

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



Simulación del Sistema Eléctrico de Potencia de la Constelación de Nanosatélites del proyecto BIRDS

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniera en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Catalina Varela González

Cartago, 18 de junio, 2018

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Catalina Varela González

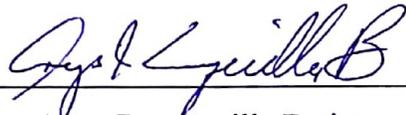
Cartago, 18 de junio de 2018

Céd: 2-0746-0274

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

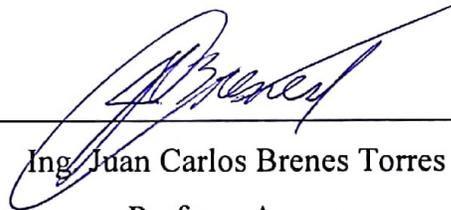
Miembros del Tribunal



Ing. Arys Carrasquilla Batista
Profesora Lectora



Ing. Yeiner Arias Esquivel
Profesor Lector



Ing. Juan Carlos Brenes Torres
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 18 de junio de 2018

Resumen

Los nanosatélites se caracterizan por ser pequeños, livianos y de bajo costo. Estas cualidades los han introducido exitosamente entre los proyectos desarrollados por universidades y pequeñas empresas. En este proyecto se realiza una simulación por medio del software PSpice para un sistema eléctrico de potencia presente en los nanosatélites que forman parte del proyecto BIRDS 2, desarrollados en el Laboratorio LaSEINE del Instituto Tecnológico de Kyushu. El sistema eléctrico de potencia es el encargado de producir, almacenar, controlar y distribuir la energía necesaria para abastecer las cargas y subsistemas que lo demandan. La complejidad para detectar problemas en este sistema genera la necesidad de utilizar una herramienta que permita facilitar esta labor.

Palabras clave: Sistema Eléctrico de Potencia, Nanosatélite, PSpice

Abstract

Nanosatellites are characterized by being small, light and inexpensive. These characteristics have successfully introduced them among the projects developed by universities and small businesses. In this project a simulation is carried out by using PSpice in order to make a model for the electrical power system of the nanosatellites that are part of BIRDS 2 project, which has been developed in LaSEINE, laboratory that belongs to Kyushu Institute of Technology. The electrical power system (EPS) is responsible for producing, storing, controlling and distributing the energy needed to supply the loads and subsystems that demand it. The complexity for detecting problems in this system, creates the need to use a tool that improves this task.

Keywords: Electrical Power System, Nanosatellite, PSpice

A mis queridos padres

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza para enfrentar y ganar los retos durante mi carrera universitaria.

A mis padres, por todo el cariño y la confianza que han puesto en mí desde siempre. Su esfuerzo y apoyo incondicional son la razón de todos mis logros.

A todas aquellas personas que me han ayudado en el desarrollo de este proyecto, espero reflejar toda la motivación y consejos que he recibido de su parte. También quiero agradecer a todos aquellos con quienes tuve la oportunidad de compartir y que siempre me brindaron su apoyo.

A todos, ¡gracias infinitas!

Catalina Varela González

Cartago, 18 de junio de 2018

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Índice de figuras | iii |
| Índice de tablas | v |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivo General | 3 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 1.2 Estructura del documento | 4 |
| 2 Marco teórico | 5 |
| 2.1 Sistema Eléctrico de Potencia | 5 |
| 2.2 Sistema Panel Solar-Batería | 6 |
| 2.3 Panel Solar | 7 |
| 2.4 Batería | 9 |
| 2.5 Electrónica de Potencia | 9 |
| 2.5.1 Dispositivos de Conmutación | 9 |
| 2.5.2 Convertidores CC-CC | 10 |
| 2.6 Unidad de Distribución de Potencia | 15 |
| 2.6.1 Protección al exceso de corriente | 16 |
| 2.7 La simulación en los procesos de ingeniería | 16 |
| 3 Metodología | 19 |
| 3.1 Investigación del entorno del laboratorio | 19 |
| 3.2 Estudio del comportamiento del sistema actual de potencia | 19 |
| 3.3 Establecimiento de los componentes y variables de interés para el modelado del sistema | 20 |
| 3.4 Simulación del sistema de potencia por medio de software | 20 |
| 3.5 Validación de la simulación por medio del análisis de datos y gráficas obtenidos | 20 |
| 4 Simulación del Sistema Eléctrico de Potencia para el Proyecto BIRDS | 21 |
| 2 | 21 |
| 4.1 Diagramas de Bloques | 21 |
| 4.2 Características para el Análisis | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Elección del Software | 25 |
| 4.4 | Implementación en PSpice | 26 |
| 4.4.1 | Panel Solar | 26 |
| 4.4.2 | Batería | 27 |
| 4.4.3 | Regulaciones | 27 |
| 4.4.4 | Seguridad | 29 |
| 4.4.5 | Limitaciones del Software | 32 |
| 4.5 | Medición del Modelo de Ingeniería | 33 |
| 5 | Resultados y análisis | 37 |
| 5.1 | Resultados de la simulación | 37 |
| 5.1.1 | Seguridad | 40 |
| 5.2 | Resultados del sistema Real | 42 |
| 5.2.1 | Comparación y análisis de la simulación y el sistema real | 42 |
| 6 | Conclusiones | 51 |
| 6.1 | Conclusiones | 51 |
| 6.2 | Recomendaciones | 52 |
| | Bibliografía | 53 |
| A | Esquemático del Sistema Eléctrico de Potencia | 55 |

Índice de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Diagrama Causa-Efecto | 3 |
| 2.1 | Componentes Básicos de un Sistema de Potencia | 6 |
| 2.2 | Sistema de Panel Solar-Batería | 7 |
| 2.3 | Efecto Fotovoltaico | 7 |
| 2.4 | Circuito Equivalente de una Celda Fotovoltaica | 7 |
| 2.5 | Características de una celda fotovoltaica y su punto máximo de potencia | 8 |
| 2.6 | Dispositivos de Conmutación | 10 |
| 2.7 | Cambio Poder-Polo | 11 |
| 2.8 | Convertidor Reductor | 13 |
| 2.9 | Convertidor Elevador | 14 |
| 2.10 | Convertidor Reductor-Elevador | 15 |
| 2.11 | Ejemplo de proceso iterativo | 17 |
| 4.1 | Diagrama de Bloques del Sistema Eléctrico de Potencia | 22 |
| 4.2 | Bloque Seguidor | 22 |
| 4.3 | Bloque Batería | 23 |
| 4.4 | Bloque Regulación | 24 |
| 4.5 | Bloque Protección | 24 |
| 4.6 | Bloque Distribucion | 25 |
| 4.7 | Circuito equivalente del panel solar en PSpice | 27 |
| 4.8 | TPS62130 | 28 |
| 4.9 | TPS61071 | 28 |
| 4.10 | TPS61235 | 29 |
| 4.11 | TPS63020 | 29 |
| 4.12 | TPS22965N | 30 |
| 4.13 | Si706DN | 30 |
| 4.14 | SiA447DJ | 31 |
| 4.15 | SSM3K15AMFV | 31 |
| 4.16 | SSM6K411TU | 31 |
| 4.17 | EPS en PSpice | 32 |
| 4.18 | Energizar el Sistema | 34 |
| 4.19 | Método de Medición Manual | 36 |
| 5.1 | Gráfico Voc vs Isc de la celda solar | 38 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.2 | Gráfico de funcionamiento del TPS62130 | 38 |
| 5.3 | Gráfico de funcionamiento del TPS61071 | 39 |
| 5.4 | Gráfico de funcionamiento del TPS61235 | 39 |
| 5.5 | Gráfico de funcionamiento del TPS63020 | 39 |
| 5.6 | Gráfico de funcionamiento del TPS22965N | 40 |
| 5.7 | Gráfico de funcionamiento del Si706DN | 41 |
| 5.8 | Gráfico de funcionamiento del SiA447DJ | 41 |
| 5.9 | Gráfico de funcionamiento del SSM3K15AMFV | 41 |
| 5.10 | Gráfico de funcionamiento del SSM6K411TU | 42 |
| 5.11 | Convertidor TPS63020 con alimentación 4.2V | 43 |
| 5.12 | Convertidor TPS63020 con alimentación 3V | 44 |
| 5.13 | Convertidor TPS61235 con alimentación 4.2V | 44 |
| 5.14 | Convertidor TPS61235 con alimentación 3V | 45 |

Índice de tablas

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Precios de distintos software y la cantidad de componente disponibles para su simulación | 26 |
| 4.2 | Datos eléctricos de la Celda Solar | 27 |
| 4.3 | Componentes y equipos utilizados para el método 1 de medición | 34 |
| 4.4 | Componentes y equipos utilizados para el método 2 de medición | 36 |
| 5.1 | Tabla comparativa entre los valores de tensión teóricos esperados y los obtenidos mediante PSpice | 40 |
| 5.2 | Tabla de las tensiones V_{DS} para los MOSFET | 42 |
| 5.3 | Datos eléctricos de la Celda Solar y porcentajes de error asociados | 43 |
| 5.4 | Convertidor a 3.3V con alimentación de 4.2V | 47 |
| 5.5 | Convertidor a 3.3V con alimentación de 3V | 48 |
| 5.6 | Convertidor a 5V con alimentación de 4.2V | 49 |
| 5.7 | Convertidor a 5V con alimentación de 3V | 50 |
| 5.8 | Comparación de los resultados utilizando el método 2 de medición | 50 |

Capítulo 1

Introducción

Laboratorio LaSEINE

El laboratorio LaSEINE (Laboratory of Spacecraft Environment Interaction Engineering), a cargo del profesor Mengu Cho se encuentra en el Instituto Tecnológico de Kyushu. Como se describe en su página web [7], en este centro se lleva a cabo la investigación y el desarrollo de tecnología basada el entorno del espacio, que es necesaria para lograr el lanzamiento de la próxima generación espacial como los satélites pequeños, comunicaciones de banda ancha de alta velocidad, posicionamiento de alta precisión, sensores remotos, creación de materiales, visitas, exploración y generación de energía. Este laboratorio es reconocido a nivel mundial por los equipos de medición especializados en pequeños satélites en los que se desarrollan las pruebas previas para poder realizar los lanzamientos de estos.

LaSEINE se centra actualmente en las siguientes seis áreas principales de investigación:

- Experimentos de carga y arco.
- Desarrollo de software de análisis numérico sobre los fenómenos de carga (MUSCAT, herramienta de análisis de carga de nave espacial MUtility).
- Experimentos de impacto de hipervelocidad
- Experimento de degradación de la superficie de materiales de la nave espacial
- Estudios sobre carga superficial, arcos, impacto de hipervelocidad y explosiones. Así como la investigación y el desarrollo de instrumentos para comprender los fundamentos y mitigar cada efecto respectivo.
- Pruebas de nanosatélites.

Además de las seis áreas mencionadas se promueve la investigación conjunta con instituciones de investigación japonesas y extranjeras, como su reciente participación en el Proyecto Irazú en cooperación con el Instituto Tecnológico de Costa Rica, destacando así, como un Centro de Excelencia global en este campo. Otra muestra de cooperación

son proyectos BIRDS que ejemplifica la forma en la que se promueve el trabajo interdisciplinario y transfronterizo, en ellos se construyen varios CubeSats idénticos que pertenecen a distintos países en vías de desarrollo de tecnologías del espacio. El objetivo principal de los proyectos BIRDS consiste en permitir que los estudiantes adquieran los conocimientos del espacio a través de la experiencia que brinda la construcción de un satélite. Esto implica integrar el sistema de potencia, la computadora a bordo, la carga principal, la estructura y la tarjeta madre entre otros, para que finalmente funcionen como un solo sistema. Estos proyectos se desarrollan en un periodo de dos años donde los estudiantes deberán diseñar y operar los satélites.

Las placas de circuitos utilizadas en los nanosatélites de los proyectos BIRDS 1 y BIRDS 2 fueron diseñadas y fabricadas por una empresa externa al laboratorio, por esta razón, el sistema no ha sido estudiado a fondo. Este desconocimiento ha dificultado la tarea de solucionar las complicaciones y errores que se han presentado en el camino. A pesar de contar con los planos esquemáticos del circuito, comprenderlos resulta complejo y tedioso. De aquí surge la necesidad de diseñar un sistema de verificación del circuito que sea efectivo y fácil de manejar, que además permita visualizar de forma estructurada el diseño y la construcción de las placas. Con esta propuesta el laboratorio busca acortar los tiempos de comprensión para los estudiantes que se encuentran construyendo los satélites.

En conclusión, la principal problemática es la ausencia de un sistema de verificación eficiente para los circuitos del sistema eléctrico de potencia.

El Sistema Eléctrico de Potencia incorporado en el circuito del proyecto BIRDS 2 se encarga obtener y controlar la energía necesaria para abastecer el control electrónico del satélite que permite la transmisión y recepción de datos. En pocas palabras, es la conexión entre la fuente de energía y la electrónica. De este sistema, el laboratorio cuenta con el plano esquemático y las placas donde se encuentra el circuito físico.

Para escoger la mejor solución, se establecen los criterios de selección de acuerdo con las necesidades del laboratorio. En primer lugar, lo que se busca es que el método sea funcional, es decir, que el proyecto logre ser una herramienta fiable para corroborar errores y modificar el diseño. Segundo, la facilidad para observar los datos y comportamientos del circuito es primordial, ya que se desea tener un acceso rápido y sin complicaciones a la información. En tercer lugar, se debe implementar una estructura de diseño sencilla, con el fin de generar una herramienta fácil de comprender y modificar. Finalmente, el costo debe ajustarse al presupuesto del laboratorio.

Diagrama de Causa-Efecto

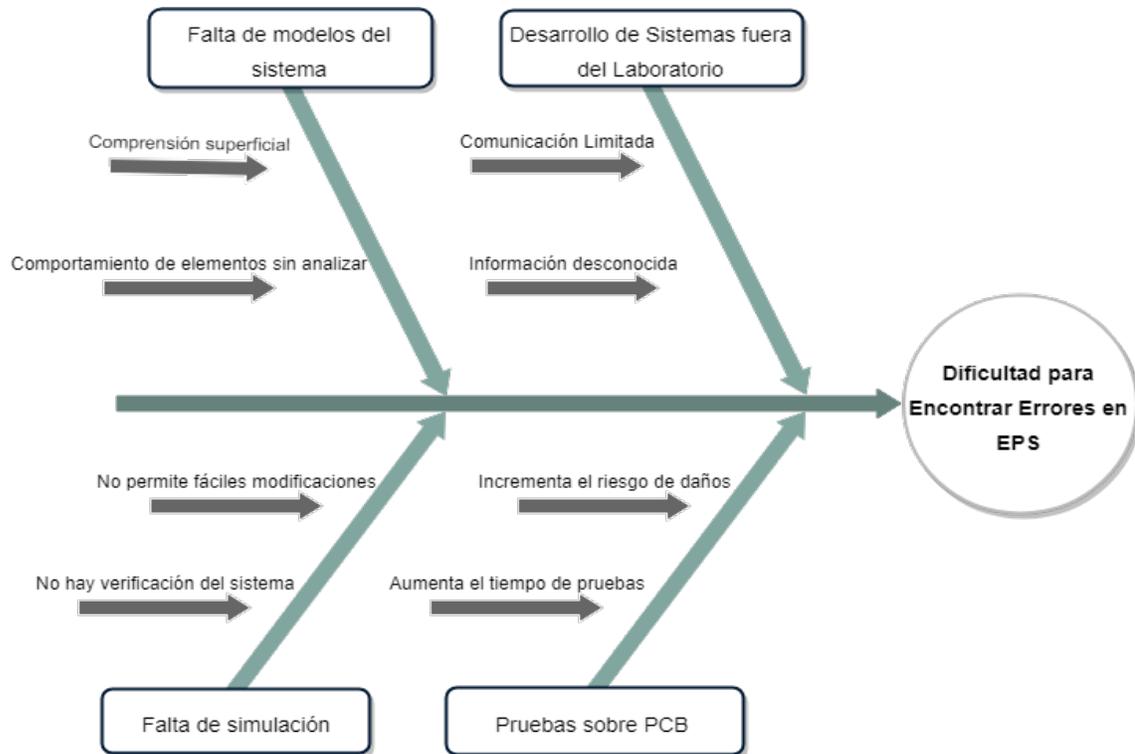


Figura 1.1: Diagrama de Causa-Efecto sobre el problema planteado. Elaboración propia utilizando draw.io.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Establecer la simulación del sistema eléctrico de potencia para los nanosatélites que forman parte del proyecto BIRDS.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Identificar la estructura general y etapas de funcionamiento del sistema eléctrico de potencia.
2. Determinar los parámetros críticos en el análisis del sistema eléctrico de potencia desde la perspectiva del laboratorio.
3. Simular el sistema eléctrico de potencia utilizando una herramienta computacional.
4. Determinar la validez de la simulación del sistema eléctrico de potencia como instrumento de prueba y análisis del circuito físico.

