



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Posgrado en Ingeniería Eléctrica. Sistemas Electrónicos

SUBSISTEMA DE POTENCIA PARA UN NANOSATÉLITE CUBESAT 3U

TESIS DE MAESTRÍA

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Rafael Orestes Arias Zamora

TUTOR:

Prado Molina Jorge Dr.
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

octubre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Martínez López José Ismael

Secretario: Dr. De La Rosa Nieves Saúl

1er. Vocal: Dr. Prado Molina Jorge

2do. Vocal: Dra. Moumtadi Fátima

3er. Vocal: Dr. Peña Cabrera Juan Mario

Agradecimientos

A México, por abrirme sus fronteras, por su cultura y su gente.

A la UNAM, por permitir cursar estudios de postgrado y hacer de mi un profesional más preparado.

A todos los profesores que permitieron aumentar mis conocimientos.

A colectivo de trabajo y estudiantes del Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada, del Instituto de Geografía de la UNAM por el apoyo en la realización de este trabajo y por la amistad.

A mi tutor Jorge Prado Molina, por su confianza, sus consejos y exigencia.

A todos los amigos. Esos que me han acompañado en esta aventura acá en México, así como los que quedaron en Cuba y nunca se olvidan.

A toda mi familia. En especial a mi madre por inspirarme a seguir adelante, a mi hermano por su ayuda y a mi esposa por siempre estar a mi lado.

A todos los que de una forma u otra y aun sin darse cuenta han hecho posible este logro, a los que confiaron en mí.

A todos, muchas gracias

Dedicatoria

A mis amigos, esos que siempre confiaron en mí y alentaron a seguir adelante.

A mi hermano que siempre me ha apoyado y más en estos momentos fuera de mi país.

A mi madre. Que me alentó a crecer profesionalmente y es mi ejemplo a seguir como profesional.

A mi esposa, que siempre me ha apoyado y ha estado a mi lado en los momentos buenos y malos.

A mi hija adoptiva, Daniela; para que se refleje en mí y comprenda que con estudio, esfuerzo y sacrificios se logran las metas y victorias.

Contenido

| | |
|--|----|
| Índice de Figuras | 1 |
| Índice de Tablas | 3 |
| Resumen | 4 |
| Introducción | 5 |
| Objetivos | 6 |
| Metodología..... | 7 |
| Capítulo 1 | 8 |
| Generalidades sobre los subsistemas de potencia para nanosatélites. | 8 |
| 1.1 Nanosatélites y el estándar Cubesat..... | 8 |
| 1.1.1 Especificaciones eléctricas..... | 8 |
| 1.2 Sistema de potencia para nanosatélites CubeSat..... | 9 |
| 1.3 Estado del arte de las arquitecturas de sistemas de potencia fotovoltaicos para satélites..... | 10 |
| 1.3.1 Arquitecturas de sistemas de potencia para satélites..... | 10 |
| 1.3.2 Comparación entre arquitecturas de sistemas de potencia para Cubesat..... | 13 |
| Capítulo 2 | 16 |
| Celdas solares fotovoltaicas y baterías para uso espacial..... | 16 |
| 2.1 Propiedades de las celdas solares para uso espacial..... | 16 |
| 2.1.1 Parámetros principales de una celda solar..... | 17 |
| 2.2 Máxima transferencia de potencia de paneles solares..... | 19 |
| 2.2.1 Algoritmos de MPPT..... | 20 |
| 2.3 Reguladores de tensión y convertidores CC/CC..... | 25 |
| 2.3.1 Convertidor DC-DC para sistema de MPPT..... | 27 |
| 2.4 Baterías utilizadas en satélites..... | 30 |
| 2.4.1 Características de baterías utilizadas en Satélites..... | 30 |
| 2.4.2 Configuración de baterías..... | 33 |
| Capítulo 3 | 35 |

| | |
|--|----|
| Diseño del sistema..... | 35 |
| 3.1 Presupuesto de energía de Cubesat. | 36 |
| 3.1.1 Parámetros eléctricos de subsistemas del satélite. | 36 |
| 3.1.2 Cálculo de potencia debido a la iluminación solar. | 37 |
| 3.1.3 Celdas solares para el sistema de potencia..... | 39 |
| 3.1.4 Cálculo de presupuesto de energía..... | 41 |
| 3.2 Selección de baterías..... | 42 |
| 3.3 Diseño de sistema de potencia..... | 44 |
| 3.3.1 Subsistema de celdas solares y MPPT. | 46 |
| 3.3.1.1 Convertidor del sistema de MPPT. | 47 |
| 3.3.1.2 Simulación de Convertidor de MPPT en Pspice | 48 |
| 3.3.2 Subsistema de almacenamiento de energía | 50 |
| 3.3.3 Convertidores de tensión de buses de alimentación | 51 |
| 3.3.4 Subsistema de Distribución y Protección..... | 51 |
| 3.3.5 Subsistema de monitoreo y gestión..... | 52 |
| 3.4 Optimización del algoritmo de perturbación y observación | 53 |
| 3.4.1 Simulación de algoritmo de MPPT en Simulink..... | 57 |
| Capítulo 4 | 62 |
| Implementación del sistema..... | 62 |
| 4.1 Selección de componentes y esquemas electrónicos de diseño | 62 |
| 4.1.1 Subsistema de paneles solares..... | 62 |
| 4.1.2 Sistema de almacenamiento de energía. | 64 |
| 4.1.3 Sistema de convertidores y regulación de tensión. | 65 |
| 4.1.4 Sistema de distribución | 65 |
| 4.1.5 Sistema de medición y monitoreo..... | 66 |
| 4.2 Algoritmo de funcionamiento del sistema | 67 |
| 4.3 Construcción del sistema | 68 |
| Capítulo 5 | 72 |

| | |
|--|-----------|
| Pruebas de Funcionamiento..... | 72 |
| 5.1 Pruebas de funcionamiento..... | 72 |
| 5.1.1 Pruebas al sistema de medición..... | 72 |
| 5.1.2 Pruebas a sistema de distribución..... | 73 |
| 5.1.3 Pruebas al sistema de convertidores reguladores de tensión..... | 75 |
| 5.1.4 Pruebas al sistema de almacenamiento de energía | 77 |
| 5.1.5 Pruebas a sistema de MPPT | 78 |
| 5.1.6 Pruebas a sistema de paneles solares..... | 80 |
| 5.2 Resultados..... | 81 |
| 5.2.1 Eficiencia total del sistema de potencia..... | 81 |
| 5.2.2 Datos de información del sistema..... | 82 |
| Conclusiones | 84 |
| Recomendaciones | 85 |
| Referencias | 86 |
| Anexos | 90 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Componentes básicos de sistema de potencia de un satélite [5]. | 9 |
| Figura 1.2 Arquitectura de transferencia de energía directa totalmente regulada [5]..... | 11 |
| Figura 1.3 Arquitectura de bus regulado por luz solar[5]. | 12 |
| Figura 1.4 Arquitectura de seguidor de máxima potencia.[5]..... | 13 |
| Figura 2.1 Curva corriente tensión característica de una celda solar iluminada [11] | 18 |
| Figura 2.2 Circuito equivalente de una celda con resistencia serie y paralelo [8]...... | 18 |
| Figura 2.3 Puntos de máxima potencia de un panel solar [15]. | 20 |
| Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo perturbación y observación.[15]..... | 25 |
| Figura 2.5 Esquema de convertidor SEPIC[24]. | 28 |
| Figura 2.6 Curva característica de carga de baterías de Ion de litio[32]. | 31 |
| Figura: 2.7 Diagrama de Ragone[34]...... | 33 |
| Figura 3.1 Gráfica de radiación total en una órbita recibida por una cara del satélite..... | 38 |
| Figura 3.2 Gráfica de radiación directa en una órbita recibida por una cara del satélite..... | 38 |
| Figura 3.3 Características eléctricas de las celdas solares[36]..... | 39 |
| Figura 3.4 Degradación de parámetros de las celdas con temperatura. | 41 |
| Figura 3.5 Distribución de potencia según el presupuesto de energía y baterías seleccionadas.. | 44 |
| Figura 3.6 Esquema general del sistema de potencia..... | 45 |
| Figura 3.7 Subsistema de paneles solares y MPPT. | 46 |
| Figura 3.8 Convertidor SEPIC sincrónico..... | 47 |
| Figura 3.9 Convertidor SEPIC sincrónico..... | 48 |
| Figura 3.10 Eficiencia del convertidor a diferentes potencias de salida. | 49 |
| Figura 3.11 Tensión de salida del convertidor simulado. | 49 |
| Figura 3.12 Rizados de corriente en inductor L1 y L2. | 50 |
| Figura 3.13 Sistema de almacenamiento de energía para cada batería. | 50 |
| Figura 3.14 Sistema de regulación de buses. | 51 |
| Figura 3.15 Sistema de distribución..... | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 3.16 Diseño de sistema de monitoreo y gestión. | 53 |
| Figura 3.17 Movimiento del punto de operación del panel solar. [50] | 54 |
| Figura 3.18 Tensión en el panel debido al comportamiento dinámico del convertidor [51]. | 56 |
| Figura 3.19 Puntos de operación de panel para una radiación determinada[51]. | 56 |
| Figura 3.20 Sistema MPPT en Simulink | 57 |
| Figura 3.21 Resultados obtenidos para diferentes niveles de irradiación. | 58 |
| Figura 3.22 Detalles de resultados los obtenidos. | 59 |
| Figura 4.1 Diagrama de flujo de algoritmo de control del sistema. | 67 |
| Figura 4.1 Diseño de tarjetas de circuito impreso en Eagle™ | 70 |
| Figura 4.2 Tarjeta de circuito impreso de conexión con placa de evaluación. | 70 |
| Figura 4.3 Sistema de potencia construido | 71 |
| Figura 5.1 Prueba al sistema de mediciones. | 72 |
| Figura 5.2 Prueba a interruptores de sistema de cámara y comunicaciones. | 74 |
| Figura 5.3 Prueba a interruptores de sistema de computadora de a bordo y telemetría. | 74 |
| Figura 5.4 Prueba a interruptores de sistema de control y orientación. | 75 |
| Figura 5.5 Prueba de regulación de línea. | 75 |
| Figura 5.6 Prueba de regulación de carga. | 76 |
| Figura 5.7 Tensión de salida de convertidores a diferentes niveles de carga. | 76 |
| Figura 5.8 Eficiencia de convertidores a diferentes niveles de potencia. | 77 |
| Figura 5.9 Prueba de interruptores de carga y descarga de baterías. | 77 |
| Figura 5.10 Comportamiento de convertidor MPPT | 79 |
| Figura 5.11 Comportamiento de eficiencia del convertidor MPPT. | 79 |
| Figura 5.12 Comportamiento de ciclo de trabajo en convertidor de MPPT. | 80 |
| Figura 5.13 Equipo utilizado para simular un diodo ideal. | 81 |
| Figura 5.14 Simulación de ambos paneles recibiendo radiación. | 81 |
| Figura 5.15 Eficiencia obtenida. | 82 |
| Figura 5.16 Datos del sistema obtenidos en consola serial. | 83 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de las arquitecturas de los sistemas de potencia [5]. | 14 |
| Tabla 1.2 características de sistemas de potencia de misiones de Cubesat..... | 14 |
| Tabla 2.1 Eficiencia de métodos de MPPT variando la radiación [22]..... | 22 |
| Tabla 2.2 Eficiencia de métodos de MPPT variando temperatura[22]..... | 23 |
| Tabla 2.3 Eficiencia de métodos de MPPT con panel fotovoltaico[21]..... | 23 |
| Tabla 2.4 Comparación de convertidores DC-DC para aplicaciones MPPT[27]..... | 28 |
| Tabla 3.1 Características eléctricas de subsistemas..... | 36 |
| Tabla 3.2 Consumo según modos de operación..... | 37 |
| Tabla 3.3 Presupuesto de energía..... | 41 |
| Tabla 3.4 Características de baterías LIR14500-8..... | 43 |
| Tabla 3.5 Parámetros del convertidor para MPPT..... | 47 |
| Tabla 3.6 Variación de potencia a diferentes niveles de radiación..... | 59 |
| Tabla 3.7 Resultados de simulación a diferentes cambios de ciclo de trabajo..... | 60 |
| Tabla 4.1 Características de MOSFET DMN6040SSD, SI4850EY y DMG6968UQ [51] [52] [53] .. | 63 |
| Tabla 5.1 Valores de corriente y tensión medidos por instrumento y medidos por el sistema..... | 73 |

Resumen

En el Instituto de Geografía de la UNAM, desde hace varios años se trabaja en el desarrollo de tecnología espacial propia y que al mismo tiempo permita la formación de recursos humanos en esta área en México.

En la presente tesis se describe el diseño, implementación y pruebas de funcionamiento de un subsistema de potencia de un Cubesat 3U. Está compuesto por las etapas de generación; a través de paneles solares, seguimiento de punto de máxima potencia, almacenamiento de energía, conversión de tensión, distribución y protección. Dentro del marco teórico, se abordan las arquitecturas y características de los sistemas de potencia de satélites y los algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia de paneles solares.

Se determinaron los parámetros de ajuste del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia para una determinada razón de variación de la radiación y teniendo en cuenta el comportamiento del convertidor utilizado en esta función, se llevaron a cabo las simulaciones correspondientes. Se obtuvo un presupuesto de energía del Cubesat según los requerimientos de potencia de los sistemas del satélite y los paneles solares propuestos a utilizar.

Posteriormente se realizó un diseño del sistema de potencia basado en el análisis de algunos Cubesats que han realizado misiones exitosas y se propusieron componentes comerciales para la implementación del mismo. Luego se realizó el diseño de las tarjetas de circuito impreso, la fabricación, las pruebas de funcionamiento y la caracterización del sistema.

Finalmente se expresan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Introducción

Cada año los subsistemas de potencia de las naves espaciales se benefician de las mejoras en la eficiencia de las celdas solares, la química de las baterías y la tendencia a la miniaturización de la tecnología electrónica. Actualmente existen tecnologías fotovoltaicas en desarrollo muy prometedoras, que aumentarán la eficiencia y reducirán el costo de las celdas solares. Las tendencias de la electrónica de consumo y las mejoras en la tecnología solar, alentadas por el enfoque en la energía renovable terrestre, son en gran parte lo que ha impulsado este desarrollo ya que el mercado de la industria espacial aún es demasiado pequeño para incidir en la investigación y desarrollo a gran escala. Los sistemas de administración y distribución de energía PMAD, del inglés, *Power Management and Distribution*, permiten controlar el flujo de energía a los instrumentos y subsistemas de la nave espacial. Estos adoptan diversas formas y a menudo están diseñados a la medida, para cumplir con los requisitos específicos de la misión [1]. Los diferentes proyectos relacionados con el diseño y construcción de satélites pequeños requieren la creación de un sistema eléctrico de potencia que sea eficiente y proporcione la energía necesaria para el buen funcionamiento de los demás subsistemas. Hay algunos de ellos con demandas de energía importantes, como los de telecomunicaciones y de control de orientación.

Específicamente en el instituto de Geografía de la UNAM, se ha trabajado en un prototipo de laboratorio de subsistema de potencia para un satélite Cubesat 3U, el cual; para el estado actual de desarrollo de esta clase de nanosatélites resulta ineficiente tanto en dimensiones y masa, así como en la densidad de carga que debe distribuir al resto de los subsistemas [2].

La construcción y diseño de este subsistema de potencia, en conjunto con el resto de los subsistemas del nanosatélite en los cuales se trabaja actualmente en el Instituto de Geografía, representa una excelente oportunidad para reducir la dependencia de la tecnología extranjera en el ámbito espacial y contar con un prototipo diseñado y construido en nuestro país. Dentro del Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada, del Instituto de Geografía de la UNAM, se cuenta con el equipo propio de un laboratorio de electrónica y los programas de simulación necesarios para la correcta realización de este proyecto.

Objetivos

De ahí que el objetivo de este trabajo de tesis sea, diseñar y construir un prototipo de laboratorio de un sistema de potencia para un nanosatélite Cubesat 3U.

Para lo cual se trazan los siguientes objetivos específicos.

- Determinar que arquitectura del subsistema de potencia se va a utilizar basado en los requerimientos y objetivo de la misión.
- Optimizar el algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia de celdas solares.
- Diseñar el sistema de potencia según la arquitectura seleccionada.
- Implementar el diseño mediante la utilización de componentes comerciales.
- Realizar pruebas de funcionamiento en el Laboratorio al sistema implementado.

Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos trazados se determina utilizar en este trabajo la siguiente metodología

- Revisión bibliográfica sobre el estado de arte de los sistemas de potencia satelitales para su uso en Cubesats.
- Revisión de las arquitecturas de sistemas de potencia utilizados en Cubesats.
- Revisión de algoritmos para seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia de paneles solares (MPPT).
- Análisis y optimización de algoritmo de MPPT.
- Revisión de diseños de fuentes conmutadas y reguladores de tensión.
- Realizar un análisis de los parámetros eléctricos y consumos de energía de los diferentes subsistemas que conforman el satélite.
- Realizar un presupuesto de energía para un nanosatélite según los modos de operación del mismo.
- Diseño del sistema de potencia según la arquitectura seleccionada.
- Proponer paneles solares y baterías a utilizar teniendo en cuenta las necesidades del diseño.
- Seleccionar los componentes a utilizar según una revisión sobre los circuitos y componentes de tipo comercial que hayan funcionado en el espacio y atendiendo a la capacidad económica de proyecto.
- Implementar el diseño propuesto.
- Realizar pruebas de funcionamiento a diferentes módulos que conforman el sistema y sistema en general.

Generalidades sobre los subsistemas de potencia para nanosatélites.

1.1 Nanosatélites y el estándar Cubesat.

El proyecto de CubeSat comienza en 1999 como una colaboración entre la Universidad Estatal Politécnica de California, (California Polytechnic State University) Cal Poly y el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales de la Universidad de Stanford. El propósito de este proyecto era proveer un estándar para diseñar picosatélites y reducir costos, tiempo de desarrollo e incrementar el acceso al espacio. Actualmente esta es una colaboración de varias universidades y empresas privadas que desarrollan picosatélites. La misión principal del programa CubeSat es proporcionar acceso al espacio para pequeñas cargas útiles [3].

Además, el Cal Poly estandarizó un sistema de despliegue para los CubeSat llamado Despliegue Orbital de Picosatélites P-POD, del inglés *Poly Picosatellite Orbital Deployer*. Este puede transportar tres CubeSats estándar y sirve como interfaz entre ellos y el vehículo de lanzamiento. El P-POD es un contenedor rectangular con una puerta y un mecanismo de resorte. El mecanismo de liberación del P-POD es accionado por una señal de despliegue enviada desde el vehículo de lanzamiento. El sistema de coordenadas internas del CubeSat coincidirá con el sistema de coordenadas del P-POD mientras se encuentre integrado en el mismo. [4].

1.1.1 Especificaciones eléctricas.

Este estándar CubeSat tiene diferentes especificaciones mecánicas, eléctricas y operacionales. Las eléctricas se numeran a continuación, debido a que son los requerimientos a tener en cuenta de acuerdo al objetivo de este trabajo. Dichas especificaciones son tomadas de [4].

- El sistema de alimentación CubeSat estará apagado para evitar activar cualquier función mientras éste se mantenga integrado en el P-POD.

- La función de encendido del CubeSat incluye varios subsistemas como Comando y Manejo de Datos, Comunicación de RF, Determinación de Orientación y Control y actuación del mecanismo de despliegue en caso de tenerlo.
- El Cubesat deberá incorporar un circuito de protección para cargar y descargar las baterías.
- El CubeSat tendrá una inhibición de emisión de RF y su salida de potencia de RF será de no más de 1.5W en la antena de transmisión.

1.2 Sistema de potencia para nanosatélites CubeSat.

Los componentes básicos del sistema de potencia de un satélite según [5] se muestran en la [Figura 1.1](#).

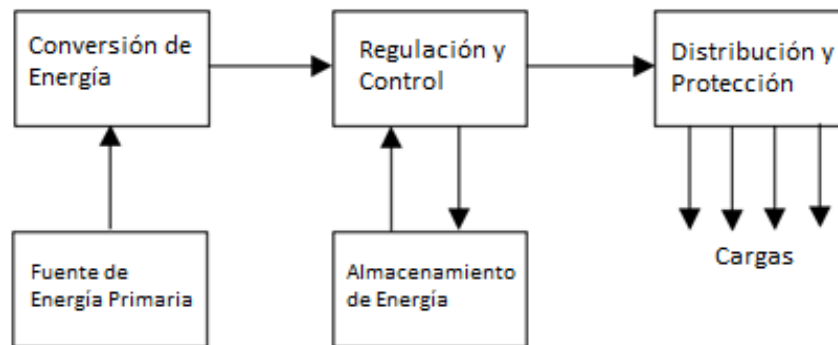


Figura 1.1 Componentes básicos de sistema de potencia de un satélite [5].

La fuente de energía principal, conversión, el regulador de potencia, el almacenamiento, la distribución y la protección contra sobrecargas, son las diferentes etapas que conforman el sistema. Las fuentes de energía primaria pueden incluir radiación solar, radioisótopos, reactores de energía nuclear y combustible electroquímico y o químico. Mientras la conversión de energía puede ser fotovoltaica, termoeléctrica, por alternador dinámico, célula de combustible o termoiónica.

Ya que se dispone de varias opciones compatibles con una misión determinada y su entorno, es necesario llevar a cabo un estudio de optimización del satélite para seleccionar la mejor combinación de fuente de energía, conversión de la misma y tecnologías de almacenamiento. Los principales criterios que siempre se tienen en cuenta para realizar una selección de los sistemas son: masa, costo y número de ciclos de vida. Además esta selección está influenciada en gran medida por el nivel de potencia y la duración de la misión [5].

Las celdas fotovoltaicas y los paneles solares son la tecnología de conversión de energía más utilizada en la industria de los satélites. Esto se debe a que pueden proporcionar potencia desde unos pocos watts hasta varios kilowatts y proporcionar una vida útil de unos pocos meses hasta 15 años[1]. Para satélites que requieren potencia de carga continua, incluso durante un eclipse, estos deben usar una batería recargable junto con el arreglo de celdas solares. La batería se carga durante la exposición a la luz solar y se descarga para alimentar la carga en este mismo periodo y durante un eclipse. Es necesario utilizar reguladores de potencia y circuitos de control según se requiera.

El tamaño físico de los CubeSat restringe el área disponible para colocar paneles solares. Por lo general, los presupuestos de potencia máxima de CubeSats 1U, 2U y 3U van de 1 a 5 watts. Todas las misiones deben tener al menos dos modos de energía básicos: uno de almacenamiento de energía y otro de sobre potencia. En el primero, el consumo total de energía es menor que la energía producida por los paneles solares para que las baterías puedan almacenar energía. En el modo de sobre potencia, el consumo total de energía puede exceder la potencia generada por los paneles solares mediante el aprovechamiento de la energía almacenada de las baterías. Los sistemas con un gran consumo de energía para la carga útil y demás subsistemas, pueden tener varias opciones en los modos de potencia básicos [6].

1.3 Estado del arte de las arquitecturas de sistemas de potencia fotovoltaicos para satélites.

La conversión fotovoltaica de la energía del Sol es la fuente más común de energía eléctrica en el espacio. El sistema de energía fotovoltaica consiste principalmente en un arreglo de celdas solares, una batería recargable y un regulador del flujo de potencia entre otros componentes.

1.3.1 Arquitecturas de sistemas de potencia para satélites.

El arreglo de celdas solares, las baterías y los reguladores, junto con el requisito de voltaje de carga, son extremadamente importantes para seleccionar la arquitectura del sistema de potencia más adecuado para la misión. Los requisitos impuestos por la misión o derivados del sistema de potencia, también tienen relación con la selección de la arquitectura.

➤ Arquitectura de transferencia directa de energía.

En la arquitectura de transferencia directa, DET, del inglés, *Direct Energy Transfer*, la energía solar se transfiere a las cargas sin ningún componente en serie entre ellas. A su vez esta arquitectura se divide en dos clases: bus completamente regulado y bus regulado por la luz solar. Los componentes y el funcionamiento de estos dos buses son similares, excepto que este último no tiene convertidor de descarga de batería en la unidad reguladora de potencia.

- Bus completamente regulado

En el bus de transferencia de energía directa completamente regulado, conocido como bus regulado, el voltaje se controla dentro de un pequeño porcentaje durante todo el período de la órbita. La variación típica de la tensión del bus es del 2 al 5% de la tensión nominal.

Este modelo tiene los siguientes componentes; arreglo de celdas fotovoltaicas, controlador del panel solar SAD, del inglés, *Solar Array Driver*, disipador en derivación, baterías, unidad reguladora de potencia PRU, del inglés, *Power Regulator Unit*, unidad de distribución de potencia PDU, del inglés, *Power Distribution Unit* y un controlador de voltaje del bus [7].

En la [Figura 1.2](#) se muestra la arquitectura de este bus.

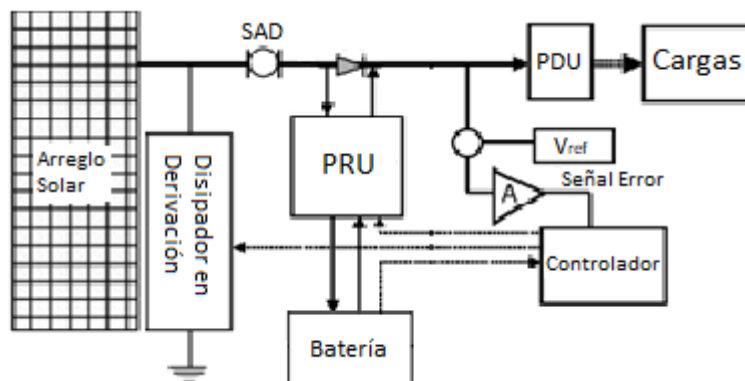


Figura 1.2 Arquitectura de transferencia de energía directa totalmente regulada [5].

La salida de señal de error amplificada del controlador de bus, ingresa al controlador de modo de operación, este envía las señales de comando necesarias para regular la tensión del bus dentro de los límites requeridos. La unidad de distribución de energía asegura que todas las cargas sean alimentadas a través de interruptores y fusibles. Los

fusibles no son para proteger las cargas, sino para proteger al sistema de alimentación de fallas en los subsistemas que energiza [5].

- Bus regulado por la luz solar

Con el objetivo de minimizar la complejidad, es muy común distribuir la energía de ambas fuentes, del conjunto solar y de la batería, directamente a la carga; este es el caso del bus regulado por luz solar o bus parcialmente regulado.

El voltaje del bus se regula mediante el control de derivación durante la presencia de la luz solar y no está regulado durante un eclipse. La diferencia de éste con el anterior se encuentra en la PRU. Este bus tiene un regulador de carga de la batería para administrar el nivel de carga de la misma durante la presencia de la luz solar, pero no tiene convertidor de descarga de batería. La energía durante el eclipse, se suministra directamente al bus a través del diodo 'D' y se desconecta cuando hay luz solar, mientras el controlador de derivación regula la tensión del bus. En esta arquitectura la tensión del bus disminuye a medida que la batería se descarga durante el eclipse y aumenta a medida que se recarga durante la presencia de la luz solar [5].

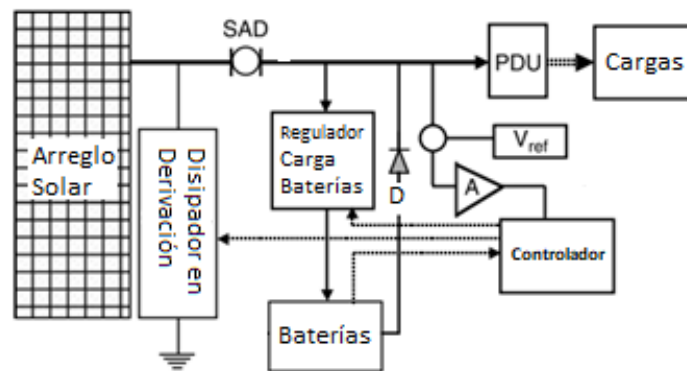


Figura 1.3 Arquitectura de bus regulado por luz solar[5].

- Seguidor de potencia máxima.

En la arquitectura Seguidor de Máxima Potencia PPT, del inglés, *Peak Power Tracker* la tensión de salida del conjunto solar siempre se establece en el valor que da como resultado la máxima transferencia de potencia del panel solar a la carga. Un convertidor de potencia en serie entre el panel solar y la carga, acopla el voltaje de carga y la tensión de salida del panel. Un regulador de conmutación adecuado entre el panel solar y la carga, como se muestra en la [Figura 1.4](#), soluciona la disparidad entre la tensión máxima de generación y la tensión de carga o baterías.

El seguidor de potencia máxima mantiene la tensión de entrada del regulador serie al máximo nivel de generación, y la tensión de salida se mantiene constante variando el ciclo de trabajo según sea necesario. El relé de la batería se abre cuando ésta se encuentra completamente cargada.

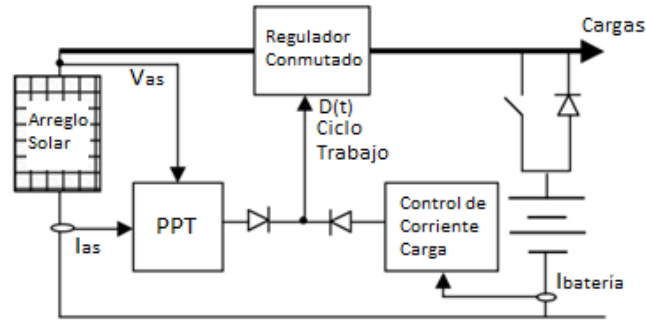


Figura 1.4 Arquitectura de seguidor de máxima potencia.[5]

Esta arquitectura es útil en pequeños satélites que no tienen mecanismos de seguimiento, de modo que el conjunto solar no siempre está orientado hacia el Sol. También es conveniente su uso en satélites donde la radiación solar y la temperatura del panel varían, cambiando indirectamente la tensión del panel solar. Además, en órbitas bajas de la Tierra, donde la batería debe cargarse en un período corto de tiempo; siendo necesario capturar la máxima potencia durante varios minutos después de cada eclipse. La arquitectura sin la función PPT como un bus DET, desperdicia una cantidad significativa de energía, siendo esta la principal ventaja del PPT ya que se maximiza la potencia de salida del conjunto solar todo el tiempo y no requiere de reguladores de derivación, ni de carga de la batería[5].

1.3.2 Comparación entre arquitecturas de sistemas de potencia para Cubesat.

La arquitectura de bus totalmente regulado, encuentra su aplicación en naves espaciales que tienen requisitos de potencia de carga por encima de 3 kW, generalmente en GEO. Mientras que el bus regulado por el Sol, encuentra aplicaciones principalmente en satélites que tienen un requerimiento de potencia de carga de menos de un par de kilowatts, típicamente en LEO; mientras para una misión corta que opera en parámetros de órbita baja, la arquitectura de seguimiento de potencia máxima es la más adecuada[5].

En la [Tabla 1.1](#) se resumen las ventajas y desventajas entre varias arquitecturas con sus mejores aplicaciones. La selección final de la arquitectura depende de los detalles específicos de la misión.

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de las arquitecturas de los sistemas de potencia [5].

| Sistema | Parcialmente regulado | Completamente regulado | Seguimiento de máxima potencia |
|----------------------|--|--|--|
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia en transferencia de energía de panel a batería y cargas. - Menos componentes electrónicos que completamente regulado. | <ul style="list-style-type: none"> - Mejora la regulación de voltaje de entrada a todas las cargas. - Eficientes convertidores de cargas | <ul style="list-style-type: none"> - No necesita regulador de carga de baterías. - Utiliza al máximo la energía solar incidente |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> - Complejos convertidores de cargas. - Grandes paneles solares. | <ul style="list-style-type: none"> - Necesita más convertidores de potencia. - Pérdida de potencia entre baterías y carga | <ul style="list-style-type: none"> - Mayor disipación de calor en el satélite |
| Aplicable a misiones | <ul style="list-style-type: none"> - Pequeñas variaciones de carga. - Pequeñas variaciones en iluminación | <ul style="list-style-type: none"> - Para cargas que requieren una muy buena regulación. - Grandes variaciones de tensión de salida de panel solar | <ul style="list-style-type: none"> - Grandes variaciones en la energía solar que incide al panel solar. - Menor complejidad de implementación. |

Se determina utilizar en este trabajo la arquitectura de seguimiento de máxima potencia debido a que es recomendable para satélites en los que hay una alta variación de la energía solar que incide en los paneles solares. Su implementación es menos compleja al requerir un menor número componentes electrónicos y ser la que mejor aprovecha la energía solar incidente. Adicionalmente, en la bibliografía consultada se verifica que esta arquitectura es la más empleada en los sistemas de potencia para Cubesats. En la [Tabla 1.2](#) se muestran datos de sistemas de potencia de diferentes misiones.

