito de ayudar a los paneles solares a trabajar en el punto de máxima potencia, de esta manera maximizando la entrega de energía por los mismos [66]; En la actualidad existen un gran número de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia y en el título de “Algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracker).” se mencionan y explican algunos de estos. Los algoritmos que se utilizaron para llevar a cabo las simulaciones en lazo cerrado fueron: Perturbación y Observación (P&O), y Conductancia Incremental, con los cuales se piensa determinar cuál será la mejor estrategia de control para implementar.

9.1. Método Perturbación y Observación

Este tipo de algoritmo es muy utilizado en las aplicaciones fotovoltaicas debido a su simplicidad y buen funcionamiento; Este método consiste en hacer variaciones por medio de la única variable a la que el sistema de control tiene acceso que es el ciclo útil del convertidor [67], en la Fig. 37 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo, su proceso consiste en determinar los niveles actuales de voltaje y corriente del arreglo de paneles solares para calcular la potencia que se está obteniendo a la salida, este proceso se realiza para tomar ese valor como un valor de referencia que el algoritmo irá comparando constantemente para tomar la decisión de aumentar o disminuir el voltaje.

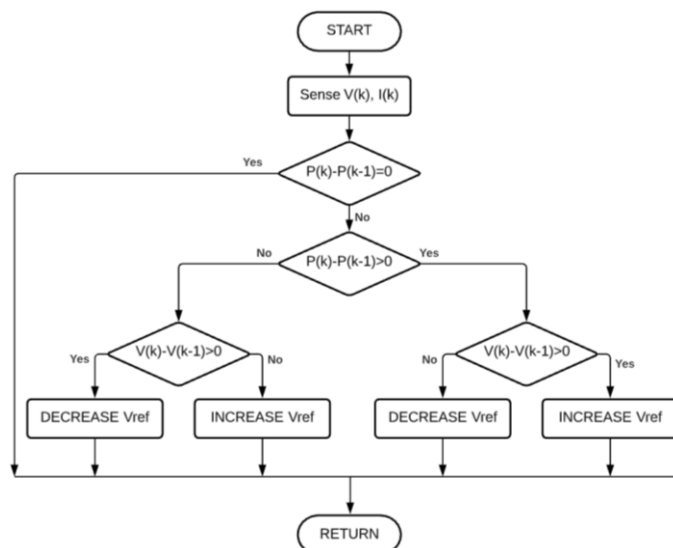


Fig. 37. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O [68].

9.1.1. P&O implementado en el convertidor Buck

En la Fig. 38 se puede observar el circuito Buck con el algoritmo MPPT implementado en el software de simulación POWERPSIM y en el apartado de potencia se puede ver claramente como el algoritmo está tomando muestras de corriente y voltaje para encontrar el valor de potencia, además con la ayuda del controlador PI se calcula el error de voltaje que está enviando el arreglo de paneles solares para hacer la toma de decisiones.

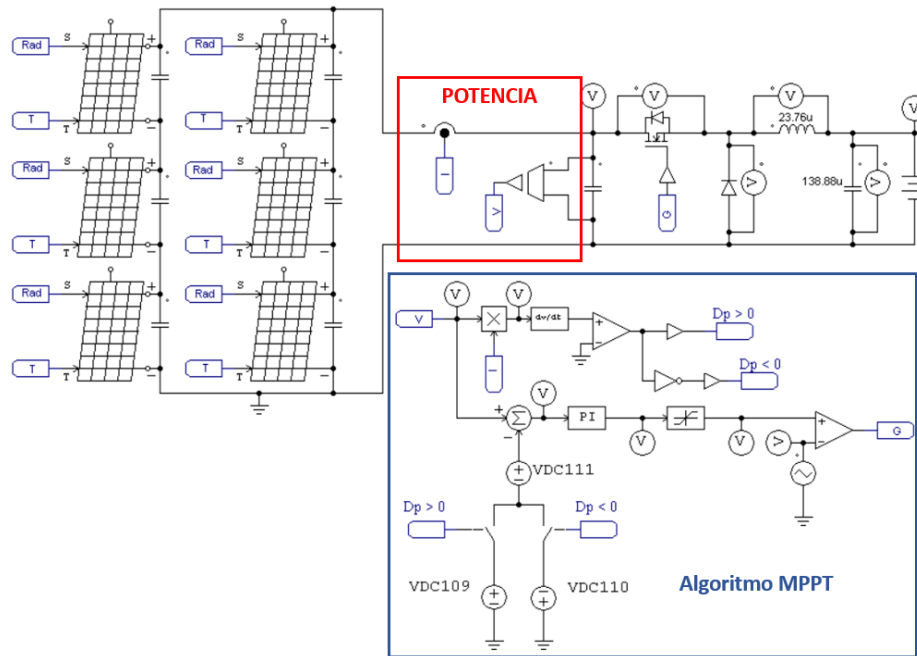


Fig. 38. Convertidor Buck con algoritmo MPPT P&O.

El algoritmo implementado en el circuito, está presentando un buen comportamiento con respecto a las perturbaciones que se le incluyeron al sistema. En la Fig. 39 se evidencia como actúa el circuito y el algoritmo frente a esas variaciones de radiación solar, a pesar de que la corriente y la potencia generada por los paneles tienen una variación, el sistema sigue manteniendo en estado estable el voltaje, además se observa que el algoritmo está actuando al instante permitiendo estabilizar el sistema frente a las variaciones generadas.

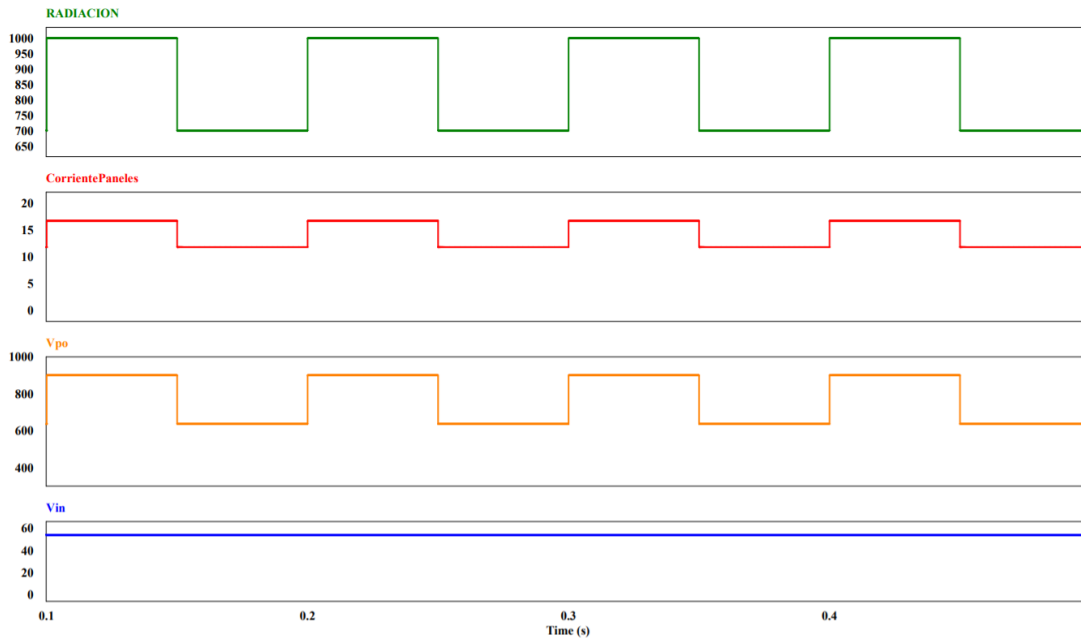


Fig. 39. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Buck

9.1.2. P&O implementado en el convertidor Sepic

De igual modo, al convertidor Sepic se le implemento el algoritmo MPPT para observar su comportamiento y determinar si presenta mejor respuesta a comparación del convertidor Buck frente a las perturbaciones que se le incluyeron a la simulación, en la Fig. 40 se presenta el circuito y su algoritmo en el simulador PSIM.

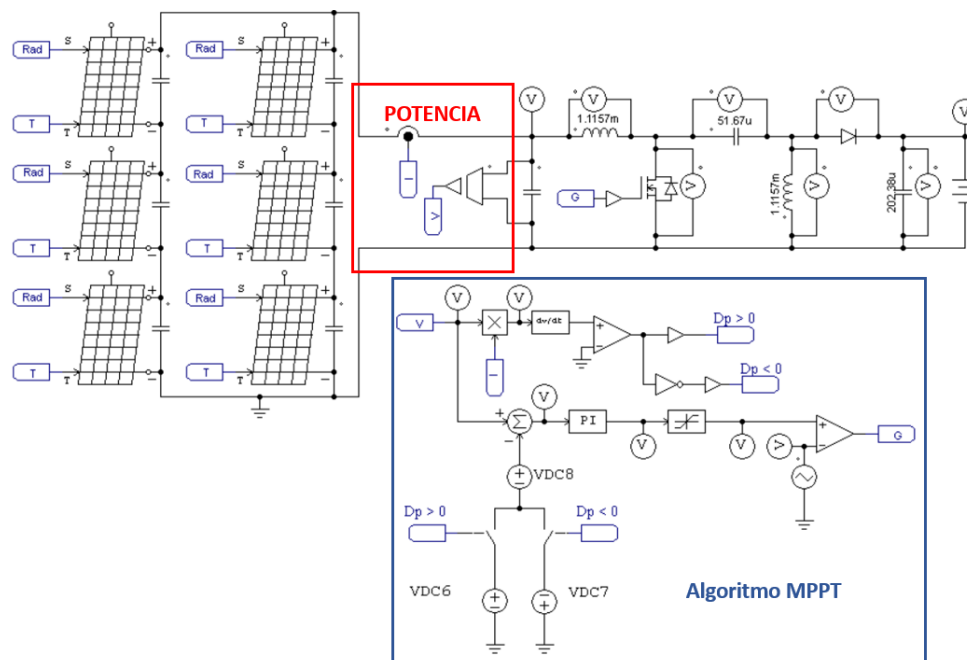


Fig. 40. Convertidor Sepic con algoritmo MPPT P&O.

Con los resultados obtenidos en la Fig. 41, se puede observar que el comportamiento del convertidor sepic no es lo que se esperaba y el algoritmo se esta demora en estabilizar el sistema, a pesar de que se logra mantener el voltaje de salida la respuesta no es favorable, porque estas variaciones generarían picos innecesarios de voltaje y corriente que afectarían el funcionamiento de todo el sistema.