1.2 Estructura del documento

Para describir la estrategia utilizada en el desarrollo del proyecto, se pretende que la estructura del documento le permita al lector identificar con claridad el procedimiento para alcanzar el objetivo propuesto. De esta forma, la estructuración se formula de la siguiente manera: En el capítulo 2 se establecen las bases teóricas necesarias para entender el desarrollo y análisis de la solución propuesta; el capítulo 3 contiene en detalle el proceso del planteamiento y los métodos utilizados para lograr el desarrollo de la solución; el capítulo 4 contiene los procedimientos realizados según la metodología; mientras que en el capítulo 5 se incluyen los resultados y el análisis de los datos obtenidos; finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los objetivos planteados.

Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capítulo, se exponen los principales conceptos teóricos necesarios para comprender el problema y las soluciones en el desarrollo del proyecto. A continuación, se explica la función y las características del sistema eléctrico de potencia como parte de la estructura básica de los nanosatélites. En esta misma línea, se exponen los principios de funcionamiento que describen el comportamiento de las partes que componen el sistema en estudio.

2.1 Sistema Eléctrico de Potencia

Cuando se habla del sistema eléctrico de potencia, se relaciona inmediatamente con el abastecimiento de energía. Lo cierto es que para los satélites, este sistema es el conjunto de elementos que cumple la función de generar, guardar, controlar y distribuir energía con el voltaje de banda especificado para el bus y las cargas. [9]

También se debe incluir dentro del sistema eléctrico de potencia, las estrategias de seguridad que permiten la protección de los componentes frente a cualquier tipo de daño. Por lo que el sistema debe ser capaz de vigilar continuamente el comportamiento de sus bloques, y con esto encontrar cualquier anomalía que le permita al sistema tomar una acción de emergencia.

Por lo general, los componentes básicos del sistema de potencia son: el panel solar, el controlador del panel solar, la batería, los reguladores de carga y descarga, el regulador de voltaje del bus, los interruptores de carga, los fusibles y el arnés de distribución. [9]

En la Fig. 2.1 se observa la estructura básica de un sistema eléctrico de potencia. Esta configuración se ordena de la siguiente forma: la alimentación del sistema es obtenida por medio de una fuente primaria de energía, que debe ser sometida a una conversión que le permita ser utilizada por el sistema. Seguidamente se coloca un bloque de regulación y control que puede recibir y dar energía al dispositivo de almacenamiento recargable. A partir del bloque de control y regulación se utiliza la energía para su distribución y se

añaden las protecciones del circuito, para finalmente entregar la energía a las cargas.

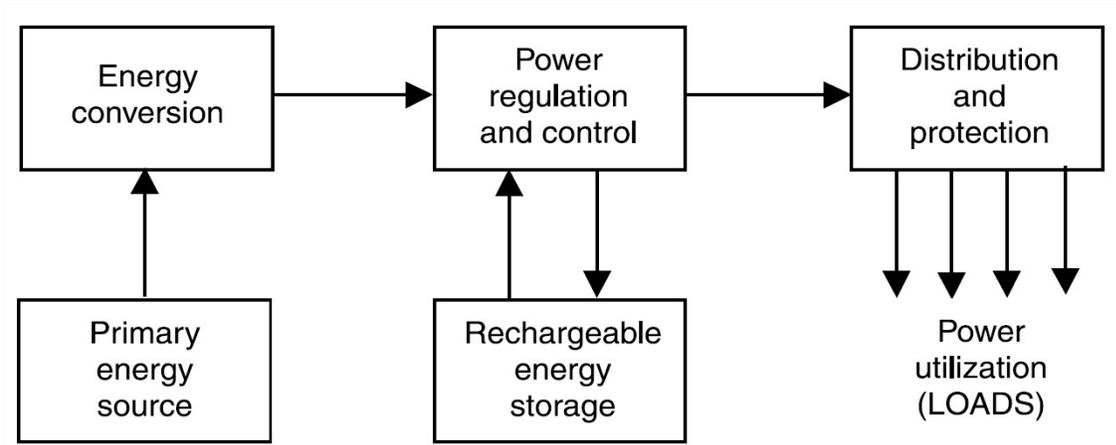


Figura 2.1: Componentes básicos de un sistema de potencia. Tomado de [9].

2.2 Sistema Panel Solar-Batería

Existen diversas fuentes de energía que podrían utilizarse para alimentar los circuitos que forman parte de un satélite, sin embargo, una de las más utilizadas consiste en aprovechar la energía solar, debido a su fácil acceso en el espacio. Para lograr esto, se implementa un sistema de paneles solares y un dispositivo de almacenamiento que permiten tener a disposición la energía necesaria para que el satélite pueda seguir operando aún cuando la luz solar no puede brindar directamente la energía, como pasa por ejemplo durante los eclipses.

En la Fig. 2.2 se muestra un ejemplo de los bloques que pueden constituir una configuración Panel Solar-Batería. Se observa como la energía proveniente del sol se aprovecha por medio de las celdas solares, a las cuales se les añade la batería y su respectiva configuración, de ahí se logrará obtener la energía necesaria para la distribución y los sistemas de protección que permiten abastecer las cargas.

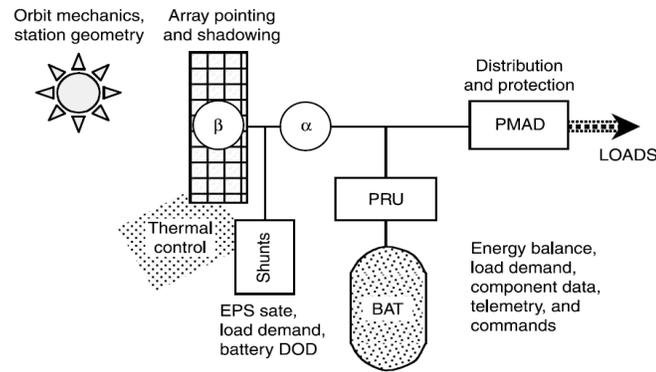


Figura 2.2: Configuración de un sistema Panel Solar-Batería. Tomado de [9].

2.3 Panel Solar

Una celda fotovoltaica convierte la luz del sol en electricidad, por medio del efecto fotovoltaico.[9] Este fenómeno se ilustra en la Fig. 2.3 y consiste en el potencial eléctrico que se genera entre dos materiales distintos cuando su unión común se ilumina con fotones.

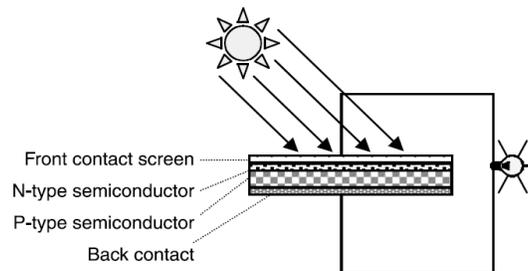


Figura 2.3: Conversión de luz del sol en electricidad por medio del efecto fotovoltaico. Tomado de [9].

Existen diversos modelos matemáticos para obtener las características de una celda solar. El circuito eléctrico equivalente más utilizado se encuentra ilustrado en la Fig.2.4, en la cual se observa como la celda se comporta como una fuente de corriente constante acompañada por un diodo ideal.

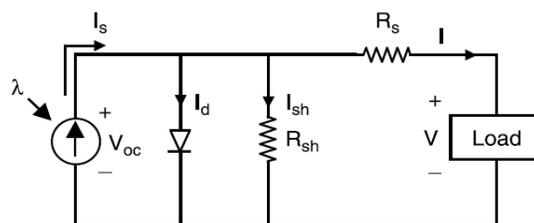


Figura 2.4: Circuito Equivalente de una Celda Fotovoltaica. Tomado de [9].

Las ecuaciones derivadas de este modelo son las siguientes:

En primer lugar la tensión de circuito abierto, V_{OC} , está dada por la ecuación 2.1.

$$V_{OC} = V + IR_s \quad (2.1)$$

La corriente del diodo se caracteriza por medio de su representación clásica, por medio de la Ecuación 2.2.

$$I_d = I_O [e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} - 1] \quad (2.2)$$

Dónde:

I_O = Corriente de saturación del diodo.

q = Carga del electrón = 0.1592×10^{-18} Coulomb.

A = Constante de ajuste para la curva.

K = Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K

T = Temperatura absoluta en Kelvin.

Finalmente, la corriente a través de la carga está dada por la expresión en la Ecuación 2.3.

$$I = I_s - I_O [e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} - 1] - \frac{V_{OC}}{Rsh} \quad (2.3)$$

Los parámetros más importantes utilizados para describir el comportamiento de las celdas son: la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Estos son normalmente representados en un gráfico I-V en el que se puede visualizar el punto máximo de potencia. También se suele utilizar el gráfico P-V dónde se muestra directamente el punto dónde la celda entrega su máxima potencia. En la Fig.2.5 se muestra el comportamiento característico de una celda fotovoltaica representado por medio de los gráficos mencionados.

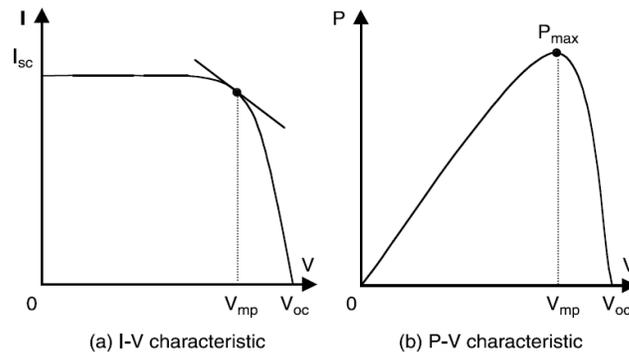


Figura 2.5: Gráficos de las características de una celda fotovoltaica y su punto máximo de potencia. Tomado de [9].

Para la obtención de energía, las celdas solares son conectadas como arreglos en paralelo o serie con lo que se puede alcanzar el voltaje o la corriente requeridas de acuerdo a su aplicación. En el caso de los satélites, se emplea comúnmente la configuración de celdas en paralelo.

Un factor muy importante es la eficiencia. Para una celda fotovoltaica este factor nos indica qué porcentaje de la energía solar es exitosamente transformado en electricidad. [8]

2.4 Batería

El almacenamiento de energía resulta vital en las aplicaciones espaciales, principalmente porque los paneles solares no pueden abastecer de energía al sistema durante los eclipses. Aunque de la misma manera, resultan de suma importancia cuando la energía solar no es suficiente para suplir las demandas energéticas. Con este fin, se puede escoger entre una gran variedad de baterías, de las cuales se pueden mencionar: Níquel Cadmio (NiCd), Níquel Hidrógeno (NiH₂), Hidruro de Níquel Metal (NiMH), Ion de Litio (Li-ion), Polímero de Litio (Li-poly) y Plata Zinc (AgO-Zn).

Las baterías de NiCd están entre las primeras en ser utilizadas para las misiones espaciales y siguen siendo parte de algunos satélites. Sin embargo, se han ido reemplazando con NiH₂, y recientemente la industria apunta hacia las de Li-Ion. Comercialmente hablando, las baterías de Li-poly y NiMH son las que cuentan con mayor disponibilidad.

Las baterías de NiMH, presentan en general, pocos riesgos de salud y a la seguridad, principalmente porque los materiales del electrodo no son tóxicos. Su ánodo está hecho de hidruro de metal, y esto permite eliminar las preocupaciones ambientales que genera el cadmio. Además, el NiMH ofrece una mejora en la energía específica sobre el NiCd. Electroquímicamente, el NiMH es similar al NiH₂, excepto que el hidrógeno que trabaja se almacena como sólido de hidruro metálico en vez de gas.[9]

2.5 Electrónica de Potencia

2.5.1 Dispositivos de Conmutación

Existen dispositivos de estado sólido disponibles para ser utilizados como conmutadores controlados. Sin embargo, los más comunes en aplicaciones espaciales son: el transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), transistor de unión bipolar (BJT) y el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), cuya composición y símbolo se presentan en la Fig.2.6. La selección del dispositivo depende del voltaje requerido, la corriente y

la frecuencia de cambio. Una característica común entre estos dispositivos es que todos poseen tres terminales. [9]

Según [11], un transistor bipolar de juntura (BJT) son dispositivos que se controlan por medio de corriente, requieren una corriente de base para controlar el flujo del colector mientras que los MOSFET son dispositivos que permiten ser controlados por voltaje y que requieren solamente una pequeña corriente de entrada, y con ellos se puede obtener una velocidad de conmutación muy alta.

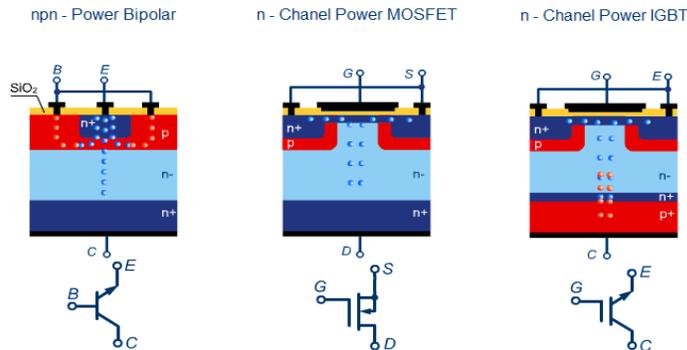


Figura 2.6: Dispositivos de conmutación más comunes. Tomado de [1].

2.5.2 Convertidores CC-CC

Los convertidores de potencia se encargan básicamente de transformar el nivel de tensión entre dos componentes, ya sea mediante la elevación o reducción de la misma. Estos convertidores se utilizan como herramienta indispensable en el aprovechamiento de energía por medio de celdas solares y el almacenamiento en baterías, ya que permite llevar la tensión al nivel necesario para que el sistema trabaje de manera óptima.

En un convertidor CC-CC, la entrada y salida pueden diferir en magnitud y estar eléctricamente aisladas. La tensión de salida puede tener que regularse en presencia de variación en la tensión de entrada y corriente de la carga. [12]

Entre los más comunes se encuentran los Reductores, Elevadores y la configuración Reductor-Elevador, que funcionan por medio del modo de conmutación. Su principio se basa en el cambio poder-polo, cuya conmutación se lleva a cabo por medio de un transistor, para el cual la forma de onda se repite sin cambios de un ciclo al siguiente. En la Fig. 2.7, $q(t)$ corresponde a la función de conmutación y D es el valor de estado estable, y las formas de onda se repiten con un periodo T_s .

Para caracterizar los fenómenos básicos de este sistema se analiza en primer lugar la tensión y corriente del inductor asociado al sistema. La corriente en el inductor depende de la forma de onda de V_L mostrada en la Fig. 2.7. Para el análisis se consideran las ecuaciones convencionales del inductor que se expresan como:

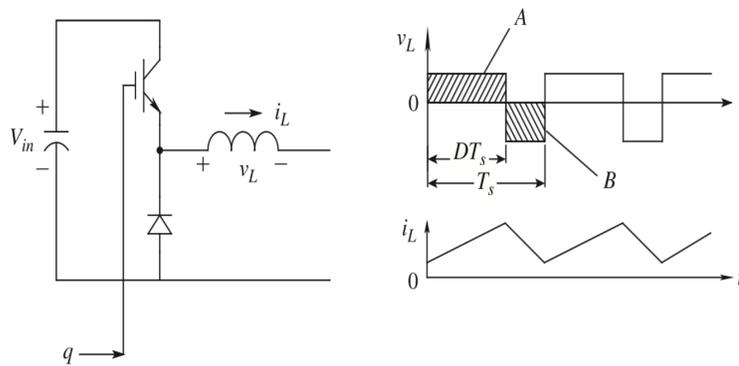


Figura 2.7: Cambio Poder-Polo en un convertidor CC-CC. Tomado de [6].