Tabla 1.2 características de sistemas de potencia de misiones de Cubesat.

| Misión | Año | CubeSat | Arquitectura EPS | Baterías |
|-----------------|------|---------|------------------|----------------------------|
| LAICE | 2016 | 6U | MPPT | Li-ion 38WH |
| QBITO | 2016 | 2U | MPPT | Li-ion 2 x 2.85 Ah |
| Galassia | 2015 | 2U | MPPT | Polímero de litio 20 Wh |

| | | | | |
|--|------|-----------|------|--|
| GOMX-3 (GomSpace Express-3) | 2015 | 3U | MPPT | 4 Li-Ion en series 38 Wh |
| CubeSTAR | 2014 | 2U | MPPT | (LiFePO4) fosfato de litio y hierro 2 x 4.4 Ah |
| Rising-2 | 2014 | - | MPPT | 9 cell (NiMH) níquel metal hidruro 3.7 Ah, 10.8 V |

Celdas solares fotovoltaicas y baterías para uso espacial.

Las celdas solares de uso espacial deben operar en un amplio intervalo de intensidad luminosa y temperatura. Una vez en órbita, las celdas son la única fuente de potencia del satélite por lo que deben emplearse aquellas que ofrezcan el mejor desempeño, ya que el éxito de la misión depende de manera crítica de la potencia suministrada por estos dispositivos. Dadas las características de las misiones espaciales, toda reparación o reemplazo es dificultoso o imposible por lo que es muy importante el buen funcionamiento de las celdas fotovoltaicas.

Las celdas solares en el espacio están sometidas a condiciones ambientales mucho más severas que, en la superficie terrestre, por ejemplo: bombardeo con partículas cargadas, radiación ultravioleta, variaciones bruscas de temperatura, etc. Ello hace que sus características eléctricas se deterioren durante la misión, sufriendo pérdidas significativas; mayores al 20 % en misiones de varios años en la potencia entregada[8].

En la industria aeroespacial, las celdas de triple unión se utilizan actualmente de manera común debido a su alta relación eficiencia-costo, en comparación con otras. Las celdas de triple juntura $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ son las más eficientes que se utilizan para fines espaciales [1].

2.1 Propiedades de las celdas solares para uso espacial.

Las propiedades más importantes para el funcionamiento en el espacio de estas celdas según [9] son:

- Alta eficiencia, debido a que el área disponible para el montaje es restringida.
- Resistencia a los daños por radiaciones causados por partículas cargadas provenientes del espacio, debido a la radiación proveniente directamente del Sol o aquella que es atrapada por los cinturones magnéticos de la Tierra, ya que producen degradación de las propiedades del material semiconductor.
- Tolerancia a la intensa radiación ultravioleta y a la degradación por átomos de oxígeno.
- La masa debe ser la mínima posible.

- La temperatura de la celda debe reducirse al máximo posible por la emisión de longitudes de onda infrarrojas. Esto se debe a que la eficiencia de las celdas disminuye con el aumento de la temperatura.

Además, es esencial que las celdas sean robustas y altamente confiables, resistentes a los esfuerzos durante el lanzamiento, así como a ciclos térmicos a los cuales se ve expuesto el satélite durante su paso de la exposición al sol, a la sombra terrestre.

2.1.1 Parámetros principales de una celda solar.

En una celda al iluminarse la juntura, ocurre una generación de pares que se calcula mediante la tasa de fotogeneración G ; apareciendo un término constante, independiente de la tensión, que es la corriente fotogenerada I_f [10]. Esta corriente establece una polarización en directa de la juntura por lo cual la corriente del diodo se puede considerar como una pérdida en el dispositivo. La ecuación para la corriente generada por el dispositivo según plantea [8] es:

$$I = I_f - I_o [e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Donde I_f es la corriente fotogenerada, I_o la corriente en inversa o corriente de saturación del diodo ideal, q la carga del electrón, V la tensión en la juntura, n una constante entre 1 y 2, k la constante de Boltzman, y T la temperatura. Esta ecuación considera a la celda como un generador de corriente[11].

La curva corriente tensión de un dispositivo fotovoltaico proporciona la caracterización eléctrica del mismo. La [Figura 2.1](#) muestra una curva corriente voltaje característica de una celda solar.

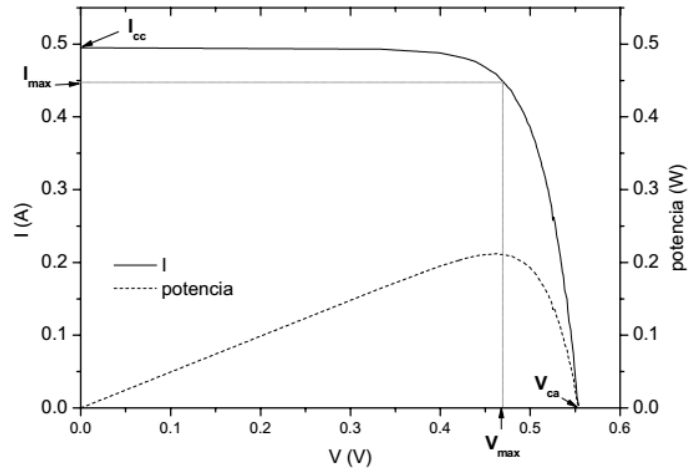


Figura 2.1 Curva corriente tensión característica de una celda solar iluminada [11]

Esta curva característica cambia significativamente con la temperatura y la dosis de radiación de partículas cargadas. Además, la potencia de salida se degrada de forma gradual con la dosis de radiación acumulada. Debido a esto al final de su vida, la celda genera menos energía que al comienzo[5].

A su vez el circuito equivalente consiste en una fuente que provee una corriente a un conjunto de impedancias, entre las cuales se han incluido dos resistencias: R_S y R_P , resistencias serie y paralelo respectivamente. La primera proviene principalmente de la resistividad del emisor y la base, así como las resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos. La R_P es esencialmente debida a pérdidas en los bordes y a la presencia de defectos cristalinos y precipitados de impurezas en la zona de la juntura. Cabe destacar además que cuanto mayor sea R_S mayor es la potencia disipada en la juntura y menor la tensión a través de la carga [12]. La Figura 2.2 muestra el circuito equivalente de una celda solar.

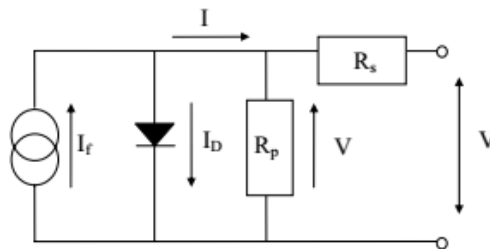


Figura 2.2 Circuito equivalente de una celda con resistencia serie y paralelo [8].

Otros parámetros utilizados habitualmente para caracterizar una celda solar son:

- Corriente de corto circuito I_{cc} . Correspondiente a una tensión nula entre contactos
 $I_{cc} \cong I_f$
- Densidad de corriente de cortocircuito J_{cc} , definida como el cociente entre la corriente y el área de la celda
- Tensión a circuito abierto, V_{ca} correspondiente a una corriente nula.
- Eficiencia de conversión energética.

Un parámetro muy importante para los paneles solares trabajando en el espacio es la eficiencia; esta no es más que la capacidad para convertir la energía solar en energía eléctrica. Esta eficiencia es afectada a lo largo del tiempo por la alta radiación de energía de partículas presentes en la órbita. Definida en el punto de máxima potencia, donde P_i es la potencia solar incidente sobre la celda. La eficiencia, según se plantea en [11] responde a la siguiente fórmula.

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_i} = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{P_i} \quad (2.2)$$

- Factor de forma.

El factor de forma es otro parámetro característico de las celdas solares. Es un término que se usa para describir cuantitativamente la forma de la curva de corriente y tensión. Si se supone el caso ideal donde la curva I-V tiene una forma cuadrada, entonces la potencia máxima de salida P_{max} puede obtenerse únicamente a partir de I_{cc} y V_{ca} . Por lo que el factor de forma se define según la siguiente ecuación.

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{ca} \cdot I_{cc}} \quad (2.3)$$

2.2 Máxima transferencia de potencia de paneles solares.

Para cualquier Cubesat, el sistema de potencia está diseñado para entregar la energía requerida a fin de que el nanosatélite pueda cumplir con su misión. Es por ello que en estos sistemas fotovoltaicos se utiliza el concepto de punto de máxima potencia, MPP; del inglés, *Maximum Power Point*, este es el punto de operación del panel solar donde se entrega la mayor potencia para un determinado nivel de radiación y temperatura.

Según [13] se define un seguidor de punto de máxima potencia MPPT, del inglés *Maximum Power Point Tracker*, como un sistema que optimiza la tensión de salida y de entrada entre el panel fotovoltaico y la batería, respectivamente, para lograr la máxima eficiencia del panel; esto se logra mediante sensores de corriente y voltaje para determinar las condiciones de operación del panel fotovoltaico.

Las ventajas del sistema MPPT se aprovechan en situaciones donde el punto de máxima potencia en el panel está cambiando significativamente mientras el satélite está recibiendo iluminación solar. Este es el caso de equipos operando en órbita baja donde la temperatura del panel y por tanto, el MPP cambia considerablemente durante los períodos de iluminación y sombra durante cada órbita [14].

La [Figura 2.3](#) muestra las curvas características de corriente-tensión y potencia-tensión de salida del sistema fotovoltaico. Se observa la variación de las mismas para los diferentes niveles de radiación solar y temperaturas de celda. El punto de máxima potencia divide la curva característica de salida en dos partes: la izquierda se define como una región de fuente de corriente en donde la salida se aproxima a un valor constante, y la parte derecha es una región de fuente de tensión en donde la salida varía dentro de un cierto intervalo. Puesto que el MPP cambia ante variaciones de radiación y temperatura, se requiere un ajuste continuo de la tensión en las terminales del sistema para proveer la máxima potencia generada hacia la carga [15].

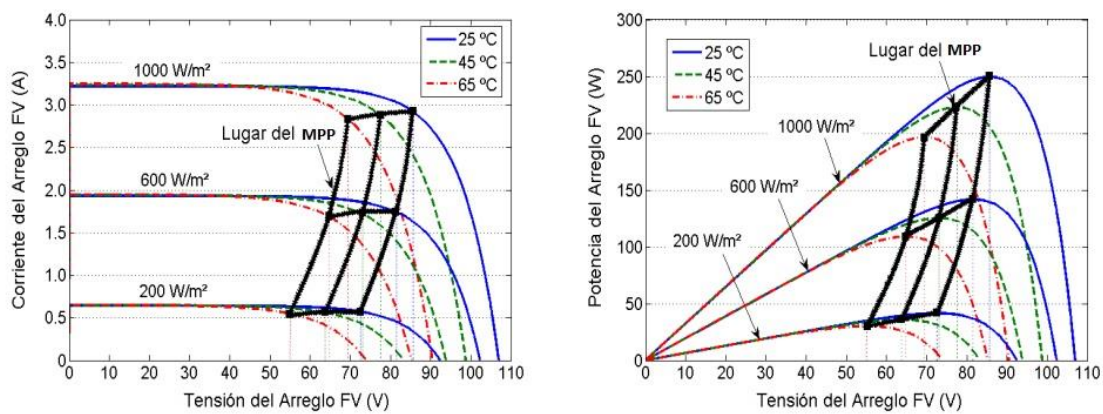


Figura 2.3 Puntos de máxima potencia de un panel solar [15].

2.2.1 Algoritmos de MPPT.

Se han desarrollado diversos métodos para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles solares. Éstos están agrupados en indirectos y directos.

Los indirectos tienen como característica que el MPP se estima a partir de las medidas de voltaje y corriente del generador fotovoltaico o utilizando datos empíricos, mediante expresiones matemáticas de aproximaciones numéricas. La estimación se lleva a cabo para un generador fotovoltaico específico; no obtienen la potencia máxima para cualquier irradiación o temperatura y ninguno de ellos puede obtener el MPP exactamente. Ejemplo de estos métodos es el ajuste a una curva, tabla de consulta, generador fotovoltaico de voltaje abierto, generador fotovoltaico de cortocircuito y la celda de circuito abierto [16]. Los métodos directos o métodos de búsqueda verdadera ofrecen la ventaja que obtienen la potencia máxima real de las medidas de tensión y corriente fotovoltaica. Estos algoritmos tienen la ventaja de ser independientes del conocimiento de las características del generador fotovoltaico, así como la temperatura, la radiación o los niveles de degradación.

Son varios los métodos directos para realizar el MPPT en los paneles solares. Estos varían en complejidad, sensores requeridos, costo, rango de efectividad, hardware de implementación y popularidad; entre otros aspectos. La facilidad de implementación es un factor importante para decidir qué técnica MPPT utilizar, ya que alguno de estos métodos requiere trabajar con circuitos digitales, el uso de software y programación. En caso que se aplique un método o técnica digital, esta es más costosa que la analógica ya que normalmente involucra un microcontrolador que necesita ser programado [17]. En el caso de satélites espaciales y estaciones orbitales, los costos y la complejidad no son tan importantes como el rendimiento y fiabilidad, siendo necesario realizar un seguimiento continuo del verdadero MPP en un tiempo mínimo [18].

Según se plantea en [19], los algoritmos de MPPT se pueden categorizar como convencionales o basados en técnicas estocásticas e inteligencia artificial, dentro de esta segunda categoría se encuentran las redes neuronales y algoritmos de control con lógica difusa. Los controladores difusos mejoran la robustez del control, no necesitan modelos matemáticos exactos; pueden manejar no linealidades y son adaptativos, su control les otorga un buen rendimiento bajo variación de parámetros, perturbaciones de carga y tensión de alimentación. La desventaja es que su implementación es de mayor complejidad [20] y utilizan unidades de procesamiento de mayor rendimiento y velocidad de procesamiento lo cual tiene asociado un mayor consumo de energía.

Los métodos directos que se destacan en la literatura son Perturbación y Observación, P&O y Conductancia Incremental, C&I ya que son menos complejos de implementar. El

algoritmo P&O es el más utilizado en los convertidores comerciales, tiene el potencial de ser muy competitivo frente a otros métodos pues si se optimiza adecuadamente se pueden obtener niveles de eficiencia de seguimiento por encima del 97%. Este se puede implementar con circuitos analógicos simples o con un microcontrolador de muy bajo costo y bajo consumo de energía. Mientras que el algoritmo C&I por otro lado, requiere diferenciación, circuitos de división y un proceso de toma de decisiones relativamente complejo por lo tanto requiere un microcontrolador más complejo con más memoria[21]. Se verifica según la revisión del estado del arte que la mayoría de los circuitos integrados que se encargan de la función de MPPT en nanosatélites Cubesat emplean el algoritmo Perturbación y Observación.

En este trabajo se realiza una revisión de diferentes trabajos donde se comparan estos algoritmos o métodos. En [22] se realiza un análisis comparativo de los métodos directos Perturbación Observación, P&O; Conductancia Incremental, C&I y control difuso. En dicho trabajo se realiza una simulación en Matlab Simulink de los diferentes algoritmos; de esta manera se observa la eficiencia de cada uno de ellos para variaciones de radiación lentas donde se simuló un aumento en la radiación de 800 W/m² a 1000 W/m² durante un período de tiempo de 5s para una razón de 40 W/m²/s y variaciones rápidas de la irradiación de 1000 W/m² a 1500 W/m² en un período de tiempo de 2,5s lo que representa 200 W/m²/s. En la [Tabla 2.1](#) se muestran los resultados obtenidos en [22].

Tabla 2.1 Eficiencia de métodos de MPPT variando la radiación [22].

| Algoritmo | Eficiencia (%) | |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Lento incremento radiación | Rápido incremento radiación |
| Lógica Difusa | 99.14 | 99.01 |
| P&O | 96.77 | 96.64 |
| C&I | 96.75 | 96.66 |
| Sin MPPT | 59.64 | 68.93 |

En la [Tabla 2.2](#) se muestra la eficiencia de los algoritmos para variaciones de temperatura lentas de 45 a 50°C en 5s y variaciones de temperatura rápidas de 45 a 60°C en 2,5s.

Tabla 2.2 Eficiencia de métodos de MPPT variando temperatura[22].

| Algoritmo | Eficiencia (%) | |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|
| | Lento incremento temperatura | Rápido incremento temperatura |
| Lógica Difusa | 99.22 | 99.21 |
| P&O | 96.76 | 96.64 |
| C&I | 96.78 | 96.66 |
| Sin MPPT | 66.99 | 68.92 |

Por otra parte en [21] se realiza también un análisis de la eficiencia de los algoritmos P&O, C&I y otro método denominado voltaje constante, CV. Para probar y evaluar la eficiencia de los algoritmos en dicho trabajo se utiliza un arreglo solar y la luz solar natural como fuente de irradiación. Se tiene en cuenta datos de varios días y diferentes condiciones de iluminación. En [Tabla 2.3](#) se muestran los resultados obtenidos en dicho trabajo. Ver detalles en [21].

Tabla 2.3 Eficiencia de métodos de MPPT con panel fotovoltaico[21]

| Condición del Cielo | P&O | | C&I | | CV | |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Días de datos | η_{MPPT} | Días de datos | η_{MPPT} | Días de datos | η_{MPPT} |
| Despejado | 20 | 98.7 | 17 | 98.7 | 20 | 90.4 |
| Parcialmente nublado | 14 | 96.5 | 11 | 97.0 | 10 | 90.1 |
| Nublado | 9 | 98.1 | 11 | 96.7 | 6 | 93.1 |
| En general | 43 | 97.8 | 39 | 97.4 | 36 | 91.2 |

Para evaluar el rendimiento de los diferentes métodos que anteriormente se especifican, se utiliza la eficiencia del seguimiento la cual se define como:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{max} dt} \quad (2.4)$$

Donde t_1 es el tiempo de inicio del sistema y t_2 es el tiempo de cierre del mismo, P es la potencia de salida del panel y P_{max} es la potencia máxima teórica del panel.

El algoritmo de Perturbación y Observación muestra resultados de eficiencia por encima del 95%, tiene un menor grado de complejidad en su implementación pudiéndose usar unidades de procesamiento de bajo consumo de energía y está basados en control digital, lo cual ha captado la atención de los investigadores debido a la buena combinación de flexibilidad, precisión y simplicidad. Por tanto, se determina utilizar el algoritmo de Perturbación y Observación en este trabajo. Además se verifica que los

circuitos integrados que realizan la función de MPPT, son utilizados en varios satélites Cubesat e implementan dicha función mediante este algoritmo.

Este algoritmo se basa en un convertidor CC/CC para producir una tensión de salida, generada a través de técnicas de control por modulación de ancho de pulso, PWM. De esta forma se controla la relación de tensión entre la salida del sistema fotovoltaico y la salida del convertidor. Para esto se tienen que manejar las siguientes variables:

- D : Ciclo de trabajo del convertidor
- I_A : Corriente de salida del sistema fotovoltaico del ciclo actual.
- V_A : Tensión de salida del sistema fotovoltaico del ciclo actual.
- I_P : Corriente de salida del sistema fotovoltaico del ciclo previo.
- V_P : Tensión de salida del sistema fotovoltaico del ciclo previo.
- P_A : potencia de salida actual.
- P_P : potencia del ciclo previo de perturbación.

A continuación, se describe el funcionamiento de este algoritmo.

➤ **Algoritmo de perturbación y observación.**

Este algoritmo opera variando periódicamente, incrementando o decrementando la tensión en las terminales del panel fotovoltaico por medio de cambios sistemáticos del ciclo de trabajo del convertidor, y luego comparando la potencia de salida actual con la potencia del ciclo previo. A estos cambios en el ciclo de trabajo se les conoce en la literatura como perturbaciones. Si la potencia actual es mayor que la del ciclo anterior, la perturbación continuará en la misma dirección en el próximo ciclo, caso contrario; la dirección de la perturbación o cambio se invertirá en el próximo ciclo. La tensión en las terminales del sistema fotovoltaico varía en cada ciclo a intervalos de muestreo T_a ; una vez alcanzado el MPP, el algoritmo oscilará alrededor de este punto, especialmente en casos donde la energía solar sea constante o varíe lentamente. En la [Figura 2.4](#) se muestra el diagrama de flujo del algoritmo perturbación-observación.

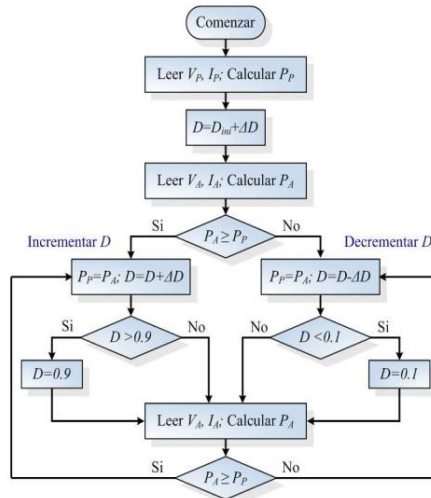


Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo perturbación y observación.[15]

Cuando hay cambios bruscos de la energía solar que se recibe, el algoritmo se desvía del MPP [23]. Este algoritmo puede operar equivocadamente en estos casos debido al hecho de que no es capaz de distinguir las variaciones de la potencia de salida del sistema fotovoltaico causadas por el ciclo de trabajo, de aquellas causadas por la desviación de la radiación solar [15].

La desventaja de este método descrita en [23], aparece en el caso de una variación rápida de la irradiación, donde el algoritmo puede funcionar de manera errónea pero cuando se optimiza adecuadamente, puede tener eficiencias superiores al 97%, y es altamente competitivo frente a otros algoritmos [21]. Posteriormente se realiza un análisis del funcionamiento del algoritmo frente a cambios de radiación y se obtienen los parámetros óptimos para su funcionamiento.

2.3 Reguladores de tensión y convertidores CC/CC.

La función de un regulador de tensión es proporcionar una tensión estable a partir de una fuente de alimentación de entrada. Estos deben ser capaces de proporcionar corrientes de salida desde unas decenas de miliamperes hasta varios amperes. Los reguladores de tensión se clasifican en reguladores en serie o lineales y reguladores de conmutación.

Los reguladores lineales controlan la tensión de salida ajustando continuamente la caída de tensión en un transistor de potencia conectado en serie entre la entrada y la carga. El transistor debe conducir corriente continuamente por lo que opera en la región activa o lineal. Estos reguladores son más sencillos de utilizar que los de conmutación, pero son

muy ineficientes, poseen niveles de eficiencia alrededor del 25% y tienen como ventaja que generan poco o ningún ruido eléctrico en sus salidas. Por su parte los reguladores de conmutación emplean dispositivos de estado sólido como conmutadores de alta frecuencia, que funciona como interruptores completamente encendidos o apagados para realizar la conversión de energía; esta se transfiere a la carga en paquetes discretos. La salida de tensión se regula mediante un control de retroalimentación que emplea un modulador de ancho de pulso, donde se usa la tensión de control para ajustar el ciclo de trabajo del interruptor. Estos reguladores son más eficientes que los lineales, presentan eficiencias superiores al 80%, además son pequeños y ligeros, pero pueden producir un ruido considerable si no se diseñan adecuadamente. Los mismos se utilizan especialmente en sistemas digitales donde es importante una alta eficiencia y un bajo peso y tamaño. Estos reguladores de conmutación mediante el principio de funcionamiento de los convertidores CC-CC pueden operar como reductores o elevadores de tensión[24].

Ambos tipos de reguladores deben manejar la capacidad para mantener su tensión nominal bajo condiciones externas variables se define a través de los siguientes parámetros.

- Regulación de línea

Esta es una medida de la capacidad del circuito para mantener la tensión de salida nominal cuando existe una variación de la tensión de alimentación. Habitualmente ésta es una tensión de directa no regulada, o una tensión con un nivel de regulación más bajo[25]. La regulación de línea se define como

$$\text{Regulación de línea} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \quad (2.5)$$

- Regulación de carga

La regulación de carga es una medida de la capacidad del circuito para mantener la tensión de salida, aunque cambie la corriente que es consumida por la carga. La regulación de carga está directamente relacionada con la resistencia de salida del elemento de referencia de tensión[25]. Se define como:

$$\text{Regulación de Carga} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I} \quad (2.6)$$

- Coeficiente de variación con la temperatura

El coeficiente de temperatura mide la capacidad del circuito para mantener la tensión nominal de salida respecto de cambios de la temperatura del dispositivo. Se expresa como:

$$CT = \frac{\Delta V_o}{\Delta T} \quad (2.7)$$

Los reguladores conmutados son los que nos interesan en este trabajo debido a sus características de poco peso y tamaño, así como su alta eficiencia.

Específicamente los convertidores CD-CD del tipo sincrónicos manejan niveles de eficiencia alrededor del 85% al utilizar elementos de conmutación como Mosfet de potencia en lugar de diodos. La eficiencia aumenta a expensas de los circuitos de conducción más complicados para los interruptores[24].

2.3.1 Convertidor DC-DC para sistema de MPPT.

Existen diferentes configuraciones o topologías de reguladores conmutados o convertidores CD-CD. Estas se dividen en convertidores aislados o no aislados. Los sistemas aislados utilizan transformadores entre la entrada y la salida y son aplicables para altas tensiones y sistemas de distribución de potencia; mientras que los no aislados mantienen el mismo camino eléctrico entre entrada y salida, son aplicables a bajas tensiones y sistemas portátiles [26] siendo estos los que nos interesan en este trabajo.

Se consideran las topologías de convertidores no aislados, SEPIC, Cúk, reductor o Buck, elevador o Boost y reductor elevador. En la topología reductora la tensión de entrada debe ser mayor que la de salida deseada y mientras en la topología elevador sucede lo contrario. Por su parte la topología reductora elevador tiene la capacidad de conversión descendente como ascendente al igual que sucede con la topología SEPIC y Cúk; esto permite utilizarse cuando la tensión de entrada cambia a valores por debajo o por arriba de la tensión de salida deseada.[13].

En [27] se presenta una comparación basada en hardware de topologías de convertidores reductores elevadores para aplicaciones MPPT. Se realiza un análisis comparativo de los convertidores clásicos reductor elevador, SEPIC y Cúk en cuanto a capacidad de seguimiento, número de componentes que se utilizan, si la corriente del módulo fotovoltaico es continua o discontinua y dificultades para la medición de esta

corriente. Varias simulaciones se realizan utilizando el algoritmo de perturbación y observación (P&O) en el entorno de MATLAB / Simulink en diferentes condiciones de irradiación solar para llevar a cabo esta investigación. En [27] los autores proponen una guía técnica básica para la selección de convertidores en aplicaciones MPPT, donde se genera una tabla de comparación según el análisis realizado en dicho trabajo y que se muestra a continuación. Para más detalles ver [27].

Tabla 2.4 Comparación de convertidores DC-DC para aplicaciones MPPT[27]

| Parámetros | Topologías | | |
|-------------------------------------|-------------------|----------|----------|
| | Reductor Elevador | SEPIC | Cúk |
| Capacidad MPPT | Perfecta | Perfecta | Perfecta |
| Número Componentes | Bajo | Alto | Alto |
| Corriente de módulo Fotovoltaico | Discontinua | Continua | Continua |
| Medición de Corriente | Difícil | Fácil | Fácil |
| Fluctuación en cambios de Radiación | Alta | Media | Baja |
| Eficiencia Seguimiento | Baja | Media | Alta |

Según los resultados mostrados en la tabla anterior un convertidor Cúk brinda los mejores niveles de eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia al tener una baja fluctuación de potencia debido a los cambios en la radiación solar, sin embargo, este convertidor tiene la desventaja de invertir la tensión o sea brindar una tensión negativa a la salida por lo que se desprecia utilizarlo en este trabajo. Se plantea entonces utilizar un convertidor SEPIC que brinda una eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia superior al convertidor reductor elevador.

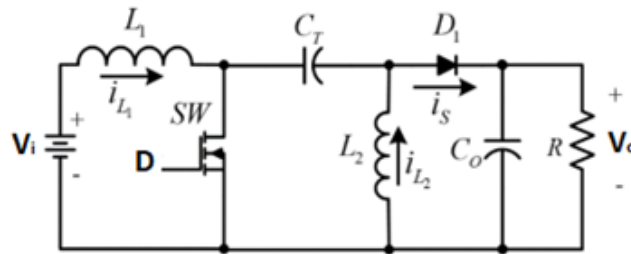


Figura 2.5 Esquema de convertidor SEPIC[24].

La Figura anterior muestra el esquema básico de un convertidor SEPIC. La ventaja de este convertidor es que el voltaje de salida no se invierte. También cuenta con una entrada de corriente no pulsante lo cual permite realizar la medición de corriente de salida

del sistema fotovoltaico de manera sencilla, presenta un buen desempeño ante variaciones en el voltaje de entrada. La desventaja es que la corriente de salida es pulsante ya que el diodo conduce corriente solo cuando el interruptor esta desactivado, por lo que se requiere un capacitor de salida de alto valor[28].

El interruptor funciona con un ciclo de trabajo D definido como una relación entre el tiempo de encendido y la suma de los tiempos de encendido y apagado. Los valores promedios de tensión y corriente son controlados mediante el ajuste de ciclo de trabajo D .

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.8)$$

De esta manera la tensión promedio de salida es:

$$V_o = V_s \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (2.9)$$

Los convertidores pueden operar en dos modos distintos con respecto a la corriente del inductor. Modo continuo, cuando la corriente por la inductancia L_2 siempre es mayor a cero; o modo de conducción discontinua cuando la corriente del inductor es cero durante una parte del período de conmutación. El modo continuo es preferido por su alta eficiencia y buena utilización de conmutadores semiconductores y componentes pasivos.

Según se plantea en [29] para que el sistema funcione en modo continuo se debe cumplir la siguiente premisa:

$$\bar{I}_{L_2} \geq \frac{1}{2} \Delta I_{L_2} \quad (2.10)$$

Es decir, la corriente media de la bobina L_2 debe ser igual o mayor que la mitad del rizado de la corriente de la bobina. Según estas ecuaciones, se define que para que el sistema funcione en modo continuo se debe cumplir que:

$$L_2 \geq \frac{(1-D_{\min})^2 R}{2f} = \frac{(1-D_{\min})^2 V_o}{2f I_{o_{\min}}} \quad (2.11)$$

La bobina L_1 , teniendo en cuenta el rizado en la corriente de entrada, se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_{L1} = I_S = \frac{V_o I_{O_{\max}}}{V_i} \quad (2.12)$$

$$L_1 \geq \frac{V_i D_{\max}}{\Delta I_{L1} f} \quad (2.13)$$

Para definir el valor de los condensadores C_T y C_O se define una tensión de rizado en ambos condensadores y se emplean las siguientes ecuaciones:

$$C_T \geq \frac{V_O D_{\max} I_{O_{\max}}}{\Delta V_S V_O f} \quad (2.14)$$

$$C_O \geq \frac{D_{\max} I_{O_{\max}}}{\Delta V_O f} \quad (2.15)$$

Mientras mayores sean los valores de la bobina L_1 y el condensador C_T , el circuito tendrá unos transitorios demasiado largos, necesitando mayor tiempo el sistema para lograr un estado estable. Estas ecuaciones de diseño del convertidor con topología SEPIC se obtienen de [29].

2.4 Baterías utilizadas en satélites.

La generación de energía solar no siempre está disponible para las operaciones de vuelos espaciales; según la órbita, la duración de la misión, la distancia desde el Sol o la potencia máxima requerida en un subsistema, se puede necesitar energía almacenada a bordo. Las baterías basadas en litio debido a que son fácilmente recargables, que tienen bajo peso y alta energía, se han vuelto omnipresentes en las misiones espaciales[30].

Antes de seleccionar un sistema de almacenamiento de energía, deben definirse las operaciones, los objetivos y los requisitos de la misión. Éstas incluyen requisitos de nivel de potencia, voltaje de trabajo, duración de la órbita y la misión, así como confiabilidad. Además, se deben considerar factores físicos como el tamaño, el peso, la configuración y el entorno operativo de la batería. Los niveles de potencia están determinados por los requisitos de potencia de la carga útil[31].