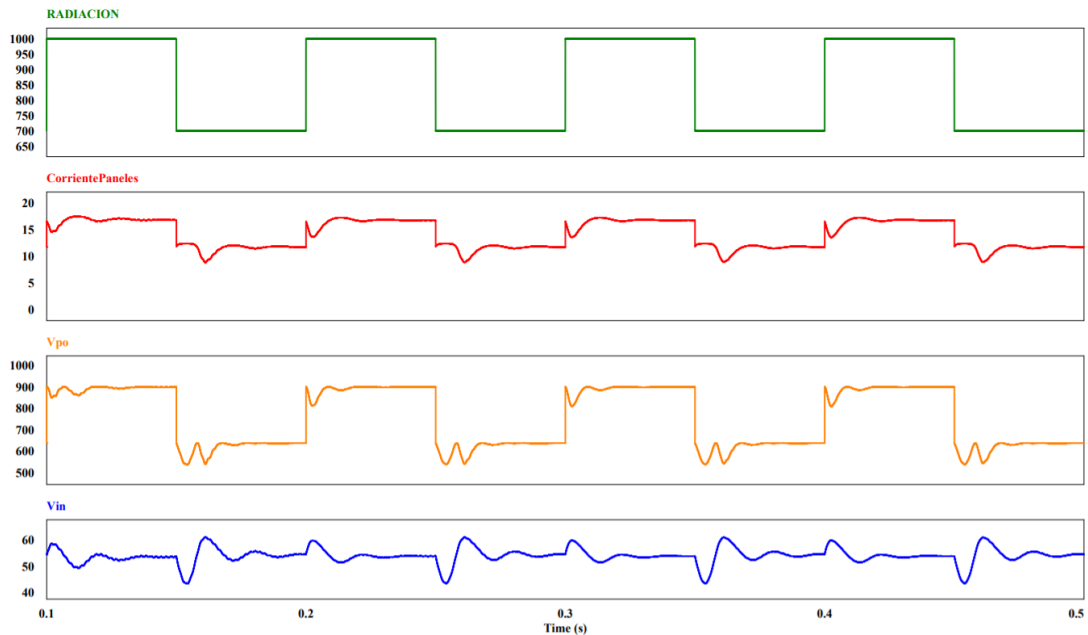


Fig. 41. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Sepic.

9.1.3. P&O implementado en el convertidor Zeta

A continuación, se presenta el convertidor Zeta con el algoritmo MPPT implementando, al igual que los convertidores Buck y Sepic, se le implementaron perturbaciones a la simulación para observar si el sistema logra dar una respuesta rápida para controlar esas variaciones. En la Fig. 42 se observa el circuito en el simulador Psim.

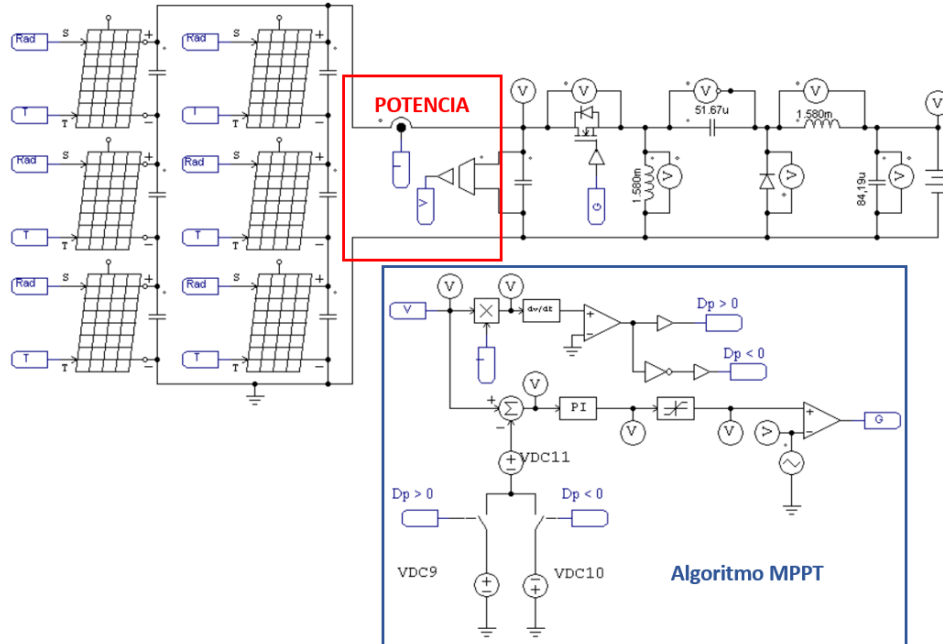


Fig. 42. Convertidor Zeta con algoritmo MPPT P&O.

Los resultados obtenidos por el circuito Zeta son buenos y el algoritmo está actuado correctamente frente a la variación que se le agrego a la radiación solar. En la Fig. 43 se evidencian los resultados obtenidos.

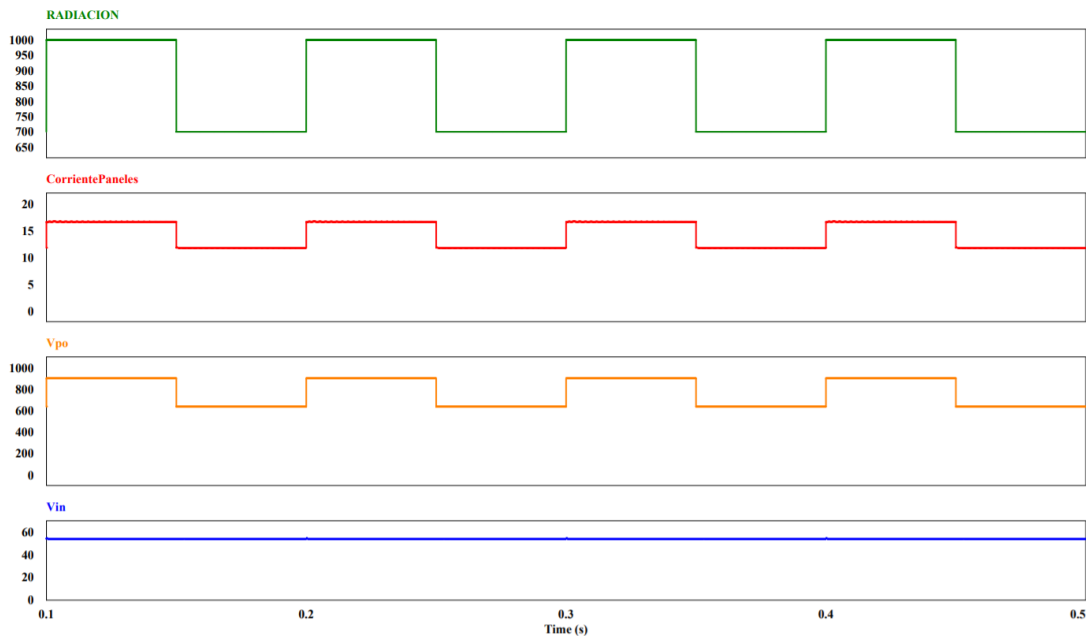


Fig. 43. Resultados algoritmo MPPT en el convertidor Zeta

De acuerdo a los resultados de simulación obtenidos, se concluye que los mejores convertidores para implementarlos en la aplicación fotovoltaica de este trabajo de grado son el Buck y el Sepic, pero teniendo en cuenta que el Buck es un reductor de voltaje, se debe garantizar que el voltaje de

entrada sea mayor al de salida, pero esta condición no se puede asegurar porque al ser un sistema aislado de la red eléctrica, va a depender exclusivamente de la radiación solar que se logre obtener por los paneles solares; A diferencia del convertidor Buck, el convertidor Zeta es un reductor – elevador de voltaje que al tener esta característica y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones, se convierte es el más indicado para llevarlo a cabo en la implementación.

9.2. Método de conductancia incremental.

Este método tiene un mayor rango de complejidad frente al anterior algoritmo, son muy similares en su funcionamiento porque estos deben determinar un voltaje de referencia para obligar al arreglo de paneles solares a operar sobre ese punto [69], pero cuando este algoritmo logra estabilizarse puede entregar una mejor carga constante para cargar las baterías y si se llega a presentar un cambio en las condiciones atmosféricas, el algoritmo actuará rápidamente para variar ese voltaje de referencia hasta encontrar uno nuevo voltaje sobre el que pueda seguir trabajando. En la Fig. 44 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental.

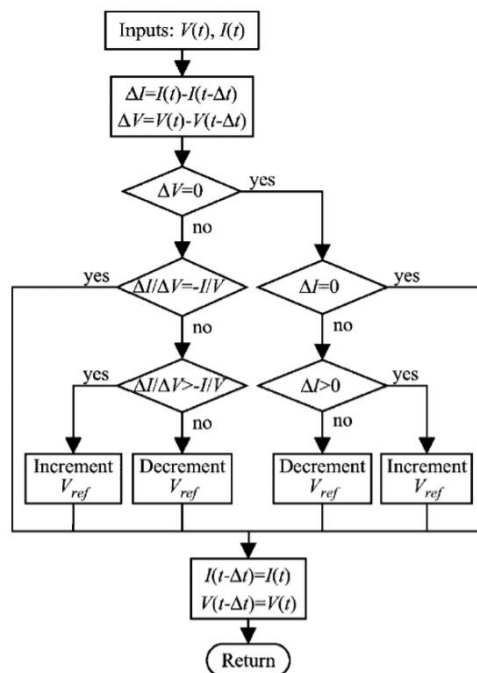


Fig. 44. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT Conductancia Incremental. [69].

9.2.1. Conductancia incremental implementado en el convertidor Buck

En la Fig. 45 se muestra la implementación del algoritmo al convertidor Buck, la simulación de todo el sistema se realizó en el software de simulación psim debido a que viene con la librería de este algoritmo, este algoritmo toma los datos de voltaje y corriente de la salida de los paneles solares y dependiendo de las variaciones que se presenten en la atmosfera, el encendido y apagado del mosfet va a variar.