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\tau} v_L \cdot d\tau \quad (2.4)$$

Dónde τ , representa el tiempo y es la variable de integración. Para simplificar se considera que el primer periodo inicia con $t = 0$. Y utilizando la forma integral de la Ecuación 2.4, la corriente en el inductor puede ser expresada en términos de su valor inicial $i_L(0)$ como:

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_L \cdot d\tau \quad (2.5)$$

Debido a que todas las variables del circuito se deben repetir cada T_s , de la Ecuación 2.5 se concluye que:

$$i_L(T_s) = i_L(0) \quad (2.6)$$

Y al integrar sobre un solo periodo se obtiene:

$$\frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L \cdot d\tau = 0 \Rightarrow V_L = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} v_L \cdot d\tau + \int_{DT_s}^{T_s} v_L \cdot d\tau \right) = 0 \quad (2.7)$$

De manera similar se puede describir el capacitor de acuerdo a las ecuaciones convencionales:

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{\tau} i_C \cdot d\tau \quad (2.8)$$

Bajo la misma condición en la que las variables se repiten cada T_s , se realizan las siguientes conclusiones:

$$v_C(T_s) = v_C(0) \quad (2.9)$$

Nuevamente al integrar sobre un periodo se obtiene:

$$\frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C \cdot d\tau = 0 \Rightarrow I_C = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{T_s} i_C \cdot d\tau = 0 \right) \quad (2.10)$$

Finalmente, al aplicar las leyes de Kirchhoff de voltaje y corriente, en el estado estacionario en CC, la suma de tensiones promedio será cero en un lazo y la suma de las corrientes será cero en un nodo:

$$\sum_k V_k \quad (2.11)$$

$$\sum_k I_k \quad (2.12)$$

Una vez realizado este análisis, se puede describir el principio de operación para estos convertidores. Básicamente, el inductor asociado con el conmutador actúa como un medio de transferencia de energía desde la entrada hasta la salida. Al activar el transistor, el nivel de energía aumenta. Cuando este se apaga, logra transferir esta energía hacia la salida, dependiendo de la extracción de tensión de la fuente de entrada. Además de la energía obtenida por medio del inductor, dependiendo del convertidor, puede haber transferencia de energía directamente desde la entrada hasta la salida. A continuación, se muestran las estructuras y el comportamiento CC en estado estable de los convertidores.

Convertidor de carga (Reductor)

Durante la luz del sol, el voltaje se mantiene mediante la energía de los paneles solares. Entonces la batería se debe cargar únicamente si su voltaje es más bajo que el del bus. Para esto se requiere un convertidor CC-CC que reduzca el voltaje del bus al mismo nivel de la batería mientras esta se carga.

En la Fig. 2.8 se muestra la estructura de un convertidor reductor y su comportamiento típico. En este caso, al encender el transistor en $q = 1$, la corriente en el inductor comienza a subir, y una vez que se apaga la señal ($q = 0$), el transistor deja de transmitir y la energía que estaba almacenada en el inductor se libera a través del diodo.

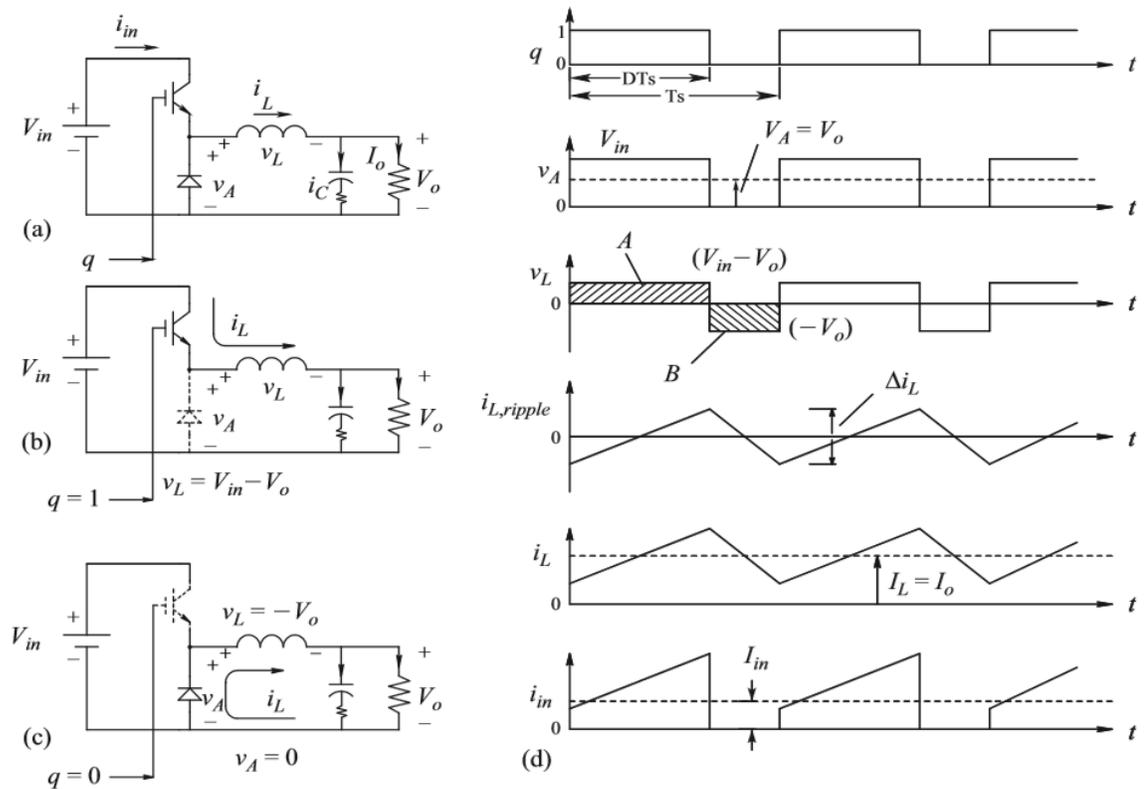


Figura 2.8: Funcionamiento y forma de onda de un Convertidor Reductor. Tomado de [6].

Convertidor de descarga (Elevador)

En un bus completamente regulado, el voltaje se mantiene dentro de una banda estrecha durante toda la órbita. Dado que el voltaje de la batería en descarga desciende durante un eclipse, se requiere un convertidor de voltaje para impulsar (intensificar) el nivel de la batería al del bus, es aquí donde se utiliza el convertidor de descarga. [9]

En el elevador, como se observa en la Fig.2.9, la etapa de salida consiste en la carga y un capacitor que se utiliza para minimizar la ondulación de la tensión de salida. Inicialmente este capacitor se carga a la misma tensión del voltaje de entrada V_{in} , por medio del diodo presente en la configuración. Al encender el transistor, se aplica la tensión de entrada al inductor, por lo que $v_L = V_{in}$ y la corriente i_L incrementará linealmente aumentando la energía en el inductor. Cuando se apaga el transistor, la corriente se ve forzada a fluir a través del diodo y la energía almacenada es transferida a la etapa de salida con lo que se acciona el filtro por medio del capacitor.

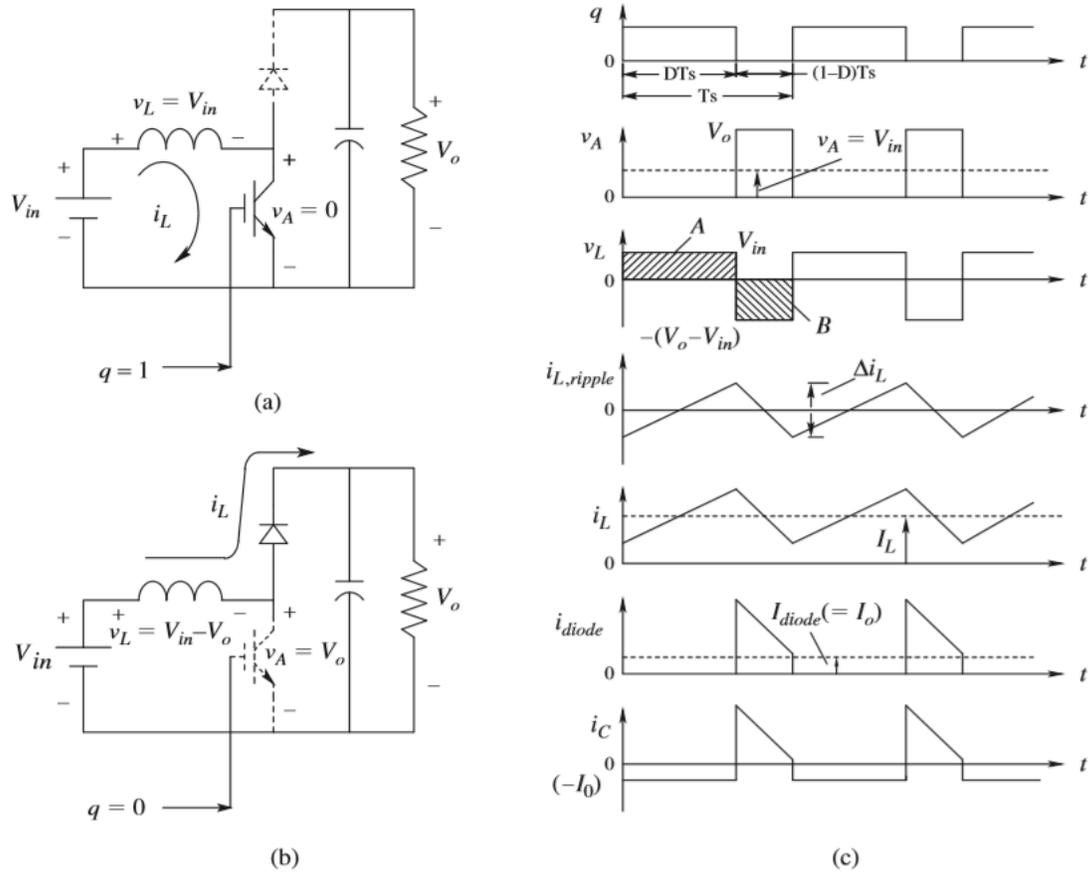


Figura 2.9: Funcionamiento y forma de onda de un Convertidor Elevador. Tomado de [6].

Convertidor Reductor-Elevador

Los convertidores Reductor-Elevador permiten a la tensión de salida ser mayor o menor que la tensión de entrada basados en el cambio del tiempo D . Al encender el transistor, se aplica la tensión de entrada a través del diodo. Para demostrar el efecto directo de D para este convertidor, se tiene la relación de entrada/salida que se describe como:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (2.13)$$

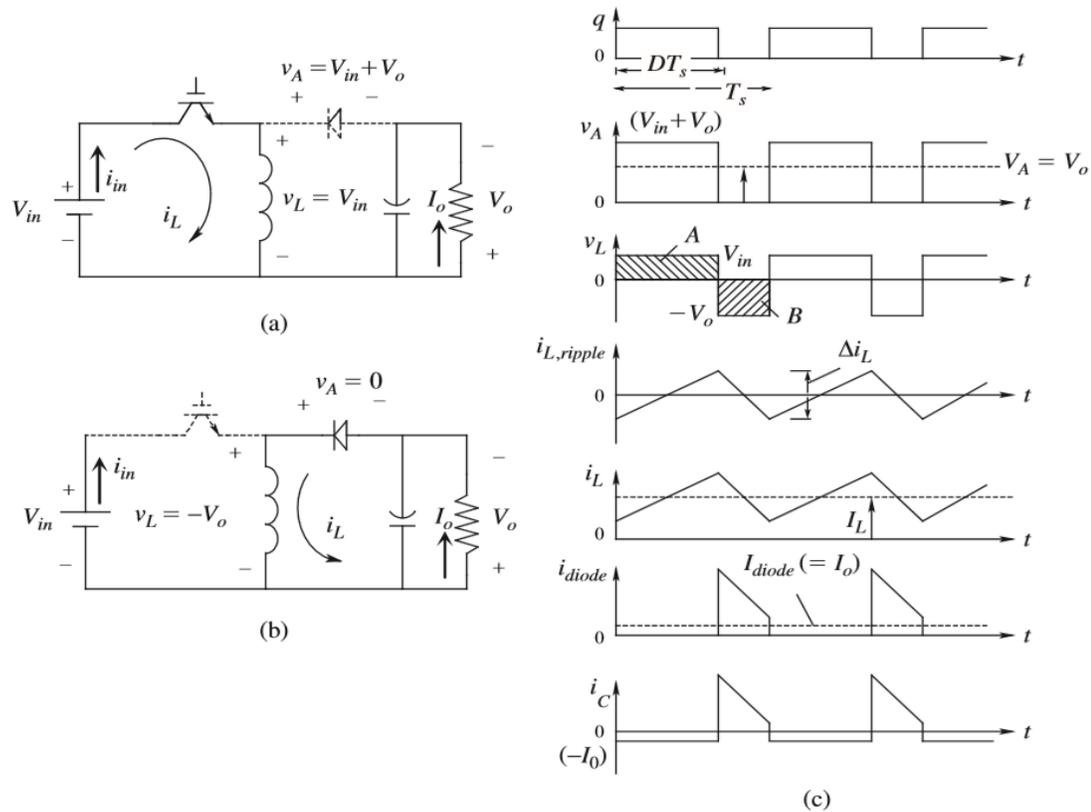


Figura 2.10: Funcionamiento y forma de onda de un Convertidor Reductor-Elevador. Tomado de [6].

2.6 Unidad de Distribución de Potencia

Generalmente en los sistemas eléctricos de potencia en satélites, la Unidad de Distribución de Potencia se utiliza para conectar la plataforma eléctrica de cargas hacia el bus principal. La protección al exceso de corriente es una función muy importante que provee esta unidad.

Las principales funciones de la Unidad de Distribución de Potencia son:

- Distribución del bus principal de potencia a los equipos y calentadores por medio de interruptores/dispositivos de ruptura.
- Recibir y ejecutar el comando de encendido/apagado.
- Generación de señales para mantenimiento y aprovisionamiento al subsistema de manejo de datos. [4]

2.6.1 Protección al exceso de corriente

La protección de un sistema de potencia está diseñada para proporcionar un aislamiento rápido ante una falla, esto con el fin de permitir que la mayor parte del sistema de alimentación continúe el servicio. Para realizar un análisis del desempeño de la protección se pueden considerar las siguientes características que se establecen como básicas: Confiabilidad (garantía de un comportamiento correcto), Selectividad (operación de falla con mínima desconexión del sistema), Velocidad de operación (duración mínima de falla).

Ahora tomando en cuenta el objetivo principal de estos sistemas, se debe prestar atención al cumplimiento de los niveles de fiabilidad necesarios. En detalle, el análisis de confiabilidad para un sistema de protección debe considerar los siguientes aspectos:

- **Confiabilidad:** que se define como "el grado de certeza de que el dispositivo de protección funcionará correctamente".
- **Seguridad:** cuando se habla de "el grado de certeza de que el dispositivo de protección no funcionará incorrectamente".
- **Simplicidad:** utilizar el equipo de protección "mínimo" para lograr los objetivos, que es especialmente importante ya que cada unidad adicional proporciona una fuente potencial de problemas.

[4]

2.7 La simulación en los procesos de ingeniería

Existen diversas formas de desarrollar un proyecto de ingeniería, pero en todos los casos es necesario plantear previamente un proceso a seguir. En la Fig. 2.11, se ilustra el ejemplo tomado de [10], sobre un proceso para el desarrollo de un prototipo que sirva para su futura industrialización.

Este proceso consiste en realizar un análisis de las características que el cliente desea obtener en su producto final, a partir de esto, se elabora una lista de especificaciones que permiten satisfacer cada una de las demandas para el producto. En base a estas especificaciones se procede a realizar el diseño del producto, en caso de ser electrónico se puede acudir a una simulación. Seguidamente se realiza el prototipo físico y se procede a evaluar en conjunto con el cliente el resultado del prototipo final. Y finalmente, si se logra validar y verificar el producto, se puede proceder a la industrialización.

De [10], se toman los conceptos de validación, verificación, simulación, modelo y modelado que se requieren para comprender el proceso y el papel de la simulación dentro del mismo.