2.4.1 Características de baterías utilizadas en Satélites.

La tecnología de las baterías de Ion de litio ofrece una ventaja significativa en volumen y densidad de energía sobre las baterías de Ni-Cd y Ni-H2. Estas baterías han sido utilizadas en numerosas misiones espaciales en GEO y LEO.

El Li-ion con los materiales de cátodo tradicionales de cobalto, níquel, manganeso y aluminio que normalmente se cargan a 4.20V por celda y la tolerancia es más menos 50 mV. Algunas variedades a base de níquel se cargan a 4.10V; mientras otras de alta

capacidad pueden ir a 4.30V por celda o más. Al aumentar el voltaje, se incrementa la capacidad, pero ir más allá de la especificación fuerza la batería y compromete la seguridad [32].

Un parámetro fundamental en las baterías es la profundidad de descarga, DOD, del inglés; *Depth of Discharge*; es el porcentaje de la capacidad de la batería que se extrae durante la descarga. El estado actual de carga, SOC; del inglés *State of Charge*, es la capacidad con que cuenta la batería en un momento dado. Es importante conocer que mientras mayor es la profundidad de descarga habrá ciclos de vida más cortos de las baterías.

La carga completa se alcanza cuando la corriente disminuye entre 3 y 5 por ciento de la capacidad en amperes-hora de la batería. Estas baterías de litio no pueden absorber la sobrecarga, cuando están completamente cargadas la corriente debe cortarse. El ion de litio funciona de manera segura dentro de los voltajes operativos designados; sin embargo, la batería se vuelve inestable si se carga inadvertidamente a un voltaje más alto que el especificado. La carga prolongada por encima de 4.30V en diseños para 4.20V por celda, provoca daños a la batería. La tasa de carga recomendada de una batería está entre 0.5C y 1C; el tiempo de carga completo es de aproximadamente 2 a 3 horas. Es aconsejable dejar de usar la batería o el cargador si la temperatura sube más de 10°C (18°F) a velocidades de carga moderadas [32]. La [Figura 2.6](#) muestra la característica de voltaje y corriente a medida que la batería de ion de litio pasa a través de diferentes etapas de carga.

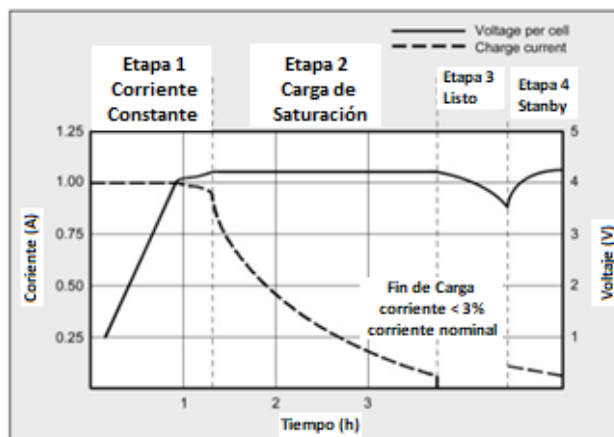


Figura 2.6 Curva característica de carga de baterías de Ion de litio[32].

Aumentar la corriente de carga no acelera mucho el estado de carga completa. Aunque la batería alcanza el pico de tensión más rápido, la carga de saturación tomará más tiempo.

En consecuencia, con una corriente más alta la etapa 1 es más corta, pero la saturación durante la etapa 2 tomará más tiempo. El Li-ion no necesita cargarse completamente, ni es deseable hacerlo. Elegir un umbral de voltaje más bajo o eliminar por completo la carga de saturación prolonga la vida útil de la batería, pero esto a su vez reduce el tiempo de ejecución. En algunos casos se puede usar el método simplificado de "Cargar y Ejecutar" que carga una batería de iones de litio en una hora o menos, sin pasar a la carga de saturación de la Etapa 2. El estado de carga, SoC en este punto es de alrededor del 85 por ciento, un nivel que puede ser suficiente para algunas aplicaciones. Se tiene en cuenta que una batería de iones de litio que ha recibido una carga totalmente saturada mantendrá el voltaje elevado durante más tiempo que una que no haya recibido una carga de saturación[33].

Han surgido dos tipos básicos de Li-ion: la celda de energía y la celda de potencia.

Las celdas de energía de iones de litio están hechas para extraer de ellas una capacidad máxima y proporcionar tiempos de ejecución largos. Una celda de este tipo que tenga una capacidad de 3.2Ah es menos duradera cuando se descarga a 2C. Este tipo de celda es ideal para sistemas donde no se requiere extraer una mayor capacidad de la especificada por la batería. Las celdas de potencia por su parte tienen una capacidad moderada, pero capacidades de carga excelentes; pueden permitir hasta una descarga continua de 10C. Esto significa que una celda con capacidad para 2,000 mAh puede proporcionar una carga continua de 20 A. Esta celda funciona bien para aplicaciones que requieren una gran corriente de carga, como herramientas eléctricas[33].

Para calcular el tiempo de ejecución de una batería existen diferentes métodos según el tipo de batería que se trate. Las baterías basadas en litio y níquel son comúnmente evaluadas por el diagrama de Ragone. El diagrama de Ragone mira la capacidad de la batería en watt hora (Wh) y la potencia de descarga en watts (W). La gran ventaja el uso de los diagramas de Ragone es la capacidad de leer el tiempo de ejecución en minutos y horas presentados en las líneas diagonales en el gráfico.

La [Figura 2.7](#) ilustra la gráfica de Ragone de cuatro sistemas de ion de litio. El eje horizontal muestra la capacidad en energía en watts hora (Wh) y el eje vertical es la potencia en watts (W). Las líneas diagonales en el campo revelan el tiempo que las celdas de la batería pueden suministrar energía en las condiciones de carga dadas. La escala es logarítmica para permitir una amplia selección de tamaños de batería.

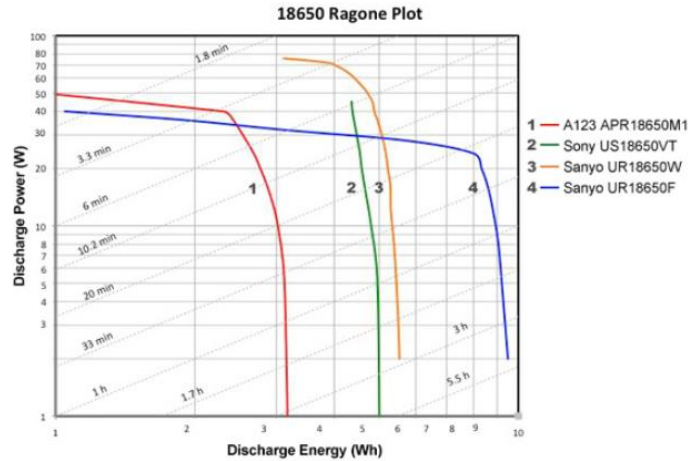


Figura: 2.7 Diagrama de Ragone[34].

El diagrama de Ragone ayuda a seleccionar el sistema de iones de litio óptimo para satisfacer la potencia de descarga mientras se conserva el tiempo de ejecución requerido. Teniendo en cuenta estas condiciones y limitantes; el diseño de un sistema de baterías debe desarrollarse para que un paquete de baterías que sea duradero y no sufra deterioro durante su uso regular.

2.4.2 Configuración de baterías.

Por otra parte, los proveedores de baterías de satélite Li-ion proponen dos configuraciones. La topología serie-paralelo, S-P y paralelo serie, P-S.

La topología S-P se caracteriza por cadenas de celdas seriales ensambladas en paralelo. El número de celdas dentro de cada cadena proporciona el voltaje de salida de la batería; la capacidad de energía de la batería se adapta a la potencia necesaria ajustando el número de cuerdas paralelas. Esta topología se usa principalmente para baterías de baja potencia que usan celdas de baja capacidad, menos de 10 Ah. Al usar múltiples cadenas, la batería puede soportar fallas de celdas sin caída de voltaje. Esta topología es la más utilizada en los satélites LEO. Para esta topología, existe un inconveniente: la telemetría de voltaje aplicada a cada celda haría que la batería fuera muy costosa; entonces, solo el voltaje total de la batería se mide por telemetría[35].

La topología P-S es más adecuada para celdas de alta capacidad, más de 20 Ah. Las celdas conectadas en paralelo constituyen un módulo o paquete que define la capacidad de la batería; los módulos se conectan en serie para cumplir con el rango de voltaje del satélite. Como las celdas dentro del mismo módulo tienen el mismo estado de carga, SOC; y el mismo voltaje, el número de líneas de telemetría también se reduce. Los

módulos de esta topología pueden equiparse con sistemas de derivación para proteger la batería contra fallas. Esta topología se adapta bien a baterías de alta potencia como las que se usan en los satélites de comunicación GEO[35].

Existen características que son comunes en ambas topologías. Todas las baterías tienen una placa base o equivalente para ser fijadas en la pared del satélite; esta placa base soporta la estructura mecánica la cual es un elemento clave para mantener los niveles de vibración y choque requeridos. La interconexión de las celdas eléctricas se realiza mediante cables o barras colectoras. Los calibres de los cables se seleccionan teniendo en cuenta estrictas normas de corriente y temperatura. Además, los elementos que se usan para la conexión de potencia y la telemetría están protegidos e identificados para evitar la conexión incorrecta.

La configuración S-P es la más utilizada debido a las ventajas que brinda. Si una celda falla, toda la cadena se pierde, junto con la capacidad que proporcionaría; sin embargo, la tensión sigue siendo la misma y, por tanto, el sistema de satélite puede continuar funcionando sin otro efecto que una pequeña reducción en la capacidad de la batería.

Capítulo 3

Diseño del sistema.

Se define que el objetivo de la misión es tomar una fotografía por cada revolución de órbita. Se establece además que el satélite será de órbita baja y que no tendrá partes móviles o despegables por lo que solo el área de las caras del satélite podrá ser utilizada para montar las celdas solares. Se requiere además que el satélite se mantenga con un apuntamiento estable hacia el nadir terrestre.

Para realizar el diseño del sistema de energía es necesario definir los modos de operación del satélite, las tareas y subsistemas que se activarán en cada modo. Por lo que se establecen 2 modos de operación básicos, que son en espera y activo. Estos modos se caracterizan por ser

Modo en espera: el modo en espera se activa cuando baterías llegan a un 10 % aproximadamente de su capacidad donde empiezan a cargarse y se mantiene este modo hasta que llegan a un 85%. Este modo de funcionamiento permite cargar las baterías manteniendo un consumo mínimo del satélite.

Modo activo: este modo se activa una vez alcanzado el 85% de capacidad de baterías donde estas empiezan a descargarse y se mantiene este modo hasta que llegan al 10 % de su capacidad. En este modo se activan todos los subsistemas del satélite y se comienzan a descargar las baterías.

Tareas en los modos de operación.

- Modo en espera:

El picosatélite mantendrá activo su sistema de telemetría básica (corriente, voltaje, temperatura) y computadora de a bordo.

- Modo activo

El picosatélite transmitirá telemetría básica, corriente, voltaje, temperatura, indicará que está en modo activo, además recibirá comandos de la estación terrena para la toma de imágenes en un azimut determinado y las enviará a la estación terrena. En este estado se activa además el sistema de orientación. La estación terrena deberá tener la

capacidad de enviar comandos y recibir telemetría; incluso las imágenes. Se requiere además que el estado activo se mantenga al menos durante toda una órbita. Teniendo en cuenta estos criterios se realiza el presupuesto de energía.

3.1 Presupuesto de energía de Cubesat.

Los cubesat generalmente son satélites LEO, tienen una órbita circular o elíptica a una altura de 250-2000 km desde la superficie de la Tierra. El período de la órbita, que depende principalmente de la altitud, varía en el intervalo de 90 a 120 minutos. Como la altitud en LEO es baja, su velocidad es muy alta y efectúan de 12 a 16 órbitas alrededor de la Tierra por día terrestre. En consecuencia, en la órbita LEO, el tiempo máximo durante el cual un satélite está por encima del horizonte local para un observador en la Tierra, es de hasta 20 minutos aproximadamente. Este es el tiempo que se utiliza para transferir datos, imágenes y fotografías a estaciones terrestres seleccionadas situadas en ubicaciones estratégicas [35].

3.1.1 Parámetros eléctricos de subsistemas del satélite.

El satélite consta de 4 subsistemas; cámara, control y orientación, sistema de comunicaciones, sistema de telemetría y computadora de a bordo. La [Tabla 3.1](#) muestra los requerimientos eléctricos de estos subsistemas. Para este análisis se define que los buses de tensión de 5 y 12V son regulados mediante reguladores conmutados definiendo que los mismos manejan una eficiencia de 90% por lo que para poder brindar los niveles de potencia requeridos por los diferentes subsistemas entonces se debe suministrar una potencia superior teniendo en cuenta las pérdidas en estos convertidores.

Tabla 3.1 Características eléctricas de subsistemas.

| Subsistema | Tensión (V) | Corriente (mA) | Potencia (W) | Eficiencia regulador | Potencia necesaria (W) |
|-------------------------------------|-------------|----------------|--------------|----------------------|------------------------|
| Cámara | 5 | 70 | 0.35 | 0.9 | 0.39 |
| Sistema de comunicaciones | 5 | 150 | 0.75 | 0.9 | 0.83 |
| Computadora de a bordo y telemetría | 5 | 150 | 0.75 | 0.9 | 0.83 |
| Control y orientación | 12 | 150 | 1.8 | 0.9 | 2.00 |
| Total | | 520 | 3.65 | | 4.06 |

Teniendo en cuenta estos valores y los modos de operación propuestos en la [Tabla 3.2](#) tabla se definen los siguientes consumos según los modos de operación.

Tabla 3.2 Consumo según modos de operación.

| Modo de Operación | Modo Activo | En Espera |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Subsistemas Activos | Computadora de a bordo y telemetría | Computadora de a bordo y telemetría |
| | Control y orientación | |
| | Sistema de comunicaciones | |
| | Cámara | |
| Potencia | 4.06 W | 0.83 W |

Teniendo en cuenta estos datos y los modos de operación definidos, se requiere que los paneles solares entreguen una potencia superior a 0,83W ya que cuando el sistema opera en modo de espera y el satélite se encuentra iluminado, el sistema de telemetría y la computadora de a bordo se mantienen activos, por lo que se requiere entregar potencia suficiente para que estos subsistemas funcionen y además poder cargar la batería.

3.1.2 Cálculo de potencia debido a la iluminación solar.

Las órbitas heliosíncronas son populares para los CubeSats por dos motivos, suelen experimentar una iluminación casi constante del sol y, por tanto, proporcionan una gran potencia y el CubeSat pasa sobre la misma posición geográfica de la Tierra (Latitud) a la misma hora todos los días. [6].

Con la herramienta en línea de la agencia espacial europea SPENVIS se obtuvieron simulaciones para determinar la radiación total y directa que recibiría el satélite en una órbita circular baja heliosíncrona a 600 Km, con ángulo de inclinación de 97 grados, siendo 1.61 horas el tiempo de duración de cada órbita, y se tomó en cuenta que la irradiancia del Sol en el espacio cercano a la Tierra es de 1371 Watts/m². Además, la simulación tiene en cuenta una orientación del satélite al Nadir y paralelo al eje de orientación.

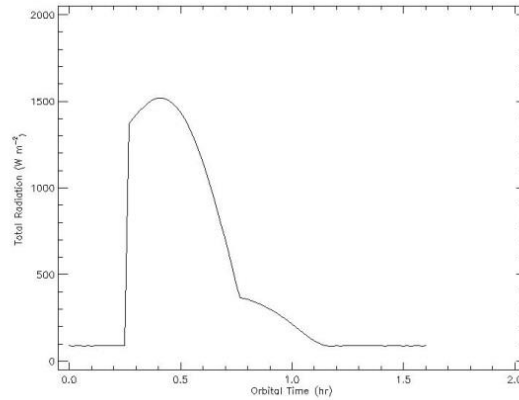


Figura 3.1 Gráfica de radiación total en una órbita recibida por una cara del satélite.

La radiación total tiene en cuenta aquella reflejada por la Tierra, incluyendo la parte infrarroja del espectro. Se decide realizar cálculos con datos de iluminación directa solamente para ser conservadores en el diseño. La [Figura 3.2](#) muestra la gráfica de radiación directa.

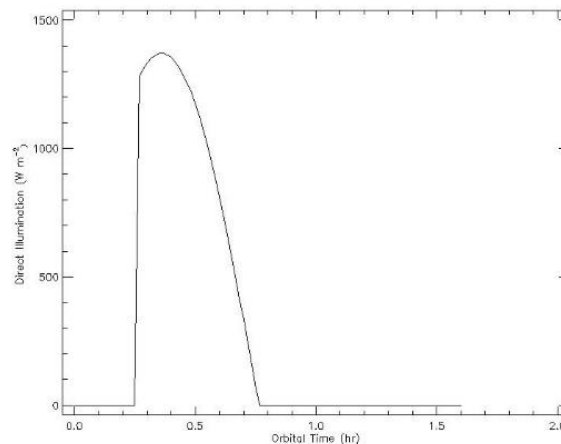


Figura 3.2 Gráfica de radiación directa en una órbita recibida por una cara del satélite.

Los datos generados y graficados en SPENVIS se exportan a la herramienta de software Microsoft Excel perteneciente al paquete de Microsoft Office y se obtiene el valor promedio de radiación que recibirán los paneles solares en una cara de 30 cm por 10 cm durante el período de iluminación en una órbita, resultando un valor de radiación promedio de 1094 Watts/m². Para este cálculo de valor promedio de radiación se tienen en cuenta solamente los valores de radiación en el tiempo de iluminación ya que el presupuesto de energía se realiza teniendo en cuenta período de eclipse e iluminación por separado.

La cantidad de energía que se dispone en un módulo fotovoltaico se puede determinar mediante la siguiente ecuación.

$$\Phi = A\lambda \cos(\alpha) \quad (3.1)$$

Donde; A es el área del módulo fotovoltaico, λ es el nivel de irradiancia y α es el ángulo del módulo fotovoltaico con respecto a la luz incidente.

3.1.3 Celdas solares para el sistema de potencia.

Para dicho sistema se propone utilizar celdas solares de grado espacial 3G30C del fabricante Azur Space. Este tipo de celda es de triple unión InGaP / GaAs / Ge sobre sustrato de Ge. Tienen un área activa de 60.36 cm². Las mismas cuentan con un revestimiento de óxido de aluminio y óxido de titanio TiOx/Al2O3 [36]. Estas celdas han sido utilizadas en sistemas de potencia de varios Cubesat, según la revisión del estado de arte.

El presupuesto de energía del sistema se realiza según las características de estas celdas, debido a las limitaciones económicas del proyecto estas no fueron compradas y las pruebas se realizaron con otras celdas de menor eficiencia. En la [Figura 3.3](#) se muestran las características eléctricas de las celdas solares propuestas, estos datos se obtienen para una temperatura de 28°C.

| Electrical Data | | BOL | 2,5E14 | 5E14 | 1E15 |
|---|------|------|--------|------|------|
| Average Open Circuit V _{oc} | [mV] | 2700 | 2616 | 2564 | 2522 |
| Average Short Circuit I _{sc} | [mA] | 1041 | 1038 | 1029 | 1004 |
| Voltage at max. Power V _{mp} | [mV] | 2411 | 2345 | 2290 | 2246 |
| Current at max. Power I _{mp} | [mA] | 1007 | 1005 | 999 | 972 |
| Average Efficiency η_{bare} (1367 W/m ²) | [%] | 29.4 | 28.6 | 27.7 | 26.5 |
| Average Efficiency η_{bare} (1353 W/m ²) | [%] | 29.7 | 28.9 | 28.1 | 26.7 |

Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spectrum: AMO WRC = 1367 W/m²; T = 28 °C [e/cm²]

Figura 3.3 Características eléctricas de las celdas solares[36].

Se plantea utilizar las caras de tamaño 30 cm x 10 cm del Cubesat 3U para fijar las celdas, por lo que se dispondrá de un total de 12 celdas, 3 en cada una de estas caras. Suponiendo que alguna de estas caras estará orientada al Sol, entonces el ángulo de incidencia de la radiación será de 90 grados. La potencia que entrega un panel está dada por la siguiente fórmula.

$$P = A\lambda \eta \cos(\alpha) = \Phi \eta \quad (3.2)$$

Donde A es el área, λ es la irradiancia incidente, α es el ángulo entre la irradiancia incidente y la superficie del panel y η es la eficiencia del panel. En caso que por perturbaciones externas el satélite gire y dos caras del satélite queden apuntando al sol pues mayor será la potencia que se obtendría. Posteriormente en el diseño se explica la conexión de los paneles solares donde las caras siguientes del satélite están conectadas a sistemas independientes de MPPT y la energía que suministra cada sistema se conduce y concentra en un bus de energía el cual llamamos bus de energía principal.

Para el cálculo de la potencia que generan las celdas solares se toman los datos eléctricos de las celdas solares, que son mostrados en [Figura 3.3](#), donde se tiene en cuenta la degradación en los parámetros de las celdas según la dosis total de radiación, TID, del inglés, *total ionizing dose*, se utilizan los datos para una dosis de radiación acumulada de 10^{15} electrones/cm² donde la eficiencia de la celda es 26.5%.

Realizando el cálculo según la [Ecuación 3.2](#) con los datos siguientes.

$$A = 0.006036 \text{ m}^2$$

$$\lambda = 1094 \text{ Watts/m}^2$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\eta = 0.265$$

Se obtiene que la potencia promedio que entrega cada celda es de 1.75 W por lo que las 3 celdas de una cara entregarán una potencia promedio de 5.25 W.

En la [Figura 3.4](#) se muestran datos de la degradación en los parámetros de las celdas con relación a la temperatura, estos datos se tienen en cuenta pues a lo largo de la órbita los paneles varían su temperatura y pueden alcanzar altas temperaturas lo cual degrada su eficiencia y por tanto la potencia que entregan. Se tienen en cuenta los datos para la mayor dosis total de radiación acumulada. Según se plantea en [37] la temperatura que pueden alcanzar los paneles está en un rango de -40 a 70°C; en [38] y [39] se plantea que los paneles funcionan en el rango de -100 a 125°C de esta manera se calcula la degradación en la potencia para un nivel de temperatura máxima de 125°C.

Temperature Gradients

| | | | BOL | 2E14 | 5E14 | 1E15 |
|-----------------------|-----------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Open Circuit Voltage | $\Delta V_{oc}/\Delta T \uparrow$ | [mV/°C] | - 6.2 | - 6.5 | - 6.6 | - 6.7 |
| Short Circuit Current | $\Delta I_{sc}/\Delta T \uparrow$ | [mA/°C] | 0.72 | 0.66 | 0.70 | 0.76 |
| Voltage at max. Power | $\Delta V_{mp}/\Delta T \uparrow$ | [mV/°C] | - 6.7 | - 6.8 | - 7.1 | - 7.2 |
| Current at max. Power | $\Delta I_{mp}/\Delta T \uparrow$ | [mA/°C] | 0.48 | 0.40 | 0.48 | 0.56 |

Figura 3.4 Degradación de parámetros de las celdas con temperatura.

La potencia calculada anteriormente es para una temperatura de 28°C, por lo que la diferencia de temperatura sería 97°C, siendo la tensión y corriente afectadas en la siguiente medida; $\Delta V_{MP} = -698\text{mV}$, $\Delta I_{MP} = 54\text{mA}$. Por tanto, la potencia en cada celda se ve afectada en $\Delta P_{MP} = 37.7\text{mW}$. De esta manera al ser tres celdas la potencia disminuye en 113.1 mW y la potencia promedio que entregarían las 3 celdas de una cara del satélite sería 5.13 W.

3.1.4 Cálculo de presupuesto de energía.

Para realizar el presupuesto de energía se obtienen los tiempos de iluminación directa y eclipse según los datos que arroja SPENVIS. Se define entonces que la duración de una órbita es de 1.61 horas, siendo 0.53 horas de iluminación directa y 1.08 horas de eclipse. Los 5.13W de potencia promedio que entrega el panel solar de una cara del satélite se afectan por las pérdidas en el convertidor DC-DC con topología SEPIC que anteriormente se determina utilizar como parte del sistema de MPPT, según se analizó anteriormente el mismo maneja niveles de eficiencia sobre el 90%, por lo que la potencia promedio que se entrega es 4.62W. Teniendo en cuenta estos tiempos, la información de los consumos de potencia de cada subsistema y los modos de funcionamiento, se elabora la [Tabla 3.3](#) donde se muestra el presupuesto de energía.

Tabla 3.3 Presupuesto de energía.

| Modo operación | Tiempo (H) | Potencia entregada (W) | Energía entregada (Wh) | Potencia necesaria (W) | Energía consumida (Wh) | Balance de Potencia (W) | Balance de Energía (Wh) | Energía en cada modo (Wh) |
|----------------------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Espera y eclipse | 1.08 | 0.00 | 0.00 | 0.83 | 0.90 | -0.83 | -0.90 | 1.11 |
| Espera e iluminación | 0.53 | 4.62 | 2.45 | 0.83 | 0.44 | 3.79 | 2.01 | |
| Activo e iluminación | 0.53 | 4.62 | 2.45 | 4.06 | 2.15 | 0.56 | 0.30 | -4.09 |
| Activo y eclipse | 1.08 | 0.00 | 0.00 | 4.06 | 4.38 | -4.06 | -4.38 | |

Para cargar las baterías durante la iluminación, estando el sistema en modo espera se dispone de 3.79W de potencia mientras que en estado activo se disponen 0.56W.

En estado de espera por órbita se pueden suministrar a las baterías 1.11 Wh, por lo que el tiempo o cantidad de órbitas necesarias para cargar las baterías hasta el 85% de su capacidad, dependerá de la capacidad de las baterías que se utilicen. De igual manera el tiempo o cantidad de órbitas que el sistema puede permanecer en estado activo.

Según el tipo de funcionamiento que anteriormente se plantea, donde las baterías trabajan entre el 10% y 85% de su estado de carga; entonces los 4.09Wh que se consumen por órbita representarían el 75% de la capacidad de la batería. Dado que el sistema debe permanecer en modo activo mínimo durante una órbita, esto determina que la batería a utilizar debe tener una capacidad mínima de 5.45Wh.

El presupuesto de energía anterior se realiza suponiendo que todos los subsistemas del satélite están en funcionamiento durante todo el estado activo, esto no exactamente funciona de esta manera por tanto la energía consumida por cada órbita en este estado es realmente menor a la reflejada en la tabla. Los cálculos y el diseño se realizan de esta manera teniendo en cuenta un peor caso.

3.2 Selección de baterías

En el caso que nos ocupa de un Cubesat y aplicaciones en LEO es clave en las baterías poseer una gran cantidad de ciclos de carga y descarga. Los principales parámetros que deben cumplir las baterías según [35] son:

- Duración del ciclo de carga y descarga de 90 minutos; generalmente 60 minutos para carga y 30 para la descarga.
- La profundidad de descarga DOD es del 10-70% dependiendo principalmente del tiempo de la misión.
- Tasa de carga cercana a C/3
- Tasa de descarga: C/2 a C/1.5

Teniendo en cuenta estas características, se propone para este trabajo utilizar baterías de litio del tipo celdas de energía ya que no se requiere un régimen de descarga mayor a 1C y con una configuración S-P dada las ventajas de esta configuración que anteriormente se mencionan. Además, se propone realizar la carga de las baterías mediante el método cargar y ejecutar, donde no se realiza carga de saturación a la

batería con el objetivo de extender la vida útil de las mismas; según dicho método, la carga de la batería se realiza hasta que la misma alcance una tensión de 4.2V donde el estado de carga, SoC; en este caso sería alrededor del 85 por ciento.

Para brindar redundancia, se define utilizar 2 bancos de baterías los cuales funcionan en paralelo, siendo posible que, en caso de fallar uno de estos, el restante pueda brindar la energía necesaria al sistema. Se decide que cada banco este conformado por dos baterías de litio en configuración serie con lo cual 7.4V sería la tensión nominal del bus de baterías. Dado ese nivel de tensión y teniendo en cuenta que un banco de baterías debe poseer una capacidad mínima de 5.45Wh, entonces se necesitan baterías de mínimo 736 mAh.

Para determinar qué baterías utilizar se consultan diferentes catálogos como [40] y [41]. Finalmente se propone entonces emplear baterías cilíndricas de litio de alta capacidad LIR14500-8; las mismas tienen una capacidad de 800 mAh son del tipo AA y pesan 20.5 gramos [41], por lo que pueden ser utilizadas dentro del Cubesat. La [Tabla 3.4](#) muestra los datos característicos de esta batería los cuales se obtienen de [42].

Tabla 3.4 Características de baterías LIR14500-8.

| | Especificaciones |
|----------------------------------|--|
| Tensión Nominal | 3.7V |
| Capacidad Nominal | 800mAh/2.96Wh |
| Corriente de Carga Recomendada | Estándar: 300mA Rápida: 800mA |
| Máxima Corriente Descarga | 1600mA |
| Tiempo de Carga | Estándar: 5 horas Rápida: 2.5 horas |
| Mínima Tensión | 3.0V |
| Máxima Tensión | 4.2V |
| Ciclos de Vida (> 80% capacidad) | > 500 |

Cada banco de baterías posee entonces una capacidad de 5.92 Wh. Según el modo de trabajo que se plantea utilizar se dispone del 75% de dicha capacidad o sea 4.44 Wh. Suponiendo un solo banco de baterías en funcionamiento; como en modo activo se consumen 4.09 Wh, entonces se puede permanecer en este estado 1.08 órbitas. Por otra parte, en modo de espera se entregan 1.11 Wh por lo que se necesitan 4 órbitas para cargar las baterías. Estando activos ambos bancos de baterías la cantidad de órbitas serían el doble en cada caso.

De esta manera se logra obtener una distribución de potencia del sistema de donde se definen los niveles de potencia, tensión y corriente que se manejan; información que se tiene en cuenta para seleccionar los componentes del sistema. La [Figura 3.5](#) muestra dicha distribución de energía según el presupuesto de energía realizado y baterías seleccionadas.

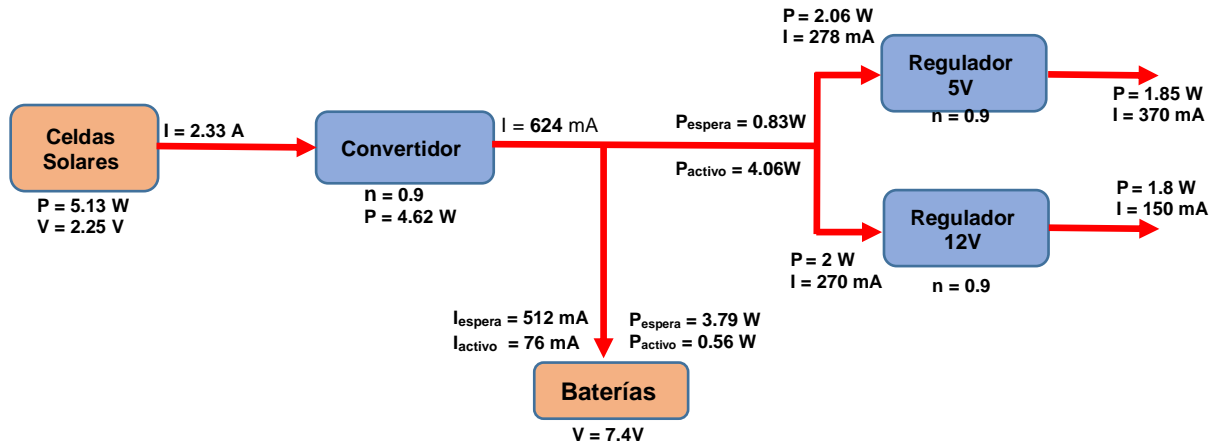


Figura 3.5 Distribución de potencia según el presupuesto de energía y baterías seleccionadas.

Los bancos de baterías son iguales por lo que la potencia disponible para cargar las mismas se divide entre ambos bancos de igual manera. Durante el periodo de iluminación del satélite cuando las baterías reciben carga; en modo espera cada batería se cargará a una corriente promedio de 256mA, mientras en modo activo se cargarán a razón de 38mA. En caso de falla de un banco de baterías y el sistema quede funcionando solamente con uno de ellos, este recibirá una corriente promedio de 512 mA para cargarse, dicho valor no supera la máxima corriente de carga para estas baterías que es de 800mA.