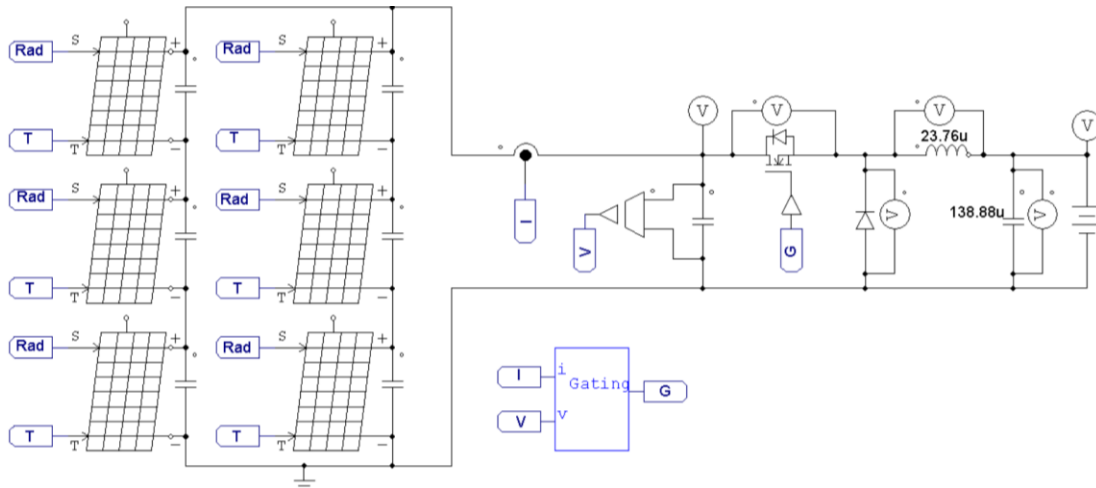


Fig. 45. Convertidor Buck con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.

Los resultados obtenidos se muestran en la

Fig. 46 y son muy buenos, el algoritmo reacciona rápidamente a las variaciones de la radiación solar, permitiendo estabilizar todo el sistema y que su eficiencia no sea afectada.

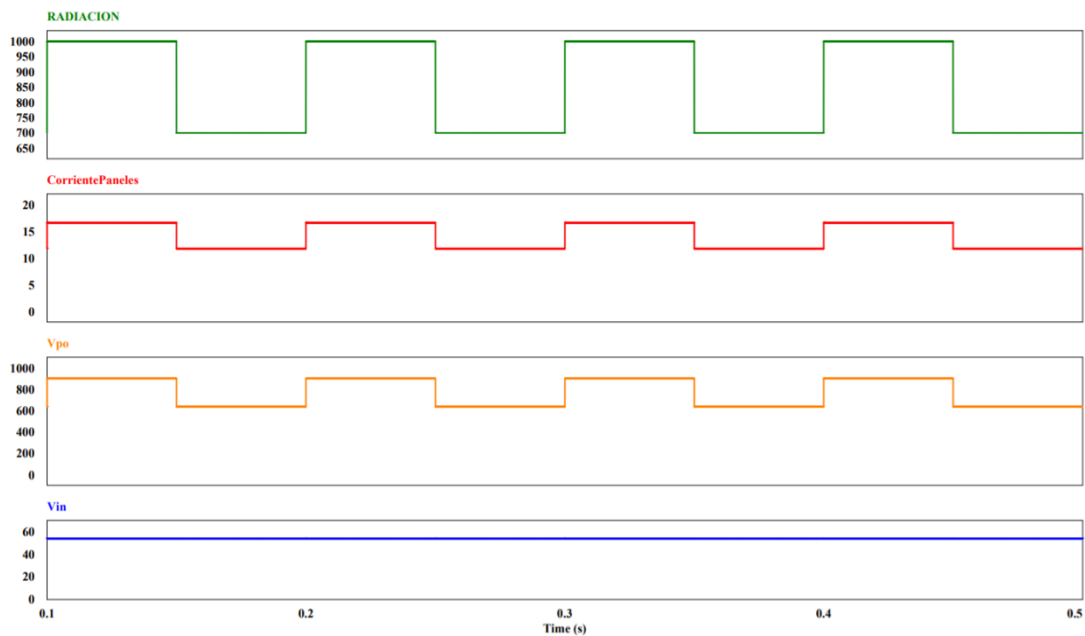


Fig. 46. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Buck.

9.2.2. Conductancia incremental implementado en el convertidor Sepic

El convertidor sepic siguió entregando una respuesta muy lenta con este nuevo algoritmo, en la Fig. 47 se muestra el circuito con su algoritmo mppt.

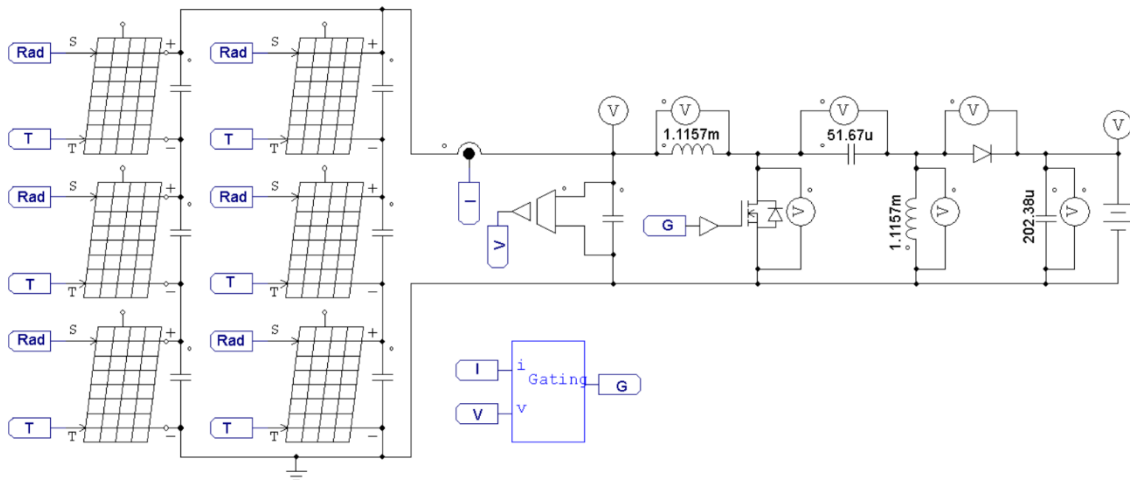


Fig. 47. Convertidor Sepic con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.

En la Fig. 48 se muestran los resultados obtenidos, pero esta topología no presentó los resultados esperados, su velocidad de respuesta frente a las variaciones no eran muy rápidas, a pesar de que lograba estabilizar todo el sistema, así que esta configuración no es la indicada para implementarla en la aplicación.

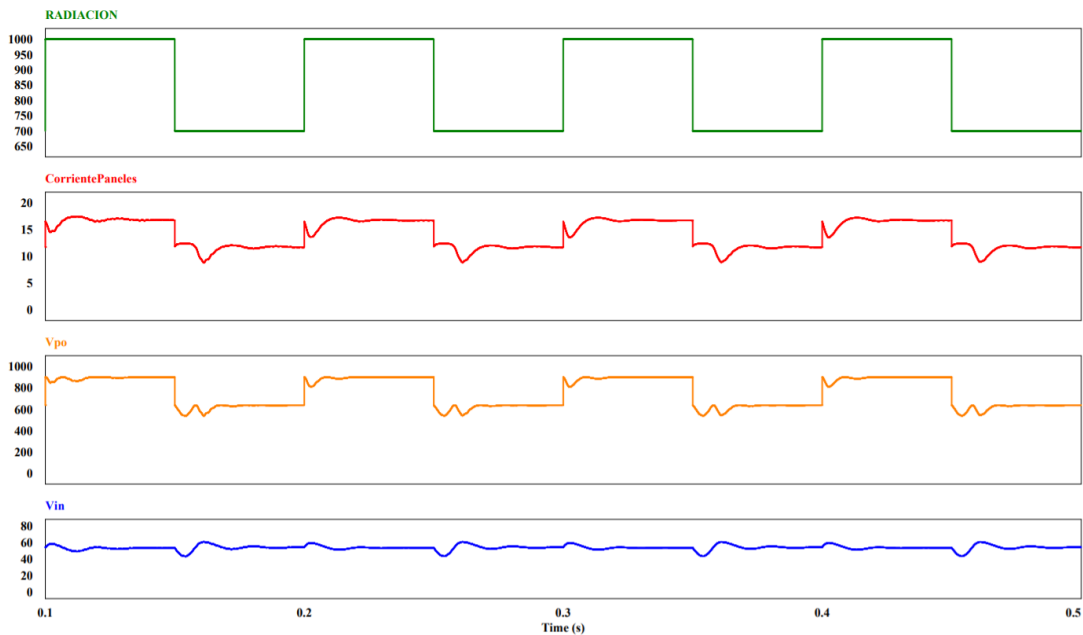


Fig. 48. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Sepic.

9.2.3. Conductancia incremental implementado en el convertidor Zeta

Seguidamente se encuentra la topología zeta, en la Fig. 49 se muestra su configuración en el software de simulación PSIM.

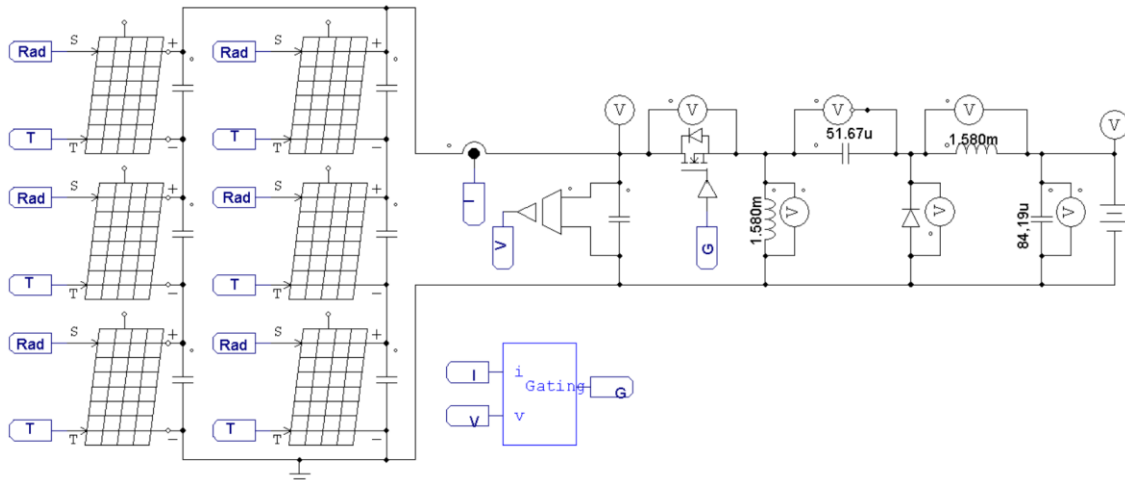


Fig. 49. Convertidor Zeta con algoritmo MPPT Conductancia Incremental.