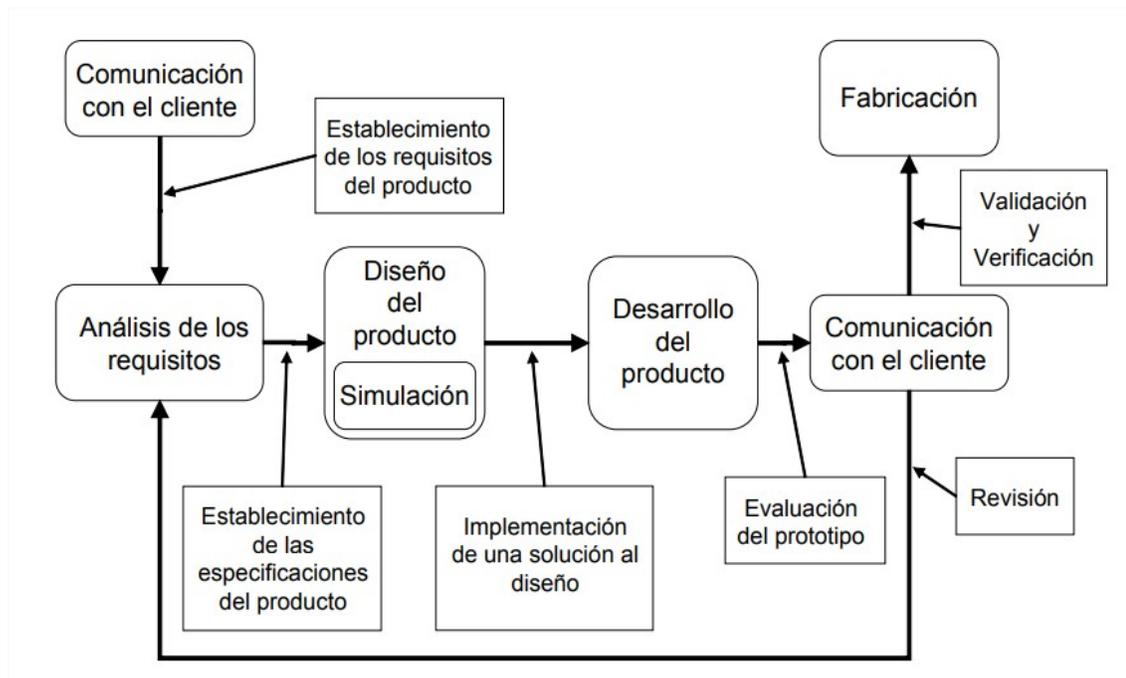


Figura 2.11: Ejemplo de proceso iterativo para la obtención de un producto. Tomado de [10].

De esta forma, validación se refiere al conjunto de actividades que establecen que el sistema construido se ajusta a lo solicitado por el cliente. Y verificación es el conjunto de actividades que aseguran que el sistema responde correctamente a una función específica.

Por otra parte, "Un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea, de forma diferente a la identidad misma. Habitualmente, su finalidad es ayudar a definir, entender o mejorar un sistema." [10]

El modelo puede ser la representación fiel o puede extraer las propiedades más importantes del objeto por medio de simplificaciones.

Y finalmente, "La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender su comportamiento y evaluar sus especificaciones." [10]. Por lo general, las simulaciones son parte importante en los procesos de diseño de las grandes industrias debido a las ventajas que implica, de esta misma forma se debe buscar su implantación en las investigaciones con fines educativos sobretodo cuando de igual forma el resultado final será un producto.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se expone el plan de trabajo para solucionar el problema establecido. Con esta sección se pretende aclarar la estructura y herramientas empleadas para profundizar en el conocimiento del problema y de esta forma ejecutar el plan de solución.

3.1 Investigación del entorno del laboratorio

En esta etapa se pretende conocer el entorno del laboratorio LaSEINE, donde se ejecutará el proyecto. Esto mediante la exploración de los equipos disponibles, proyectos desarrollados y los componentes de los sistemas de potencia antecesores.

Al identificar los elementos disponibles, se pretende desarrollar el conocimiento necesario para señalar de forma más específica los alcances y necesidades del proyecto, encontrando de esta manera las herramientas que deberán ser empleadas para el cumplimiento de los objetivos propuestos y de esta manera establecer las bases para trabajar en las siguientes etapas.

3.2 Estudio del comportamiento del sistema actual de potencia

En el desarrollo de los nanosatélites antecesores, existe un diseño del sistema de potencia que ya se ha implementado. Sin embargo, la tarea es tomar este diseño y realizar una simulación que permita encontrar los fallos y posibilidades de mejora con mayor facilidad. La meta es diseñar una simulación fácil de comprender que permita una manipulación sencilla.

Para lograr esto, se realizará un diagrama de bloques que explique las etapas de funcionamiento del sistema eléctrico de potencia. Esta tarea consiste en agrupar los componentes electrónicos que cumplen una misma función y crear un bloque. El conjunto de estos bloques formará el diagrama general del sistema de potencia que brindará una visión a

alto nivel de su comportamiento.

3.3 Establecimiento de los componentes y variables de interés para el modelado del sistema

Mediante la estructuración del comportamiento realizado en las etapas anteriores se facilitará la tarea de determinar aquellos elementos que permiten el correcto funcionamiento del sistema de potencia, y los que son de relevancia para los análisis y estudios llevados a cabo en el laboratorio, de esta manera se busca dar a conocer características claves en los distintos bloques del sistema y analizar su respuesta. Por medio del desarrollo de esta etapa, se pretende armonizar las necesidades del laboratorio con los objetivos y alcances del proyecto.

3.4 Simulación del sistema de potencia por medio de software

Por medio de la herramienta computacional seleccionada, se realizará una simulación del sistema eléctrico de potencia. De esta manera, se plasmará de la forma más cercana al sistema físico, una simulación que se podrá someter a distintas pruebas para corroborar que la respuesta coincide con las especificaciones planteadas, y que, frente a distintas interrupciones, el sistema reacciona de la forma que se requiere.

3.5 Validación de la simulación por medio del análisis de datos y gráficas obtenidos

Luego de poner a prueba al circuito por medio de la simulación, se deberán obtener gráficas y datos para el análisis. De esta forma, se podrá estimar si los resultados satisfacen las condiciones de diseño con márgenes de error y métodos comparativos.

Además, se deberán realizar gráficos que demuestren el comportamiento del sistema bajo condiciones normales de funcionamiento para obtener una base que demuestre que el circuito es capaz de desempeñar su función según lo esperado.

Para esto se diseñará e implementará la toma de datos en el circuito físico del sistema eléctrico de potencia. A partir de esto, se podrá establecer qué tan alejado está el diseño de simulación planteado de comportarse como el sistema real.

Capítulo 4

Simulación del Sistema Eléctrico de Potencia para el Proyecto BIRDS 2

En este capítulo se describe el proceso de solución al problema planteado. En primer lugar, se exponen los criterios utilizados para la selección del software en el que se implementará la solución. Seguidamente, se presentan el análisis y la elaboración de esquemas funcionales del sistema eléctrico de potencia, además se definen los criterios deseados para la extracción de datos y se detalla el proceso para crear la simulación en el software previamente seleccionado. Finalmente, se describe el proceso para obtener los datos a partir del modelo de ingeniería creado para el sistema eléctrico de potencia en los nanosatélites.

4.1 Diagramas de Bloques

A continuación, se presentan distintos diagramas de bloques que establecen el flujo de trabajo y la estructura del sistema eléctrico de potencia estudiado presente en el Anexo A. Inicialmente, se busca describir de forma sencilla la funcionalidad de todo el sistema eléctrico de potencia. El objetivo de crear estos bloques, es facilitar la comprensión del sistema y con esto, el estudio del mismo. A partir de este diagrama a gran escala, se pueden subdividir las funciones de los componentes y asegurar que cada uno cumple con una sencilla función que finalmente formará un esquema más complejo.

En la Fig.4.1 se muestra el diagrama de bloques a alto nivel del sistema. El proceso comienza al tomar la energía solar por medio de los paneles, esta se regula antes de permitir la alimentación del sistema de carga. Seguidamente se añade la batería, que se encargará de almacenar y abastecer la energía. A partir de este punto, se realiza la distribución de energía, no sin antes añadir protecciones en caso de que exista un exceso de corriente en el sistema. Esta distribución cuenta con energía regulada y sin regular que abastecerá cada sistema dependiendo de las demandas y limitaciones.

El bloque del panel solar, está constituido por tres celdas solares de la compañía AZUR SPACE y tipo Montaje de Celda Solar TJ 3G30A (TJ Cell Assembly 3G30A), también

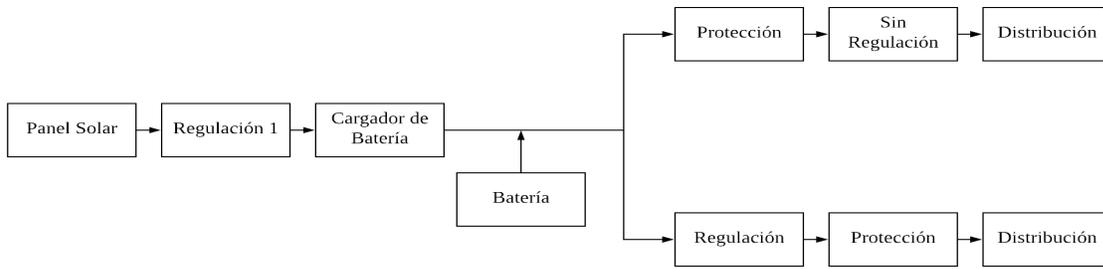


Figura 4.1: Diagrama de bloques de Alto Nivel del Sistema Eléctrico de Potencia . Elaboración propia utilizando Lucidchart.

denominada Montaje de Celda Solar con Triple Unión al 30 % de GaAs. (30% Triple Junction GaAs Solar Cell Assembly).

Inmediatamente después del panel solar se coloca un regulador con los componentes que se especifican en la Fig.4.2, el comparador estará alimentado con la tensión proveniente del panel solar y en caso de detectar la presencia suficiente de energía, establecerá a la salida una tensión que permite controlar el MOSFET que configura el pin necesario para que el TPS62130 funcione como un regulador de tensión, colocando un valor fijo de a 4.3V.

En caso de que la tensión se encuentre muy baja, el pin no será activado, y el TPS62130 actuará como un seguidor. A este sistema se le agregan diodos que impiden que fluya la corriente proveniente de la batería que se encuentra después de este sistema.

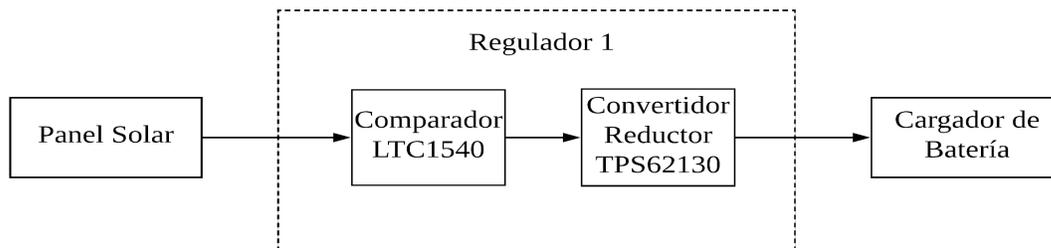


Figura 4.2: Diagrama de Bloques de la primera regulación. Elaboración propia utilizando Lucidchart.

Una vez que la tensión pasa a través del regulador, se coloca un cargador de batería de acuerdo con la composición de las baterías seleccionadas, el componente que se ha implementado en este diseño es el LTC4059. Además, las baterías utilizadas son tipo Hidruro de Níquel-Metal, marca Panasonic, y que poseen una tensión nominal de 1.2V con una capacidad típica de 2000mAh y tamaño AA.

En la Fig. 4.3 se establece un diagrama de bloques denominado "Batería", que está conformado por los MOSFETS que funcionan como interruptores para cumplir con las normas de seguridad establecidas.

En primer lugar, se encuentra el "Kill Switch" cuya función es desconectar completamente la alimentación del sistema. Seguidamente se encuentran los RBF o "Remove Before Flight" que deben permanecer cerrados hasta el momento en que el sistema debe ser energizado para funcionar en el espacio. Y finalmente, cumpliendo con la función de asegurar que el sistema no se encuentre encendido en condiciones que pueden ser peligrosas, se añade el interruptor de despliegue que funciona de la misma forma que los RBF.

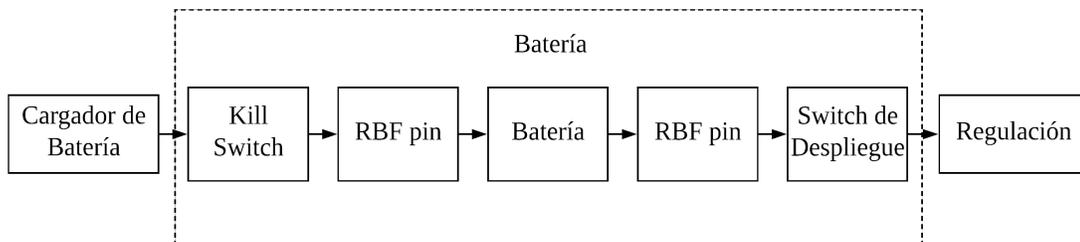


Figura 4.3: Diagrama de Bloques del Sistema para la Batería. Elaboración propia utilizando Lucidchart.

Después del bloque de la batería, se encuentra la regulación necesaria para abastecer los subsistemas como se muestra en la Fig. 4.4. Para lograrlo, se desea obtener tensiones de 3.3V y 5V. Esto se aplica a través de los reguladores TPS63020 y TPS61235 respectivamente. Los elementos mencionados son convertidores que trabajan de acuerdo al principio explicado en el Capítulo 2 en el apartado de convertidores CC-CC.

En el caso de las protecciones, como se muestra en la Fig.4.5, se establecen inmediatamente después de cada alimentación, de esta forma se asigna una protección de 2.77A para la salida sin regulación y 1A en las salidas reguladas. Para implementar esto, se utiliza el controlador de protección LTC4361-2 que permite medir la corriente a través de una resistencia y la desconexión se implementa por medio del MOSFET SSM6K411TU.

Finalmente, la distribución se establece como se ilustra en la Fig.4.6, y corresponde al abastecimiento de los subsistemas "On-Board Computer", GPS, y las misiones incorporadas en el sistema. Con respecto a la tensión sin regular, se utiliza únicamente para lograr el despliegue de la antena.

4.2 Características para el Análisis

Para seleccionar los parámetros de interés, se estudian todos los elementos del sistema con un modelo disponible para la simulación, que frente a situaciones críticas, como el nivel de carga de la batería o la demanda de potencia exigida por la carga del sistema, no deben alterar su funcionamiento porque esto significaría una falla en el sistema. De esta forma se eligen las siguientes características.

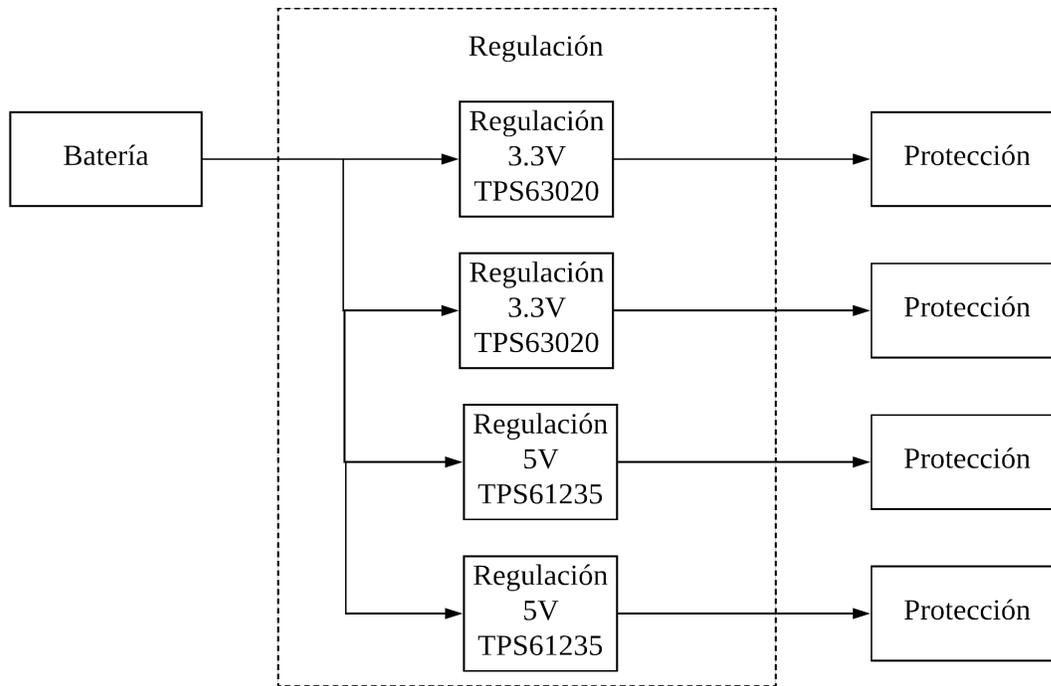


Figura 4.4: Diagrama de Bloques de la Regulación. Elaboración propia utilizando Lucidchart.