3.3 Diseño de sistema de potencia.

Hay varios sistemas eléctricos de potencia comercialmente disponibles para la plataforma CubeSat. Estos sistemas proporcionan voltajes típicamente utilizados en sistemas embebidos tales como 3.3V, 5V y 12V. Además, proporcionan características tales como protección contra cortocircuitos, sobrecargas, baja y sobre tensión y monitoreo de la batería. El sistema que se propone posee estas características y se diseña mediante una arquitectura de seguimiento de máxima potencia.

El esquema del diseño que se propone es mostrado en la [Figura 3.6](#) y se realiza con base al análisis de diferentes sistemas de potencia de Cubesats [43], [44], [45], [46], [47] que han sido implementados. Se analizan y tienen en cuenta algunos criterios de los mismos para ser utilizados en el presente trabajo. El diseño propuesto consta de los subsistemas; paneles solares, subsistema de MPPT, almacenamiento de energía, conversión y regulación de buses de tensión y distribución de energía.

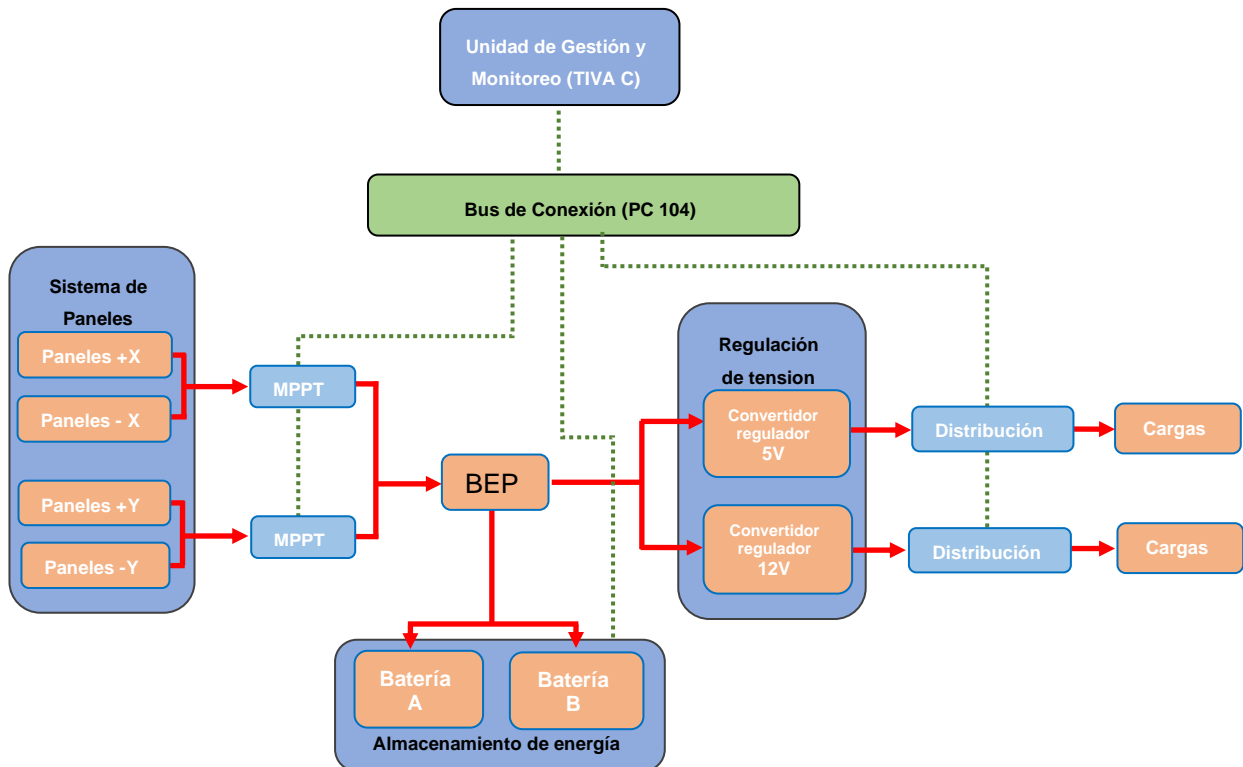


Figura 3.6 Esquema general del sistema de potencia

Se utiliza un bus no regulado o bus de energía principal, BEP; el mismo está conectado a ambos bancos de baterías. Este esquema trae como ventaja que el BEP concentra toda la energía proveniente de las celdas solares independientemente de cuál de los lados del Cubesat sea el que esté recibiendo radiación, de manera que, si algún panel falla o no recibe radiación, la energía que proviene de los restantes se concentra en dicho bus. El sistema maneja un subsistema de almacenamiento de energía el cual incluye protección de las baterías, un subsistema de regulación y distribución de energía el cual tiene asociado protección contra cortocircuitos, sobrecarga, sobre y baja tensión. A continuación, se detallan cada uno de los subsistemas.

3.3.1 Subsistema de celdas solares y MPPT.

Se utilizan las 4 caras de 30 cm x 10 cm del Cubesat para colocar paneles solares. Por lo que las condiciones de radiación y temperatura en las 3 celdas colocadas en una misma cara del satélite son iguales, dichas celdas se conectan en paralelo.

De esa manera los paneles dispuestos en un lado y el lado opuesto se conectan al mismo sistema MPPT, mientras los paneles de los otros lados paralelos van conectados al otro sistema de MPPT. Para conectar las celdas de un lado y el lado opuesto se utiliza un sistema de control de flujo de potencia, CFP; este se realiza mediante un MOSFET controlado por un circuito integrado controlador simulador de diodos ideales. De esta manera la salida de ambos sistemas va conectada a un bus de entrada del sistema MPPT. El esquema en bloques de este sistema es el mostrado en la [Figura 3.7](#).

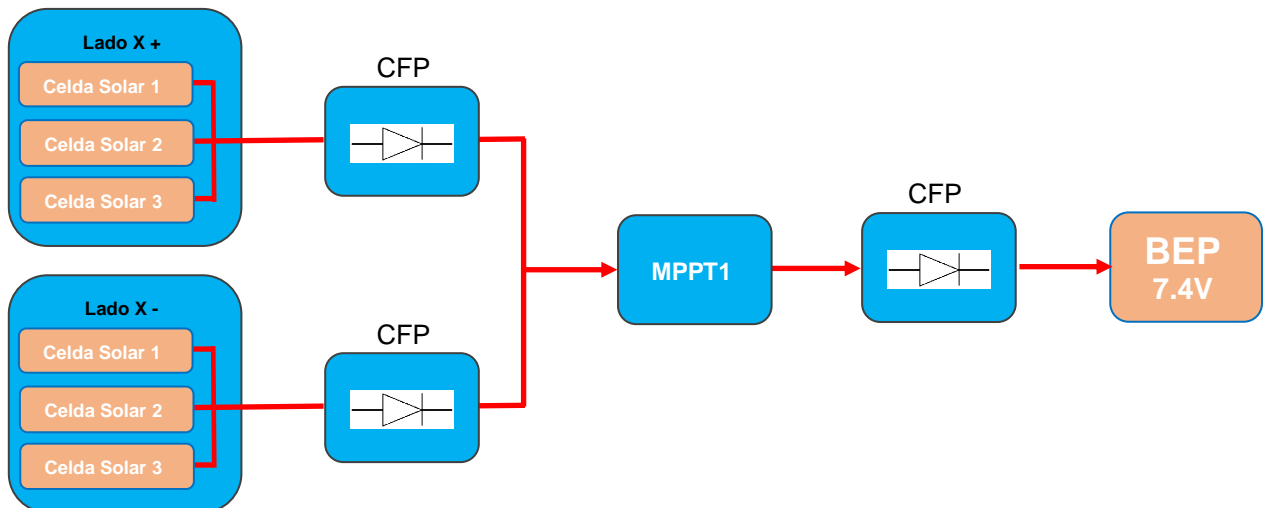


Figura 3.7 Subsistema de paneles solares y MPPT.

El sistema de control de flujo de potencia también se utiliza para conectar cada uno de los sistemas MPPT al bus de energía principal lo cual permite que si uno de estos sistemas no entrega potencia; pues entonces no funcione como una carga. El sistema CFP brinda una eficiencia superior a un diodo ya que la caída de tensión en el MOSFET es muy baja dado que se utilizan MOSFET de baja resistencia de encendido.

Al utilizarse un convertidor SEPIC en el sistema de MPPT, el arreglo de paneles solares puede tener una tensión menor o mayor a la tensión del bus de baterías, lo cual brinda flexibilidad al diseño. Se señala que esta distribución y conexión de los paneles solares logra que la energía que pueda suministrar cada panel solar se obtenga en el bus de energía principal.

3.3.1.1 Convertidor del sistema de MPPT.

El sistema de MPPT funciona mediante un convertidor CC-CC que es una fuente de energía conmutada que se controla mediante el cambio del ciclo de trabajo para regular la tensión de entrada de forma que los paneles entreguen la máxima potencia disponible. Según se define anteriormente se utiliza un convertidor de topología SEPIC con arquitectura de convertidor sincrónico para brindar mejores niveles de eficiencia.

La frecuencia de operación del PWM que se pretende utilizar es 100Khz. Mientras mayor sea la frecuencia de operación del convertidor aumentan las pérdidas en los elementos activos de conmutación, en este caso los MOSFET debido a la carga de las capacidades parásitas del dispositivo.

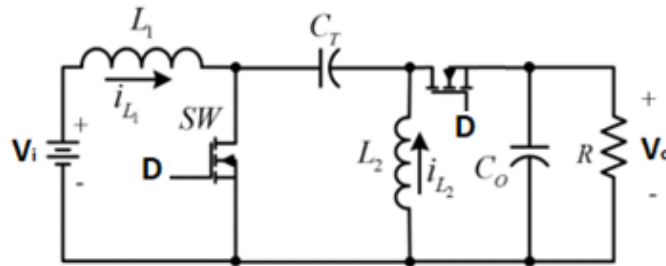


Figura 3.8 Convertidor SEPIC sincrónico.

Según los datos del panel solar, las baterías y requerimientos del sistema se obtienen los parámetros para el diseño del convertidor. La corriente de salida mínima se obtiene según la menor potencia que necesita el sistema, que serían los 0.83W que consume la telemetría y computadora de a bordo; mientras para la corriente máxima se tiene en cuenta los 4.72W de potencia máxima que se obtienen a la salida del convertidor. La siguiente tabla muestra los parámetros necesarios para realizar los cálculos de diseño del convertidor.

Tabla 3.5 Parámetros del convertidor para MPPT.

| Parámetro | |
|------------------------------|--------|
| Vi | 2.25V |
| Vo_{max} | 8.4V |
| F | 100KHz |
| Io_{min} | 112mA |
| Io_{max} | 638 mA |
| D_{min} | 0.1 |
| D_{max} | 0.9 |
| Vo rizado | 1% Vo |
| V_{Cr} rizado | 1% Vs |

| | |
|---------------|-----|
| Irizado en L1 | 10% |
| Irizado en L2 | 20% |

Según estos datos al evaluar las ecuaciones de diseño (2.11) a la (2.15) se obtiene que

$$L_1 = 90\mu\text{H}$$

$$L_2 = 90\mu\text{H}$$

$$C_T = 70\mu\text{F}$$

$$C_o = 70\mu\text{F}$$

Se determina utilizar un inductor L_1 de $100\mu\text{H}$ y L_2 de $120\mu\text{H}$, condensadores C_T de $100\mu\text{F}$ y C_o de $200\mu\text{F}$.

3.3.1.2 Simulación de Convertidor de MPPT en Pspice

En Pspice se realiza una simulación del convertidor propuesto, con los valores de los componentes calculados, para de esta manera verificar los requerimientos que se tuvieron en cuenta en el diseño.

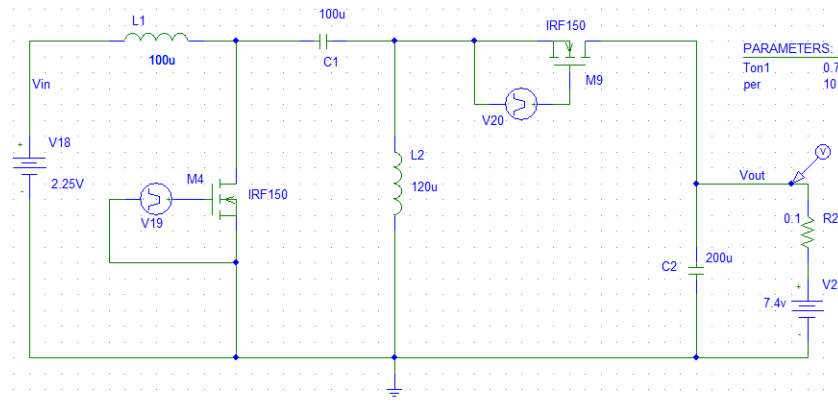


Figura 3.9 Convertidor SEPIC sincrónico.

En la simulación se ajustan las señales de control de los Mosfet para que entre dichas señales exista un tiempo muerto de 100 ns y se utiliza una frecuencia de 100KHz. En este trabajo se llevaron a cabo simulaciones teniendo en cuenta un bus de baterías de 7.4V y 3.7V para lo cual se realizaron también los cálculos de los componentes, se verifica que la eficiencia era ligeramente menor para un bus de 3.7V, por lo que se decide ocupar un bus de baterías de 7.4V.

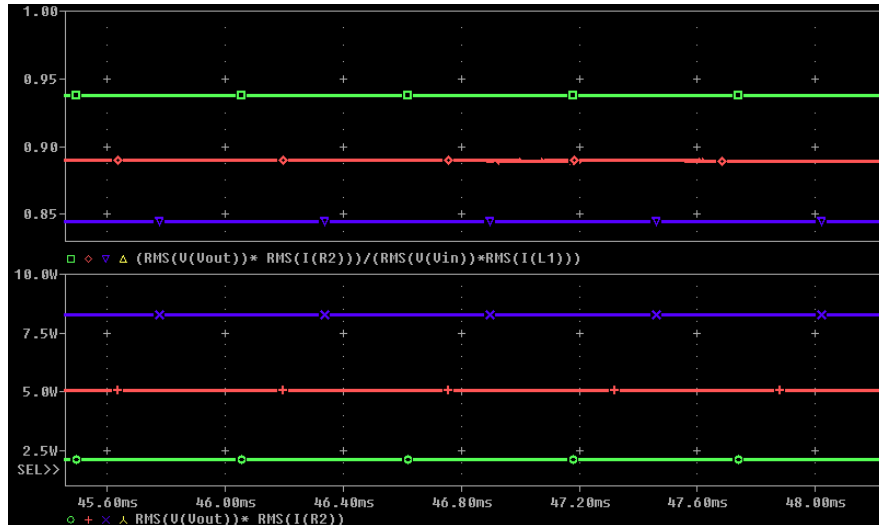


Figura 3.10 Eficiencia del convertidor a diferentes potencias de salida.

La Figura 3.10 muestra el comportamiento de la eficiencia a diferentes potencias de salida; donde se verifica que la misma es superior a 84% en todos los casos.

La Figura 3.11 muestra la tensión de salida para diferentes niveles de potencia del convertidor y se verifica que el rizado es menor al 1% de valor nominal.

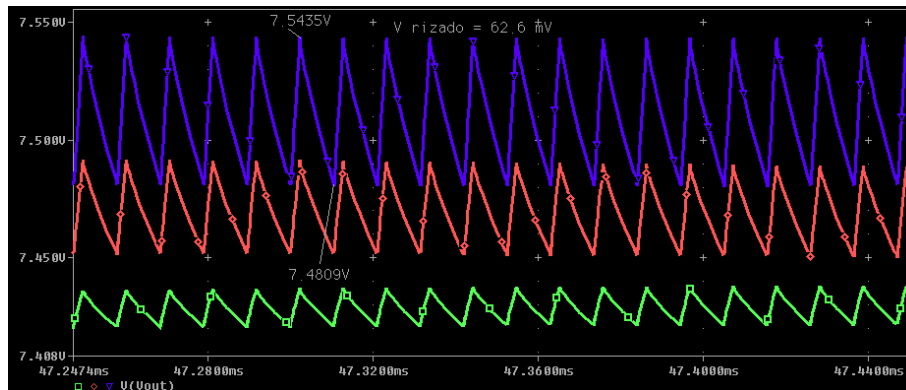


Figura 3.11 Tensión de salida del convertidor simulado.

Se comprueba que la corriente en el inductor L1 tiene un rizado menor al 10%, mientras que la corriente por el inductor L2 se mantiene siempre mayor a cero por lo que se verifica un funcionamiento del sistema en modo continuo. La Figura 3.12 muestra la corriente que circula en las bobinas para una potencia de salida de 5W.

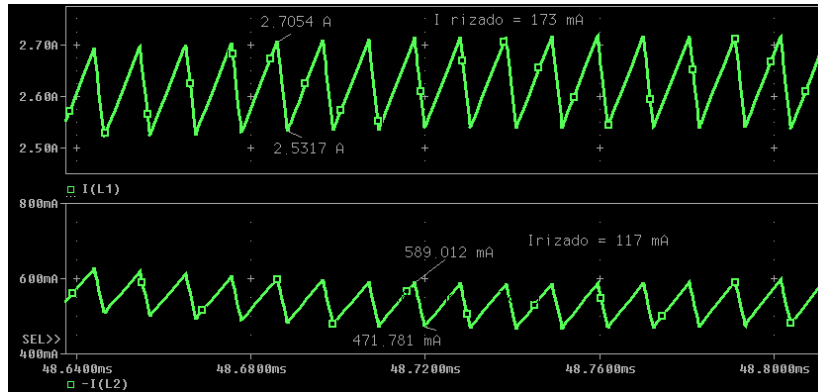


Figura 3.12 Rizados de corriente en inductor L1 y L2.

3.3.2 Subsistema de almacenamiento de energía

Se decide utilizar 2 bancos de baterías para lograr redundancia en el diseño, ambos conectados al BEP mediante circuitos independientes de protección de baterías que permiten tener una protección contra sobretensión, sobrecorriente y descargas profundas. En la Figura 3.13 se puede observar el sistema propuesto para cada batería.

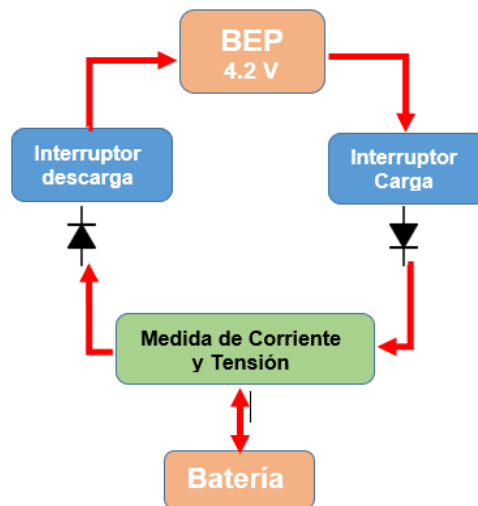


Figura 3.13 Sistema de almacenamiento de energía para cada batería.

Se utiliza un interruptor para carga y otro para descarga. Las activaciones de cada uno de estos dependen de la corriente que circule por los mismos. En caso que la corriente supere un determinado valor umbral de desactivación que se configura electrónicamente, estos interruptores se abren y empiezan un ciclo de reinicio automático donde se chequea la corriente hasta que la misma sea menor al umbral donde se activa el interruptor y permanece activado.

Además de esta función de protección propia de los interruptores, el sistema de almacenamiento es gestionado por la unidad de procesamiento y gestión del sistema de potencia. Si la corriente de carga es superior a 800mA, que es el límite de carga de las baterías que se proponen; se detiene el algoritmo de MPPT y se comienza a disminuir el ciclo de trabajo en el convertidor de MPPT de manera que la corriente disminuya. De la misma manera cuando las baterías alcanzan una tensión igual o superior a 4.2V se detiene el sistema de MPPT para no sobrecargar las mismas.

3.3.3 Convertidores de tensión de buses de alimentación

Según los niveles de tensión de funcionamiento de los módulos o subsistemas que conforman el nanosatélite, se debe tener un bus de 5V y otro de 12V. Cada bus de tensión debe soportar la máxima corriente que demandan todos los módulos que se alimentan de él. Según la demanda de potencia y consumos de los módulos o subsistemas del satélite, la máxima corriente de salida de los buses de 5V y 12V, es 372mA y 150mA respectivamente. La [Figura 3.14](#) muestra un diagrama en bloques del diseño propuesto.

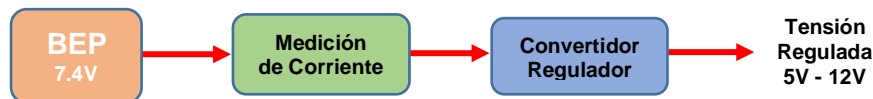


Figura 3.14 Sistema de regulación de buses.

Se determina utilizar circuitos integrados convertidores reguladores de tensión del tipo conmutados, los cuales poseen una mayor eficiencia que los lineales y trabajan a altas frecuencias de conmutación, lo que hace posible utilizar inductores de potencia pequeños, que además deben ser protegidos para minimizar la interferencia electromagnética que genera el sistema.

3.3.4 Subsistema de Distribución y Protección

El sistema de distribución conecta cada uno de los módulos y subsistemas del nanosatélite al bus de tensión correspondiente; incluye protección contra sobrecarga y cortocircuito. Para esto, se seleccionan interruptores de potencia integrados y se establecen en cada caso límites de corriente de sobrecarga según la potencia que demanda cada módulo o subsistema. Se define que los interruptores de potencia integrados deben tener entrada de habilitación para que los mismos sean activados por la unidad de procesamiento y gestión en dependencia del modo de operación del sistema.

Específicamente en el caso de los interruptores que alimentan la computadora de a bordo y al sistema de telemetría, estos no dependen de la unidad de procesamiento y gestión para estar activados pues dichos sistemas deben estar constantemente activos en cualquier modo de trabajo del sistema de potencia. La [Figura 3.15](#) muestra un esquema general del sistema propuesto.

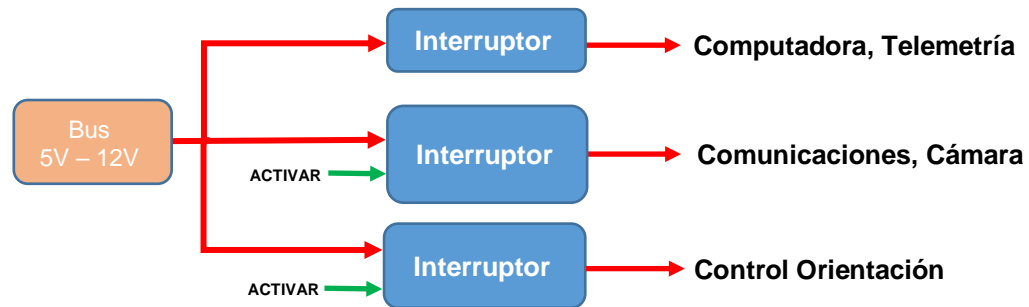


Figura 3.15 Sistema de distribución.

3.3.5 Subsistema de monitoreo y gestión.

La frecuencia que maneja el convertidor que realiza la función de MPPT es de 100KHz y según el diseño que se propone, se necesitan al menos 14 puertos para el control y las mediciones del sistema. Por tanto, se propone utilizar para las pruebas del sistema de potencia como unidad de procesamiento y gestión del sistema una placa de evaluación Tiva™ serie C LaunchPad TM4C123G de Texas Instruments. Esta unidad posee las propiedades suficientes para realizar las tareas de procesamiento y mediciones del sistema de potencia propuesto.

Esta arquitectura de la serie Tiva™C ofrece un procesador TM4C123GH6PMI Cortex-M de 80 MHz con una variedad de memorias integradas y 16 GPIO programables. Además, cuenta con botones de usuario programables y un LED RGB para aplicaciones personalizadas [48]. Para obtener más datos ver [49].

Para el control y monitoreo del sistema de potencia es necesario tomar mediciones de tensión y corriente en diferentes puntos. Se mide corriente y tensión en cada uno de los sistemas de paneles solares, en las baterías, y la corriente en cada rama de regulación. La [Figura 3.16](#) muestra el diseño propuesto del sistema de medición y gestión.

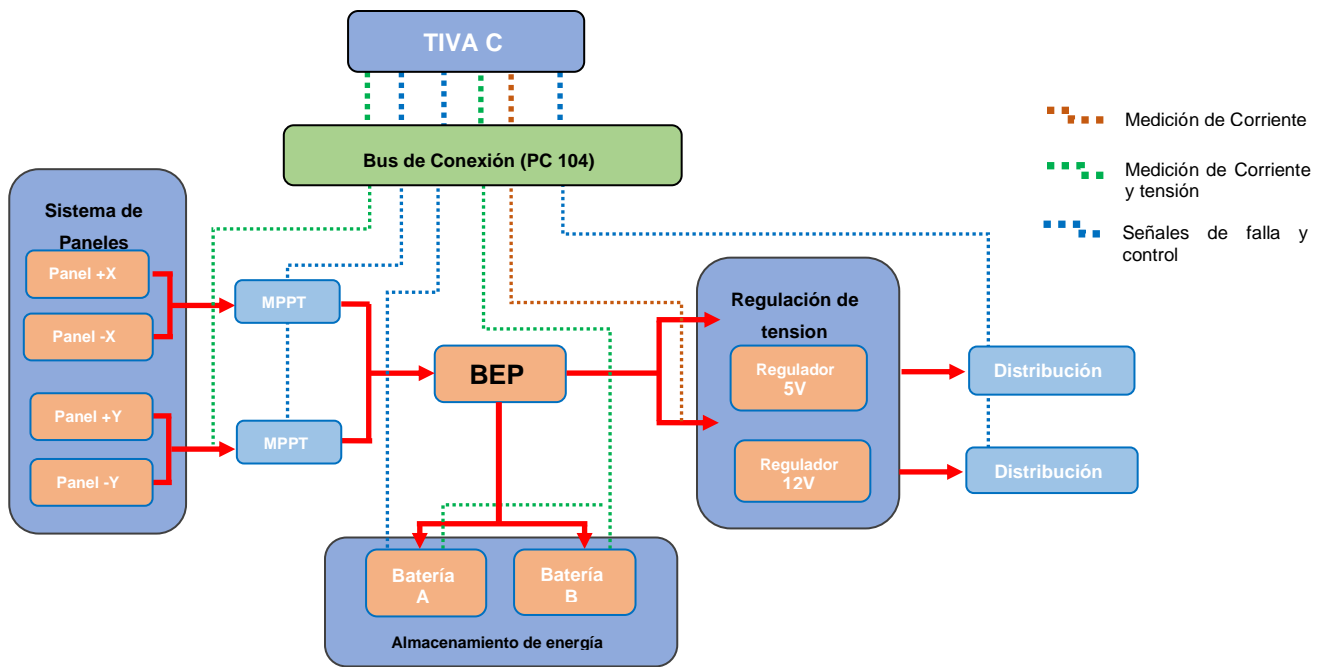


Figura 3.16 Diseño de sistema de monitoreo y gestión.

3.4 Optimización del algoritmo de perturbación y observación

Se debe implementar el algoritmo de Perturbación y Observación de manera que se reduzcan los efectos negativos asociados a los cambios en las condiciones de irradiación solar, tal inconveniente puede reducirse si el intervalo de muestreo usado por el algoritmo es elegido correctamente y se adecúa al comportamiento dinámico del convertidor CC/CC utilizado para realizar el MPPT, así como la magnitud de los cambios en el ciclo de trabajo del convertidor.

En el algoritmo, ΔD es la variación o cambio del ciclo de trabajo y T_a es el intervalo de muestreo de potencia del panel. La reducción de ΔD disminuye las pérdidas de estado estacionario causadas por la oscilación del punto de operación del panel solar alrededor del punto de máxima potencia, pero hace que el algoritmo sea menos eficiente en caso de que existan condiciones de irradiación que cambien rápidamente[50].

En lo sucesivo se muestra la manera de hacer eficiente este algoritmo según se plantea en [50] y [51].

Supongamos que el sistema está trabajando en el MPP en el instante de muestreo k -ésimo con un nivel de irradiación S ; y el signo de la perturbación o cambio del ciclo de trabajo es negativo, o sea $D(k) = D(k-1) - \Delta D$, por lo que según la [Figura 3.17](#) el punto de operación debería pasar del MPP al punto A con una tensión más elevada. Si entre los instantes kT_a y el $(k+1)T_a$ cambia el nivel de irradiación; ejemplo, si aumenta, entonces el punto de operación se moverá al punto B en lugar del punto A en $(k+1)T_a$ [50].

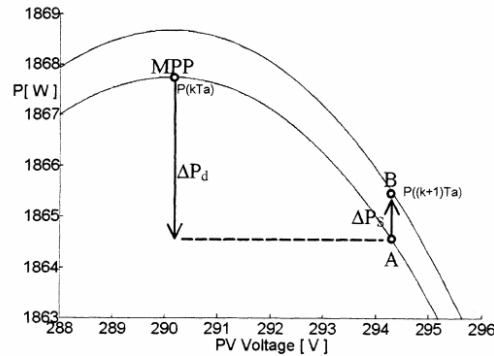


Figura 3.17 Movimiento del punto de operación del panel solar. [50]

Siendo ΔP_d el cambio de la potencia de salida del panel causada por la variación del ciclo de trabajo ΔD a un nivel de irradiación constante y ΔP_s la variación de potencia del panel provocada por la variación ΔS de irradiación. El algoritmo no se confundirá solo si:

$$\Delta P_d > \Delta P_s \quad (3.3)$$

Siendo I_A y V_A la corriente y tensión de salida del panel e I_{MPP} , V_{MPP} sus valores en MPP; dadas las variaciones de corriente y voltaje ΔI_d y ΔV_d con respecto al MPP a un nivel de radiación constante, según se plantea en [50] la variación de potencia de salida del panel causada por la variación del ciclo de trabajo es:

$$\Delta P_d = V_{MPP} \Delta I_d + I_{MPP} \Delta V_d + \Delta V_d \Delta I_d \quad (3.4)$$

Asumiendo que las oscilaciones del punto de operación de panel son pequeñas en comparación con el MPP entonces ΔI_d se puede aproximar como:

$$\Delta I_d \approx \left. \frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} \right|_{MPP} \Delta V_d + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 I_{PV}}{\partial V_{PV}^2} \right|_{MPP} \Delta V_d^2 \quad (3.5)$$

Donde:

$$\left. \frac{\partial i_{PV}}{\partial v_{PV}} \right|_{MPP} = -\frac{1}{R_{MPP}} \quad (3.6)$$

$$\left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i_{PV}}{\partial v_{PV}^2} \right|_{MPP} = \frac{1}{2} \frac{1}{2\eta V_T} \left(1 - \frac{R_s}{R_{MPP}}\right)^3 \left(\frac{I_s}{\eta V_T} e^{\frac{V_{MPP} + R_s I_{MPP}}{\eta V_T}} \right) = -H \quad (3.7)$$

Donde R_s es la resistencia serie, η es el factor de idealidad del diodo, I_s es la corriente de saturación del diodo y V_T es la tensión térmica. R_{MPP} es el valor absoluto de la resistencia en el MPP; I_s y V_T básicamente solo dependen de la temperatura [52]. Sustituyendo las ecuaciones (3.7) y (3.6) en la ecuación (3.5) y luego en (3.4) siendo $V_{MPP} = R_{MPP} \cdot I_{MPP}$ se obtiene la ecuación:

$$\Delta P_d \approx \left(I_{MPP} - \frac{V_{MPP}}{R_{MPP}} \right) \Delta V_d - \left(H V_{MPP} + \frac{1}{R_{MPP}} \right) \Delta V_d^2 = - \left(H V_{MPP} + \frac{1}{R_{MPP}} \right) \Delta V_d^2 \quad (3.8)$$

El efecto al variar el ciclo de trabajo una amplitud ΔD y la variación en la tensión del panel ΔV_d , pueden evaluarse mediante una señal de control de voltaje del panel o a través de la función de transferencia G_o , donde G_o es la ganancia de tensión directa [51].

$$\Delta V_d = G_o \cdot \Delta d \quad (3.9)$$

En cuanto a ΔP_s , la variación de potencia del panel solar sin tener en cuenta los cambios debido a la variación del ciclo de trabajo ΔV_d respecto a V_{MPP} , se puede expresar como:

$$\Delta P_s = V_{MPP} \Delta I_s + \Delta V_d \Delta I_s \approx V_{MPP} \Delta I_s = V_{MPP} K \Delta S \quad (3.10)$$

Donde ΔI_s es la variación de corriente del panel para un ciclo de trabajo dado debido al cambio de radiación ΔS y K es una constante de la celda [52]. Finalmente, el algoritmo no se confunde en condiciones dinámicas si:

$$\left| - \left(H V_{MPP} + \frac{1}{R_{MPP}} \right) \right| (G_o \cdot \Delta D) > V_{MPP} K |\Delta S| \quad (3.11)$$

De esta ecuación obtenemos la magnitud mínima requerida de variación del ciclo de trabajo ΔD_{min} , para garantizar una operación segura del algoritmo. Si esta desigualdad se cumple, el algoritmo puede rastrear sin errores un MPP que se mueve bajo tasas promedio de cambio de la radiación menor a ΔS , dentro del intervalo de muestreo T_a ,

cuyo valor óptimo se puede encontrar sobre la base de las consideraciones expuestas en [51] y que se exponen a continuación.