Los resultados que se obtuvieron de esta configuración zeta, se registraron en la Fig. 50 y son los esperados, su tiempo y estabilización del sistema son bastantes rápidos lo que favorecerá a la aplicación, ya que se busca tener un sistema autónomo que pueda tomar decisiones cuando las condiciones atmosféricas varíen demasiado.

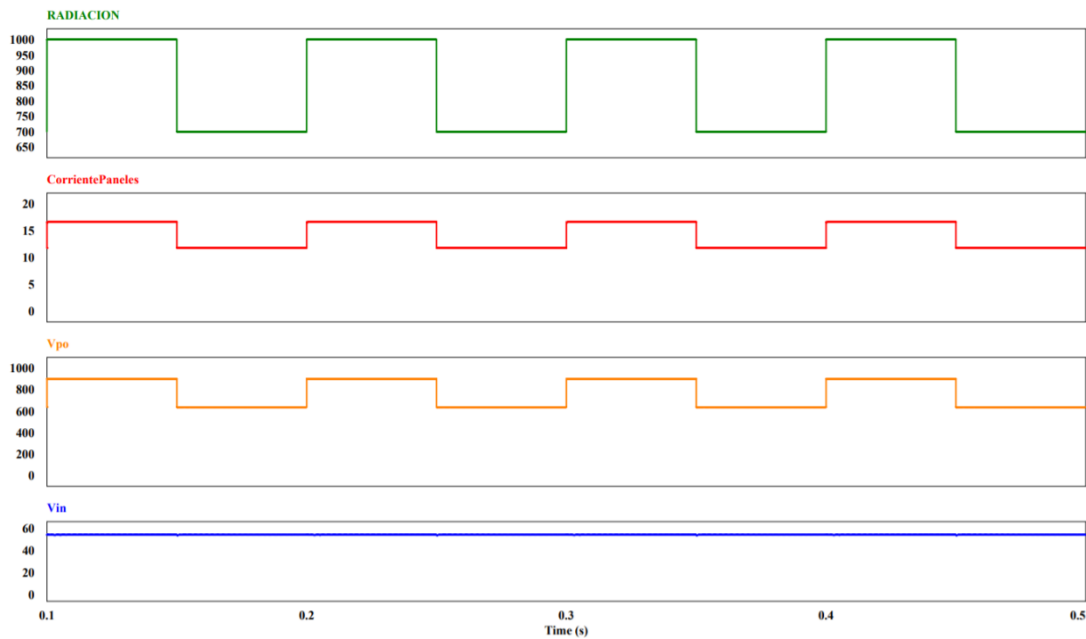


Fig. 50. Resultados algoritmo MPPT conductancia incremental en el convertidor Zeta.

De acuerdo a los resultados de simulación obtenidos en los dos algoritmos, se llega a la conclusión de que ambos algoritmos funcionan correctamente en el convertidor Zeta, pero se decide implementar el algoritmo de Perturbación y Observación porque el de Conductancia Incremental debido a su nivel de complejidad se debe hacer uso de mayor cantidad de sensores, los cuales causarían que se elevarían los costos del proyecto final, además si el algoritmo de perturbación y observación obtiene las mismas respuesta, hace más rentable su implementación.

9.3. Desarrollo del Algoritmo MPPT perturbación y observación.

Debido a lo concluido anteriormente, se procede a realizar el código del algoritmo MPPT P&O y agregarlo al circuito de simulación, el código se agrega al circuito por medio del bloque llamado “Simplified C Block” el cual compila e interpreta el código c y, así poder analizar su comportamiento para determinar si es o no fiable implementarlo al prototipo final.

En la Fig. 51 se presenta todo el prototipo del sistema con su código incorporado, se puede observar claramente que el bloque “Simplified C Block” está tomando muestras de voltaje y corriente las cuales estas siendo procesadas por el código que se ha realizado, todo esto con la finalidad de obtener el mejor rendimiento de los paneles solares frente a las variaciones que se lleguen a presentar.

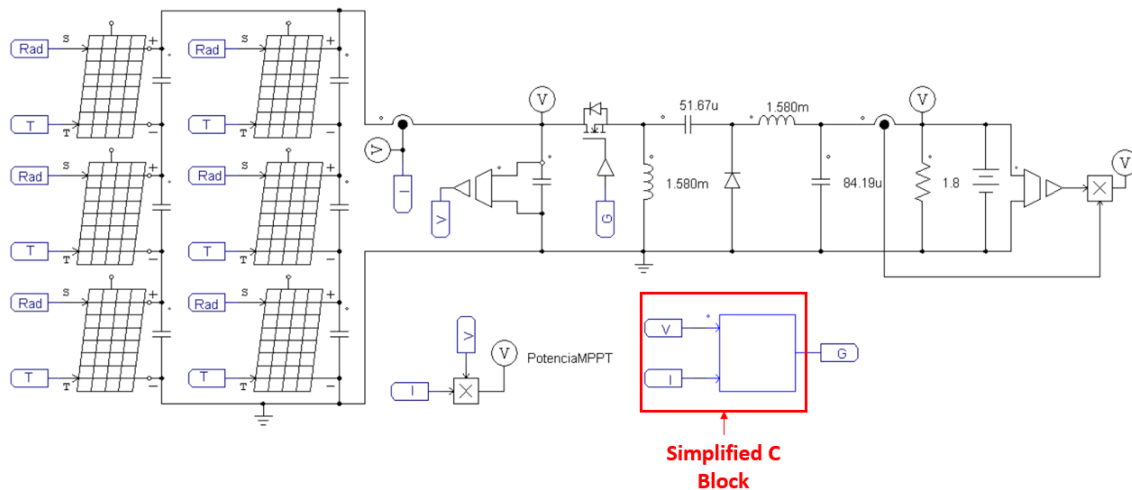


Fig. 51. Sistema de cargador de baterías con algoritmo MPPT en C incorporado.

Los resultados presentados en la Fig. 52 presentan el funcionamiento esperado de todo el sistema, además se puede observar cómo actúa el código C del algoritmo MMPT frente a las variaciones de radiación solar que se le agregaron a los paneles solares. Además, se observa la comparación entre el diagrama obtenido por PSIM y el código c generado, obteniendo de esta manera un prototipo que cuenta con un tiempo de respuesta rápido que ayuda a estabilizar todo el sistema.

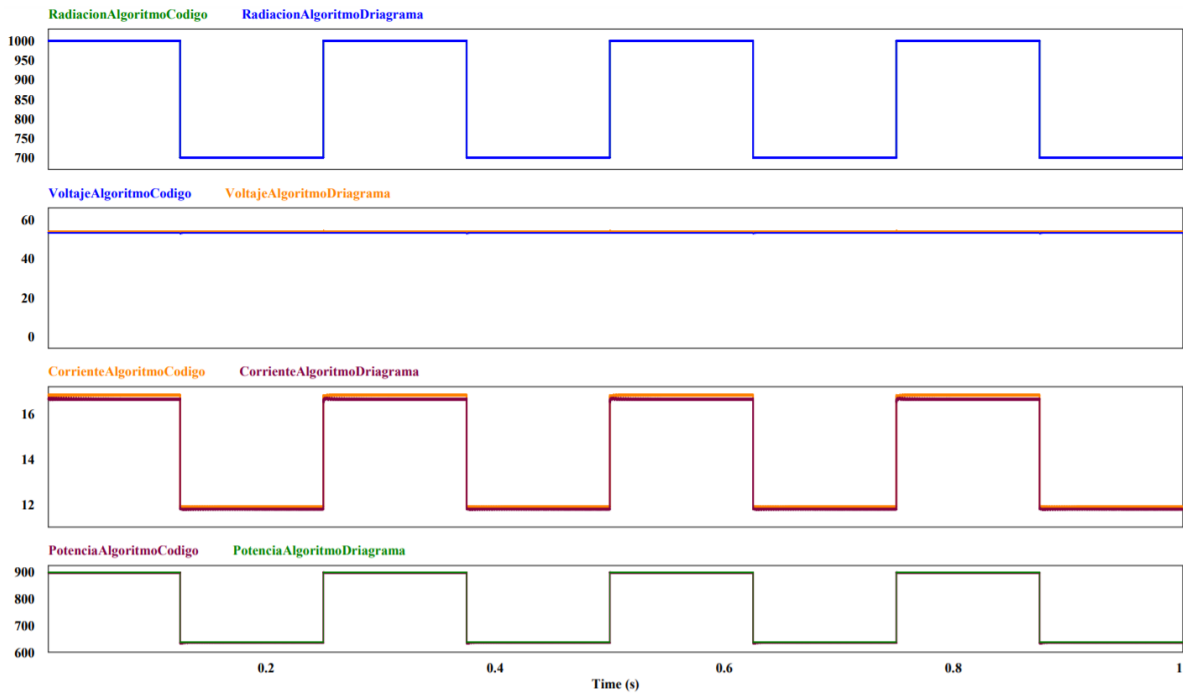


Fig. 52. Resultados del funcionamiento del sistema con el código C del algoritmo.

En “ANEXOS A: CÓDIGO EN C IMPLEMENTADO EN EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN” se muestra el código realizado en C que se agregó al bloque “Simplified C Block”, el cual ha presentado un buen comportamiento sobre el convertidor zeta que se encuentra trabajando sobre condiciones irregulares de la radiación solar.

10. CAPÍTULO 4: BATERÍA Y MÉTODO DE CARGA

Las baterías recargables son de gran importancia para este tipo de aplicaciones fotovoltaicas, porque son las encargadas del almacenamiento de la energía generada por el sistema fotovoltaico permitiendo obtener una fuente de energía eléctrica alternativa que se podrá utilizar a cualquier momento del día.