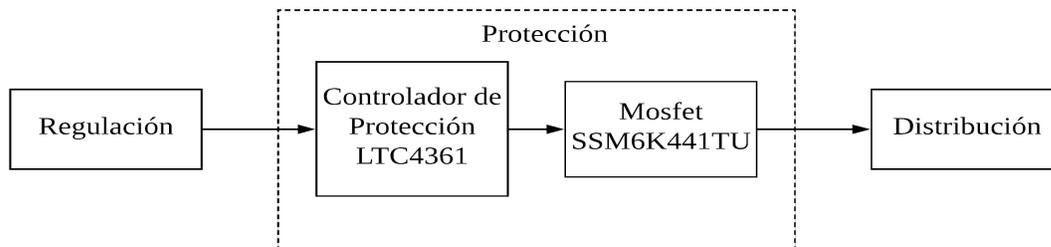


Figura 4.5: Diagrama de Bloques de la Protección. Elaboración propia utilizando Lucidchart.

Tensiones

Se decide hacer un enfoque en el análisis de las tensiones de salida de los convertidores TPS63020 a 3.3V y el TPS61235 a 5V. Su elección se justifica debido a que el comportamiento de estos dispositivos frente a distintas condiciones carga de la batería asegura que el satélite permanezca vivo en el espacio, incluso con la presencia de los eclipses que experimentan estos dispositivos, y en situaciones en las que la batería podría estar operando a un nivel de tensión bajo. De la misma forma, se desea comprobar que estos convertidores son capaces de dar la tensión de salida requerida cuando la carga de la batería es elevada.

Carga del Sistema

Otra de las características críticas es la demanda energética del sistema. De esta manera, se busca analizar la respuesta de los convertidores escogidos frente a grandes cargas. Este estudio se realiza para comprobar que el sistema es capaz de enfrentarse a eventuales

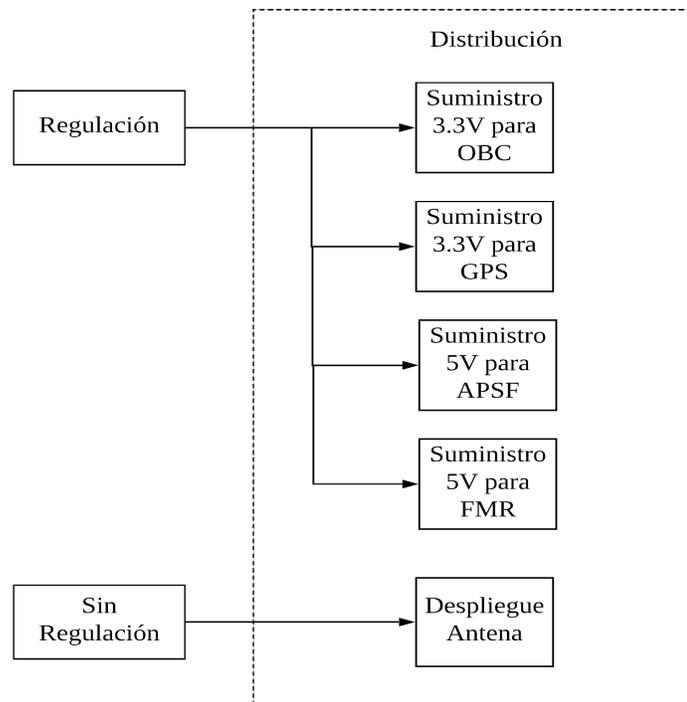


Figura 4.6: Diagrama de Bloques de la Distribución. Elaboración propia utilizando Lucidchart.

sobrecargas una vez que se encuentra cumpliendo las misiones designadas. Es por esto que se busca determinar los límites en los cuáles cada convertidor funciona de forma adecuada.

4.3 Elección del Software

Para la elección del software, se tomaron en cuenta principalmente dos parámetros: el precio y los componentes disponibles. El objetivo es seleccionar un programa que se encuentre dentro del presupuesto y que posea la mayor cantidad de componentes del modelo real. El presupuesto no tiene un límite claro establecido pero debe contar con la aprobación del laboratorio, por esta razón es un parámetro que debe ser examinado.

Por otra parte, los componentes disponibles serán fundamentales para la obtención los resultados, puesto que se desea construir una simulación que se apegue lo más posible al comportamiento real del sistema. Este análisis se desarrolla tomando en cuenta tres de los software más populares para el desarrollo y análisis de circuitos, estos son: PSpice, LTSpice y Proteus.

Precios

LTSpice, es conocido por ser de uso libre y por tener múltiples beneficios como se muestra en [2], y es por esta razón que en este parámetro tiene ventaja sobre los otros, ya que no

hay que realizar ninguna inversión. Lo sigue PSpice, que fue presupuestado directamente por los vendedores autorizados del producto. Y en último lugar, de [3] se obtienen las cotizaciones para Proteus se posiciona como el software de mayor costo.

En la tabla 4.1 se enlistan los software propuestos para el desarrollo de la simulación con su respectiva cotización por licencia.

| Software | Precio Aproximado (\$) | Componentes para Simulación |
|----------|------------------------|-----------------------------|
| LTSpice | Gratis | 3 |
| PSpice | 1500 | 13 |
| Proteus | 6592 | 1 |

Tabla 4.1: Precios de distintos software y la cantidad de componente disponibles para su simulación

Componentes disponibles

Este parámetro se basa en medir la cantidad de componentes que pueden ser simulados en los respectivos software. En la tabla 4.1 se observa como PSpice lidera en este aspecto, puesto que es quien posee la mayor cantidad de componentes que pueden ser simulados.

De acuerdo a los análisis realizados, se selecciona el software PSpice principalmente por la cantidad y el tipo de componentes que están disponibles, siempre tomando en cuenta que el precio del mismo se encuentra dentro del presupuesto del laboratorio. Es importante resaltar que PSpice es el único programa que permite la simulación de los modelos para los convertidores CC-CC del diseño de BIRDS 2, que finalmente serán los puntos claves de análisis.

4.4 Implementación en PSpice

Para desarrollar la simulación lo más cercano al sistema real, se decide simular el panel solar de acuerdo a los modelos ya existentes, se añade el modelo más sencillo de una batería y se añaden los distintos componentes al sistema de acuerdo a su configuración.

En primer lugar, se divide la simulación en cada uno de los componentes y se comprueba que la configuración individual se comporte de la misma manera que lo hace el dispositivo en la realidad. A partir de esto, se desea unir cada uno de los componentes en bloques más grandes hasta integrar un sistema.

4.4.1 Panel Solar

En el caso del panel solar, se utiliza como guía el modelo que presenta Patel [9]. Y se utilizan las ecuaciones mostradas en el capítulo 2, de aquí se obtienen los valores de las

resistencias y se le asignan características específicas al diodo del modelo. Con esto se pretende comparar la corriente I_o y la V_{oc} del modelo contra los datos presentados en la hoja de datos del panel solar respectivo que se presentan en la tabla 4.2.

| | |
|---|----------|
| Datos Eléctricos | 1E15 |
| Voltaje de Circuito Abierto Promedio V_{OC} | 2512 mV |
| Corriente de Cortocircuito Promedio I_{SC} | 501.3 mA |

Tabla 4.2: Datos eléctricos de la Celda Solar

En la Fig.4.7 se muestra el esquema final del modelo de una celda solar de acuerdo con las características utilizadas en los nanosatélites de BIRDS 2.

Para lograr obtener una comparación de las características, se realiza el análisis denominado barrido de corriente directa, que cambia la tensión de la fuente V1 y con esto la corriente entregada. De esta forma, se logrará obtener el gráfico característico de la celda.

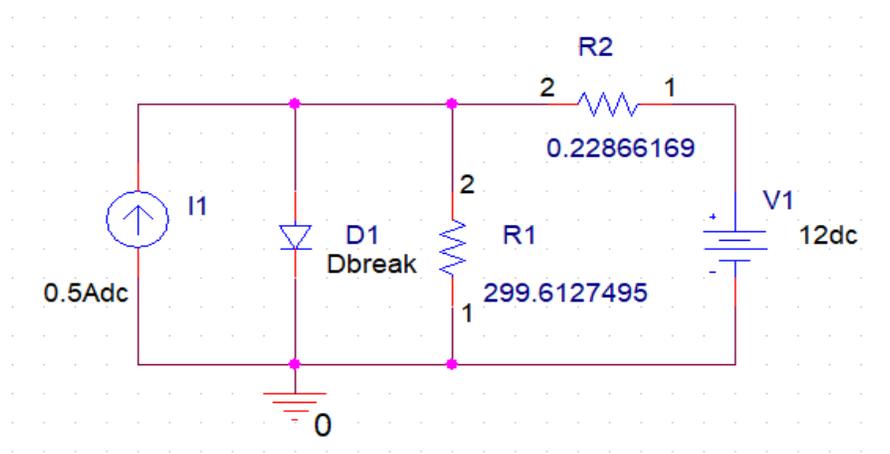


Figura 4.7: Circuito equivalente del panel solar en PSpice . Elaboración propia utilizando PSpice.

4.4.2 Batería

En el caso de la batería, se utiliza una fuente de tensión constante y una resistencia cuyo valor es obtenido por medio de las pruebas de seguridad realizadas previamente en el laboratorio. Este modelo sencillo es suficiente para el análisis que se desea realizar sobre el sistema.

4.4.3 Regulaciones

Para las regulaciones se utilizan convertidores de carga y descarga. Se han encontrado los modelos diseñados por Texas Instruments para ser utilizados en PSpice y en base a estos,

se ha adaptado la configuración de acuerdo al diseño original del sistema para BIRDS 2. La primera etapa consiste en asegurar el correcto funcionamiento de los elementos individuales del sistema. De esta manera se tiene las configuraciones de los componentes TPS62130, TPS61071, TPS61235 y TPS63020 ajustándolos al diseño de BIRDS 2, en el caso de los últimos tres. La configuración del TPS62130 se encuentra en el primer bloque de regulación del sistema y se presenta en la Fig. 4.8.

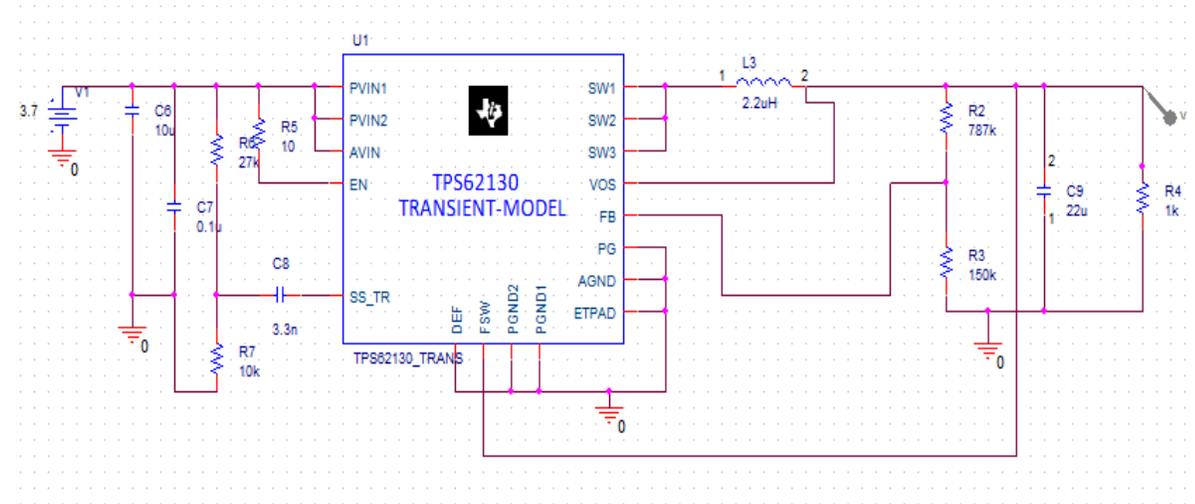


Figura 4.8: TPS62130. Elaboración propia utilizando PSpice.

En la Fig. 4.9, se muestra el convertidor de carga que debe encargarse subir el voltaje a aproximadamente 5.5V.

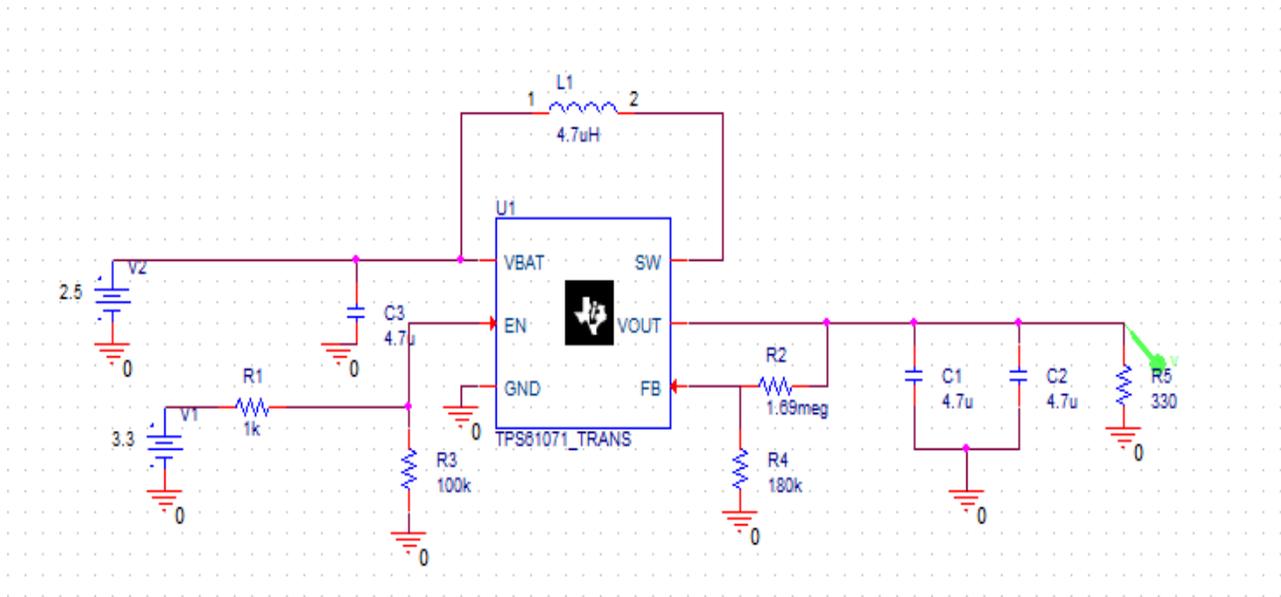


Figura 4.9: TPS61071. Elaboración propia utilizando PSpice.

El dispositivo de la Fig. 4.10, se encarga de regular el voltaje para la línea de distribución a 5V.

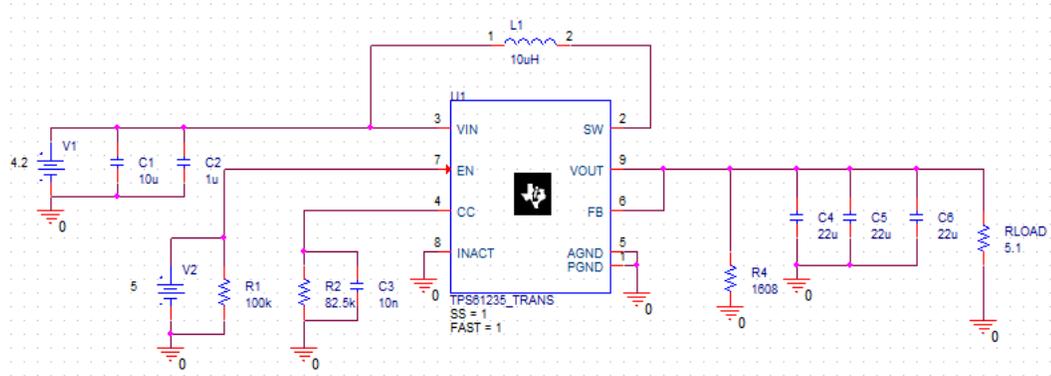


Figura 4.10: TPS61235. Elaboración propia utilizando PSpice.