El intervalo de muestreo de potencia del panel, T_a , debe establecerse lo más corto posible sin causar inestabilidad. Si el algoritmo muestrea la tensión y corriente del conjunto fotovoltaico demasiado rápido, está sujeto a posibles errores causados por el comportamiento transitorio del convertidor; por tanto, el algoritmo puede confundirse y el punto de operación puede volverse inestable. La solución consiste en elegir T_a de acuerdo con la dinámica del convertidor, de modo que después de cada perturbación o cambio del ciclo de trabajo se permita al sistema alcanzar la operación en estado estable antes de la próxima variación del ciclo de trabajo [51]. En las Figuras 3.18 y 3.19 se muestran el comportamiento de la tensión y de los puntos de operación del panel solar. Si se selecciona un valor de T_a mayor al tiempo que demora el sistema en alcanzar cierta estabilidad tras el cambio de ciclo de trabajo; se asegura que el algoritmo de MPPT no se confunde con el comportamiento transitorio del sistema.

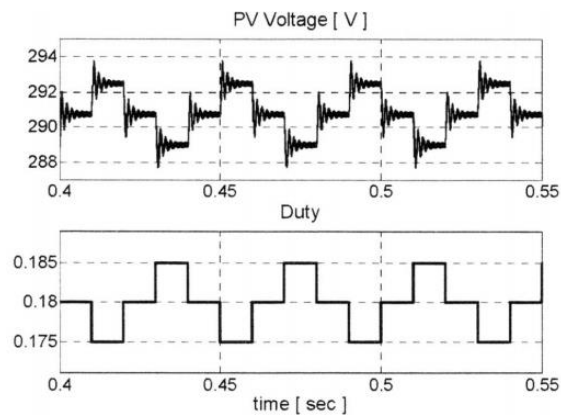


Figura 3.18 Tensión en el panel debido al comportamiento dinámico del convertidor [51].

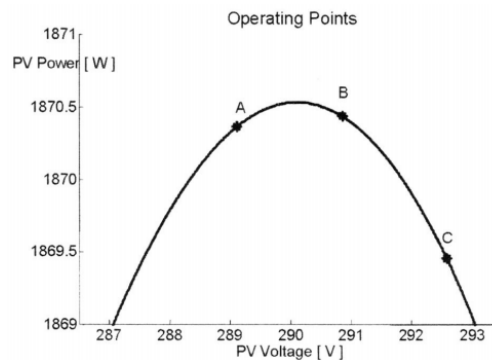


Figura 3.19 Puntos de operación de panel para una radiación determinada[51].

El ciclo de trabajo asume solo tres valores diferentes: D_{MPPT} , $D_{MPPT} - \Delta D$ y $D_{MPPT} + \Delta D$ y el punto de operación toma tres posiciones diferentes en la característica del panel solar. Se debe señalar que el punto B no es perfectamente coincidente con el MPP debido a la discretización del ciclo de trabajo; por supuesto, cuanto menor sea la ΔD , menor será la distancia entre B y el MPP, pero a su vez esto trae consigo una menor velocidad de respuesta del MPPT al cambiar la condición atmosférica.

La elección del valor de T_a de acuerdo con el enfoque propuesto, garantiza un cambio de estado estable de tres niveles alrededor del MPP para cualquiera que sea el tamaño del cambio del ciclo de trabajo ΔD y nivel de irradiación S que se establezcan. Establecer tiempos menores trae consigo un peor comportamiento del sistema debido a una oscilación más amplia del punto de operación alrededor del MPP y conduce a una menor eficiencia del algoritmo MPPT [51].

3.4.1 Simulación de algoritmo de MPPT en Simulink

Para obtener los óptimos parámetros de ajuste ΔD_{min} , variación del ciclo de trabajo mínima y T_a , tiempo de muestreo de potencia del panel; se simula el sistema MPPT propuesto en MATLAB\Simulink. Se utiliza un modelo de panel solar y batería que posee Simulink; estos modelos se configuran y ajustan según los datos del panel solar y las baterías propuestas. Además, se utiliza en la simulación un convertidor SEPIC con los valores de los componentes pasivos calculados anteriormente. En la [Figura 3.20](#) se muestra el sistema simulado en Matlab\Simulink.

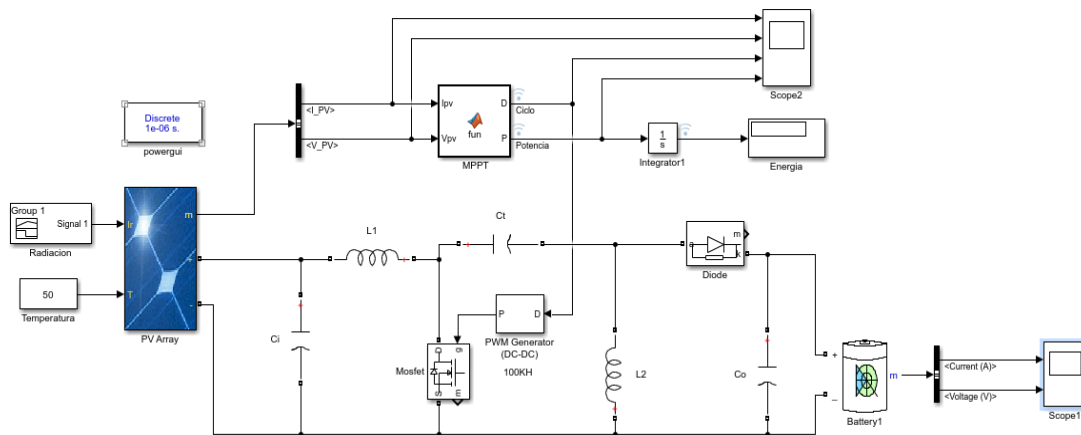


Figura 3.20 Sistema MPPT en Simulink

Se utiliza un bloque programado en Matlab para desarrollar de algoritmo de MPPT. En el ANEXO 1 se muestra el código de dicho bloque. Se realiza una primera simulación a

diferentes niveles de radiación de 100 a 1300 W/m² en escalones de 100 W/m², temperatura constante de 50°C, $\Delta D = 0.02$, $T_a = 80$ ms y 100KHz como frecuencia de conmutación del convertidor. En la [Figura 3.21](#) se muestran las gráficas de la corriente, tensión del panel, ciclo de trabajo con que se hace funcionar el convertidor y la potencia del conjunto fotovoltaico.

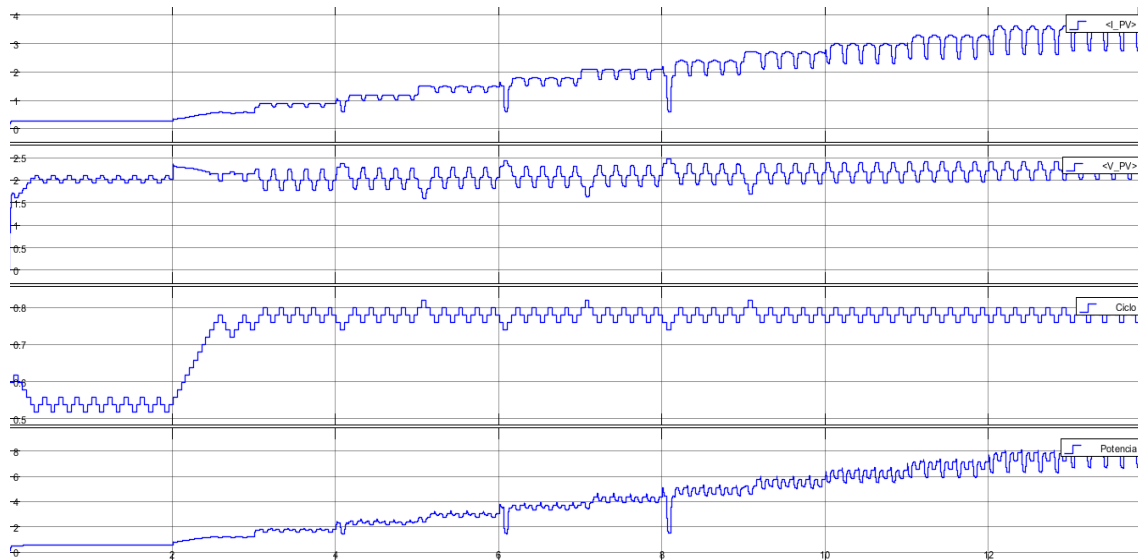


Figura 3.21 Resultados obtenidos para diferentes niveles de irradiación.

En la [Figura 3.22](#) se muestra con detalle los resultados de la simulación donde se verifica el correcto funcionamiento del algoritmo de MPPT al estar oscilando el ciclo de trabajo sobre un valor 0.78, donde el panel se encuentra en el MPP. Se verifica que luego de cada cambio o perturbación en el ciclo de trabajo; la tensión y corriente en el panel se estabilizan luego de 37ms, por lo que se utiliza un tiempo de muestreo $T_a = 50$ ms para realizar las mediciones de estas variables y variar el ciclo de trabajo del sistema.

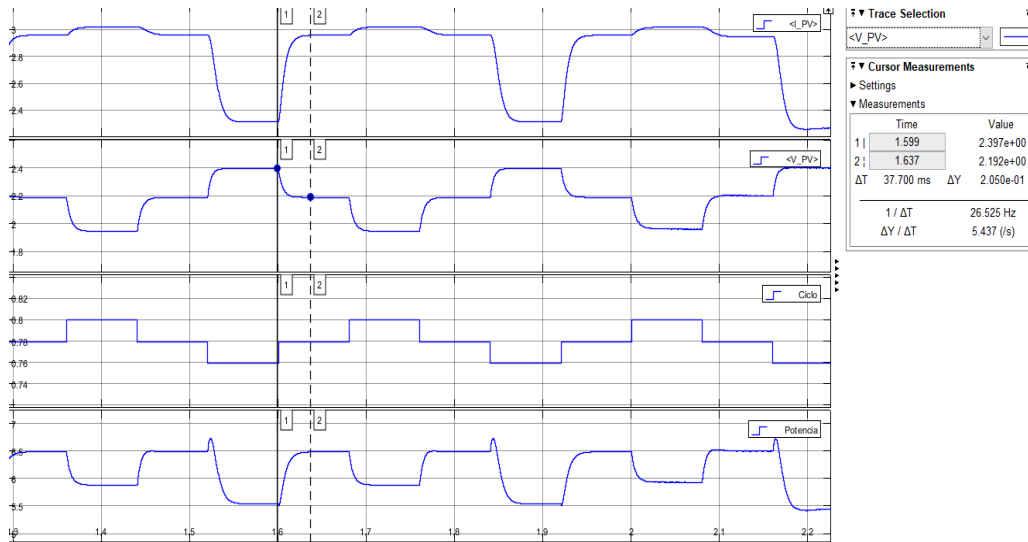


Figura 3.22 Detalles de resultados los obtenidos.

Tabla 3.6 Variación de potencia a diferentes niveles de radiación.

| | $\Delta D = 0.05$ | $\Delta D = 0.02$ |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Radiación (W/m ²) | ΔP_D (mW) | ΔP_D (mW) |
| 100 | 150 | 52 |
| 200 | 173 | 128 |
| 300 | 240 | 197 |
| 400 | 353 | 263 |
| 500 | 520 | 324 |
| 600 | 725 | 377 |
| 700 | 993 | 420 |
| 800 | 1303 | 450 |
| 900 | 1823 | 465 |
| 1000 | 2062 | 458 |
| 1100 | 2081 | 502 |
| 1200 | 3146 | 554 |

Se obtiene la variación de potencia del panel solar debido a los cambios o perturbaciones en el ciclo de trabajo ΔP_D , a diferentes niveles de radiación. La [Tabla 3.6](#) muestra una relación de ΔP_D para $\Delta D = 0.05$ y 0.02 a diferentes niveles de radiación; donde se verifica que la misma tiene un comportamiento no lineal respecto a la radiación incidente en el panel y que mientras mayor es ΔD la variación de potencia ΔP_D también es superior.

Se pretende entonces para un determinado valor de razón de cambio de la irradiación incidente ΔS ; determinar que variación del ciclo de trabajo ΔD posibilita obtener una mayor energía en el sistema. Para obtener ΔS se tiene en cuenta la gráfica o curva de radiación directa obtenida por SPENVIS. Según los datos generados mediante esta herramienta de simulación espacial, cada 63 segundos se obtiene un valor de radiación, siendo el mayor cambio de radiación que se registra de 1290 W/m^2 por tanto, la máxima razón de cambio de la radiación incidente es $20.48 \text{ W/m}^2/\text{s}$. Se establece entonces realizar un análisis del comportamiento del sistema teniendo en cuenta un valor superior; $\Delta S = 25 \text{ W/m}^2/\text{s}$. Se realizan simulaciones a diferentes valores de ΔD y se integra la potencia que entrega el panel para calcular la energía que se logra extraer durante un incremento de la radiación de 100 a 1300 W/m^2 a razón de $25 \text{ W/m}^2/\text{s}$. De esta manera se conoce el menor ΔD para el cual se cumple que $\Delta P_d > \Delta P_s$ de manera que el algoritmo funcione de manera óptima.

La [Tabla 3.7](#) muestra los resultados de estas simulaciones a diferentes valores de cambios o perturbaciones de ciclo de trabajo, ΔD , siendo el tiempo de muestreo de potencia del panel solar 50 ms .

Tabla 3.7 Resultados de simulación a diferentes cambios de ciclo de trabajo

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Frecuencia del convertidor MPPT | 100 KHz | | | | | | | |
| Tiempo de simulación | 48 s | | | | | | | |
| T_A | 50 ms | | | | | | | |
| Radiación | 100 a 1300 W/m^2 | | | | | | | |
| Razón de cambio de radiación | $25 \text{ W/m}^2/\text{s}$ | | | | | | | |
| ΔD | 0.001 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.1 |
| Energía (Ws) | 64.788 | 96.523 | 101.5 | 96.01 | 89.993 | 80.915 | 76.214 | 69.255 |

Se obtiene la mayor energía para un $\Delta D = 0.01$, siendo este el menor valor para el cual se cumple que $\Delta P_d > \Delta P_s$ ya que, para valores menores, la energía que entrega el panel es menor debido que el algoritmo se desplaza del MPP al ser $\Delta P_d < \Delta P_s$. Este valor máximo de energía es equivalente a 0.028 Wh obtenidos en 48 segundos.

En resumen, se tiene que el algoritmo debe funcionar mediante cambios o perturbaciones de ciclo de trabajo $\Delta D = 0.01$ mientras que el tiempo en que se toman las muestras de

tensión y corriente del panel o tiempo de muestreo $T_A = 50\text{ms}$. Esto asegura que para razones de variación de radiación ΔS menores a $25 \text{ W/m}^2/\text{s}$ el algoritmo no se confunda y permita obtener la mayor energía posible del conjunto fotovoltaico.

Capítulo 4

Implementación del sistema

Para la selección de componentes se tienen en cuenta los datos de potencia, tensión y corriente que arroja el presupuesto de energía realizado anteriormente. Para la implementación del sistema se usó la herramienta de software de diseño electrónico EAGLE donde se generan los esquemas electrónicos de cada subsistema que luego se integran para realizar el diseño completo de la tarjeta de circuito impreso. Luego de la fabricación de la tarjeta impresa se agregaron los componentes para realizar las pruebas de funcionamiento.

4.1 Selección de componentes y esquemas electrónicos de diseño

Según el diseño planteado y los niveles de potencia que se derivan del presupuesto de energía, se seleccionan los diferentes componentes que se utilizaran en cada subsistema.

4.1.1 Subsistema de paneles solares

Se tiene en cuenta que los niveles de potencia determinados en el presupuesto de energía son valores promedios por lo que los niveles máximos de corriente que deben soportar los dispositivos que forman parte de este subsistema se seleccionan teniendo en cuenta la máxima potencia que pueden suministrar los paneles solares propuestos, que según los datos expuestos en [36] es 7.5W.

Este consta de un sistema de control de flujo de potencia, CFP, que simula el comportamiento de un diodo ideal, lo cual permite una baja disipación de potencia y un mejor aprovechamiento de la potencia que entregan los paneles. Esta función la realiza un circuito integrado controlador de MOSFET, específicamente el circuito integrado LTC4352.

Este integrado crea un diodo casi ideal utilizando un MOSFET de canal N externo y reemplaza un diodo Schottky de alta potencia y el disipador de calor asociado, ahorrando energía y área de la placa. Si la fuente de entrada falla o es cortocircuitada, un apagado rápido minimiza las corrientes inversas. Este controlador opera con tensión de entrada

desde 0V hasta 18V. El paso de energía se desactiva durante condiciones de baja tensión, sobretensión o si se detecta el MOSFET abierto. El integrado tiene un rango de temperatura de operación de -40°C a 85°C [53]. Para seleccionar el MOSFET adecuado que va ser controlado por este integrado se debe tener en cuenta la tensión de compuerta umbral, tensión máxima de fuente a drenaje, resistencia de encendido y máxima corriente de dren. La salida del integrado que maneja la compuerta del MOSFET opera entre 5V y 7.5V, lo cual permite utilizar un MOSFET canal N con umbral de nivel lógico. El voltaje de fuente a dren, debe ser mayor que la tensión de los paneles solares y la resistencia de encendido debe ser suficientemente pequeña para conducir la corriente de carga máxima y no exceder los 250 mV, para no disparar la señal de falla; además se debe permanecer dentro de la potencia nominal del MOSFET a la corriente de carga máxima. Según estos requerimientos y asumiendo un valor de corriente de 4A; valor superior a la máxima corriente que entregan los paneles; entonces el MOSFET debe tener una resistencia de encendido menor a $62.5\text{ m}\Omega$ y una potencia nominal superior a 1W.

Se determinan utilizar los mosfet DMN6040SSD y SI4850EY, estos tienen una baja resistencia de encendido y alta velocidad de conmutación, ideales para aplicaciones de manejo de energía de alta eficiencia. En el ANEXO 2 se muestra el esquema electrónico de este sistema, que fue realizado en Eagle.

Tabla 4.1 Características de MOSFET DMN6040SSD, SI4850EY y DMG6968UQ [54] [55] [56].

| | DMN6040SSD | SI4850EY | DMG6968UQ |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| V_{DS} | 60 V | 60 V | 20V |
| I_D | 5 A | 8.5 A | 6.5 A |
| $R_{SD_{on}}$ | 40 $\text{m}\Omega$ | 22 $\text{m}\Omega$ | 21 $\text{m}\Omega$ |
| $V_{gs(th)}$ | 1 V | 1 V | 900 mV |
| P_D | 1.7 W | 3.3 W | 1.3 W |

Para el convertidor SEPIC que realiza la función de MPPT, según los valores calculados anteriormente, se decide utilizar inductores del fabricante Coilcraft, familia MSS1583 de $100\mu\text{H}$ y $120\mu\text{H}$, montaje superficial, temperatura operación de -40 a 155°C con máxima corriente efectiva de 4.8A y 1.6A. Además, se determina utilizar capacitores de $100\mu\text{F}$, $200\mu\text{F}$ y tensión de 16V, los mismos de montaje superficial y con estructura resistente a la vibración. Como elementos de conmutación se utilizan los MOSFET DMG6968UQ. El control y gestión del convertidor se realiza mediante un procesador el

cual realiza el algoritmo de MPPT para poder ajustar la magnitud de los cambios en el ciclo de trabajo y los tiempos de muestreo de las variables de tensión y corriente de los paneles según el análisis anteriormente realizado de optimización del algoritmo de Perturbación y Observación. En el ANEXO 3 se muestra el esquema del sistema de MPPT realizado en Eagle.

4.1.2 Sistema de almacenamiento de energía.

Para la conexión de las baterías se decide utilizar interruptores electrónicos TPS1H200A. Este integrado posee un límite de corriente ajustable que mejora la confiabilidad del sistema al limitar la corriente de entrada. La alta precisión del límite de corriente mejora la protección contra sobrecargas. Incorpora protección contra cortocircuitos, sobrecarga, baja tensión de entrada y de estado térmico. Las características configurables del mismo además del límite de corriente, proporcionan flexibilidad de diseño, funcionalidad y disipación térmica. Permite una corriente máxima de salida de 2.5A, tensión de trabajo de 4 a 40V y temperatura de operación de -40 a 125 °C[57]. El integrado se hace funcionar en modo de reinicio. Cuando se alcanza el límite de corriente ajustado, el interruptor se desactiva y la señal de falla va a nivel bajo, lo cual es detectado por la unidad de monitoreo y gestión del sistema de potencia; pero sistemáticamente en un tiempo ajustable este se activa nuevamente y se chequea la corriente; en caso que la misma sea menor al valor límite, el interruptor queda activado; de lo contrario continúa desactivado. Según el diseño, es necesario utilizar además diodos para establecer el camino de carga y descarga, definiendo usar los diodos LSM115JE3

Los interruptores integrados que controlan la carga y descarga de baterías, se configuran para funcionar con un límite de corriente de 900mA, superior al valor máximo recomendado para cargar baterías y a la máxima demanda de corriente de las cargas. El circuito diseñado se muestra en el ANEXO 4.

Se señala que como parte de las funciones de protección del sistema de almacenamiento de energía cuando la corriente de carga de las baterías es superior a 800mA o cuando tensión en las mismas es igual o superior a 4.2V; se detiene el algoritmo de MPPT y se disminuye sistemáticamente el ciclo de trabajo del convertidor MPPT hasta limitar o suprimir la carga de las baterías.

4.1.3 Sistema de convertidores y regulación de tensión.

Se determina utilizar para la regulación de tensión de los buses de 5V y 12V, reguladores integrados conmutados pues los mismos poseen niveles de eficiencia superiores a 85%.

Para regular la tensión del bus de 5V, se determina utilizar el convertidor CC/CC reductor integrado LMR33620, este convertidor es capaz de conducir hasta 2 A de corriente de carga y proporciona una alta eficiencia. Este dispositivo integra señales de falla o mal funcionamiento y una de activación, lo cual brinda flexibilidad y una solución simple. Las características de protección incluyen apagado térmico, bloqueo de baja tensión de entrada, límite de corriente y protección contra cortocircuitos. La hoja de datos del integrado especifica una eficiencia superior a 90% [58].

Mientras que para regular la tensión del bus de 12V, se define utilizar el convertidor CC/CC elevador integrado LM2733XMF; este conduce corrientes de hasta 1A, utiliza pequeños capacitores e inductores brindando una alta densidad de potencia. Las características de protección del mismo son: limitación de corriente ciclo a ciclo y apagado térmico. Además, utiliza pocos componentes externos y maneja niveles de eficiencia superior a 90% [59].

En el ANEXO 5 y 6 se observa el esquema electrónico desarrollado en Eagle de cada uno de estos reguladores de 5 y 12V, respectivamente.

4.1.4 Sistema de distribución

Se seleccionaron diferentes interruptores atendiendo a los niveles de potencia que requiere cada subsistema del nanosatélite.

Se decide utilizar para las cargas de 5V, como el sistema de comunicaciones y la cámara, los interruptores de potencia TPS2551-Q1, dicho integrado está diseñado para trabajar con cargas capacitivas y soporta cortocircuitos. La máxima corriente de salida se puede limitar y es ajustable entre 100mA y 1.1A, mediante una resistencia externa. Este dispositivo limita la corriente de salida al nivel deseado cambiando a un modo de corriente constante cuando la carga de salida excede el límite de corriente o hay un cortocircuito. Además, poseen una señal de falla que se mantiene a nivel bajo durante condiciones de sobre corriente y de tensión inversa [60]. En estos casos se ajustan los límites de corriente a 180mA.

Específicamente, para la alimentación de la computadora de a bordo, se decide utilizar el interruptor integrado de potencia FPF2104, que presenta un límite de corriente de

400mA. Para la telemetría se utiliza el interruptor integrado de potencia FPF2104 que posee un límite de corriente de 200mA. Estos integrados poseen una función de reinicio automático que enciende el interruptor después de 160 ms luego de apagarse tras una falla. Este dispositivo contiene protección térmica de apagado para evitar daños cuando una condición de sobrecorriente causa un calentamiento excesivo. Además, cuando el interruptor alcanza su límite de corriente, este opera en modo de corriente constante para evitar daños; si la condición de corriente constante aún persiste después de 10 ms entonces el interruptor se apaga y se activa un pin de señal de falla. Este pin de activación funciona mediante una entrada lógica capaz de interactuar directamente con señales de control de bajo voltaje. Estas piezas están disponibles en un empaquetado SOT23 de 5 pines para ahorrar espacio[61].

Para el caso de las cargas de 12V, como el módulo de control y orientación; se utiliza el interruptor de potencia integrado TPS1H200A, pues este funciona con valores de tensión de hasta 40V. Las características del mismo se mencionaron anteriormente.

En el ANEXO 7 se muestran los esquemas electrónicos de esta etapa.

4.1.5 Sistema de medición y monitoreo.

Para realizar las mediciones de corriente se determina utilizar sensores de corriente integrados, estos son invasivos pues introducen una muy pequeña resistencia en serie, los mismos permiten tomar mediciones de corrientes de orden de mA de manera efectiva. Se selecciona el sensor de corriente TS1103-100EG6 del fabricante Silicon Labs, estos son amplificadores de corriente bidireccionales y salida de tensión de baja potencia. Estos consumen una corriente de 1 μ A y tienen una alta precisión. Estos son autoalimentados, tienen un amplio rango de voltaje de modo común de entrada de 2V a 25V y cuentan con una señal de salida digital que indica la dirección de la corriente[62].

Las mediciones de tensión se realizan mediante un amplificador operacional ya que éste posee una alta impedancia de entrada. Se decide utilizar específicamente el amplificador operacional LM324AD. Este posee 4 canales y un ancho de banda de 1.2 MHz. En el ANEXO 8 se muestra el esquema electrónico correspondiente.

Todas las mediciones de corriente y tensión se realizan a través del convertidor análogo digital de la unidad de procesamiento Tiva™ serie C LaunchPad TM4C123G de Texas Instruments, este posee 12 canales de conversión análogo digital con una resolución de conversión de 12 bits.

4.2 Algoritmo de funcionamiento del sistema

En este apartado se muestra el diagrama de flujo de la programación realizada en la unidad de procesamiento TM4C123GH6PMI perteneciente a la tarjeta de desarrollo Tiva™ serie C. La Figura 4.1 muestra un diagrama de flujo del algoritmo realizado.

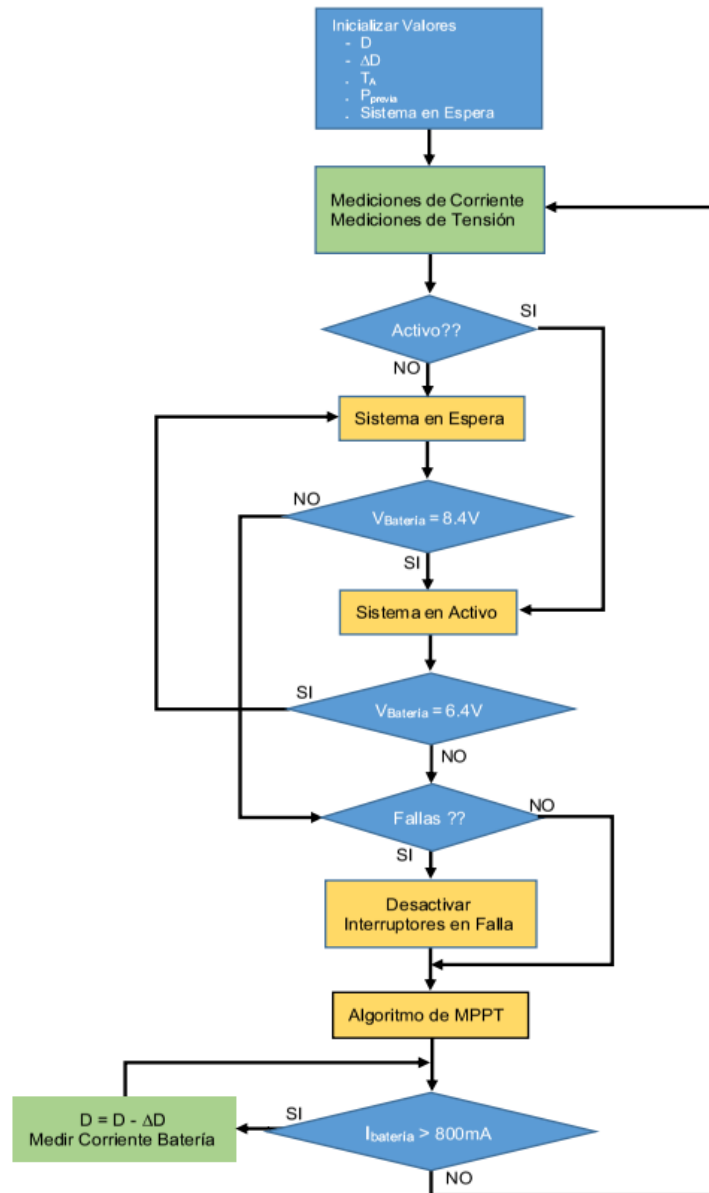


Figura 4.1 Diagrama de flujo de algoritmo de control del sistema.

Este microcontrolador realiza el algoritmo de MPPT, el manejo de los modos de operación del sistema en estado activo o espera y la activación de los interruptores de potencia integrados. Además, se realizan las funciones de medición de las corrientes y

tensiones a través de los puertos asociados a convertidores analógico digitales y verifica la activación de las señales de falla del sistema. En el Anexo 11 se muestra el código de programación del procesador.

4.3 Construcción del sistema

Se realizan los esquemas de cada subsistema en la herramienta de diseño electrónico Autodesk Eagle Version 9.0.0. La tarjeta de circuito impreso es desarrollada a doble cara utilizando un bus de conexión estándar PC104, de manera que este sistema de potencia se pueda conectar a otros módulos que integren el Cubesat.

Para realizar el diseño de la tarjeta se hizo una revisión de la norma IPC 2221A, la cual es una norma genérica sobre diseño de circuitos impresos. La IPC, Association Connecting Electronics Industries; es una asociación de participantes de la industria electrónica mundial: diseñadores, fabricantes, ensambladores de equipos, productos o aparatos electrónicos. Trabaja en normalización, certificación, educación, desarrollo profesional, estudios de mercado, programas industriales y regulaciones. Las normas IPC son una herramienta guía de las mejores prácticas de diseño, fabricación, ensamble, inspección de circuitos impresos, cables, conectores, insumos de soldadura y pruebas. Son de uso voluntario, pero el utilizarlas mejora el producto y puede aportar robustez, confiabilidad y duración al producto[63].

Según la revisión de dicha norma, se deben de tener en cuenta diferentes técnicas y consideraciones para el diseño de la placa de circuito impreso:

- Diseñar las pistas teniendo en cuenta la longitud, grosor y máxima corriente que deban conducir; ya que estas dimensiones, mal diseñadas, podrán incrementar el valor de una resistencia no deseada y causar problemas por caídas de tensión o servir de fusible al limitar el paso de corriente.
- La separación mínima entre pistas adyacentes debe de ser la adecuada para garantizar un buen aislamiento eléctrico según los niveles de tensión del circuito.
- En los circuitos de instrumentación y de medición, ubicar los componentes de tal forma que la longitud de las pistas sea lo más pequeña posible, para evitar efectos de carga en las líneas de interconexión.
- Evitar el efecto de capacitancias parásitas, se debe evitar el paralelismo entre pistas o planos y se aconseja utilizar rectas horizontales en una cara y rectas verticales en la otra.

- Orientar de forma perpendicular al PCB las bobinas y transformadores, para evitar las influencias magnéticas sobre otros circuitos.
- Para reducir el ruido de conmutación en los circuitos digitales, colocar un condensador de 0,1uF entre fuente y tierra, lo más cercano posible a cada integrado.
- Poner puntos de prueba a la salida de cada etapa, en lugares de la placa donde se pueda conectar instrumental fácilmente.
- No poner pistas, ni colocar componentes cerca de los bordes de las placas donde puedan tener contacto con los tornillos de fijación.