En el título “Métodos de carga.” se encuentran los tipos de baterías que están disponibles y una breve descripción de las aplicaciones en las cuales se recomiendan implementar, también se clasifican los diferentes tipos de baterías existentes, como está distribuida internamente una batería y por último los diferentes métodos de carga que permitirán cuidar la vida útil de las baterías. Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se ha seleccionado las baterías de tipo estacionarias ya que son muy utilizadas en instalaciones fotovoltaicas porque están diseñadas para soportar mayor cantidad de ciclos de carga y descarga sin afectar su vida útil, también se seleccionó las baterías de tipo plomo – ácido porque son las que más se usan en este tipo de aplicaciones, aunque también están las de litio, pero como la instalación será pequeña no será necesario adquirir este tipo de baterías y el método que se implementará en la aplicación será corriente constante / voltaje constante debido a la fiabilidad que presenta este método en las aplicaciones fotovoltaicas.

10.1. Batería Plomo – Ácido

Las baterías adquiridas para poder llevar a cabo esta aplicación han sido por parte de la Universidad Sato Tomás Seccional Tunja, gracias a que en los laboratorios de electrónica cuenta con baterías recargables de 12V disponibles para su uso. En la Tabla 9 se presentan las características correspondientes a la batería.

BATERÍA PLOMO – ÁCIDO	
Modelo	MT12180HR
Recargable	Si
Ciclos de descarga hasta 30%	1500 ciclos
Voltaje nominal	12 V
Capacidad	20 Ah a 20°C
Corriente de carga máxima	6 A
Resistencia Interna	Aprox. 12 mΩ

Tabla 9. Características de la batería.

Teniendo en cuenta que a la salida del convertidor de potencia se tendrá un voltaje de 24 V, se necesitará un arreglo de baterías que soporte esa carga, así que se decidió realizar la conexión en serie de dos baterías de tipo plomo – ácido, la representación se muestra en la Fig. 53.

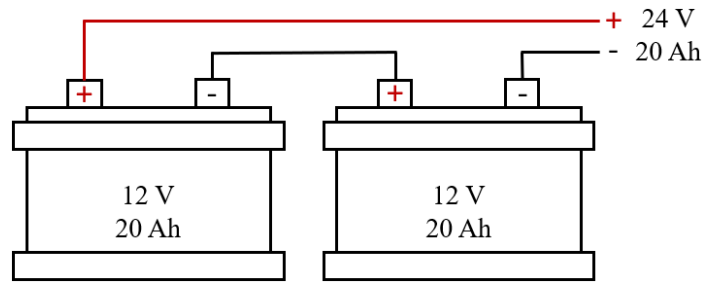


Fig. 53. Configuración baterías en serie.

10.2. Método de carga Corriente constante / Voltaje constante

En este trabajo se propone el método de carga Corriente constante / Voltaje constante para almacenar la energía generada por los paneles solares en las baterías. En la Fig. 54 se observa el comportamiento que utiliza esta técnica para almacenar la energía y también para evitar que se lleguen a presentar sobrecargas que con el tiempo afectarían su vida útil. Al mismo tiempo se presenta 4 puntos de interés (A, B, C y D), donde A representa el valor mínimo de corriente, B corresponde al valor de tensión de flotamiento que indica la tensión a la que se mantendrán las baterías después de haber sido completamente cargadas, C indica el nivel de tensión máxima que alcanzan las baterías y D representa el valor máximo de corriente de carga.

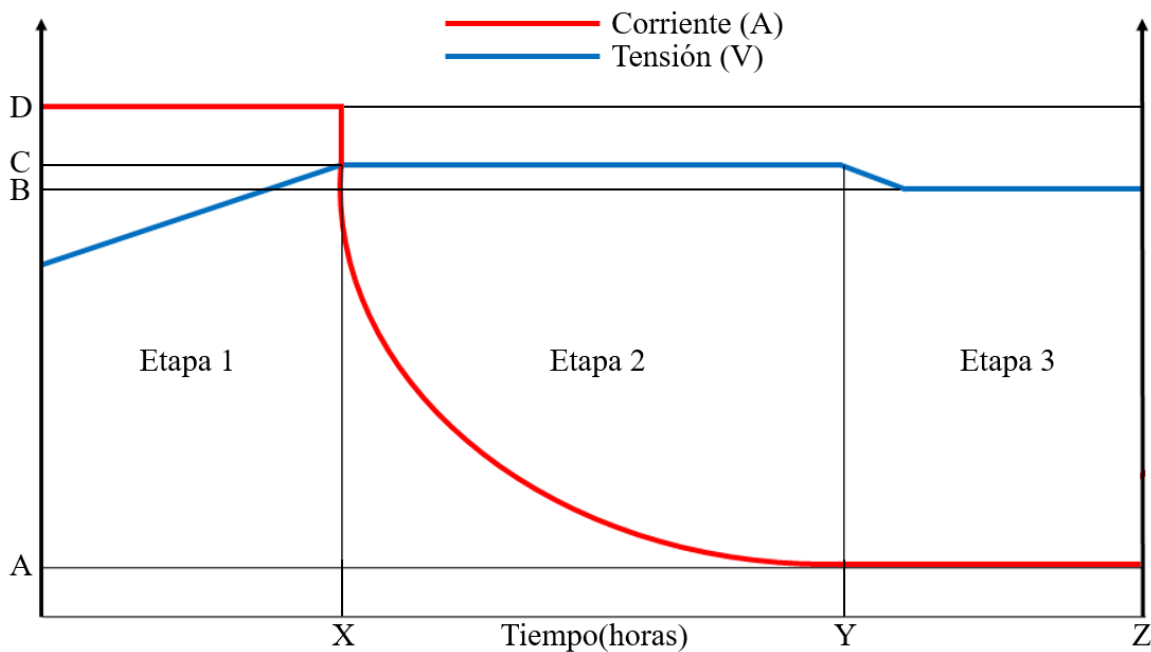


Fig. 54. Método de carga Corriente constante / Voltaje constante [70].

Este método se divide en 3 etapas [71]:

- Etapa 1: Carga rápida: Corriente constante, voltaje aumenta
- Etapa 2: Carga de absorción: Voltaje constante, corriente disminuye
- Etapa 3: Carga de flote: Voltaje constante, corriente de mantención.

La etapa 1 es la responsable de realizar la carga rápida de las baterías que se encuentren total o parcialmente descargadas, este primer periodo funcionará hasta que las baterías tengan un nivel de porcentaje de recarga del 80% [71, 72] alcanzando la etapa de absorción.

Una vez alcanzada la etapa 2, el cargador fotovoltaico ahora funcionaría en modo de voltaje constante y su capacidad de aceptar los niveles máximos de corriente iniciarían a disminuir dependiendo del nivel de carga que vaya adquiriendo el arreglo de baterías, este método se encargará de suministrar el 20% de carga restante de la capacidad.

Al alcanzar el nivel de carga del 100% entrará en funcionamiento la etapa 3, la cual se encargará de mantener la carga del 100% de la batería debido a que estas tienden a auto – descargarse con el paso del tiempo. De esta manera obteniendo un sistema que no solo estará extrayendo la máxima energía eléctrica de los paneles solares, sino también protegiendo la vida útil de estas baterías.

11. CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL PROYECTO

En este capítulo se presentan las etapas que se deben tener en cuenta al momento de realizar a futuro la implementación de este prototipo ya verificado su funcionamiento en simulación.

11.1. Etapa de selección de materiales.

Los criterios que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar los componentes electrónicos que conformarán el circuito del prototipo son: Recursos disponibles, costo, cantidad de corriente y tensión que soporta cada componente, frecuencia máxima y mínima con la que pueden trabajar, velocidad, tiempo de respuesta y tamaño si se requiere hacer una pcb pequeña (8cm x 8cm).

También se debe tener en cuenta el criterio de aislamiento de algunos componentes electrónicos, esto para tener una mayor protección en la pcb, porque el sistema será totalmente aislado de la red eléctrica y si en dado caso se llega a presentar un fallo en la etapa de potencia, que este no vaya a dañar toda la etapa de control, causando costos que elevarían el presupuesto, además de perder parte de la energía que estaría generando el arreglo de paneles solares.

El microcontrolador encargado de realizar el procesamiento de las señales análogas, el funcionamiento del algoritmo y el encendido – apagado del interruptor (mosfet) es el Pic18f4550, se ha seleccionado esta referencia por su amplia gama existente en el mercado, precios accesibles, además de su velocidad de procesamiento, la generación de frecuencias de 48 MHz máximo y su diseño que permite realizar trabajos con baterías.

11.2. Etapa de sensores.

Como el sistema de control solo recibe valores entre 0 – 5 V, se le debió agregar a la parte de potencia sensores de voltaje y corriente, en la Fig. 55 y Fig. 56 se presentan los diagramas de cómo se deben agregar estos sensores a la parte de potencia.

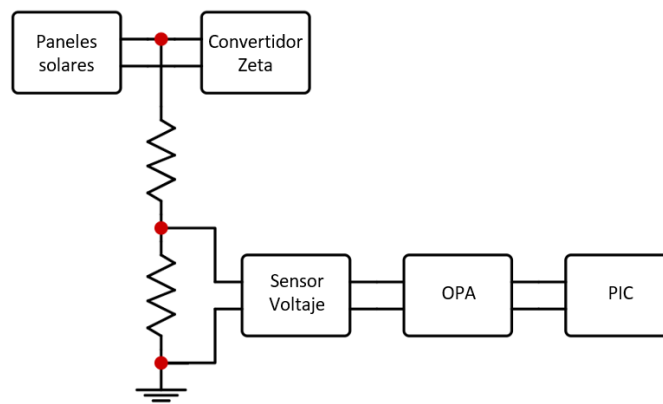


Fig. 55. Diagrama de la incorporación del sensor de voltaje a la parte de potencia.

El sensor de voltaje que se seleccionó es de la referencia ACPL-C87A-000E aislado y según su fabricante el nivel de voltaje máximo y recomendado es de 2 V, así que el divisor de voltaje se configuro para estar entregando ese voltaje y los valores de resistencias que se hallaron fueron de 12 k Ω y 453 Ω a 1/4 W. El amplificador que se implemento es de la referencia OPA237UA y se configuró como un no inverso, porque a la salida del sensor de voltaje se están generando dos señales (+, -), por lo que el amplificador ha permitido obtener una señal de 5 V la cual se agregará a una entrada análoga del microcontrolador PIC. Esta misma configuración se implementó en la parte de la carga debido a que también se necesita tener control para proteger las baterías que se van a cargar y el valor de las resistencias del divisor de voltaje son de 2,32 k Ω y 210 Ω .