El TPS63020 en la Fig. 4.11, es el regulador de voltaje que se utiliza para distribuir la energía a aquellos dispositivos que trabajan con 3.3V.

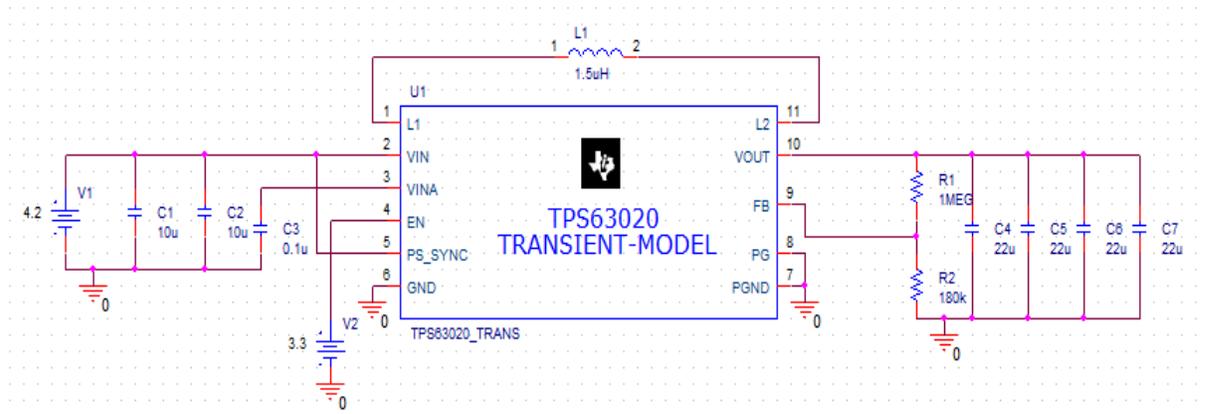


Figura 4.11: TPS63020. Elaboración propia utilizando PSpice.

4.4.4 Seguridad

Para cumplir con las normativas y los procesos de seguridad exigidos por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), se añaden distintos dispositivos empleados para asegurar el correcto encendido y apagado del sistema en los momentos que se requieren.

Para todos los casos se utiliza un circuito básico de prueba para conmutadores tipo MOS-FET, que corresponde a la alimentación del pin Gate con una señal periódica de encendido y apagado, la conexión de una fuente de tensión CC y una carga al pin de Source y finalmente el pin Drain conectado a tierra.

En la Fig. 4.12 se muestra el esquema utilizado para este componente que funciona como el interruptor de despliegue.

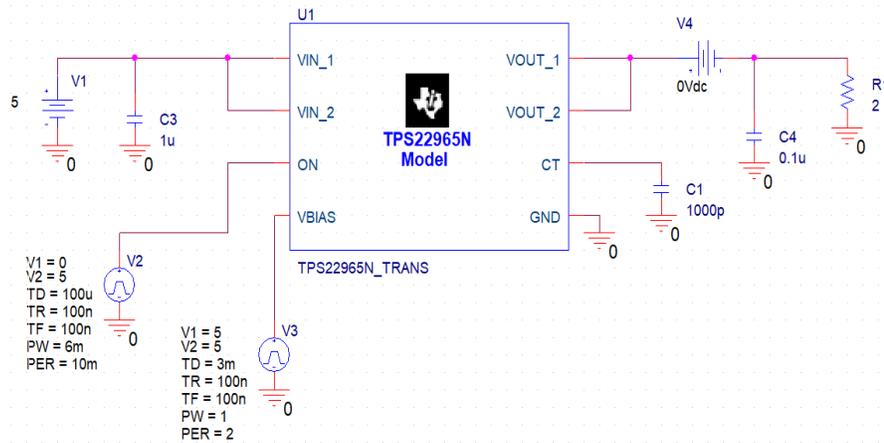


Figura 4.12: TPS22965N. Elaboración propia utilizando PSpice.

Los elementos de las Fig. 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 corresponden a interruptores tipo MOS-FET que se encargan de desconectar distintas partes del sistema en caso de que no se presenten las condiciones en que debe trabajar el nanosatélite.

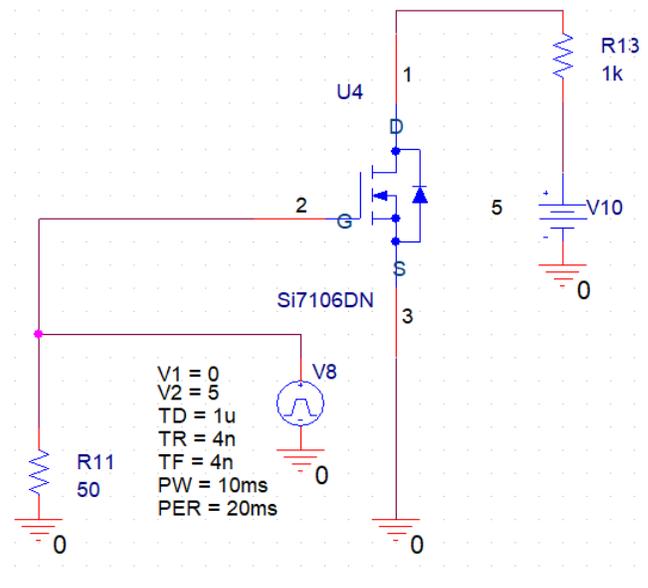


Figura 4.13: Si7106DN. Elaboración propia utilizando PSpice.

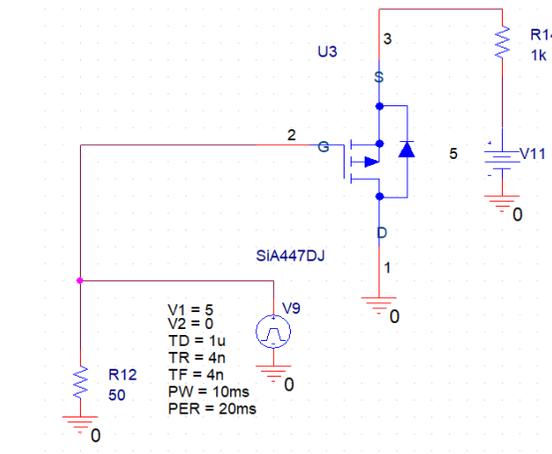


Figura 4.14: SiA447DJ. Elaboración propia utilizando PSpice.

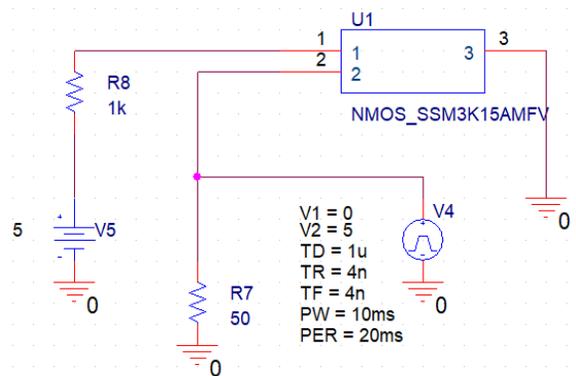


Figura 4.15: SSM3K15AMFV. Elaboración propia utilizando PSpice.

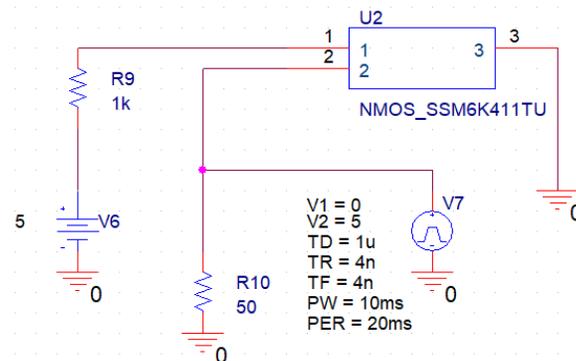


Figura 4.16: SSM6K411TU. Elaboración propia utilizando PSpice.

Seguidamente se procede a construir en PSpice, los bloques preestablecidos en el primer apartado, uniendo cada uno de los componentes que ya fueron probados. Esta configuración se establece de acuerdo al diseño mostrado en el plano esquemático del sistema eléctrico de potencia, con los componentes que aseguran el comportamiento deseado.

Para esto se implementa la herramienta presente en el software la cual permite ramificar el sistema e integrarlo en una vista de esquemático final que se comportará como el programa principal. De este modo, los complejos circuitos serán visualizados como cajas con entradas y salidas que brindan una apariencia más limpia y sencilla. El sistema final se ilustra en la Fig.4.17.

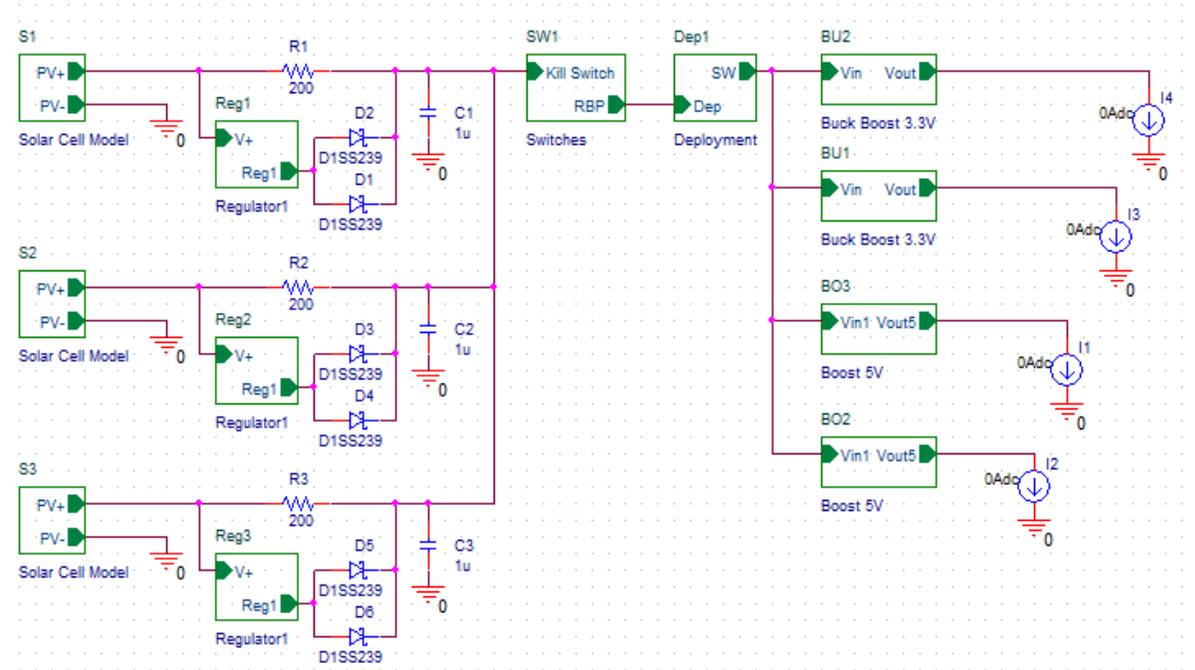


Figura 4.17: Simulación del Sistema Eléctrico de Potencia en PSpice. Elaboración propia utilizando PSpice.

Como ya se mencionó, se utiliza la misma estructuración de los diagramas de bloques, pero implementando una pequeña diferencia en el bloque de la batería que ahora se divide en los bloques de "Switches" y "Deployment".

La simulación de la energía consumida por el sistema se realiza por medio de una fuente de corriente que ilustrará de forma más sencilla los cambios en la demanda de energía del sistema y que más adelante se puede comparar con la carga electrónica propuesta para medir el sistema real.

4.4.5 Limitaciones del Software

La limitación del software para simular el sistema eléctrico de potencia de BIRDS 2, consiste en la falta de modelos que simulen el cargador de batería LTC4059 el cual se ubica después del bloque denominado Regulador 1 en la Fig. 4.2. El amplificador de sensor

de corriente LMP8640 que se encuentra antes de cada uno de los bloques de protección. El controlador para la protección al exceso de corriente y voltaje LTC4361-2 que cumple la función principal en el bloque de protección, encargándose de desconectar la carga cuando percibe corrientes más altas a 1A (especificado en el Anexo A) a la salida de los convertidores TPS61235 y TPS63020. Y el sensor de corriente ACS722 ubicado en el bloque de la batería.

Esto provoca que no se incorpore en la simulación las funcionalidades de los componentes mencionados en el párrafo anterior que también forman parte del Sistema Eléctrico de Potencia. Las funciones de mayor importancia que no se encuentran disponibles son la carga de la batería, los datos de corriente y temperatura realizadas continuamente en el sistema real y finalmente, la simulación del bloque de protección contra el exceso de corriente y voltaje que desconectará la carga.

Protecciones

Ya que el correcto funcionamiento de las protecciones es una situación crítica, se considera como punto de análisis para las pruebas realizadas en el modelo de ingeniería. El objetivo será determinar la demanda de corriente proveniente de la distribución, con la cual el controlador para la protección al exceso de corriente y voltaje LTC4361-2, desactiva el sistema eléctrico de potencia. Si bien es cierto que no se podrá simular el este controlador, se podrá determinar si el comportamiento de los convertidores TPS61235 y TPS63020 reacciona ante los cambios de carga de corriente exigidos a la salida de estos convertidores y si estos cambios se reflejan hasta el punto donde la demanda de corriente desconecta el sistema eléctrico de potencia en el modelo de ingeniería.

4.5 Medición del Modelo de Ingeniería

Para realizar las mediciones se establecen dos métodos en los cuáles se medirán las salidas reguladas de los convertidores TPS61235 y TPS63020 en condiciones distintas de operación, estas corresponden principalmente a la demanda de corriente por parte de los sistemas a los que se distribuye la energía y la carga de la batería. El primer método consiste en utilizar el ADC AD7298 que recolecta los datos dentro del sistema eléctrico de potencia y transmitirlos por medio de comunicación serial a través del programador diseñado para BIRDS 2 que consiste principalmente por el componente ADM3202.

El segundo método consiste en recrear las condiciones críticas de las baterías, es decir, cuando esta se encuentra en un estado de carga alto (4.2V) y un bajo estado de carga (3V), así como la carga de corriente aplicada a la salida de los convertidores TPS61235 y TPS63020. A continuación, se describen detalladamente los métodos aplicados.

Método 1

Como se menciona anteriormente, este método no invasivo busca obtener el valor de la tensión de salida de los convertidores TPS61235 y TPS63020 por medio de los sensores internos del sistema que se mencionaron anteriormente. Para esto, se utiliza la placa del modelo de ingeniería donde se encuentra el sistema eléctrico de potencia. Las baterías ya especificadas, se encargan de alimentar las placas a 4.012 V y no se le aplica ninguna carga externa. Utilizando los componentes y el equipo que se enlista en la Tabla 4.3, se verifica la tensión para el suministro de 3.3V.

Componentes y Equipo

| Nombre | Cantidad |
|---------------------------------------|----------|
| Sistema Eléctrico de Potencia BIRDS 2 | 1 |
| Programador para OBC de BIRDS 2 | 1 |
| Cable de conexión serial | 1 |
| Putty | 1 |
| Guantes de látex | Un par |

Tabla 4.3: Componentes y equipos utilizados para el método 1 de medición

Procedimiento

El primer paso será acondicionar el lugar de trabajo, seleccionando un área libre en el que se pueda colocar de forma segura el modelo de ingeniería, además se debe utilizar guantes para manipular el sistema de forma segura. En el circuito de prueba, los interruptores de seguridad se encuentran de tal forma que únicamente es necesario remover el "Kill Switch" para permitir que las baterías comiencen a energizar el sistema eléctrico de potencia, por lo que el primer paso será remover este pin como se muestra en la Fig.4.18.