El mínimo ancho y grosor de los conductores en la placa se determina principalmente en función de la capacidad de corriente requerida y el máximo aumento de temperatura permitido. El aumento de temperatura permisible del conductor se define como la diferencia entre la máxima temperatura de funcionamiento segura del material laminado de la placa impresa y la temperatura máxima del entorno térmico al que se someterá la placa impresa[37]. El ANEXO 9 muestra una serie de gráficas que relacionan estos parámetros para conductores en capas externas e internas de la placa impresa.

Otro aspecto es el espacio entre los conductores en las capas individuales, el cual debe maximizarse siempre que sea posible. El diseño de la placa debe planearse para permitir el máximo espacio entre las áreas conductoras de la capa externa asociadas con circuitos de alta impedancia o alto voltaje. Esto reducirá al mínimo los problemas de fugas eléctricas resultantes de la humedad condensada. Se debe evitar la dependencia total de los recubrimientos para mantener una alta resistencia superficial entre los conductores[37].

En el ANEXO 10 se muestra una tabla donde se relacionan las separaciones entre las pistas de la placa impresa según los niveles de tensión que soportan y el tipo de conductor; B1 conductores internos, B2 conductores externos a altura menor de 3050 metros y B3 mayores a esta, B4 conductores con un recubrimiento de polímero permanente y A5, A6 conductores externos con revestimiento conformado sobre ensamblaje.

Siguiendo estos criterios se decide utilizar pistas de 1 mm para los conductores de alimentación y 0.6 mm para los que manejan señales de medición y control. Mientras se establece una separación mínima entre conductores de 0.64 mm.

En la [Figura 4.1](#) se muestra el diseño de las tarjetas de circuito impreso realizado.

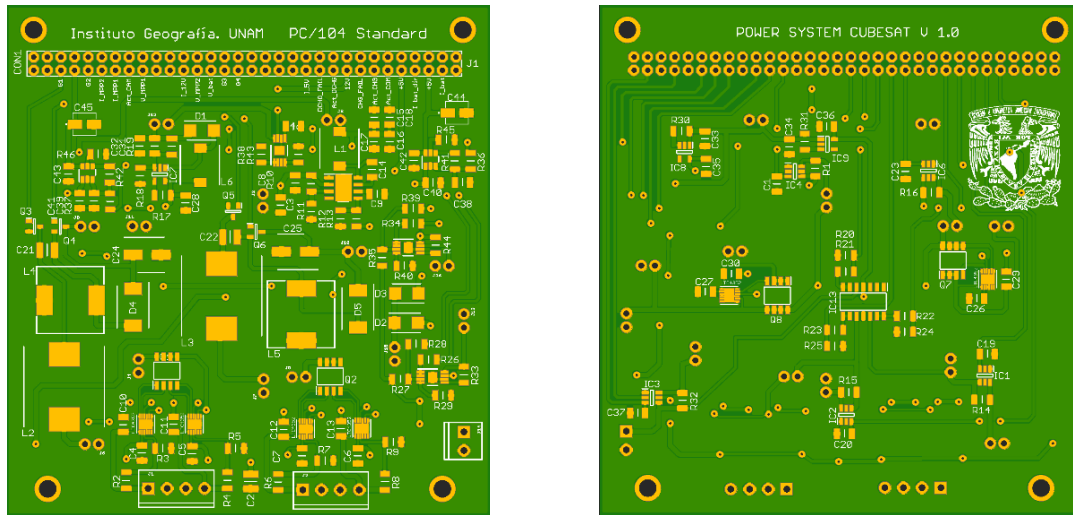


Figura 4.1 Diseño de tarjetas de circuito impreso en Eagle™

Se realiza además el diseño de otra tarjeta de circuito impreso que interconecta la del sistema de potencia con la placa de evaluación Tiva™ serie C LaunchPad TM4C123G de Texas Instruments. La misma utiliza el bus PC104 para conectar ambas tarjetas y a la vez posee buses de conexión conforme están definidos los puertos de la placa de evaluación Tiva™ serie C. La Figura 4.2 muestra la PCB diseñada.

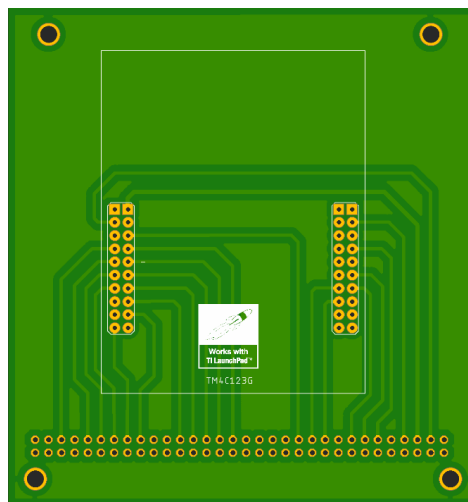


Figura 4.2 Tarjeta de circuito impreso de conexión con placa de evaluación.

Luego de realizado este diseño, estas tarjetas de circuito impreso se mandan a construir a PCBWay, empresa china que brinda servicios de construcción de tarjetas de circuito

impreso y luego se realiza el montaje de los componentes quedando las mismas de la manera que muestra la Figura siguiente.

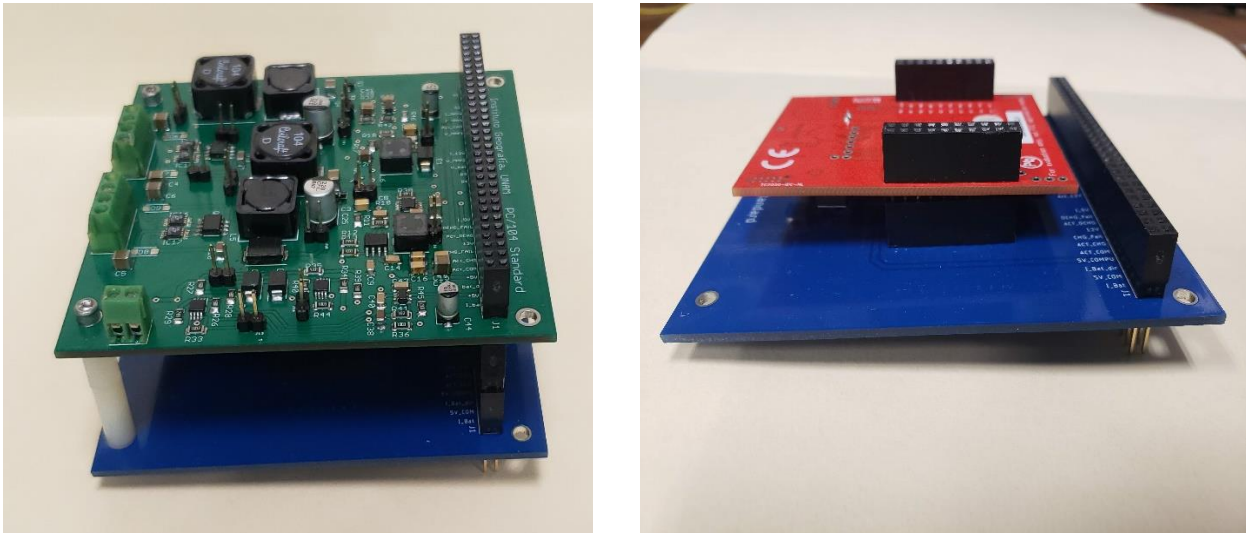


Figura 4.3 Sistema de potencia construido

En esta primera versión se utiliza la placa de evaluación Tiva™ para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, con el microprocesador TM4C123G. En versiones posteriores se pretende integrar este procesador en la misma tarjeta electrónica del sistema de potencia.

Capítulo 5

Pruebas de Funcionamiento

Se realizan pruebas al sistema para comprobar el correcto funcionamiento del mismo según los criterios planteados en el diseño. Se prueba cada subsistema por separado y finalmente en su conjunto.

5.1 Pruebas de funcionamiento.

Se utiliza un osciloscopio para verificar las señales de control y falla. Se prueban los sistemas por separado utilizando una fuente de alimentación con ajuste de tensión y corriente y mediante multímetros digitales se obtienen los valores de tensión y corriente. Estas pruebas se realizan teniendo en cuenta los criterios de prueba y resultados obtenidos en sistema de potencia comercial NanoPower P31u del fabricante GOMSpace que se exponen en [43].

5.1.1 Pruebas al sistema de medición.

Se realizan mediciones de corriente y tensión en los puntos clave que intervienen en el funcionamiento del algoritmo de MPPT y permiten conocer el funcionamiento del sistema en general. Se emplea un multímetro digital y se comparan los valores medidos con los datos obtenidos mediante el sistema de mediciones; los cuales se envían a la PC por comunicación serie para ser visualizados. En la [Figura 5.1](#) se muestran estas mediciones.

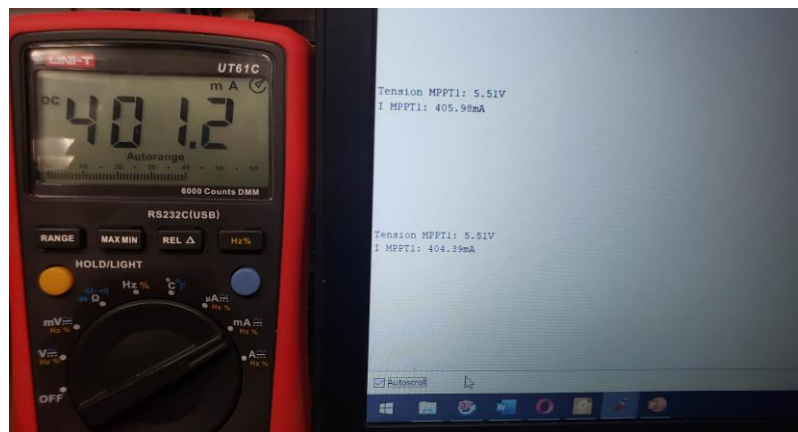


Figura 5.1 Prueba al sistema de mediciones.

Se realiza una tabla con estas mediciones a diferentes niveles de tensión y corriente para de esta forma obtener los niveles de error del sistema propuesto. Finalmente se calcula un error promedio de las mediciones. Para calcular el error se utiliza la ecuación 5.1

$$error(\%) = \left| \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| \cdot 100 \quad (5.1)$$

Tabla 5.1 Valores de corriente y tensión medidos por instrumento y medidos por el sistema.

| | Corriente(mA) | | | | | | | | Tensión(V) | | | | | | | |
|--------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Real | 202 | 300 | 404 | 501 | 597 | 712 | 804 | 2.06 | 2.55 | 3.03 | 4.01 | 5.08 | 6.01 | 7.06 | 8.17 | 202 |
| Medido | 207 | 304 | 407 | 502 | 599 | 713 | 807 | 2.12 | 2.61 | 3.12 | 4.1 | 5.15 | 6.09 | 7.11 | 8.14 | 207 |
| Error (%) | 2.48 | 1.33 | 0.74 | 0.20 | 0.34 | 0.14 | 0.37 | 2.91 | 2.35 | 2.97 | 2.24 | 1.38 | 1.33 | 0.71 | 0.37 | 2.48 |
| Error Promedio (%) | 1.07 | | | | | | | | 1.78 | | | | | | | |

5.1.2 Pruebas a sistema de distribución.

Según se describe en el diseño del sistema de distribución, éste cuenta con interruptores de potencia que limitan la corriente de salida a los diferentes subsistemas del satélite. Se realizan pruebas de sobrecarga y cortocircuito a la salida de cada interruptor verificándose el nivel de corriente en cada caso y se comprueba que la tensión en el bus conectado a la entrada de cada interruptor se mantiene estable.

Los interruptores que manejan tensión de 5V (sistema de comunicaciones y la cámara) tienen un límite de corriente de 180mA. Mientras que en la computadora de a bordo y la telemetría, el límite de corriente es 400 y 200 mA, respectivamente. En el interruptor del sistema de control y orientación que maneja una tensión de 12V y el límite de corriente establecido es de 200mA.

En las siguientes figuras se muestran las curvas de tensión a la entrada y salida de cada interruptor para casos de sobrecarga y cortocircuito. La curva de color amarillo es la tensión del bus de energía principal, la púrpura es la tensión del bus de entrada del interruptor y la azul es la tensión de salida.

La [Figura 5.2](#) muestra el caso de los interruptores de sistemas comunicaciones y la cámara. Puede observarse como luego de 156 ms se reinicia el interruptor al estar

configurado en modo de reinicio automático y en caso de continuar esta condición de sobrecarga, este se mantiene abierto hasta que la misma desaparezca.

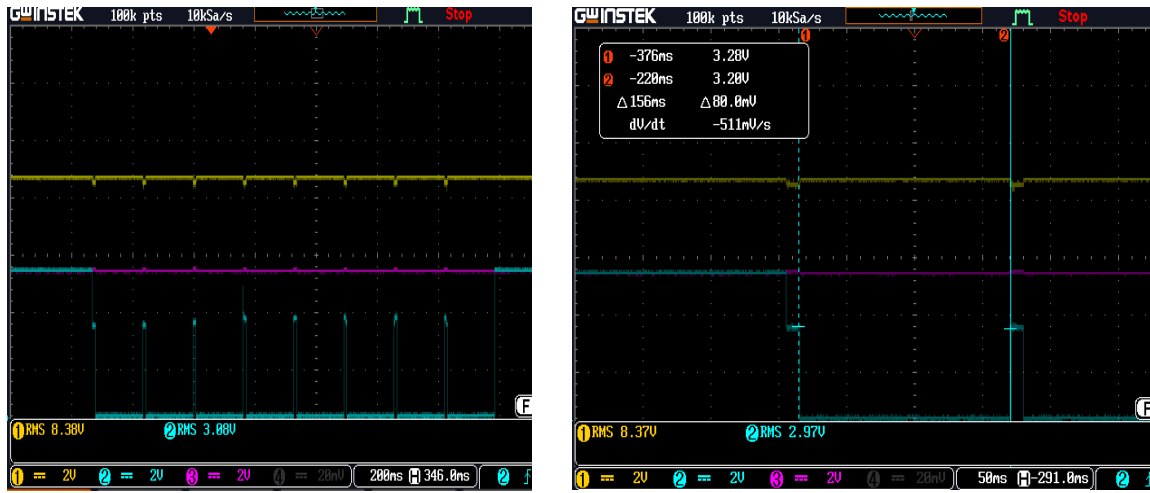


Figura 5.2 Prueba a interruptores de sistema de cámara y comunicaciones.

La Figura 5.3 muestra el caso de los interruptores de la computadora de a bordo y telemetría donde se aprecia que cada 4.10 ms se realiza el reinicio automático de los interruptores y en caso de mantenerse el estado de sobrecarga este se desactiva hasta que desaparezca esta condición.

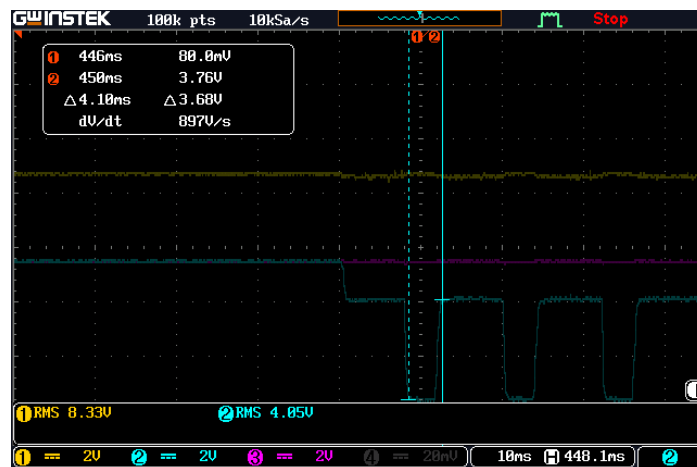


Figura 5.3 Prueba a interruptores de sistema de computadora de a bordo y telemetría.

El interruptor electrónico de la alimentación del sistema de control y orientación del satélite, maneja una tensión es 12V, el límite de corriente de sobrecarga se establece en 200 mA y no maneja función de reinicio automático y luego de detectarse una sobrecarga o cortocircuito el interruptor se desactiva con un retraso determinado. En la Figura 5.4 se

observa que luego de 330 ms manteniéndose la condición de sobrecarga o cortocircuito se desactiva el interruptor.

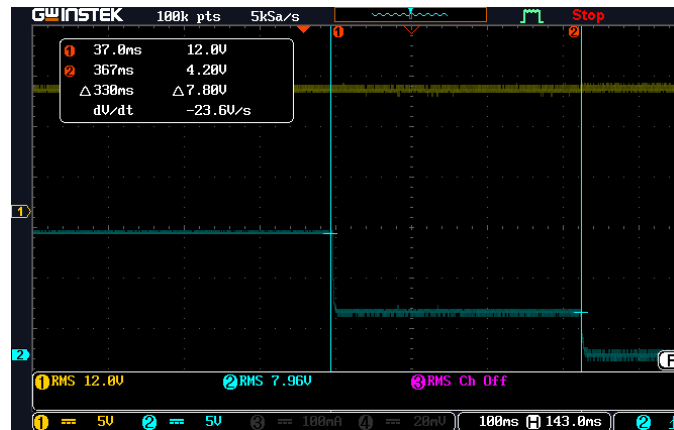


Figura 5.4 Prueba a interruptores de sistema de control y orientación.

Para activarse nuevamente es necesario aplicar un reinicio a través de la señal de activación, que se envía desde el procesador que controla el sistema.

5.1.3 Pruebas al sistema de convertidores reguladores de tensión.

En este apartado se describen las pruebas realizadas a los sistemas de conversión y regulación de tensión de los buses de 5V y 12V. Se verifica que, para diferentes niveles de tensión de entrada, la tensión de salida en los buses permanece constante, dado que los mismos manejan regulación de línea. En la Figura 5.5 se pueden observar los resultados de dicha prueba. La gráfica de izquierda es el sistema regulador de 5V y la derecha el elevador regulador de 12V. Las curvas en amarillo corresponden a la tensión de entrada de los convertidores, las azules a la tensión de salida mientras la púrpura es la corriente de salida.

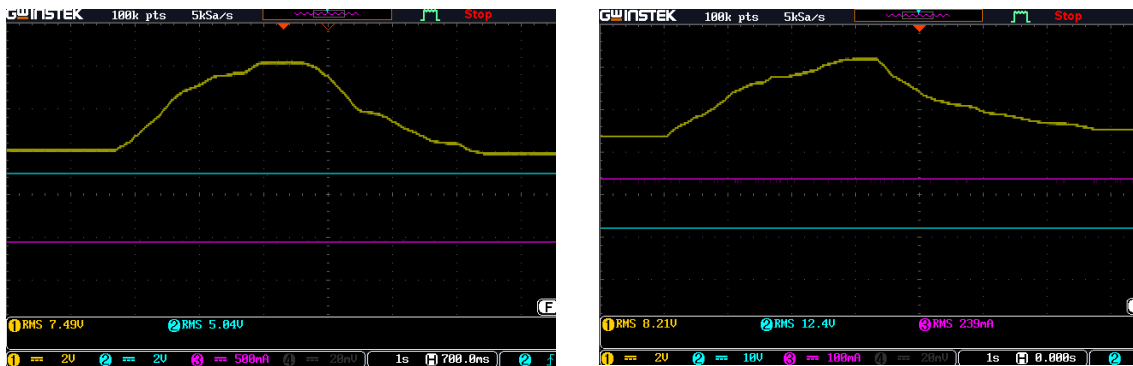


Figura 5.5 Prueba de regulación de línea.

La potencia máxima que se demanda en el sistema de 5V es 2.06W y para el de 12V es 2W. Se verifica que cada regulador entrega una corriente y potencia máxima superior a la que consumen los subsistemas del satélite, manteniendo la tensión de salida estable dado que manejan regulación de carga.

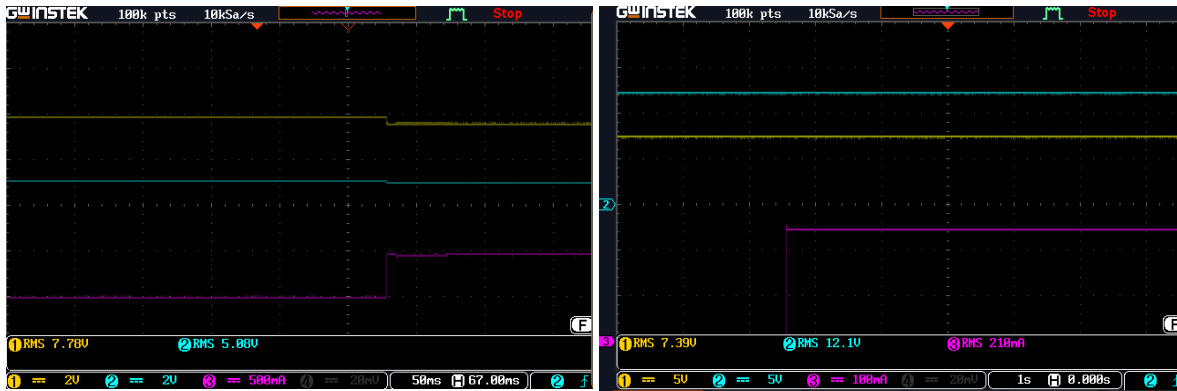


Figura 5.6 Prueba de regulación de carga.

En la Figura 5.6 se puede verificar la tensión de salida del sistema regulador de 5V, figura del lado izquierdo; sin carga y con una corriente de 500mA. De la misma manera se muestra la tensión de salida para el sistema regulador de 12V, figura del lado derecho; sin carga y con una corriente de 230mA. Además, se toman mediciones de la tensión de salida de ambos convertidores a diferentes niveles de corriente de salida. Los resultados obtenidos se reflejan en la Figura 5.7.

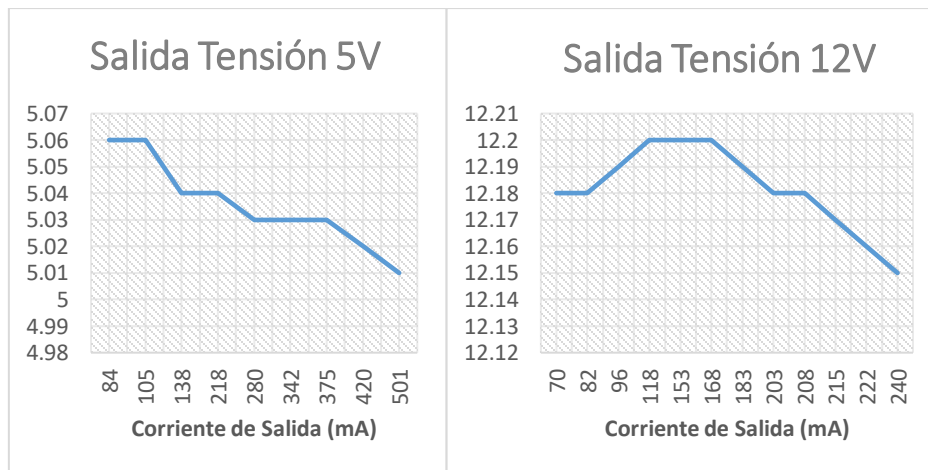


Figura 5.7 Tensión de salida de convertidores a diferentes niveles de carga.

Se calcula además la eficiencia de cada regulador midiendo los niveles de tensión y corriente a la entrada y la salida. En la [Figura 5.8](#) se muestran los datos de eficiencia de cada convertidor para diferentes niveles de potencia.

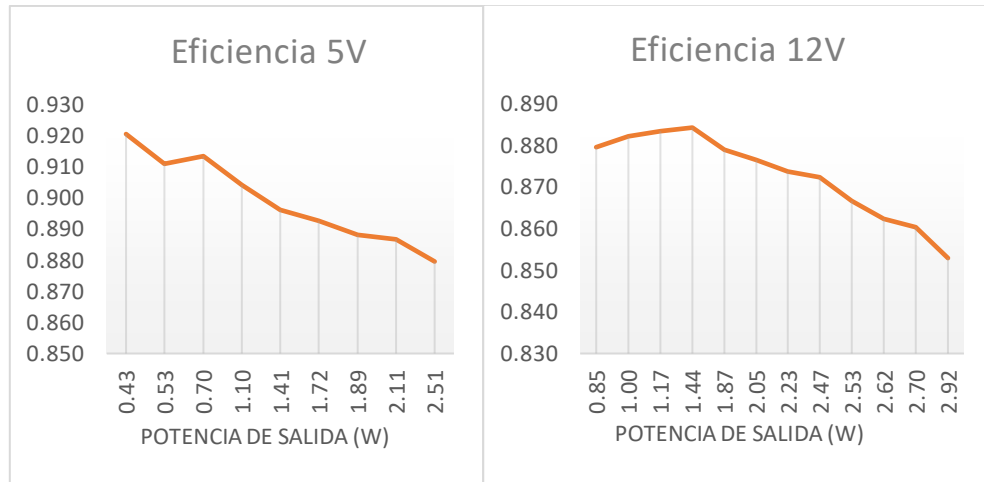


Figura 5.8 Eficiencia de convertidores a diferentes niveles de potencia.

5.1.4 Pruebas al sistema de almacenamiento de energía

El sistema de almacenamiento de energía, cuenta con interruptores electrónicos de potencia que limitan la corriente de carga y descarga de la batería. Por lo que se realizan pruebas a cada interruptor verificándose que para un nivel de corriente ajustado de 850 mA se activa la señal de falla y se desactivan estos interruptores. La [Figura 5.9](#) muestra los resultados de las pruebas realizadas, el interruptor de carga se muestra en figura del lado izquierdo y el de descarga del lado derecho. El trazo azul es la tensión del bus de energía principal, amarillo es tensión de batería y púrpura es señal de falla del interruptor que se activa en bajo.

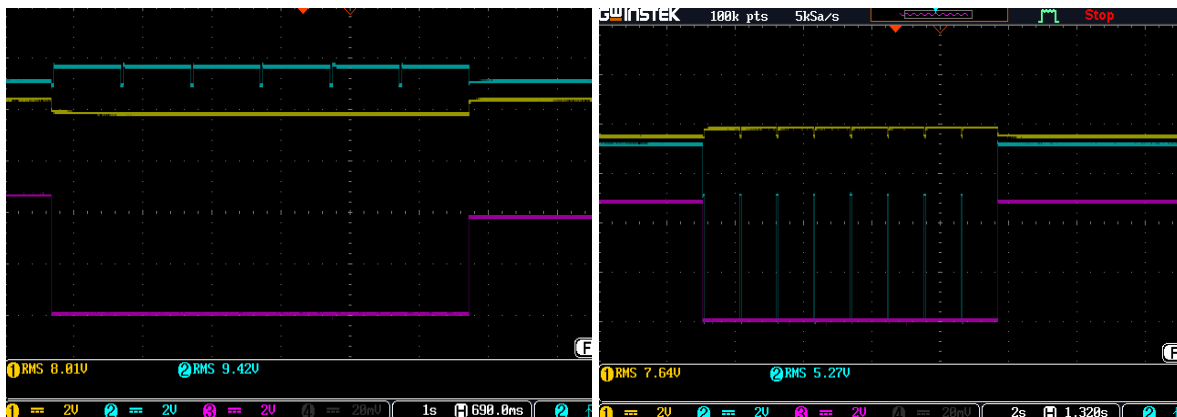


Figura 5.9 Prueba de interruptores de carga y descarga de baterías.

Se puede observar que, al estar configurados para funcionar en modo de reinicio automático, aproximadamente cada 980 ms estos se vuelven a activar y se revisa nuevamente el nivel de corriente. En caso de permanecer el estado de sobrecarga o cortocircuito, se vuelven a desconectar hasta que se elimine esta condición.

Según revisión de hojas de datos [57], [64] de los interruptores electrónicos y diodos utilizados; la resistencia de encendido de los interruptores $R_{DS(on)}$ es de $200\text{m}\Omega$ y la caída de tensión en directa de los diodos $V_f = 0.3\text{V}$. Se mide la caída de tensión entre el bus de energía principal y el de baterías, resultando ser un valor de tensión igual a 0.6V para el máximo valor de corriente permitido de 800mA . Para estos niveles de tensión y corriente, se calculan entonces las potencias de entrada y salida determinándose una eficiencia de 92% para esta máxima corriente, que sería el peor caso.

5.1.5 Pruebas a sistema de MPPT

Se realizan pruebas que permitan comprobar la eficiencia de los convertidores SEPIC que interviene en el sistema de MPPT, para lo cual se mide tensión y corriente a la entrada y la salida del convertidor para obtener las potencias y poder calcular la eficiencia. Durante las primeras pruebas realizadas no se logra un funcionamiento en modo sincrónico del sistema, debido a que las señales que se obtienen desde el procesador, y que manejan las compuertas de los MOSFET, no poseen un tiempo muerto entre ellas; por tanto, el sistema no funciona de manera correcta.

Se decide entonces utilizar el circuito integrado IR2111 que es un controlador de MOSFET de alta tensión y velocidad, con canales de salida dependientes diseñados para aplicaciones sincrónicas. La entrada lógica del mismo es compatible con salidas CMOS estándar y este proporciona un tiempo muerto interno para evitar la conducción simultánea de los MOSFET. Este integrado se utiliza para controlar el MOSFET de potencia de canal N[65]

La [Figura 5.10](#) muestra las curvas de tensión de entrada y salida del convertidor, así como la tensión de las baterías.

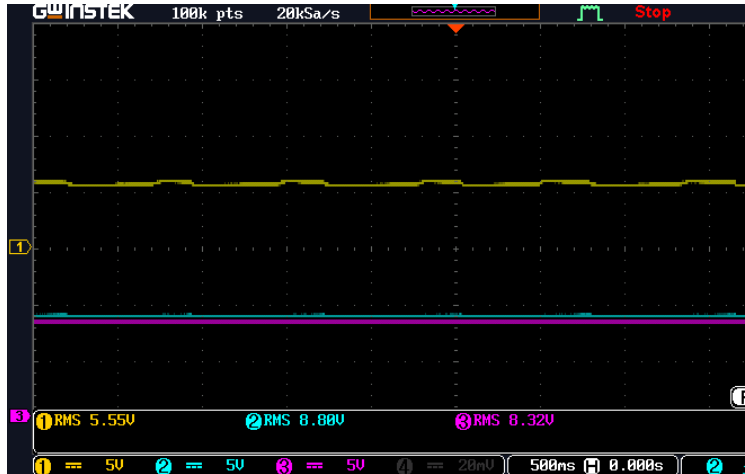


Figura 5.10 Comportamiento de convertidor MPPT

Se realizan pruebas utilizando este integrado donde se verifica un funcionamiento en modo sincrónico del convertidor y se lleva a cabo un análisis de la eficiencia a diferentes niveles de potencia; los resultados obtenidos se muestran en la [Figura 5.11](#).

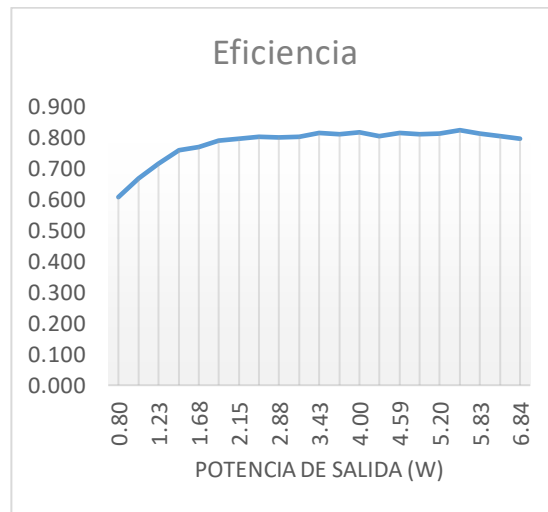


Figura 5.11 Comportamiento de eficiencia del convertidor MPPT.