En la Fig. 56 se observa cómo se le incorporo la parte de control de corriente a los paneles solares, en donde se agregó una resistencia de shunt, porque permite calcular fácilmente el nivel de corriente que la atraviesa haciendo uso de la ley de Ohm, de esta manera se obtiene el nivel de corriente que estará pasando y, esta señal se dirigirá a un amplificador aislado de la referencia AMC1100DUBR que permite proteger la etapa de control de la de potencia, según su fabricante el nivel máximo de entrada es de 250 mV y la Resistencia de shunt hallada es del valor de 27 m Ω . Esta misma configuración se le agrego a la parte de la carga y el valor de la resistencia de shunt es de 5 m Ω .

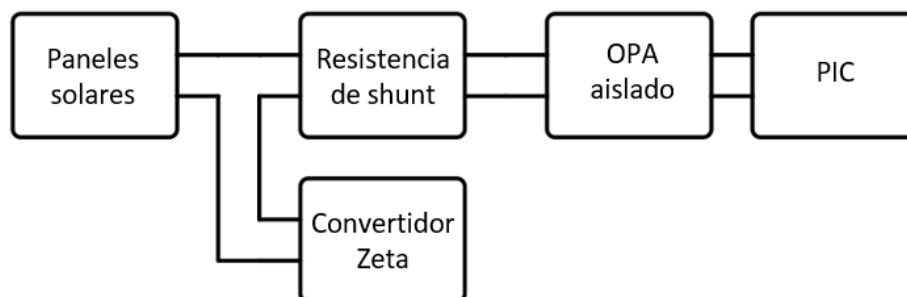


Fig. 56. Diagrama de la incorporación del sensor de corriente a la parte de potencia.

11.3. Diseño del PCB.

Una vez finalizada la simulación y la selección de los componentes, el esquema realizado en PSIM se pasa a un nuevo software en donde se procede a realizar el diseño de la pcb, para este prototipo se hizo uso de dos capas, en la Fig. 57 y Fig. 58 se muestra la distribución que se le realizó a la pcb.

Para llevar a cabo la fabricación del circuito, se ha procurado seguir las recomendaciones que entrega la empresa encargada de su fabricación en cuanto a la distancia mínima y máxima de separación que deben tener los componentes, el tamaño de los caminos, orificio de los componentes pasantes y las vías, todo esto para no tener inconvenientes al momento de realizar su implementación.

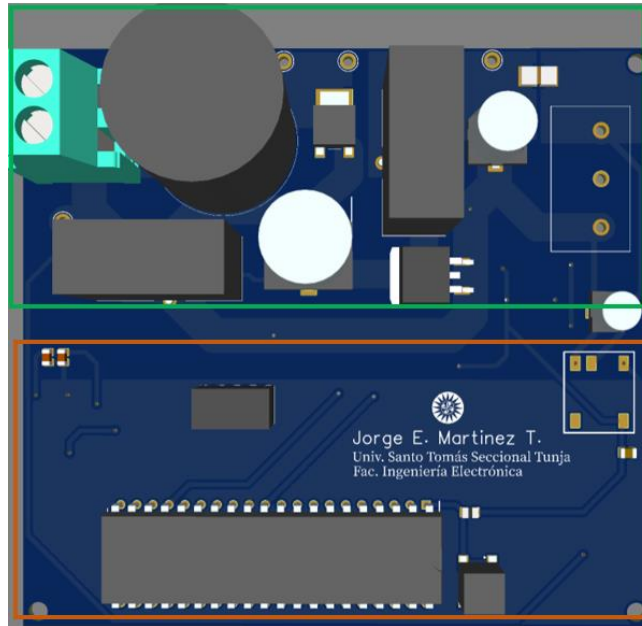


Fig. 57. Capa I PCB.

En el diseño del pcb, se procuró dejar la parte de potencia en una capa y la de control por la otra, en la capa I se encuentra la parte de potencia (cuadro color verde Fig. 57, cuadro color naranja microcontrolador) que es el convertidor zeta y en la capa II (cuadro color naranja Fig. 58) se encuentran los sensores y demás componentes que permiten controlar los niveles de tensión y corriente del circuito. Para evitar que el ruido afecte al sistema de control, se le agrego un plano tierra solo a la capa II y en la capa I no se le incluyo el plano a tierra, debido a que la conmutación de los interruptores podría generar ruido dentro del circuito causando inconvenientes en el funcionamiento del sistema.

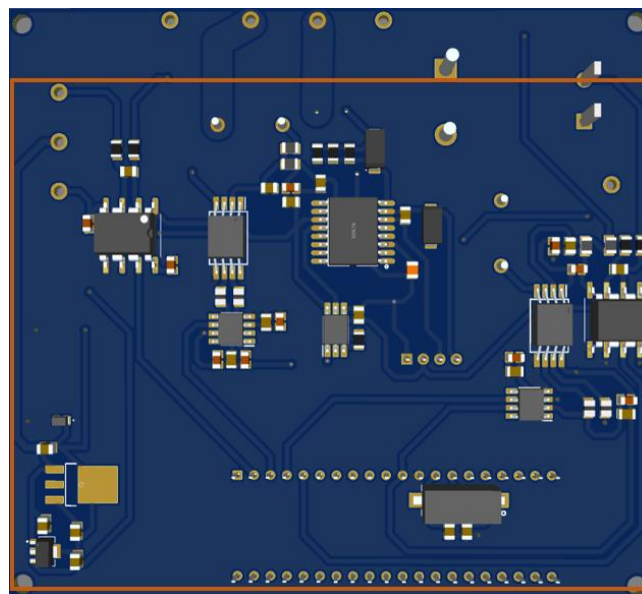


Fig. 58. Capa II PCB.

12. CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto ha permitido diseñar correctamente un prototipo de cargador de baterías alimentado por paneles solares, que cuenta con el algoritmo MPPT de perturbación y observación el cual está obteniendo la máxima potencia que pueden entregar los paneles solares, generando la potencia de 320 W con la que se diseñó el sistema. Todo esto se logró con el estudio del funcionamiento de los paneles solares, las diferentes topologías de convertidores DC–DC y los algoritmos MPPT; Además, para lograr obtener el resultado esperado del sistema, se optó por diseñar el convertidor zeta que cuenta con las especificaciones de elevador – reductor de voltaje y, con ayuda de las estrategias de control PI se ha logrado controlar el paso de corriente y tensión obteniendo un sistema capaz de controlar la carga y de proteger la vida útil de las baterías. De esta manera dando una posible solución que permitirá obtener un suministro de energía eléctrica a las comunidades que no cuentan con el servicio de electricidad.

El análisis que se le realizó a las tres topologías de convertidores (Buck, Sepic Y zeta) permitieron determinar que el convertidor Zeta es la configuración óptima para implementarse en el cargador de baterías alimentado por paneles solares, aunque la configuración Buck también presento buenas respuestas, se llegó a la conclusión de que al ser un reductor de voltaje, no ayudaría a generar siempre la carga necesaria a la salida de todo el sistema, porque siempre se debería tener un voltaje superior a la entrada del convertidor frente a la salida de este, algo que no se puede asegurar debido a que esta aplicación depende 100% de la radiación solar. La configuración Sepic no presentó los resultados esperados, su tiempo de respuesta frente a las variaciones de radiación era muy lenta y no lograba estabilizar el sistema tan rápido como las otras dos topologías, a causa de esto y por las respuestas obtenidas en el software de simulación se decidió hacer uso de la topología Zeta.

En el dimensionamiento del cargado de baterías se establecieron tres factores importantes que se deben tener en cuenta al momento de realizar este tipo de aplicaciones. La primera tiene que ver con la entrada de voltaje que estará definida por el arreglo de paneles solares, la segunda es el voltaje de salida definido por las baterías a cargar y la tercera es la potencia que entregará el sistema y se establecerá por el diseñador. Para el dimensionamiento de los paneles solares, hay que conocer los niveles de radiación que frecuentemente se tienen en la ciudad donde se realizará la instalación, investigar con qué frecuencia se presentan lluvias en ese lugar y así poder analizar qué cantidad de módulos solares serán necesarios para la aplicación. El banco de baterías se definirá de acuerdo al nivel de voltaje que se necesite a la salida siendo de 12, 24 o 48 V. Y la potencia definida por el diseñador, en este caso fue de 320 W ya que es suficiente para alimentar la mayoría de las cargas residenciales.

Para el sistema de control se implementó el algoritmo MPPT de perturbación y observación (P&O), este control ha mostrado en las simulaciones que se puede extraer el máximo nivel de energía del arreglo de paneles solares, logrando obtener un sistema eficiente que cuenta con un tiempo de respuesta rápido frente a las variaciones que se pueden presentar a causa del cambio climático, de esta manera obteniendo un sistema que no solo se encargará de obtener el máximo rendimiento de los paneles sino también de asegurar que las baterías no sufrirán daños que a futuro pueden generar más gastos.

La simulación del sistema fotovoltaico se hizo en el software de simulación PSIM, donde se hicieron modificaciones a los módulos solares mediante la herramienta “Solar Module (physical model)” para adaptarlo a las especificaciones dadas por los fabricantes de los paneles solares que se van a utilizar. De igual manera se debieron modificar algunos valores de los componentes del convertidor debido a que varios no se encontraban comercialmente, además se le ajustó al diseño sensores de voltaje y corriente que permitirán monitorear los niveles de tensión y corriente que entrarán y saldrán de todo el sistema, obteniendo una aplicación confiable que garantiza un suministro de energía alternativo.

El código que se piensa incorporar al sistema de control se realizó en el software de simulación PSIM ya que cuenta con un bloque llamado “Simplified C Block”, donde el código C se puede generar y compilar para analizar el funcionamiento de todo el sistema, esto permitió observar como el convertidor zeta y el algoritmo mppt se comportaban según lo esperado a pesar de las pequeñas diferencias que se presentaron en la obtención del punto de máxima potencia de los paneles solares, esta comparación se muestra en la Fig. 52 y se aprecia que hay un pequeño error de aproximadamente el 1% entre el bloque mppt y el código, pero aun así, el código generado en C está realizando correctamente el funcionamiento del sistema y el algoritmo está realizando el seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles solares, de esta manera obteniendo un sistema fiable que se adapta a las condiciones atmosféricas que se estén presentando en las horas del día.