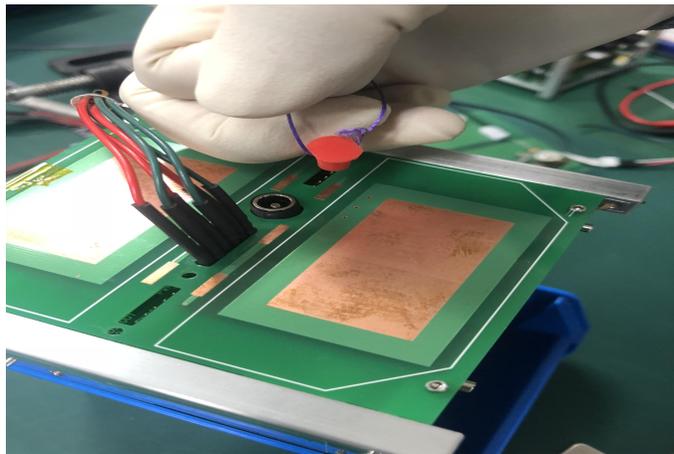


Figura 4.18: Etapa de encendido del sistema Eléctrico de Potencia. Fuente propia.

En seguida, se puede iniciar la comunicación serial a través del software de monitoreo serial de preferencia, en este caso se utiliza Putty en el cuál se despliegan inmediatamente

las configuraciones iniciales, y finalmente al presionar la tecla de entrada se visualiza el menú con las actividades que pueden ser realizadas por medio del programador. Las opciones son:

- a: Get Housekeeping data
- b: EPS Power output control
- c: Housekeeping data collection
- d: Check Flash Memories
- h: See satellite Log
- f: Reset All Time to 0
- i: SEL current Measurement
- m: Battery measurement
- r: H8 Com Reset
- t: Fuctional test
- k: Command Execution

Al introducir la letra "b", se debe asegurar que los pines de suministro que se desean medir SUP 3.3V y SUP 5.0V se encuentren encendidos, esta opción guiará al usuario para que pueda realizar dicha acción. Seguidamente para visualizar los datos se debe introducir la letra "a" en el menú principal y esto nos brindará la corriente y potencia medidas, con lo que por medio de cálculos, se pueden obtener las verdaderas tensiones en estas salidas.

Método 2

Este método consiste en probar directamente los convertidores TPS61235 y TPS63020 que proveen SUP 3.3V y SUP 5V. En este caso, se utilizará una fuente de tensión CC en lugar de las baterías y se realizará el experimento a 3V y 4.2V, esto con el fin de simular dos estados críticos en la batería, los casos de carga alta y baja. A la salida de estos convertidores se colocará una carga eléctrica con la cual se regulará la corriente demandada por los elementos que se conectan a los convertidores mencionados y se medirá desde 0 hasta el punto en el que el circuito de protección de potencia entra en funcionamiento, realizando las mediciones para cada 0.050A. En la Tabla 4.4 se enlistan los elementos necesarios para llevar a cabo este experimento.

Componentes y Equipo

| Nombre | Cantidad |
|---------------------------------------|----------|
| Sistema Eléctrico de Potencia BIRDS 2 | 1 |
| Fuente CC GWINSTEK PSW 80-13.5 | 1 |
| Carga electrónica PLZ164WA | 1 |
| Multímetro | 1 |
| Guantes de látex | Un par |

Tabla 4.4: Componentes y equipos utilizados para el método 2 de medición

Procedimiento

De igual manera es esencial ordenar el espacio de trabajo para colocar todos los elementos necesarios de forma segura, y utilizar los guantes de látex cuando se desean manipular directamente las placas del sistema. Luego se coloca la tensión de 3V o 4.2V en la entrada dónde se debe colocar la batería y se coloca la carga electrónica. Se ubican las salidas de los convertidores TPS61235 y TPS63020 y se miden por medio de un multímetro. La colocación de estos elementos se muestra en la Fig.4.19.



Figura 4.19: Componentes para el método de medición manual. Fuente propia.

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a través de la simulación del sistema eléctrico de potencia por medio del programa PSpice y de la medición del circuito de ingeniería. Además, se incorpora un análisis de los datos provenientes de la simulación en contraste con los datos del sistema real por medio de ecuaciones estadísticas.

En general, se utilizarán las ecuaciones obtenidas de [5], donde se obtiene con 5.1 el porcentaje de error de los datos obtenidos, se utiliza 5.2 para determinar el promedio de las mediciones obtenidas y 5.3 para calcular la desviación estándar.

$$\%Error = \frac{Valor_{Real} - Valor_{Aproximado}}{Valor_{Real}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.3)$$

5.1 Resultados de la simulación

En primer lugar, se muestran las gráficas obtenidas a partir de las estructuras individuales que fueron desarrolladas como se muestra en el Capítulo 4. En la Fig. 5.1, se muestra la curva obtenida para el panel solar modelado con los parámetros establecidos y se observa la forma teóricamente esperada para un gráfico de voltaje de circuito abierto en función de la corriente de cortocircuito, más adelante se analizará la exactitud de los datos obtenidos en la simulación comparando con los valores teóricos que se especifican en la hoja de datos.

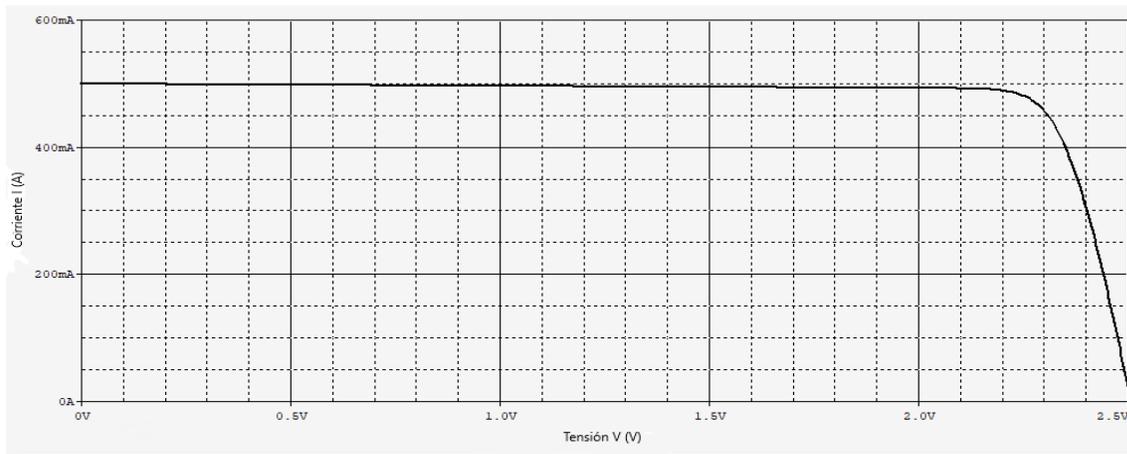


Figura 5.1: Gráfico Voc vs Isc de la celda solar. Elaboración propia utilizando PSpice.

En las Fig. 5.2, se muestra la respuesta de la tensión a salida del convertidor TPS62130, desde los 0s hasta los 2ms, punto en el que la tensión se ha estabilizado en un valor, y su configuración fue diseñada para obtener una tensión a la salida de 4.2V. La configuración de este y los convertidores TPS61071, TPS61235 y TPS63020 se pueden encontrar en el capítulo 4.

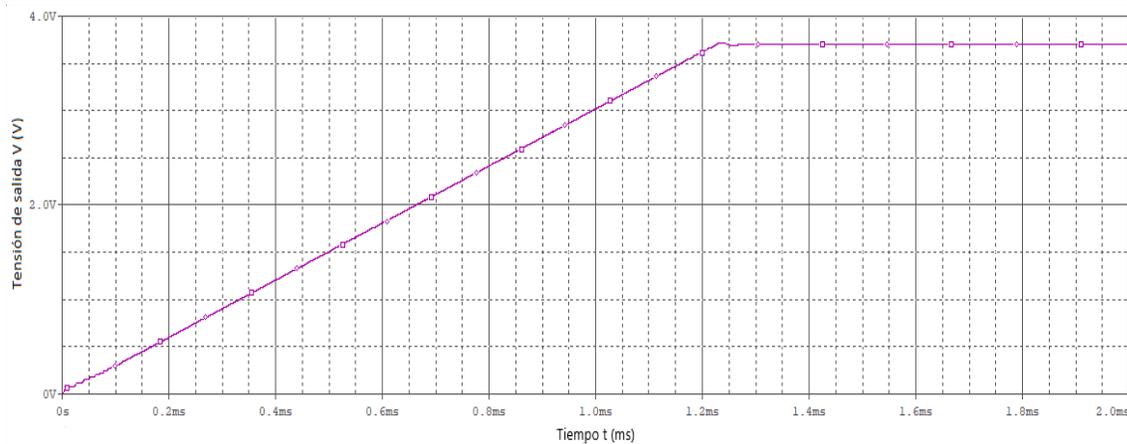


Figura 5.2: Gráfico de funcionamiento del TPS62130. Elaboración propia utilizando PSpice.

Con respecto al convertidor TPS61071 la respuesta de la tensión a la salida se presenta en la Fig. 5.3, y se define la simulación desde los 0s hasta los $800\mu\text{s}$ donde se observa la tensión de salida estable. El valor configurado para la tensión de salida del convertidor en esta simulación es de 5.1V.

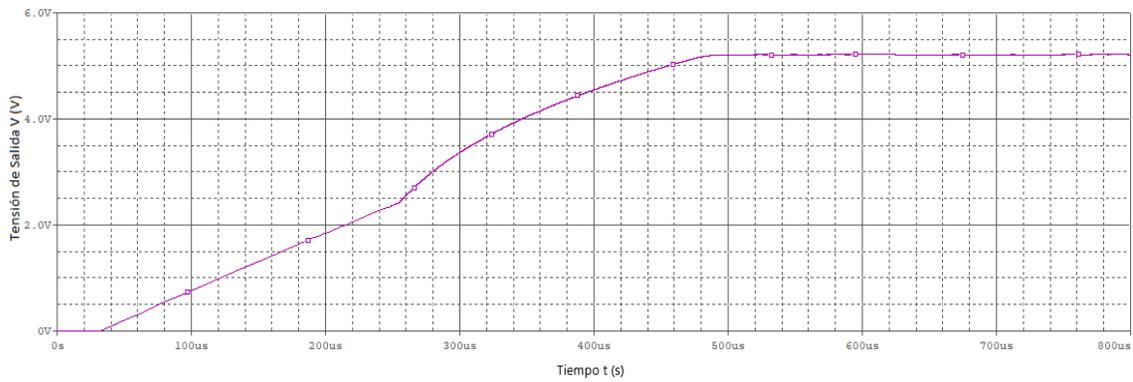


Figura 5.3: Gráfico de funcionamiento del TPS61071. Elaboración propia utilizando PSpice.

En el caso de la Fig. 5.4, se observa la respuesta de la tensión a la salida del TPS61235 desde 0s hasta 800µs, cuya configuración debe establecer a la salida una tensión de 5V.

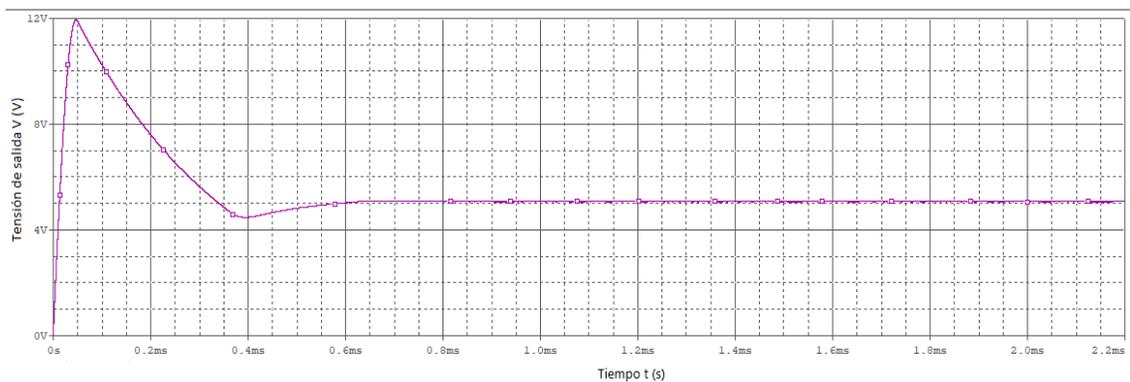


Figura 5.4: Gráfico de funcionamiento del TPS61235. Elaboración propia utilizando PSpice.

Finalmente, en la Fig. 5.5, se presenta el gráfico de la respuesta desde 0s hasta 800µs de la tensión de salida del TPS63123020 cuyo valor configurado es de 3.3V para esta prueba.

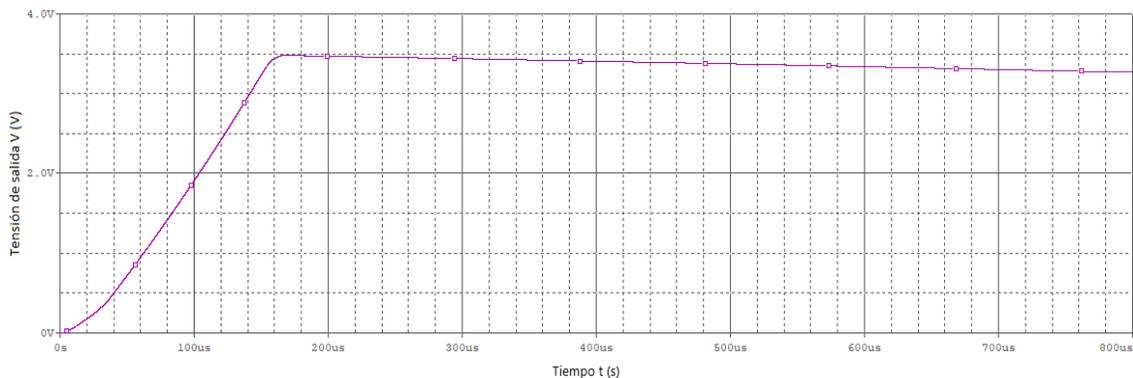


Figura 5.5: Gráfico de funcionamiento del TPS63020. Elaboración propia utilizando PSpice.

Sin embargo, solo para el TPS61235 y TPS63020 se realiza la comparación con el sistema real, para los otros convertidores mencionados, se realizará una comparación de acuerdo al valor teórico esperado a la salida de cada uno de estos convertidores dependiendo de

los valores elegidos para los capacitores, inductores y tensión establecida a entrada de los convertidores.

En la Tabla 5.1, se muestran los valores de la tensión que se configuró de acuerdo a la elección de los valores de los componentes y el valor de tensión estable obtenido por medio de la simulación por PSpice. Para cada uno de los comparadores se obtienen los porcentajes de error que determinan con qué exactitud la tensión de salida se comporta de acuerdo a los capacitores e inductores seleccionados, de los resultados se puede observar que el modelo en PSpice de los convertidores TPS61071, TPS61235 y TPS63020 es bastante exacto, excepto para el TPS62130 que pierde un poco de exactitud debido a que se obtiene más de un 10% de error.

| Convertidor | Tensión Teórica (V)] | Tensión en PSpice (V) | Error (%) |
|-------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| TPS62130 | 4.200 | 3.700 | 12 |
| TPS61071 | 5.100 | 5.199 | 2 |
| TPS61235 | 5.000 | 5.068 | 1 |
| TPS63020 | 3.3 | 3.277 | 0.7 |

Tabla 5.1: Tabla comparativa entre los valores de tensión teóricos esperados y los obtenidos mediante PSpice

5.1.1 Seguridad

Con respecto a los componentes de seguridad, se muestra básicamente el cumplimiento de su funcionamiento como interruptores. Y se crea la Tabla 5.2 donde se muestran los valores de tensión que cada uno de ellos permite obtener en cada tensión de V_{GS} . En la Fig. 5.6, se muestra la respuesta obtenida con el componente TPS22965N, y se observa como al utilizar $V_{GS} = 0$, el componente efectivamente lleva a cero la tensión V_{DS} .