Se realiza una prueba donde se mantiene constante un nivel de potencia, determinado mediante el ajuste de la fuente de potencia utilizada en las pruebas. Para lo cual el ciclo de trabajo de nuestro convertidor debe mantenerse oscilando en un mismo punto. Desde la placa de evaluación Tiva™ serie C LaunchPad TM4C123G se envía a la PC por comunicación serie la información del ciclo de trabajo para ser visualizado en una consola serial. La [Figura 5.12](#) muestra los datos capturados por dicha consola, así como unos gráficos de los datos obtenidos.

```

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.74
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.82

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.75
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.83

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.76
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.84

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.75
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.83

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.74
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.82

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.75
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.83

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.76
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.84

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.75
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.83

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.74
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.82

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.75
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.81

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.76
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.82

```

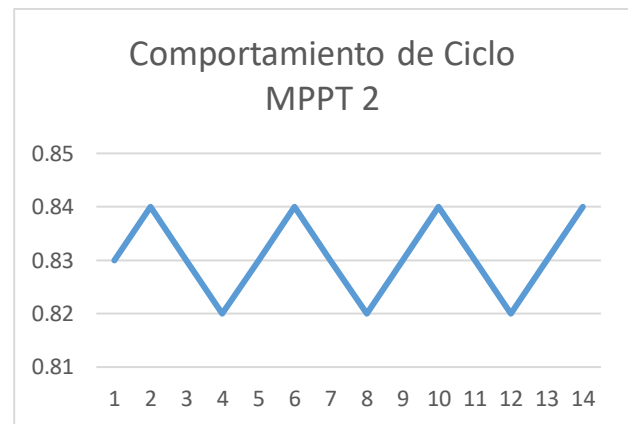
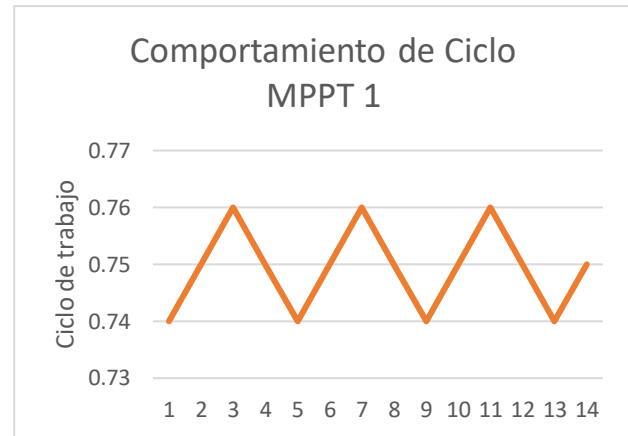


Figura 5.12 Comportamiento de ciclo de trabajo en convertidor de MPPT.

Según se puede apreciar en la [Figura 5.12](#), el ciclo de trabajo para el cual se obtiene la máxima potencia, dadas las condiciones de simulación a través de la fuente de potencia, es 0.75 para el sistema MPPT_1 y 0.83 para el MPPT_2; pues sobre estos valores es que oscilan los cambios del ciclo de trabajo.

5.1.6 Pruebas a sistema de paneles solares

Es necesario comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control de flujo de potencia o sistema simulador de diodo ideal. Para esto mediante la utilización de la fuente de potencia de dos canales, con ajuste de tensión y corriente se aplica tensión a las entradas del sistema para simular los paneles solares.

Se aplica tensión solo a una de las entradas, lo cual simula el caso de un panel iluminado y el otro en eclipse; por lo cual esta entrada ofrece energía al sistema y no fluye energía

hacia la otra entrada. En la [Figura 5.13](#) se muestra la tensión de entrada y la corriente que se entrega.



Figura 5.13 Equipo utilizado para simular un diodo ideal.

Mediante el ajuste de corriente de la fuente de alimentación se varía la potencia de cada entrada, lo cual varía la potencia que entrega al sistema. Esto simula que ambos paneles conectados al sistema de MPPT estén recibiendo radiación. En la [Figura 5.14](#) se muestran los niveles de corriente que entrega la fuente de alimentación en cada canal.

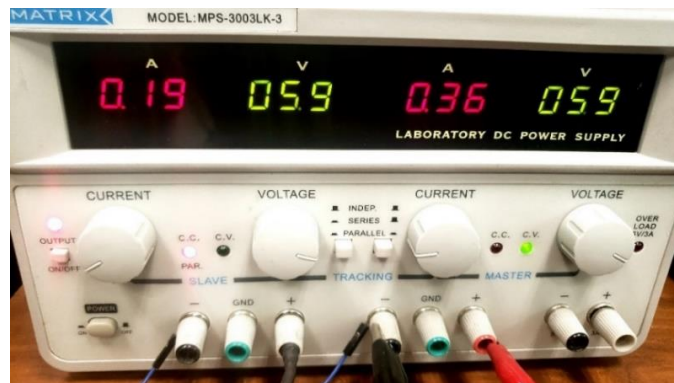


Figura 5.14 Simulación de ambos paneles recibiendo radiación.

5.2 Resultados

Luego de realizadas las pruebas a cada módulo que conforma el sistema de potencia desarrollado, se obtienen y exponen los siguientes resultados.

5.2.1 Eficiencia total del sistema de potencia.

Como resultado de las pruebas realizadas se definen las eficiencias de cada una de las etapas que conforman el sistema de potencia. Se tiene en cuenta las pérdidas en el sistema de almacenamiento y los convertidores; mientras que las ocurridas en los

interruptores electrónicos utilizados en las etapas de distribución se desprecian, debido a que los mismos manejan niveles de corriente bajos y la resistencia de encendido de estos interruptores es baja; entre 80 mΩ y 100 mΩ. La [Figura 5.15](#) muestra el esquema de distribución de potencia del sistema para los valores nominales de tensión de la batería.

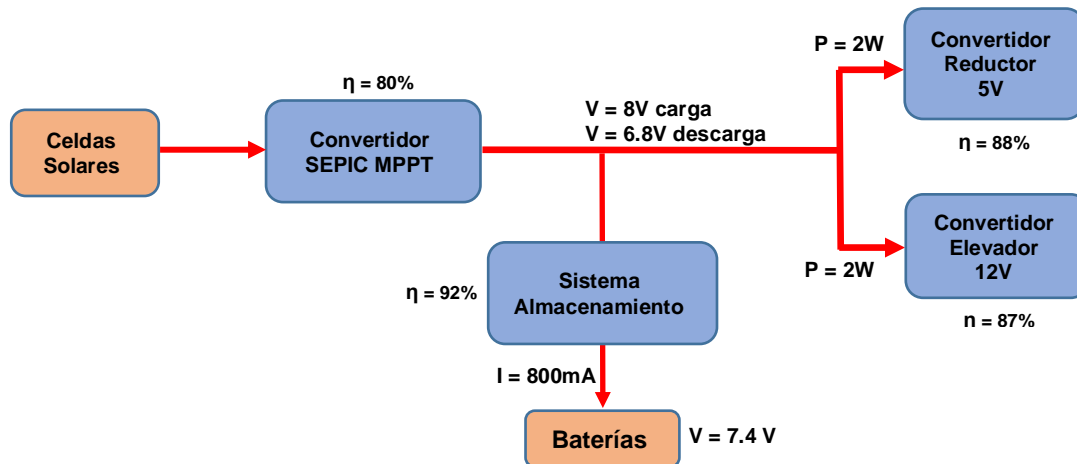


Figura 5.15 Eficiencia obtenida.

Según el esquema mostrado anteriormente, se calcula que la eficiencia total de sistema de potencia es de 70% en el caso que las cargas se alimenten desde los paneles solares; en el caso de alimentación desde las baterías la eficiencia del sistema es 80.5%. Mientras que la eficiencia con que los paneles solares cargan las baterías es de 73%.

En el diseño inicial se supone una eficiencia de 90% en el regulador SEPIC mientras que las pruebas realizadas muestran valores de 80% de eficiencia lo cual implica un mayor tiempo necesario para cargar las baterías.

5.2.2 Datos de información del sistema.

Se realiza una prueba general y mediante los datos que son enviados de manera serial desde el procesador que gestiona el sistema, se pueden obtener la información de funcionamiento y comportamiento del sistema. La [Figura 5.16](#) muestra los datos obtenidos y que se visualizan mediante una consola serial en una computadora.

COM3

```
Tension MPPT1: 3.13V
I MPPT1: 688.50mA
Tension MPPT2: 3.17V
I MPPT2: 622.29mA

Potencia MPPT1 anterior: 1.78 W
Potencia MPPT1 actual: 2.16 W
Potencia MPPT2 anterior: 1.52 W
Potencia MPPT2 actual: 1.97 W

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.70
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.80

V bateria: 8.17V
I bateria: 403.49mA
I 5V: 0.81mA
I 12V: 0.00mA
MODO OPERACION: EN ESPERA
CARGANDO BATERIA
```

COM3

```
Tension MPPT1: 0.40V
I MPPT1: 0.00mA
Tension MPPT2: 0.25V
I MPPT2: 3.19mA

Potencia MPPT1 anterior: 0.01 W
Potencia MPPT1 actual: 0.00 W
Potencia MPPT2 anterior: 0.04 W
Potencia MPPT2 actual: 0.00 W

Ciclo de trabajo MPPT1: 0.50
Ciclo de trabajo MPPT2: 0.90

V bateria: 7.08V
I bateria: 42.01mA
I 5V: 30.2mA
I 12V: 10.76mA
MODO OPERACION: ACTIVO
DESCARGANDO BATERIA
```

Figura 5.16 Datos del sistema obtenidos en consola serial.

Conclusiones

Con la realización de este trabajo se brindan las siguientes conclusiones.

- Se estableció que la arquitectura más apropiada para esta aplicación era la de seguimiento del punto de máxima potencia, ya que brinda el mejor aprovechamiento de la radiación solar que recibe el nanosatélite.
- Se cuenta con un subsistema de potencia para un nanosatélite Cubesat 3 U que entrega voltajes regulados de 5 y 12 volts con una potencia de 2 watts cada uno.
- Se obtuvieron mediante simulación los parámetros óptimos para implementar el algoritmo de Perturbación y Observación para una determinada variación de la radiación incidente en los paneles solares del satélite según una órbita definida.
- Se calculó un presupuesto de energía teniendo en cuenta los requisitos de potencia de los sistemas que conforman el satélite y la eficiencia teórica de los convertidores propuestos a utilizar.
- Se realizó el diseño del sistema de potencia teniendo en cuenta diferentes módulos; paneles solares y MPPT, almacenamiento de energía, convertidores reguladores de tensión, distribución de energía y protección, así como monitoreo y gestión del sistema.
- Se seleccionaron componentes comerciales para la implementación del sistema de potencia, se realizó el diseño y se desarrollaron 2 tarjetas que cumplen con las dimensiones del estándar Cubesat.
- Se realizaron pruebas que permitieron comprobar el correcto funcionamiento del sistema de potencia.

Recomendaciones

- Se propone realizar el diseño de la PCB del sistema de potencia incorporando el procesador TM4C123GH6PMI en la misma PCB.
- Agregar en el diseño de la PCB el circuito integrado IR2111 para con este manejar las señales de compuerta de los MOSFET que intervienen en el convertidor de MPPT para lograr que funcione de manera sincrónica.
- Se recomienda utilizar circuitos integrados de convertidores analógicos digitales para realizar las mediciones de tensión y corriente en lugar de realizarlas directamente a través de puertos del procesador para de esta manera poder tomar mediciones en más puntos del sistema de potencia.
- Realizar pruebas de compatibilidad electromagnética al sistema propuesto y rediseñar el sistema según los resultados de estas pruebas.
- Se recomienda para futuras versiones agregar y tener en cuenta criterios de redundancia ante fallas en el diseño.

Referencias

- [1] E. Agasid, R. Burton, R. Carlino, G. Defouw, and A. Dono Perez, "Small Spacecraft Technology State of the Art," ed. Moffett Field, California: National Aeronautics and Space Administration, 2015.
- [2] L. M. Buenrostro Dominguez, "Fuente de energia electrica para un satelite pequeño," Maestría Tesis de Maestría, Instituto de Geografía, Universidad Autonoma de Mexico, Ciudad de Mexico, 2013.
- [3] R. Munakata, "Cubesat Design Specification," Rev. 12 ed. Cal Poly SLO: The Cubesat Program, 2009.
- [4] A. Mehrparvar, "CubeSat Design Specification," Rev.13 ed. Cal Poly SLO: The CubeSat Program, 2014.
- [5] M. R. Patel, *Spacecraft power systems*: CRC press, 2004.
- [6] S. S. Arnold, R. Nuzzaci, and A. Gordon-Ross, "Energy budgeting for CubeSats with an integrated FPGA," in *2012 IEEE Aerospace Conference*, 2012, pp. 1-14.
- [7] C. Chatwin, "Satellite & Space Systems – Electrical Power Systems," ed. UNIVERSITY OF SUSSEX UNIVERSITY OF SUSSEX SCHOOL OF ENGINEERING & INFORMATICS, 2017.
- [8] H. Y. Tada, J. R. Carter, Jr., B. E. Anspaugh, and R. G. Downing, *Solar cell radiation handbook*, Tercera Edicion ed. United States: National Aeronautics and Space Administration, 1982.
- [9] M. J. L. Tamasi, "Celdas solares para uso espacial: optimización de procesos y caracterización," Doctor en Ciencia y Tecnología Doctoral, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN, Buenos Aires, Argentina, 2003.
- [10] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John wiley & sons, 2006.
- [11] M. P. Barrera, "Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales," *Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica. Instituto de tecnología. República de Argentina*, 2009.
- [12] M. A. Green, "Solar cells: operating principles, technology, and system applications," 1982.
- [13] A. A. Joseph and A. M. Nicole, "AN MPPT CHARGE CONTROLLER FOR SOLAR POWERED PORTABLE DEVICES," ed: WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE 2017.
- [14] P. S. Padma, A. Radhika, and V. T. Deepika, "MPPT and SEPIC based controller development for energy utilisation in cubesats," in *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2012, pp. 143-148.
- [15] M. Molina, P. Mercado, and P. Wiernes, "Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina*, vol. 11, 2007.

- [16] H. J. El-Khozondar, R. J. El-Khozondar, K. Matter, and T. Suntio, "A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms," *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 3, p. 3, 2016/02/18 2016.
- [17] V. Kumaresh, M. Mridul, N. Ramakrishna, and R. SaravanaPrabu, "Literature Review on Solar MPPT Systems," *Advance in Electronic and Electric Engineering*, vol. 4, pp. 285-296, 2014.
- [18] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.
- [19] N. A. Kamarzaman and C. W. Tan, "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 585-598, 2014.
- [20] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, and A. Lázaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, 2006/07/06/ 2006.
- [21] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 47-62, 01 / 01 / 2003.
- [22] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, *A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems* vol. 45, 2015.
- [23] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, pp. 59-64, 1995.
- [24] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook* 3ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [25] J. M. Drake Moyano, "Referencias de tensión y reguladores de tensión," ed. Santander: Universidad de Cantabria, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN, 2005.
- [26] E. Coates. (2017, 23/10/18). *Switched Mode Power Supplies*. Available: <http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu30.php>
- [27] M. E. Basoglu and B. Çakir, "Hardware based comparison of buck-boost converter topologies in MPPT systems," in *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2015, pp. 1109-1112.
- [28] J. A. Villanueva Loreda, "REGULADOR DE VOLTAJE BASADO EN UN CONVERTIDOR SEPIC CON UNA CELDA DE INDUCTORES CONMUTADOS," Maestro en Control y Sistemas Dinámicos Maestría, Laboratorio de Procesamiento Eficiente de Energía de la División de Matemáticas Aplicadas INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C., San Luis Potosí, 2018.
- [29] J. A. Flórez Montero, "MODELADO, DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR CC-CC SEPIC PARA SU UTILIZACIÓN EN SISTEMAS PORTÁTILES (PDAs)," ed. Universidad Carlos III de Madrid. España: Departamento de Tecnología Electrónica, 2013.
- [30] R. A. Nelson, "Spacecraft Battery Technology," *Via Satellite*, vol. 97, p. 53, 1999.

- [31] C. A. Hill, "Satellite battery technology; A tutorial and overview," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 26, pp. 38-43, 2011.
- [32] Cadex Electronics Inc. (2018, 25 marzo 2018). *BU-409: Charging Lithium-ion*. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries/1
- [33] Cadex Electronics Inc. (2018, 26 marzo 2018). *BU-501a: Discharge Characteristics of Li-ion*. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li/1
- [34] Cadex Electronics Inc. (2018, 26 marzo 2018). *BU-503: Cómo calcular el tiempo de ejecución de la batería*. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li/1
- [35] Y. Borthomieu, "Satellite Lithium-Ion Batteries " in *Lithium-Ion Batteries*, ed Amsterdam: Elsevier, 2014, pp. 311-344.
- [36] AZUR SPACE Solar Power GmbH, "30% Triple Junction GaAs Solar Cell Type: TJ Solar Cell 3G30C-Advanced," ed. Heilbronn, Alemania, 2016, p. 2.
- [37] M. Diaz-Aguado, J. Greenbaum, W. Fowler, and G. Lightsey, "Small satellite thermal design, test, and analysis," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 05/05 2006.
- [38] K. E. Boushon, "Thermal Analysis and Control of Small Satellites in Low Earth Orbit," M.S. in Aerospace Engineering, Mechanical and Aerospace Engineering, Missouri University of Science and Technology, 2018.
- [39] C. John and E. Keesee, "Spacecraft Thermal Control Systems," 09/06 2019.
- [40] B. S. Kim, "Rechargeable Lithium Ion Battery Model : ICR18650 S3 2200mAh," ed. Seoul Korea, 2007.
- [41] Ukai, "Pilas y baterías industriales," Ukai S. A., Ed., 7 Edición ed. España, 2018.
- [42] Fullwat, "LIR14500-8," vol. 2018, ed: FULLWAT, 2018.
- [43] GomSpace, "NanoPower P31u," 30 enero 2019 ed. Langagerve, Dinamarca: GomSpace, 2019.
- [44] M. Pajusalu, E. Ilbis, T. Ilves, M. Veske, J. Kalde, H. Lillmaa, *et al.*, "Design and pre-flight testing of the electrical power system for the ESTCube-1 nanosatellite," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 63, p. 232, 2014.
- [45] A. García-Hidalgo Baeza, "Diseño del sistema de potencia para un satélite de órbita baja(LEO) = Design of a Low Earth Orbit (LEO) satellite power subsystem," ed: E.U.I.T. Aeronáuticos (UPM), 2013.
- [46] J. E. SALAMANCA, J. CASTRO AVELLANEDA, and A. GRAJALES HENRÍQUEZ, "Diseño e implementación de un módulo de gestión de energía para un pico-satélite tipo CUBESAT," *Tecnura*, vol. 16, pp. 55-67, 2012.
- [47] J. Castro Avellaneda, A. Grajales Henríquez, and J. E. Salamanca Céspedes, "Módulo de potencia para un picosatélite experimental tipo Cubesat. ," *Power module for an experimental picosatellite Cubesat type. (English)*, vol. 7, p. 67, 01/ene-jun2016 2016.
- [48] Texas Instruments Incorporated, "Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board User's Guide," Texas Instruments Incorporated, Ed., ed. Dallas, Texas; USA, 2013.

- [49] Texas Instruments Incorporated, "Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller Datasheet," ed. Dallas, Texas; USA, 2014.
- [50] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Perturb and observe MPPT technique robustness improved," in *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004, pp. 845-850 vol. 2.
- [51] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Increasing the efficiency of P&O MPPT by converter dynamic matching," in *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004, pp. 1017-1021 vol. 2.
- [52] L. Shengyi and R. A. Dougal, "Dynamic multiphysics model for solar array," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, pp. 285-294, 2002.
- [53] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, "LTC4352 Low Voltage Ideal Diode Controller with Monitoring," ed. USA, 2008.
- [54] Diodes Incorporated, "DMG6968U N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE MOSFET," Diodes Incorporated, Ed., Rev. 7 - 2 ed: Mouser Electronics, 2017.
- [55] VISHAY INTERTECHNOLOGY INC, "Si4850EY," ed: VISHAY INTERTECHNOLOGY INC,, 2009.
- [56] Diodes Incorporated, "DMN6040SSD DUAL N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE MOSFET," Diodes Incorporated, Ed., Rev. 5 - 2 ed: Mouser Electronics, 2016.
- [57] Texas Instruments Incorporated, "TPS1H200A-Q1 40-V 200-mΩ Single-Channel Smart High-Side Switch," ed. USA, 2018.
- [58] Texas Instruments Incorporated, "LMR33620 SIMPLE SWITCHER 3.8-V to 36-V, 2-A Synchronous Step-Down Voltage Converter," Texas Instruments Incorporated, Ed., SNVSAW1A ed. Dallas, Texas; USA, 2018.
- [59] Texas Instruments Incorporated, "LM2733 0.6 and 1.6-MHz Boost Converters With 40-V Internal FET Switch in SOT-23," Texas Instruments Incorporated, Ed., SNVS209F ed. Dallas, Texas; USA, 2014.
- [60] Texas Instruments Incorporated, "TPS2551-Q1 ADJUSTABLE CURRENT-LIMITED POWER-DISTRIBUTION SWITCH," Texas Instruments Incorporated, Ed., ed. Dallas, Texas, 2008.
- [61] Fairchild Semiconductor Corporation, "FPF2100-2107 Full Function Load Switches," Fairchild Semiconductor Corporation, Ed., Rev. H ed. Aurora, Colorado; USA, 2008.
- [62] Silicon Laboratories Inc, "TS1101 A 1μA, +2V to +25V Bidirectional Precision Current-Sense Amplifier," Silicon Laboratories Inc, Ed., Rev. 1.0 ed. Austin; USA, 2014.
- [63] A. D. I. Y. T. SAS. (2019, 11/04/19). *NORMAS PARA DISEÑAR PCB – CIRCUITOS IMPRESOS Y ELECTRÓNICA*. Available: <https://www.aldelta.com.co/blog-diseno-con-normas-y-certificaciones/normas-pcb-y-electronica/>
- [64] Microsemi, "Ultra Low Forward Voltage Schottky Diode LSM115J," ed. Broomfield, Colorado: Microsemi,, 2000.
- [65] I. I. Rectifier, "IR2111 HALF-BRIDGE DRIVER," I. I. Rectifier, Ed., ed. Kansas St, California: MOUSER, 2004.

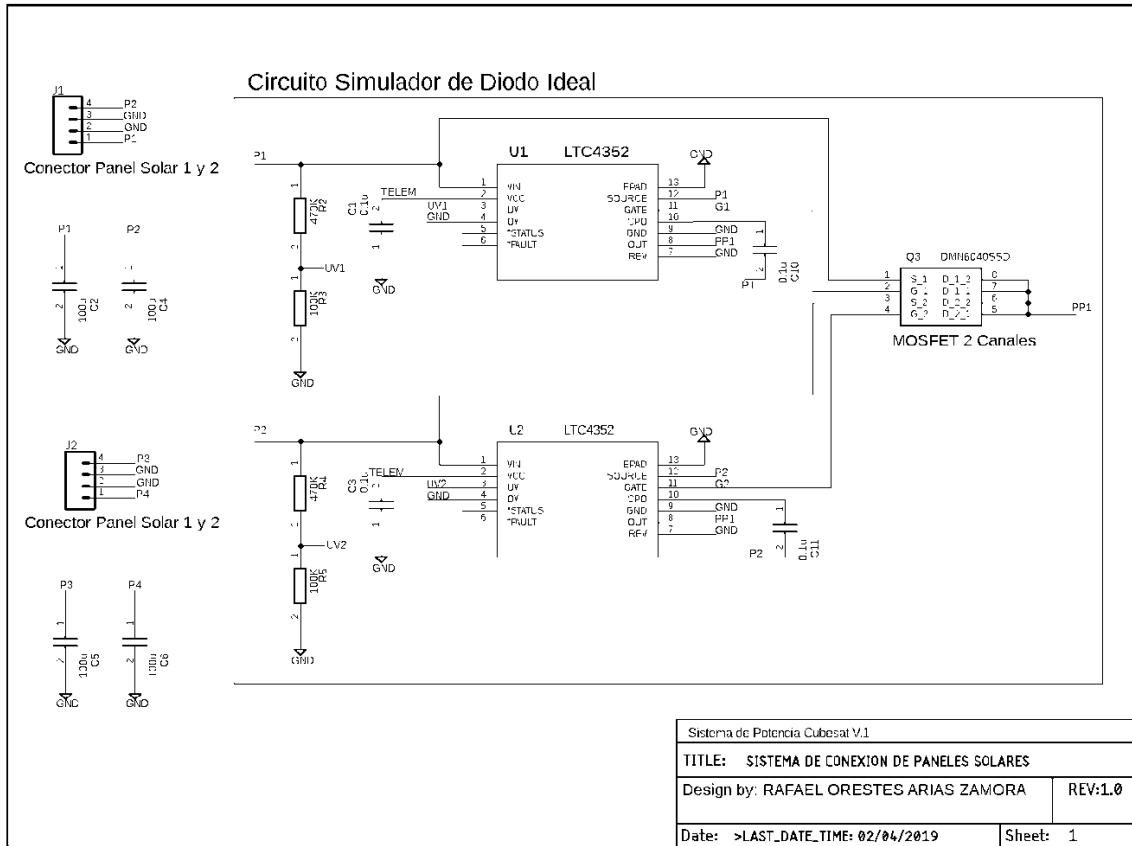
ANEXO 1. Código en Matlab de bloque MPPT

```

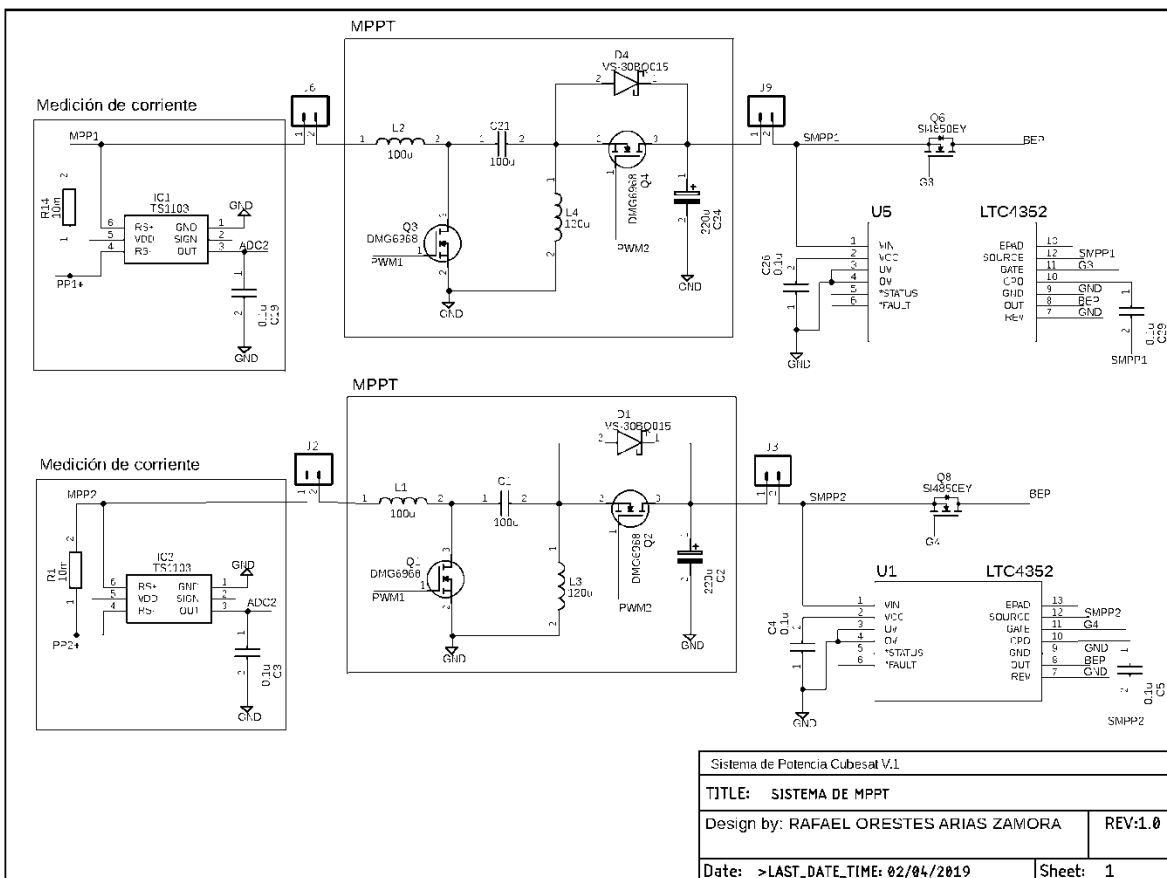
function [D, P] = fun (Ipv, Vpv)
    %#codegen
    % *****
    % MATLAB implementation of a Perturb and Observe algorithm
    % for Maximum Power Point Tracking. This algorithm is designed
    % to operate with a buck converter
    %
    % Created by: Carlos Osorio
    % *****
    % Define internal values for the voltage and power as persistent
    % variables
    persistent Dprev Pprev Vprev Cont dD
    % Initialize the internal values for the voltage and power on the
    % first pass
    if isempty(Dprev)
        Dprev = 0.6;
        Vprev = 0;
        Pprev = 0;
        Cont = 0;
        dD = 0.01;
    end
    % Initialize algorithm parameters
    D = Dprev;
    P = Pprev;
    if Cont < 50000
        Cont = Cont + 1;
        P = Vpv*Ipv;
    end
    if Cont == 50000
        Cont = 0;
        P = Vpv*Ipv;
        % Increase or decrease duty cycle based on conditions
        if (P-Pprev) == 0
            Pprev = P;
        elseif (P-Pprev) < 0
            dD = -dD;
        end
        D = D + dD;
        Pprev = P;
        Dprev = D;
    end
end
end

```

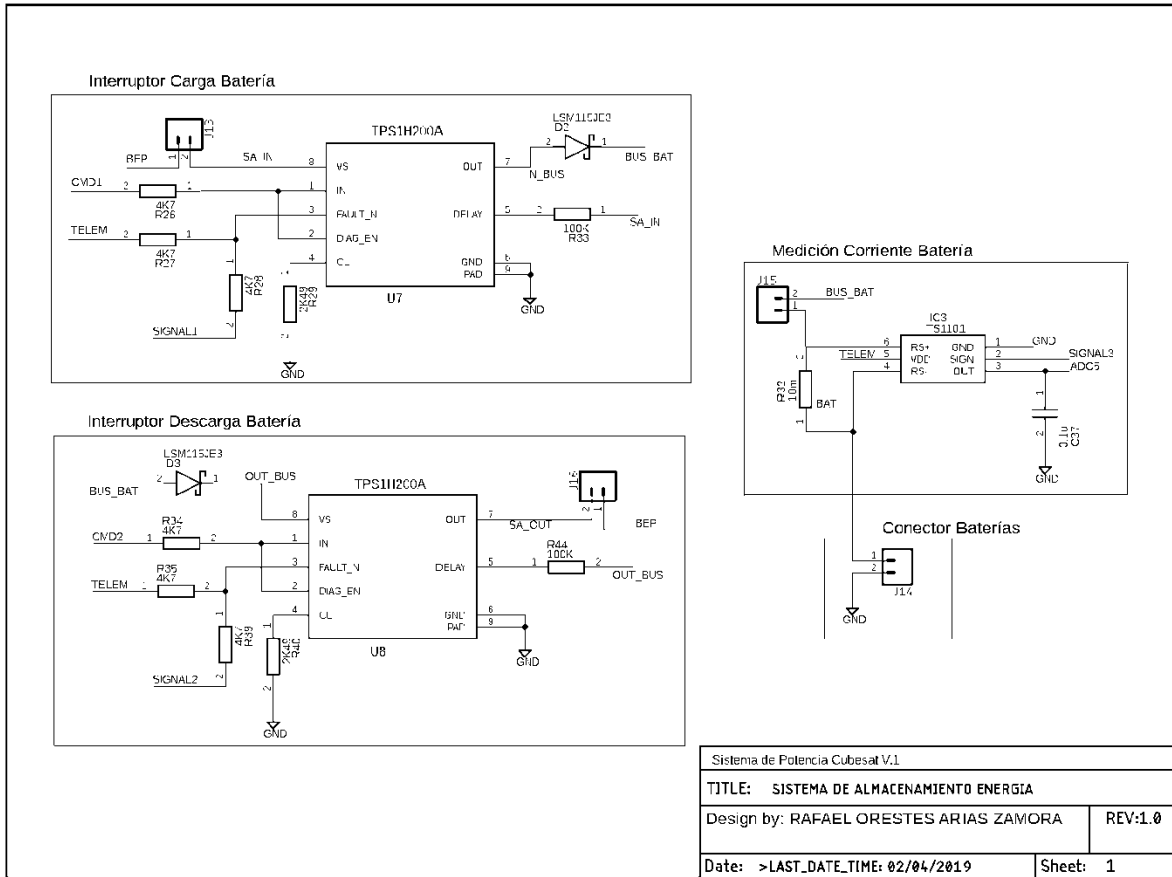
ANEXO 2. Esquema electrónico de sistema de conexión de paneles solares