13. RECOMENDACIONES

- En caso de realizar la implementación del sistema, se recomienda hacer un estudio de la disponibilidad de radiación solar que se tenga en el lugar donde se piensa instalar, así determinar si la cantidad de paneles solares con la que se diseñó este sistema, es suficiente para suplir las necesidades de energía eléctrica que se necesita en esa vivienda y si la potencia es suficiente.
- Como estos sistemas son considerados como una fuente limitada de energía, es recomendado que solo se haga uso de la electricidad cuando sea necesario, porque si se deja por horas conectado un aparato electrónico que consume mucha potencia las baterías se descargarían muy rápido.
- Este proyecto ha sido desarrollado para ayudar a comunidades en donde no cuentan con energía eléctrica, además es una propuesta que ayudaría a reducir los costos elevados que tienen estos tipos de sistemas y así poder ayudar a dichas comunidades a tener un suministro de energía alternativo, además con este proyecto se podría dar apertura a nuevos proyectos de investigación que ayuden a mejorar estos prototipos sin aumentar su costo para mejorar las condiciones de vida de varias comunidades en Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. G. de Vinuesa Bauzá, "Alternativas para la electrificación de zonas rurales", Trabajo de grado, Dept. de Ing. Elec., Univ. Politécnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2016.
- [2] Twenergy, "Electrificación sostenible en zonas rurales de Colombia", 15 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/electrificacion-sostenible-en-zonas-rurales-de-colombia-2514/>.
- [3] J. Vivas, "Los 1710 poblados que aún se alumbran con velas en el país", *El Tiempo*, [En línea]. Disponible en <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-poblados-que-aun-no-tienen-energia-electrica-en-colombia-324980>.
- [4] Á. Pinilla Sepúlveda, "Soluciones energéticas para zonas rurales (¿En el posconflicto?)", *Revista de Ingeniería*, nº 44, pp. 36-39, 2016.
- [5] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, A. M. Vélez Quiroz y W. M. Saltos Arauz, "Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales", *Revista Científica*, vol. 33, nº 3, pp. 265-274, Mar., 2018.
- [6] N. Esteve Gómez, "Energización de las zonas no interconectadas a partir de las energías renovables solar y eólica", Tesis MSc., Dept. Ing. Amb., Univ. Javeriana, Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia, 2011.
- [7] O. E. Ramirez Yaima, "Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica", Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Bogotá D.C., Cund., Colombia, Rep. téc., Nov. 10, 2016.
- [8] "Metodología y resultados de la estimación del índice de cobertura de energía eléctrica ICEE-2018", Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Bogotá D.C., Cund., Colombia, Rep. téc., Dic. 30, 2019.
- [9] V. Montalvo Bonilla, "Suministro de energía para las zonas rurales de Colombia", Trabajo de investigación, Dept. Ing. Mec., Univ. de los Andes, Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia, 2016.
- [10] O. E. Correa Meneses, "Expansión de la red eléctrica para el area rural del municipio de la capilla - Boyacá", Trabajo de Especialización, Dept Ing., Univ. Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Cund., Colombia, 2016.
- [11] J. S. Cepeda Moya y A. F. Sierra Alarcon, "Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones", *Revista Científica*, pp. 1-10, 2017.
- [12] Proyecto EnDev/GIZ, (2013), de *Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario*, [En línea]. Disponible en https://energypedia.info/images/0/0b/Guía_de_instalación_de_SFD_-_2013.pdf.
- [13] M. Upasani y J. Sangita Patil, "Grid connected solar photovoltaic system with battery storage for energy management", 2018 2nd Int. Conf. on Inventive Systems and Control (ICISC), In., Coimbatore, 2018.

- [14] T. Díaz Corcobado y G. Carmona Rubio, "Instalaciones solares fotovoltaicas, gran medio", McGraw-Hill / Interamericana De España, S.A., 2010, pp. 200.
- [15] G. Harper, "Solar energy projects for the evil genius", McGraw-Hill Education - Europe, New York, 2007, pp. 196.
- [16] M. H. Rashid, "Power electronics Handbook - Third Edition", 2011, pp. 1362.
- [17] G. E. Pamparana Manns, "Desarrollo de un modelo y simulador de sistema de almacenamiento de energía en baterías para estudiar la sinergia entre molienda SAG y la generación eléctrica con paneles solares fotovoltaicos", Tesis MSc, Dept. de Ing. de Minas, Univ. de Chile, Santiago de Chile, 2017.
- [18] K. C. Bustamante Cacao y B. B. Mirabá Valdiviezo, "Algoritmo de detección de puntos calientes en paneles fotovoltaicos", Trabajo de Grado, Dept. Ing. Elec., Univ. Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [19] A. F. Dallos Ramírez, "Desarrollo de un sistema domótico autosostenible energéticamente mediante energías renovables" Trabajo de Grado, Dept. Ing. Mec., Univ. Santo Tomás, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2018.
- [20] J. Barboda Urbano, "Estudio comparativo entre variables fotovoltaicas de dos sistemas de paneles solares (Monocristalinos y policristalinos en Bogotá)", Tesis MSc, Univ. Sergio Arboleda, Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia, 2013.
- [21] A. García Barrero y L. Peñuela Guevara, "Diseño e implementación de un sistema de paneles solares como prueba piloto para suministro energético de dispositivos móviles, en la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio campus Loma Lima, Trabajo de grado, Dept. Ing. Amb., Univ. Santo Tomás, Villavicencio, Meta, Colombia., 2019.
- [22] S. Navarro Rayos, J. A. Gonzáles Moreno y C. López Andrade, "Implementación de un sistema fotovoltaico para la alimentación de un edificio de usos múltiples", Tesis MSc., Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Repositorio Instrucional CIMAV, México, 2016.
- [23] E. V. Gonzáles Salazar y F. J. Velásquez Mejía, "Diseño de un sistema solar fotovoltaico de bajo consumo para uso domiciliario en comunidades rurales fuera del sistema interconectado Nacional", Tesis Monográfico, Dept. Ing. Elec., Univ. Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, 2016.
- [24] A. F. Pinilla Cepeda y J. L. Hernández Castaño, "Evaluación de un sistema eléctrico doméstico DC utilizando una fuente solar fotovoltaica", Trabajo de grado, Dept. Ing. Elec., Univ. Santo Tomás, Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia, 2019.
- [25] D. O. Mesias Genovez, "Diseño de un sistema solar fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica en el nuevo campus de la Escuela Politécnica del Ejército extensión laticunga", Trabajo de grado, Dept. Ing. Elec., Univ. de las Fuerzas Armadas ESPE., Laticunga, Ecuador, 2014.
- [26] R. W. Erickson, "DC-DC Power Converters", *Article in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 5, pp. 53-63, Jun., 2007.

- [27] N. Muñoz Galeano, J. B. Cano Quintero y J. M. López Lezama, "Control de un Convertidor Elevador de Voltaje AC/DC Utilizando Balance de Potencias", *SciELO*, vol. 27, n° 2, pp. 3-10, Abr. 2016.
- [28] R. Bououd y L. Sbita, "An overview of chopper topologies", 2017 Int. Conf. on Green Energy Conversion Systems (GECS), Hammamet, 2017.
- [29] J. C. Crebier, b. Revol y P. J. Ferrieux, "Boost-chopper-derived PFC rectifiers: interest and reality", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, n° 1, pp. 36-45, Feb. Feb. 2005.
- [30] C. Deekshitha y K. L. Shenoy, "Design and simulation of synchronous buck converter for LED application", 017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017.
- [31] S. Liu, J. Liu, Y. Yang y J. Zhong, "Design of intrinsically safe buck DC/DC converters", 2005 Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, 2005.
- [32] A. Nakajima y S. Masukawa, "Study of Boost type DC-DC Converter for Single Solar Cell", IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA, 2018.
- [33] R. Kiguchi y Y. Nishida, "Boost DC-DC Converter Cascade System for High Boost-Rate Application", 2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Nagasaki, JP, 2018.
- [34] A. V. Magar, S. G. Kanade y A. P. Kinge, "Transformerless Buck-Boost DC-DC Converter", 2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN), Lonavala IN., 2018.
- [35] J. Han, F. Li, J. Zheng, Z. Chen, L. y Bu and L., "Low Switching Loss Non-isolated DC-DC Buck-Boost Converter with ZCS Characteristics", 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xi'an, CN., 2019.
- [36] M. Kaouane, A. Boukhelifa y A. Cheriti, "Design of a synchronous sepic DC-DC converter for a stand-alone photovoltaic system", 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Halifax, NS, CA, 2015.
- [37] S. A. Yasin, J. Kumar, Y. Kumar, S. Athikkal y J. Peter, "Analysis of a Dual Input DC-DC Converter Topology Based on SEPIC Configuration", 2019 International Conference on Power Electronics Applications and Technology in Present Energy Scenario (PETPES), Mangalore, IN, 2019.
- [38] R. Burle Tulasi y Dipankar De, "Additional Voltage Assisted High Gain DC-DC Converter with Modified Čuk Configuration", 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), Cochin, IN, 2020.
- [39] S. M. Iلمان, A. Dahono, M. A. K. Prihambodo, B. A. Y. Putra, A. Rizqiawan y P. A. Dahono, "Analysis and Control of Modified DC-DC Cuk Converter", 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Denpasar, IDN, 2019.
- [40] N. Sujata S. y K. Shirish B., "Implementation of Zeta Converter in SPV Appliation", *International Journal of Scientific & Engineering*, vol. 10, n° 5, May, 2019.

- [41] P. K. Vineeth Kumar y K. Manjunath, "Analysis, design and implementation for control of non-inverted zeta converter using incremental conductance MPPT algorithm for SPV applications", 2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, Ind., 2017.
- [42] P. Nair y K. Deepa, "Two-port DC-DC converter with flyback inverter for rural lighting applications", 2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), Kollam, IN, 2015.
- [43] R. A. Álvarez López y G. Osorio Londoño, "Stability analysis of a photovoltaic system with DC/DC flyback converter using Filippov's method", 2012 IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE), Barranquilla, Col, 2012.
- [44] L. L. Jaime, "Diseño de un microinversor para paneles solares", Trabajo de grado, Dept. Ing. Elec., Univ. Carlos III de Madrid, Madrid, 2014.
- [45] Á. A. Rújula Bayod, "Energías renovables: sistemas fotovoltaicos", Prensas de la Universidad de Zaragoza, España, 2009, p. 339.
- [46] D. O. Cardozo Sarmiento y K. J. Sánchez Mojica, "Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la generación de energía eléctrica en escuelas rurales de Norte de Santander", *J. Eng., Gestión Ingeniería y Sociedad*, vol. 2, n° 1, pp. 50-66, Jun., 2017.
- [47] C. R. Diego Alejandro, "Diseño de un sistema de generación de energía renovable híbrido para alimentar una nano planta de cerveza artesanal", Tesis MSc, Dept. Ing. Elec., Univ. Santo Tomás, Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia, 2017.
- [48] Megger, "Guía para prueba de baterías", BatteryTestingGuide, vol. 2, p. 31, 2015.
- [49] N. A. Amran, O. Sidek y H. Jafar, "Supercapacitor-battery slow charged rate for WSN application", 2012 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), Depok, West Java, Indonesia, 2012.
- [50] J. C. Viera Pérez, "Carga rápida de baterías de Ni-Cd Y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos", Tesis MSc., Dept. Ing. Elec., Univ. de Oviedo, Gijón, España, 2003.
- [51] J. Martínez Bertran, "Métodos de estimación de estado de carga de baterías electroquímicas", Trabajo de grado, Dept. Ing. Ind., Esc. Téc. Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017.
- [52] V. B. Vu, V. T. Doan, V. L. Pham y W. Choi, "A new method to implement the constant Current-Constant Voltage charge of the Inductive Power Transfer system for Electric Vehicle applications", 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Busan, Korea (South), 2016.
- [53] M. Park, M. Seo, Y. Song y S. Kim, "Capacity Estimation of Li-ion battery using Constant Current Charging Voltage", 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), Bangkok, Thailand, 2019.

- [54] S. Lavety, R. K. Keshri y M. A. Chaudhari Given, "Multi-Step Constant Current Charging Strategy for a Valve Regulated Lead-Acid Battery", 2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Bengaluru, IN, 2019.
- [55] E. Guillem Simón, "Diseño y simulación de un cargador de dispositivos a partir de energía fotovoltaica", Trabajo de grado, Dept. Ing. Elec., Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2018.
- [56] N. T. D. Fernandez, R. Demonti, J. Andrade, P. F. Melo, C. G. Bianchin, A. R. Almeida, G. Pretko y A. R. Lemos, "Control strategy for pulsed lead acid battery charger for stand alone photovoltaics", 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, BR, 2015.
- [57] Z. Danyan, H. Guoqiang, X. Xiaohui y Y. Yang, "Design of a analog maximum power point tracking control IC based on perturb-and-observe algorithm", 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), Bangkok, THA, 2012.
- [58] G. Barca, A. Moschetto, C. Sapuppo, G. M. Tina, R. Giusto y A. D. Grasso, "A novel MPPT charge regulator for a photovoltaic stand-alone telecommunication system", 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, ITA, 2008.
- [59] N. Echeverría, M. Judewicz, G. Murcia, J. Strack y S. A. González, "Algoritmo MPPT de conductancia incremental con doble cota", AADECA 2014 - Semana del Control Automático - 24° Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, Argentina, 2014.
- [60] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis y N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, n° 1, pp. 46-54, Jan. 2001.
- [61] J. Appelbaum, "Discussion of "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power point tracking", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, n° 3, p. 652, September Sep., 2004.
- [62] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei y E. F. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltageand current-based maximum power-point tracking", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, n° 4, pp. 514-522, December Dec. 2002.
- [63] J. Gómez Ramírez, J. D. Murcia Murcia y I. Cabeza Rojas, "La energía solar fotovoltaica en Colombia: Potenciales, antecedentes y perspectivas", Univ. Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2018.
- [64] IDEAM, Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- [65] M. A. Guananga Pujos, "Diseño y construcción de un sistema fotovoltaico de baja potencia en el sector rio blanco perteneciente a la comunidad Yatzaputzan", Trabajo de grado, Fac. de Ing. Civil y Mecánica, Univ. Téc. de Ambato, Ambato, Ecuador, 2017.

- [66] L. J. Ruiz C., J. A. Beristáin J., I. M. Sosa T. y J. H. Hernández L., "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Pertubar y Observar", *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, vol. 8, nº 1, 2010.
- [67] E. M. Benavides Farías y H. P. Rosario Morales, "Implementación de un sistema de regulación para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos", Trabajo de grado, Fac. de Ing. Eléctrica y Electrónica, Rep. del Ecuador Esc. Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [68] J. A. Cuéllas Guarnizo, "Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares", Tesis MSc., Fac. de Ing. Elec., Univ. Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2019.
- [69] V. V. Jhon Edwin y F. Miguel Angel, "Maximum power point tracker shaded condition", Trabajo de grado, Fac. de Ing., Pontificia Univ. Javeriana, Bogota DC, 2013.
- [70] M. Salomón Aguilar, "Elaboración de un prototipo de sistema controlador de carga de baterías de ácido plomo e ion litio de 24v por medio de energía solar", Trabajo de grado, Inst. Tec. de Costa Rica, Esc. de Ing. en Elec., Cartago, Costa Rica, 2017.
- [71] Cise Electronics Corp., 2016, Abr., 01, "Técnicas para cargar baterías", [En línea]. Available: <http://www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/847-t%C3%A9cnicas-para-cargar-bater%C3%ADas.html?tmpl=component&print=1>.
- [72] J. Ballester, "Carga de baterías en 3 etapas", 2020, Abr., 24, [En línea]. Available: <https://dcballester.com/carga-de-baterias-en-3-etapas>.

ANEXOS A: CÓDIGO EN C IMPLEMENTADO EN EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

//Este código se realizó para el convertidor zeta que cuenta con el algoritmo MPPT de perturbación y observación, el cual trabaja a una frecuencia de 70 kHz, con un periodo de 14,28µ s; Para lograr implementar este código en el software de simulación PSIM, se recomienda ajustar el step de la simulación a un tiempo de 1,428e-007, porque si se llega a cambiar este valor la frecuencia se vería afectada alterando el funcionamiento de todo el sistema.

Pero si en dado caso se desea modificar la frecuencia, debe:

- Calcular el step de simulación para que se ajuste a la frecuencia deseada.
- Hallar el incremento para la señal.

```
float V; //Variable Voltaje
float I; //Variable Corriente
float P; //Variable Potencia
float dp; //Variable cambio de Potencia
float dv; //Variable cambio de Voltaje

float incremento = 0.1; //Incremento algoritmo
float dt = 0.000001; //Es el dt de la integral del Integrador.

//Función static float para que la variable valla almacenando los datos obtenidos en cada ciclo

static float P_obt = 0; //Almacena el valor de potencia anterior
static float V_obt = 0; //Almacena el valor de voltaje anterior
static float errorAcm; //Almacena el valor del error anterior

float Vref=54; //Voltaje nominal del sistema
float V_error; //Variable error
float PI; // //Variable controlador PI
static float counter = -1; //Contador inicia en -1.

V = x1; //Obtención del voltaje de los paneles
I = x2; //Obtención de la corriente de los paneles

P = V * I; //Obtención de potencia

dp = P - P_obt; //Cambio de potencia
dv = V - V_obt; //Cambio de voltaje

//----- Algoritmo MPPT-----//

if(dp!=0) //Lazo inicial del algoritmo
{
    if(dp>0) //Si el cambio de potencia es mayor que 0
    {
        if(dv>0) //Si el cambio de voltaje es mayor que 0
        {
            Vref=Vref+incremento; //Al Vref agréguele un incremento de 0.1
        }
        else //Si el cambio de voltaje es menor que 0
        {
            Vref=Vref-incremento; //Al Vref decreméntele 0.1
        }
    }
}
```

```

else //Si el cambio de potencia es menor que 0
{
    if(dv>0) //Si el cambio de voltaje es mayor que 0
    {
        Vref=Vref-incremento; //Al Vref decreméntele 0.1
    }
    else //Si el cambio de voltaje es menor que 0
    {
        Vref=Vref+incremento; //Al Vref agréguele un incremento de 0.1
    }
}
}

```

```

V_obt = V; //Nuevo dato obtenido se almacenado en la variable de voltaje
P_obt = P; //Nuevo dato obtenido se en la variable de potencia
V_error = V-Vref; // Nuevo dato obtenido se almacenado en la variable del error

```

```

errorAcm = errorAcm+ V_error*dt; //Se calcula la integral del controlador
PI = (0.59268* V_error)+ (0.0009411*errorAcm); // //Se calcular el error PI del sistema

```

```

//----- Generación de la frecuencia del sistema-----//

```

//Para generar la frecuencia de 70khz en el simulador, se debe inicialmente hallar el periodo, en este caso es de //14,28μs, seguidamente como diseñador debe elegir la cantidad de muestras que quiere que se realicen en un //periodo de la señal, para este caso se decidió que fueran 100 muestras; Conociendo el periodo y las muestras //de la señal, se realiza una división para obtener el tiempo de simulación, en este caso fue de 1,428e-007.

//Ahora para determinar el incremento que se le agregará al contador, se debe tener en cuenta la señal triangular //que tiene el algoritmo y observar la diferencia que existe entre pico y pico de voltaje; En este caso la diferencia //fue de 2 voltios (porque va de -1 a 1), así que eso 2 voltios se dividen entre las 100 muestras, obteniendo el //incremento que es de 0.02.

//La frecuencia con la señal triangular se realizó con dos condiciones

```

if(counter<1) //Cuando el contador es menor que 1
{
    counter=counter+0.02; //Agréguele a contador un incremento de 0.02
}
Else //Cuando el contador es mayor a 1
{
    counter=-1; //Reinícielo y vuelva a repetir el ciclo
}

```

```

//----- Comparador del PI con la señal triangular y su frecuencia-----//

```

```

if(PI>counter) //Si PI (error obtenido) es mayor que el contador
{
    PWM=1; //La salida debe ser alta
}
Else //Si PI es menor que el contador
{
    PWM=0; //La salida es baja
}
y1 = PWM; //Salida del controlador PI por PWM

```