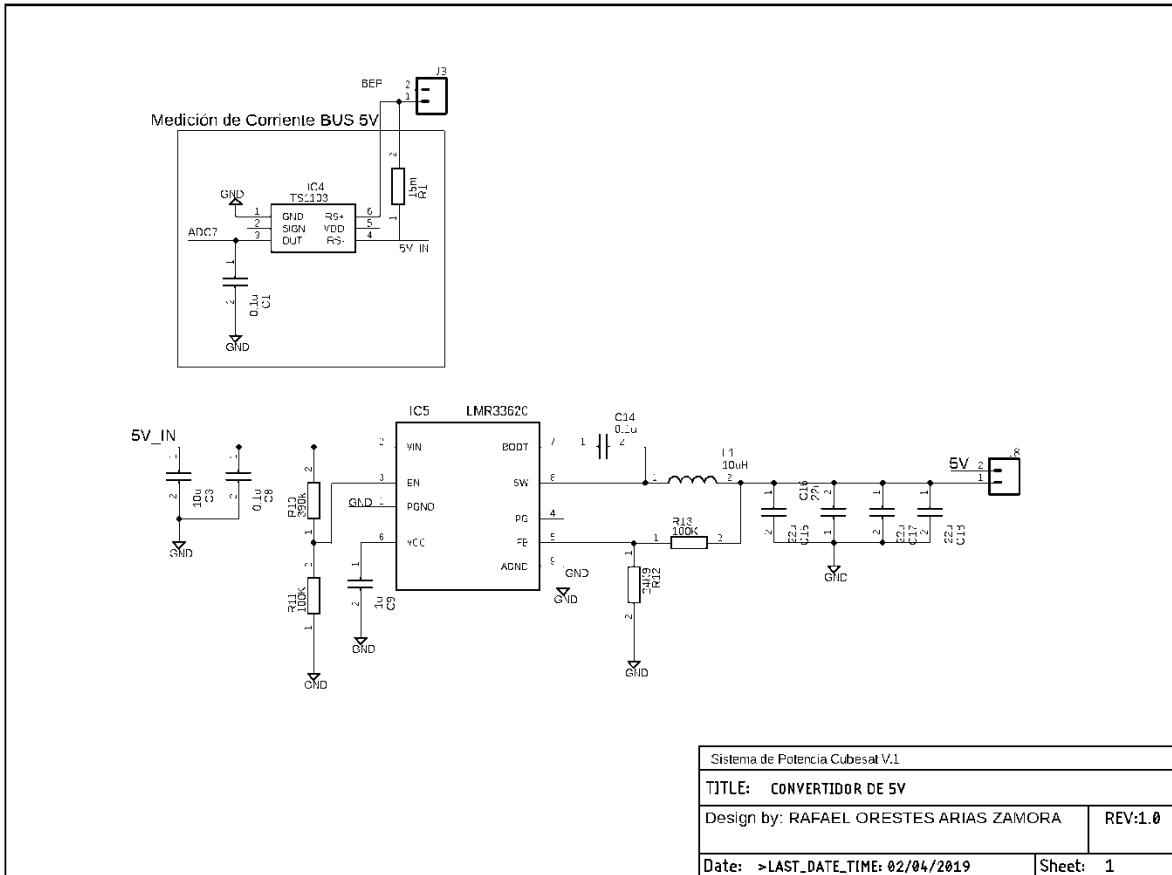
ANEXO 3. Esquema electrónico de sistema de MPPT



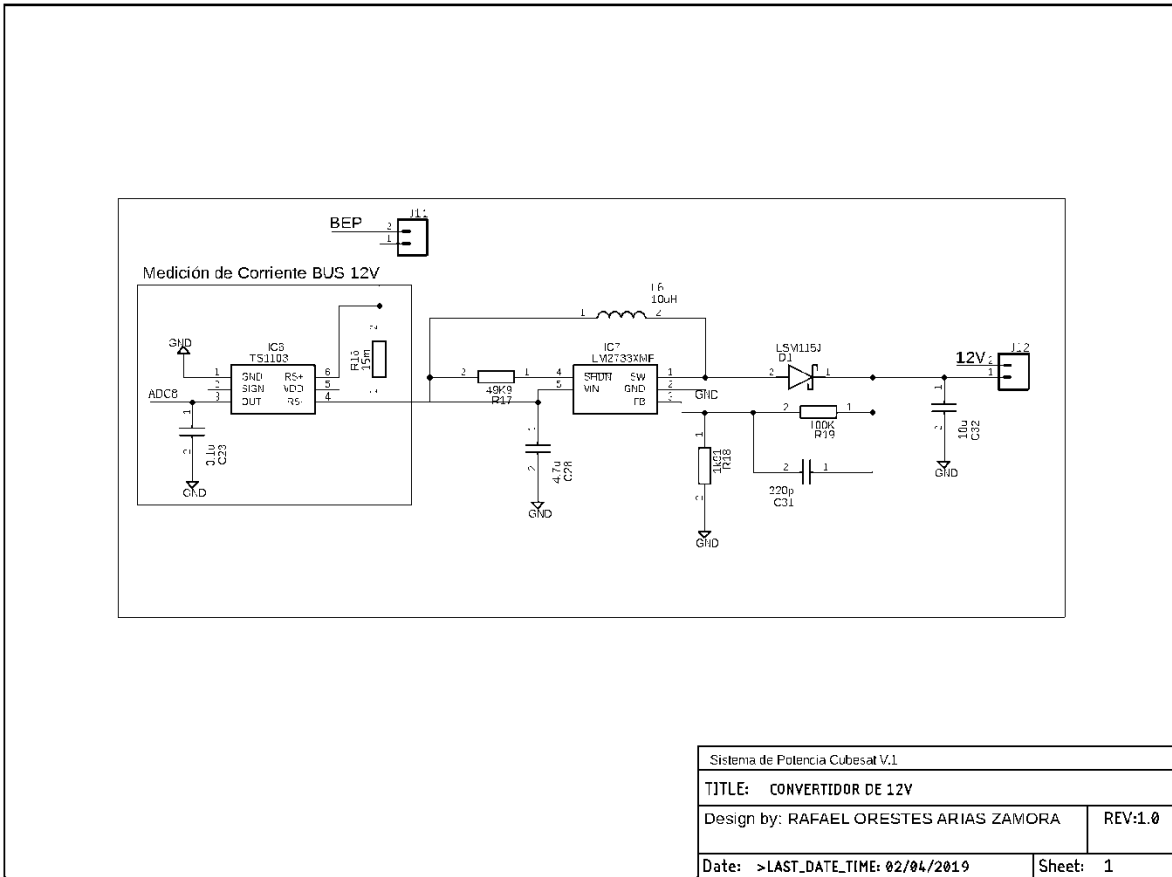
ANEXO 4. Esquema electrónico de sistema de almacenamiento de energía



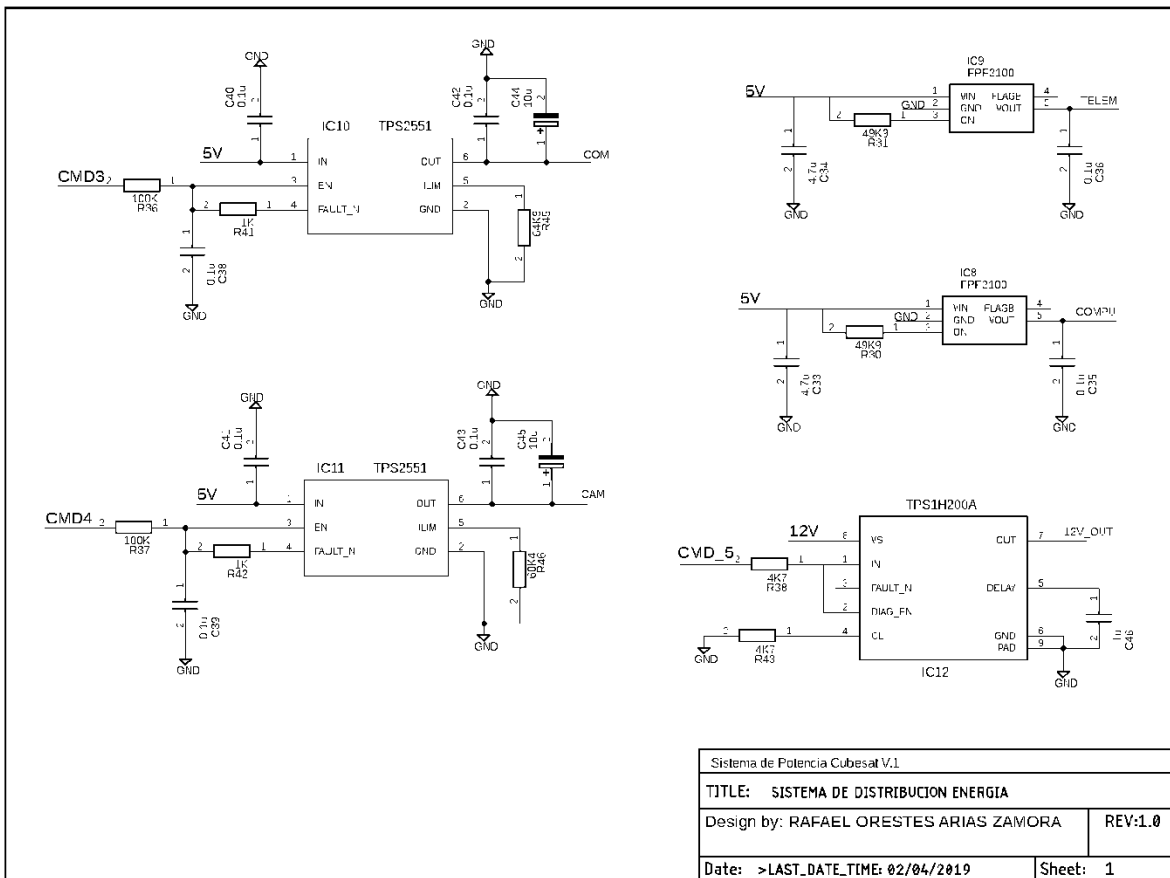
ANEXO 5. Esquema electrónico de sistema de convertidores de 5V



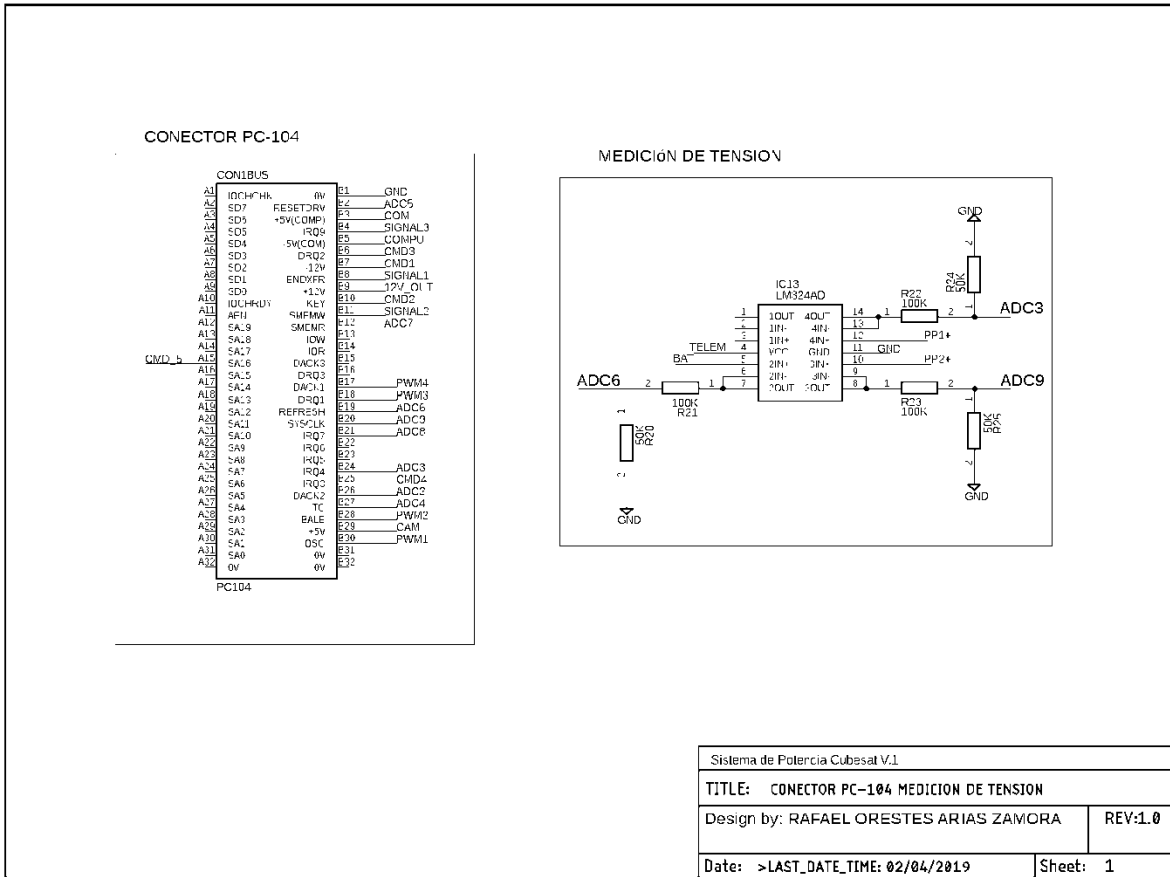
ANEXO 6. Esquema electrónico de sistema de convertidores de 12V



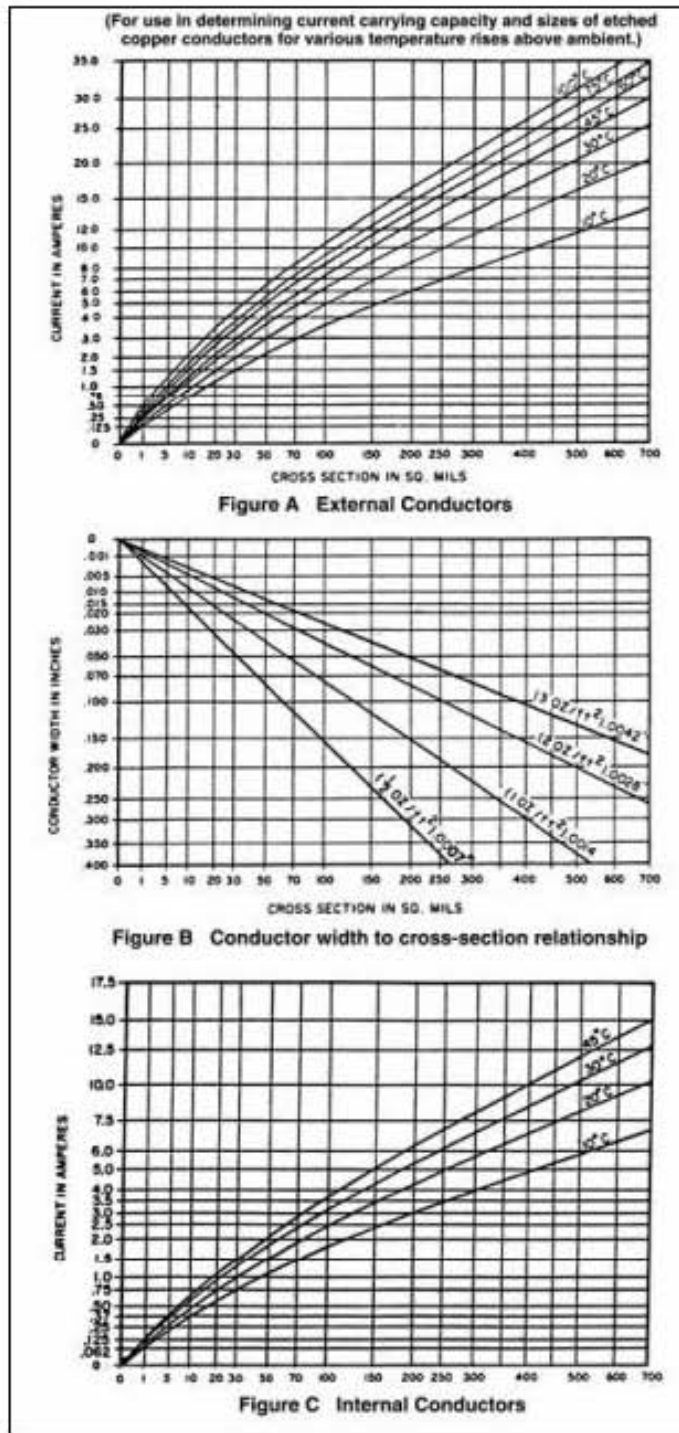
ANEXO 7. Esquema electrónico de sistema de distribución de energía



ANEXO 8. Esquema electrónico de conector PC-104 y medición de tensión



ANEXO 9. Grosor de pistas de PCB en relación a corriente y temperatura



ANEXO 10. Separación de conductores eléctricos

| Voltage Between Conductors (DC or AC Peaks) | Minimum Spacing | | | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Bare Board | | | | Assembly | | |
| | B1 ¹ | B2 | B3 | B4 | A5 | A6 | A7 |
| 0-15 | 0.1 mm [0.004 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] |
| 16-30 | 0.1 mm [0.004 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.25 mm [0.00984 in] | 0.13 mm [0.00512 in] |
| 31-50 | 0.1 mm [0.004 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.13 mm [0.00512 in] |
| 51-100 | 0.1 mm [0.004 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 1.5 mm [0.0591 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.13 mm [0.00512 in] | 0.5 mm [0.020 in] | 0.13 mm [0.00512 in] |
| 101-150 | 0.2 mm [0.0079 in] | 0.64 mm [0.025 in] | 3.2 mm [0.126 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 0.4 mm [0.016 in] |
| 151-170 | 0.2 mm [0.0079 in] | 1.25 mm [0.0492 in] | 3.2 mm [0.126 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 0.4 mm [0.016 in] |
| 171-250 | 0.2 mm [0.0079 in] | 1.25 mm [0.0492 in] | 6.4 mm [0.252 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 0.4 mm [0.016 in] |
| 251-300 | 0.2 mm [0.0079 in] | 1.25 mm [0.0492 in] | 12.5 mm [0.4921 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.4 mm [0.016 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 0.8 mm [0.031 in] |
| 301-500 | 0.25 mm [0.00984 in] | 2.5 mm [0.0984 in] | 12.5 mm [0.4921 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 0.8 mm [0.031 in] | 1.5 mm [0.0591 in] | 0.8 mm [0.031 in] |
| >500 See para. 6.3 For calc. | 0.0025 mm/volt | 0.005 mm/volt | 0.025 mm/volt | 0.00305 mm/volt | 0.00305 mm/volt | 0.00305 mm/volt | 0.00305 mm/volt |

ANEXO 11. Líneas de código de programación del procesador

```
#include <gpio.h>
#include <hw_gpio.h>
#include <hw_memmap.h>
#include <pin_map.h>
#include <pwm.h>
#include <sysctl.h>

int cont_falla1 = 0;
int cont_falla2 = 0;
int ini = 0;           //variable para inicio de algoritmo de MPPT

float sensorValueV1, sensorValueV2, sensorValueV3;
float v1, v2, v3;
float sensorValueI1, sensorValueI2, sensorValueI3, sensorValueI4, sensorValueI5;

float i1, i2, i3, i4, i5;
float Pot_MPPT1, Pot_MPPT1_ant = 0, Pot_MPPT2, Pot_MPPT2_ant = 0;
int estado = 0;

int SIGNAL3 = 19;     //PB2 señal de direccion de corriente en bateria
int DIR_I_BAT = 0;
int SIGNAL1 = 14;     //PB6 señal de falla en interruptor carga bateria
int FALLA_CARGA = 1;
int SIGNAL2 = 34;     //PC7 señal de falla en interruptor descarga bateria
int FALLA_DESCARGA = 1;

int CMD1 = 15;        //PB7 comando de activacion de carga bateria
int CMD2 = 33;        //PD6 comando de activacion de descarga bateria
int CMD3 = 17;        //PF0 comando de activacion de alimentacion comunicaciones
int CMD4 = 10;        //PA7 comando de activacion de alimentacion camara
int CMD5 = 35;        //PC6 comando de activacion de alimentacion 12V control orientacion

float PER= 100, D1 = 65, D2 = 65, dD1 = 1 ,dD2 = 1 , ciclo1, ciclo2;    //ciclo de trabajo y variacion de ciclo de trabajo
void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  pinMode(SIGNAL3, INPUT);
  pinMode(SIGNAL1, INPUT);
  pinMode(SIGNAL2, INPUT);

  pinMode(CMD1, OUTPUT);
  pinMode(CMD2, OUTPUT);
  pinMode(CMD3, OUTPUT);
  pinMode(CMD5, OUTPUT);
  pinMode(CMD4, OUTPUT);

  digitalWrite(CMD1, HIGH);    //habilitacion interruptor de carga
  digitalWrite(CMD2, HIGH);    //habilitacion interruptor de descarga

  //configuracion de PWM-----
  SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF);
  SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_PWM1);

  SysCtlPWMClockSet(SYSCTL_PWMDIV_8);    //reloj 80MHz / 8 = 10MHz

  HWREG(GPIO_PORTF_BASE + GPIO_O_LOCK) = GPIO_LOCK_KEY;
  HWREG(GPIO_PORTF_BASE + GPIO_O_CR) |= 0x01;

  GPIOPinConfigure(GPIO_PF1_M1PWM5);    //PWM1 pin PF1
  GPIOPinConfigure(GPIO_PF2_M1PWM6);    //PWM3 pin PF2

  GPIOPinTypePWM(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2);

  PWMGenConfigure(PWM1_BASE, PWM_GEN_2, PWM_GEN_MODE_DOWN |    // para modulo PWM1 pines 4 y 5
  PWM_GEN_MODE_NO_SYNC);
  PWMGenConfigure(PWM1_BASE, PWM_GEN_3, PWM_GEN_MODE_DOWN |    // para modulo PWM1 pines 6 y 7
```

```

PWM_GEN_MODE_NO_SYNC);

PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_5, D1); //configura ciclo trabajo
PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_6, D2); //configura ciclo trabajo

PWMGenEnable(PWM1_BASE, PWM_GEN_2); // para modulo PWM1 pines 4 y 5
PWMGenEnable(PWM1_BASE, PWM_GEN_3); // para modulo PWM1 pines 6 y 7

PWMOutputState(PWM1_BASE, ( PWM_OUT_5_BIT | PWM_OUT_6_BIT ), true);
//-----
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
delay (500);
sensorValueV1 = analogRead(26); //PD3 V bateria
sensorValueV2 = analogRead(27); //PE1 V MPPT2
sensorValueV3 = analogRead(29); //PE3 V MPPT1

sensorValueI1 = analogRead(2); //PB5 I bateria
sensorValueI2 = analogRead(18); //PE0 I 5V
sensorValueI3 = analogRead(28); //PE2 I 12V
sensorValueI4 = analogRead(7); //PB4 I MPPT1
sensorValueI5 = analogRead(6); //PE5 I MPPT2

DIR_I_BAT = digitalRead(SIGNAL3); //PB2 señal de direccion de corriente en bateria
FALLA_CARGA = digitalRead(SIGNAL1); //PB6 señal de falla en interruptor carga bateria
FALLA_DESCARGA = digitalRead(SIGNAL2); //PC7 señal de falla en interruptor descarga bateria

v1 = 3 * sensorValueV1 * (3.3 / 4095); // V BATERIA
v2 = 3 * sensorValueV2 * (3.3 / 4095); // V MPPT2
v3 = 3 * sensorValueV3 * (3.3 / 4096); // V MPPT1

i1 = sensorValueI1 * (3.3 / 4095); //I bateria
i2 = sensorValueI2 * (3.3 / 4095); //I 5V
i3 = sensorValueI3 * (3.1 / 4095); //I 12V
i4 = sensorValueI4 * (3.3 / 4095); //I MPPT1
i5 = sensorValueI5 * (3.3 / 4095); //I MPPT2

i1 = 1000 * i1 / 2; //I bateria
i2 = 1000 * i2 / 4; //I 5V
i3 = 1000 * i3 / 4; //I 12V
i4 = 990 * i4; //I MPPT1
i5 = 990 * i5; //I MPPT2

//secuencia al inicio del programa-----
if (ini == 0) {
Pot_MPPT1_ant = v3 * i4 / 1000;
Pot_MPPT2_ant = v2 * i5 / 1000;
Serial.println("INICIANDO PROGRAMA INICIANDO PROGRAMA ");
Serial.print("Tension MPPT1: ");
Serial.print(v3); Serial.println("V");
Serial.print("I MPPT1: ");
Serial.print(i4); Serial.println("mA");
Serial.print("Tension MPPT2: ");
Serial.print(v2); Serial.println("V");
Serial.print("I MPPT2: ");
Serial.print(i5); Serial.println("mA");
ciclo1=D1/100;
ciclo2=D2/100;
Serial.print("Potencia MPPT1 anterior: ");
Serial.print(Pot_MPPT1_ant); Serial.println(" W");
Serial.print("Potencia MPPT1 actual: ");
Serial.print(Pot_MPPT1); Serial.println(" W");
Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT1: ");
Serial.println(ciclo1);
Serial.print("Potencia MPPT2 anterior: ");

```

```

Serial.print(Pot_MPPT2_ant); Serial.println(" W");
Serial.print("Potencia MPPT2 actual: ");
Serial.print(Pot_MPPT2); Serial.println(" W");
Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT2: ");
Serial.println(ciclo2);
}
//secuencia luego de inicio del programa-----
if (ini == 1) {
    Pot_MPPT1 = v3 * i4 / 1000;
    Pot_MPPT2 = v2 * i5 / 1000;

    Serial.print("Tension MPPT1: ");
    Serial.print(v3); Serial.println("V");
    Serial.print("I MPPT1: ");
    Serial.print(i4); Serial.println("mA");

    Serial.print("Tension MPPT2: ");
    Serial.print(v2); Serial.println("V");
    Serial.print("I MPPT2: ");
    Serial.print(i5); Serial.println("mA");

    Serial.print("Potencia MPPT1 anterior: ");
    Serial.print(Pot_MPPT1_ant); Serial.println(" W");
    Serial.print("Potencia MPPT1 actual: ");
    Serial.print(Pot_MPPT1); Serial.println(" W");

    Serial.print("Potencia MPPT2 anterior: ");
    Serial.print(Pot_MPPT2_ant); Serial.println(" W");
    Serial.print("Potencia MPPT2 actual: ");
    Serial.print(Pot_MPPT2); Serial.println(" W");

// algoritmo para MPPT1 -----
    if (Pot_MPPT1 > (Pot_MPPT1_ant ))
    {
        Pot_MPPT1_ant = Pot_MPPT1;
        D1 = D1 + dD1;
        if (D1 > 90) { D1 = 90; }
        if (D1 < 10) { D1 = 10; }
    }
    else if (Pot_MPPT1 < (Pot_MPPT1_ant ))
    {
        Pot_MPPT1_ant = Pot_MPPT1;
        dD1 = -dD1;
        D1 = D1 + dD1;
        if (D1 > 90) { D1 = 90; }
        if (D1 < 10) { D1 = 10; }
    }
    else
    {
        D1 = D1 + dD1;
        if (D1 > 90) { D1 = 90; }
        if (D1 < 10) { D1 = 10; }
    }
}
//-----
// algoritmo para MPPT2 -----
    if (Pot_MPPT2 > ( Pot_MPPT2_ant ))
    {
        Pot_MPPT2_ant = Pot_MPPT2;
        D2 = D2 + dD2;
        if (D2 > 90) { D2 = 90; }
        if (D2 < 10) { D2 = 10; }
    }
    else if (Pot_MPPT2 <( Pot_MPPT2_ant ))
    {
        Pot_MPPT2_ant = Pot_MPPT2;
        dD2 = -dD2;
        D2 = D2 + dD2;
        if (D2 > 90) { D2 = 90; }
        if (D2 < 10) { D2 = 10; }
    }
}

```

```

else
{
  D2 = D2 + dD2;
  if (D2 > 90) { D2 = 90; }
  if (D2 < 10) { D2 = 10; }
}
//-----
ciclo1=D1/100;
ciclo2=D2/100;

Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT1: ");
Serial.println(ciclo1);
Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT2: ");
Serial.println(ciclo2);

}
//-----

Serial.print("V bateria: ");
Serial.print(v1); Serial.println("V");
Serial.print("I bateria: ");
Serial.print(i1); Serial.println("mA");
Serial.print("I 5V: ");
Serial.print(i2); Serial.println("mA");
Serial.print("I 12V: ");
Serial.print(i3); Serial.println("mA");

// actualiza salida de PWM -----
PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_5, D1);
PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_6, D2);
//-----
//secuencia de disminuir corriente de carga de bateria
m1:
if (i1 > 800) {
  if (DIR_I_BAT == HIGH) {
    Serial.println("SOBRECORRIENTE CARGA BATERIA");
    D1 = D1 - 1; //disminuye ciclo de trabajo MPPT_1
    D2 = D2 - 1; //disminuye ciclo de trabajo MPPT_2
    if (D1 < 10) { D1 = 10; }
    if (D2 < 10) { D2 = 10; }
    //actualiza salida de PWM -----
    PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_5, D1);
    PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_6, D2);
    ciclo1=D1/100;
    ciclo2=D2/100;
    Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT1: ");
    Serial.println(ciclo1);
    Serial.print("Ciclo de trabajo MPPT2: ");
    Serial.println(ciclo2);
    Serial.println(" ");
  }
  if (FALLA_CARGA == LOW) { //falla de interruptor de carga
    PWMOutputState(PWM1_BASE, ( PWM_OUT_5_BIT | PWM_OUT_6_BIT ), false); //desactivacion de PWM
    Serial.println("SOBRECORRIENTE INTERRUPTOR CARGA BATERIA");
  }
  delay(5);
  sensorValuel1 = analogRead(2); //PB5 I bateria
  i1 = sensorValuel1 * (3.3 / 4095); //I bateria
  Serial.print("I bateria: ");
  Serial.print(i1); Serial.println("mA");

  goto m1;
}
//-----
//secuencia de falla de interruptor de descarga
if (FALLA_DESCARGA == LOW) {
  if (DIR_I_BAT == LOW) {
    if (i1 > 800) { Serial.println("SOBRECORRIENTE INTERRUPTOR DESCARGA BATERIA"); }
  }
}
}

```

```

//-----
//secuencia estado de carga o descarga de bateria-----
if (DIR_I_BAT == LOW) {
  if (i1 > 20) { Serial.println("DESCARGANDO BATERIA "); }
}
if (DIR_I_BAT == HIGH) {
  if (i1 > 20) { Serial.println("CARGANDO BATERIA "); }
}
//-----
//secuencia de estado de carga de bateria
if (v1 > 8.4) {
  digitalWrite(CMD1, LOW); //orden desactivacion de carga bateria
  PWMOutputState(PWM1_BASE, ( PWM_OUT_5_BIT | PWM_OUT_6_BIT ), false); //desactivacion de PWM
  Serial.println("CARGA COMPLETA BATERIA");
}
else if (v1 < 8.3){
  digitalWrite(CMD1, HIGH); //orden de activacion de carga bateria
  PWMOutputState(PWM1_BASE, ( PWM_OUT_5_BIT | PWM_OUT_6_BIT ), true); //activacion de PWM
}
if (v1 < 6.6) { Serial.println(" BATERIA DESCARGADA"); }
//-----
// secuencia de estado de sistema-----
if (estado == 1) {
  digitalWrite(CMD3, HIGH);
  digitalWrite(CMD5, HIGH);
  digitalWrite(CMD4, HIGH);
  Serial.println("MODO OPERACION: ACTIVO");
  if (v1 < 7.0) { estado = 0; }
}
if (estado == 0) {
  digitalWrite(CMD3, LOW); //PE0 comando de activacion de alimentacion comunicaciones
  digitalWrite(CMD4, LOW); //PA7 comando de activacion de alimentacion camara
  digitalWrite(CMD5, LOW); //PC6 comando de activacion de alimentacion 12V control orientacion
  Serial.println("MODO OPERACION: EN ESPERA");
  if (v1 > 8.4) { estado = 1; }
}
//-----
//Inicio de algoritmo de MPPT-----
if (ini == 0)
{
  D1 = D1 + dD1;
  D2 = D2 + dD2;
  ini = 1;
}
//-----
Serial.println(" ");
Serial.println(" ");
}

```