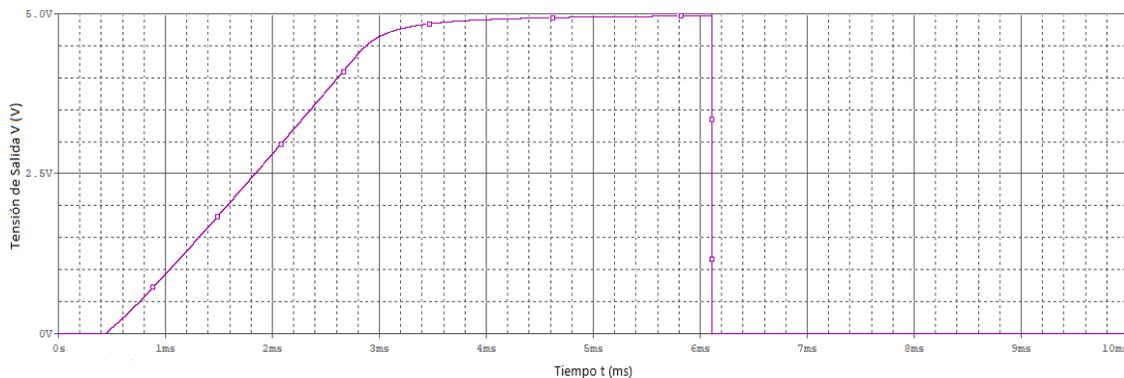


Figura 5.6: Gráfico de funcionamiento del TPS22965N. Elaboración propia utilizando PSpice.

En la Fig. 5.7, se muestra el comportamiento en función del tiempo de la tensión V_{DS} del componente Si706DN, de acuerdo a los cambios en la tensión V_{GS} .

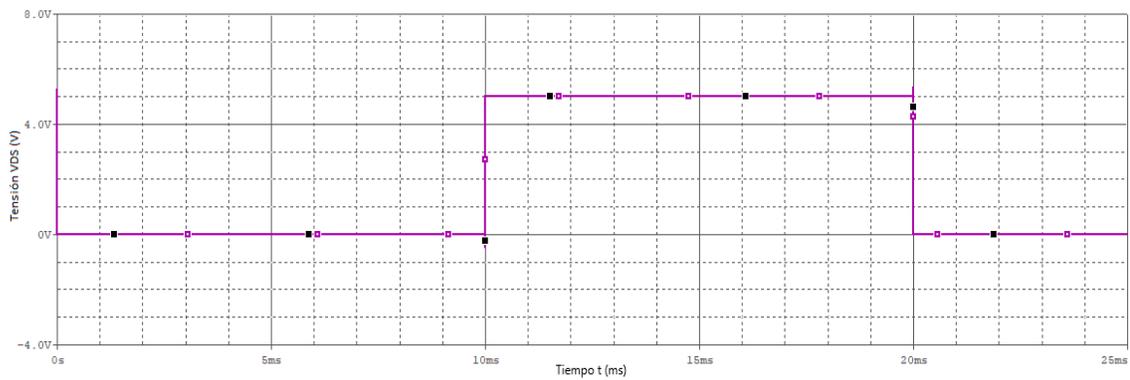


Figura 5.7: Gráfico de funcionamiento del Si706DN. Elaboración propia utilizando PSpice.

Se pone a prueba el MOSFET SiA447DJ y se comprueba que es capaz de realizar la función de interruptor en la salida V_{DS} a través del tiempo dentro de la simulación de acuerdo con los cambios de la tensión V_{GS} , y se muestra el resultado en la Fig. 5.8.

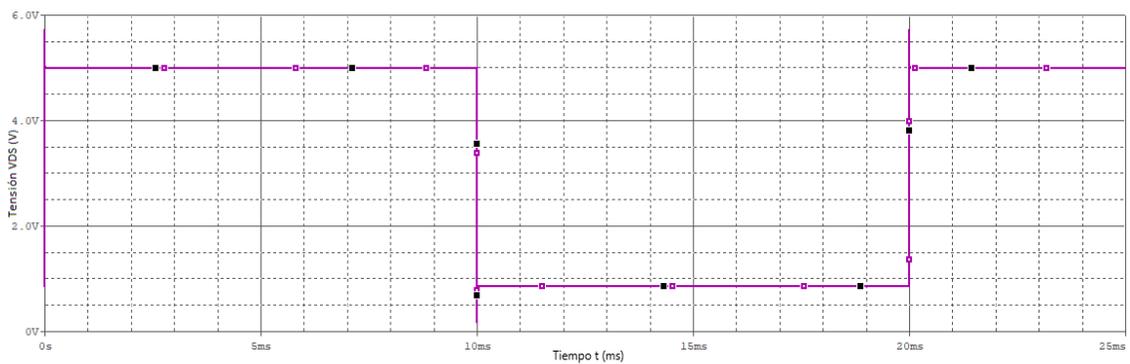


Figura 5.8: Gráfico de funcionamiento del SiA447DJ. Elaboración propia utilizando PSpice.

Para el MOSFET SSM3K15AMFV se realiza la misma prueba de aplicar una tensión V_{GS} que varía de 0V a 5V en función del tiempo y se obtiene la respuesta de la tensión V_{DS} que se presenta en la Fig. 5.9.

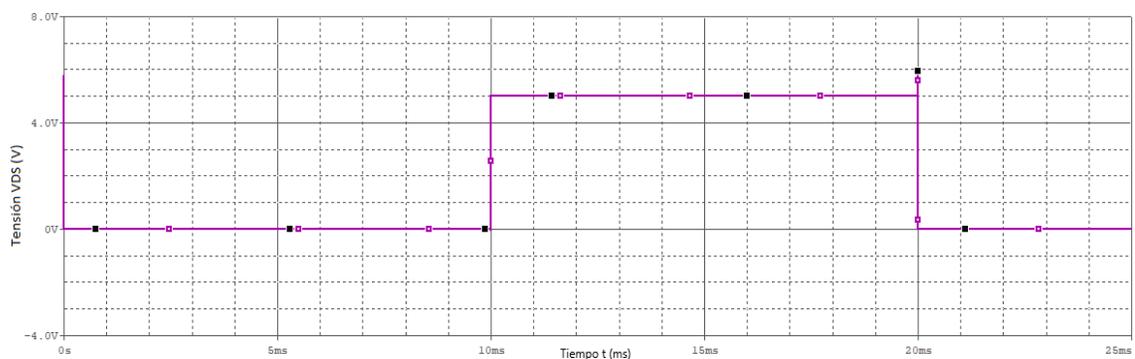


Figura 5.9: Gráfico de funcionamiento del SSM3K15AMFV. Elaboración propia utilizando PSpice.

Para finalizar con el análisis de los interruptores se obtiene la respuesta V_{DS} presente en

la Fig. 5.10, donde se observan los cambios de tensión realizados por el MOSFET al cambiar V_{GS} a través del tiempo.

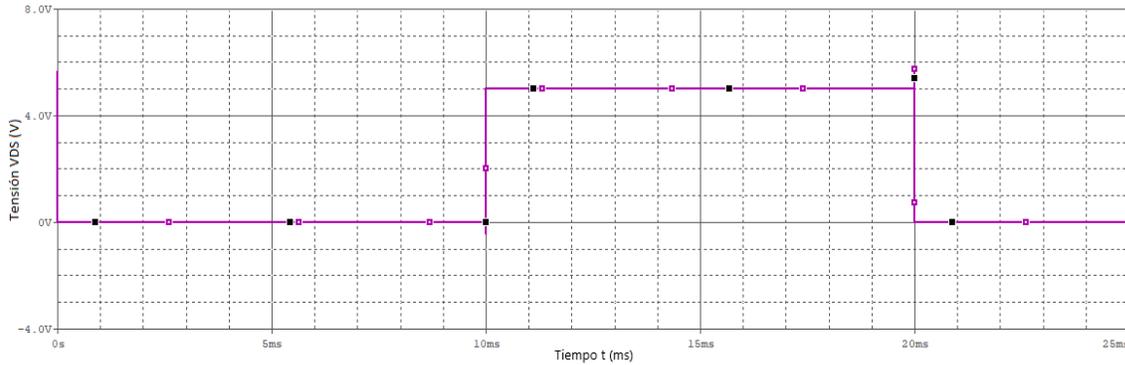


Figura 5.10: Gráfico de funcionamiento del SSM6K411TU. Elaboración propia utilizando PSpice.

Por lo tanto demuestra que efectivamente el modelo de cada uno de los MOSFET para PSpice cumple correctamente con su función de interruptor, que permite el paso y la interrupción de la tensión según el control en la tensión V_{GS} que se le asigne a cada uno. En la tabla 5.2, se realiza un resumen de los valores obtenidos para estos elementos. Debido a que no se lleva a cabo la medición de los MOSFET físicos, no se realiza el análisis de las pérdidas de tensión que vienen asociadas a estos dispositivos.

| Interruptor | Tensión V_{DS} con $V_{GS} = 5V$ (V) | Tensión V_{DS} (V) con $V_{GS} = 0V$ |
|-------------|--|--|
| TPS22965N | 5.000 | 0.000 |
| Si706DN | 5.000 | 0.000 |
| SiA447DJ | 5.000 | 0.800 |
| SSM3K15AMFV | 5.000 | 0.000 |
| SSM6K411TU | 5.000 | 0.000 |

Tabla 5.2: Tabla de las tensiones V_{DS} para los MOSFET

5.2 Resultados del sistema Real

5.2.1 Comparación y análisis de la simulación y el sistema real

Ya que no se puede tener acceso a los paneles solares utilizados en el diseño, no se han podido obtener los datos del panel solar experimentalmente, pero se define que será suficiente realizar una comparación entre la hoja de datos y los valores obtenidos en la simulación. En la Tabla 5.3 se presenta la comparación entre los datos del panel solar y la simulación del mismo.

Los datos obtenidos mediante la simulación se miden en el punto máximo de potencia que se extraen de la Fig. 5.1. De igual manera en la Tabla 5.3, se ubican los porcentajes de error asociados a estas mediciones, con los que se puede determinar que la exactitud de la tensión no es tan buena dependiendo de la forma en la que se requiera utilizar esta información, sin embargo, para la función que debe cumplir en este proyecto la exactitud es suficiente.

| Datos Eléctricos | Hoja de Datos | PSpice | Error (%) |
|--------------------------------------|---------------|---------|-----------|
| Tensión de Circuito Abierto V_{OC} | 2512 mV | 2243 mV | 11 |
| Corriente de Cortocircuito I_{SC} | 501.3 mA | 482.9mA | 6 |

Tabla 5.3: Datos eléctricos de la Celda Solar y porcentajes de error asociados

Seguidamente, se muestran los gráficos obtenidos por medio de las mediciones realizadas al sistema real, las cuáles se repitieron seis veces para cada uno de los estados medidos con lo que se calculó un valor promedió y se comparó con los datos obtenidos en la simulación. Además, se realizan cálculos estadísticos que permiten observar la exactitud de las mediciones y las diferencias encontradas entre los dos sistemas.

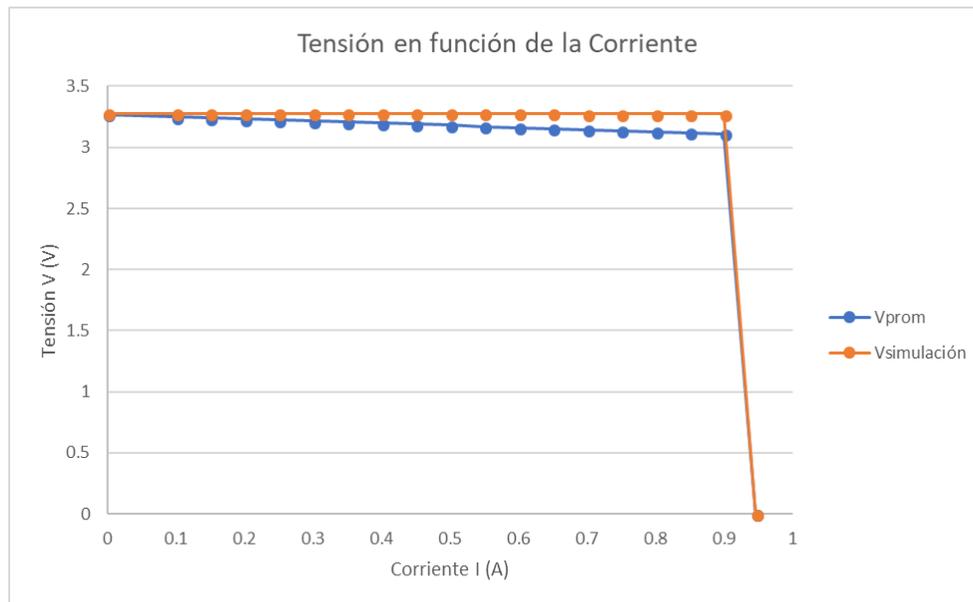


Figura 5.11: Convertidor TPS63020 con alimentación 4.2V. Elaboración propia utilizando Microsoft Excel.

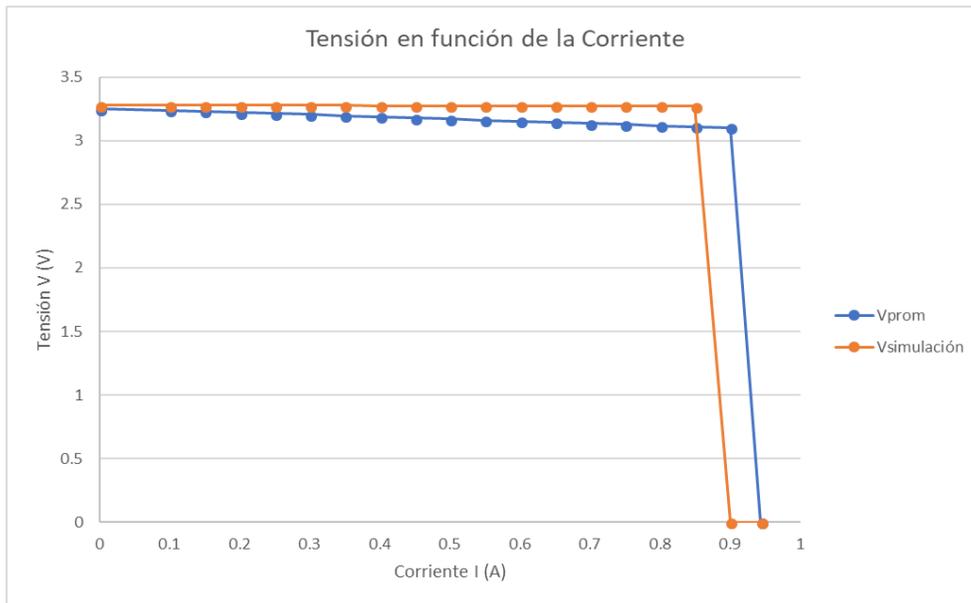


Figura 5.12: Convertidor TPS63020 con alimentación 3V. Elaboración propia utilizando Microsoft Excel.

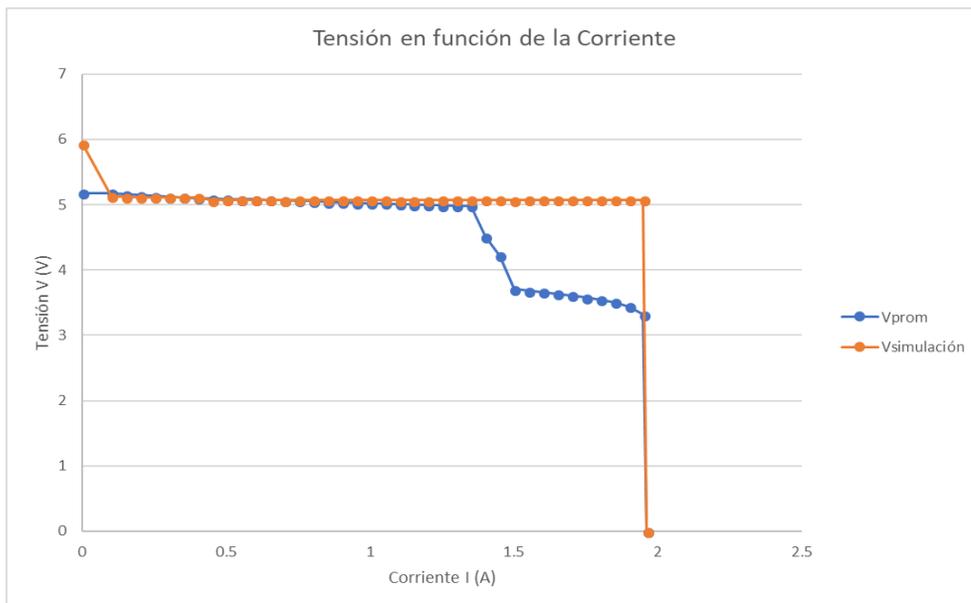


Figura 5.13: Convertidor TPS61235 con alimentación 4.2V. Elaboración propia utilizando Microsoft Excel.

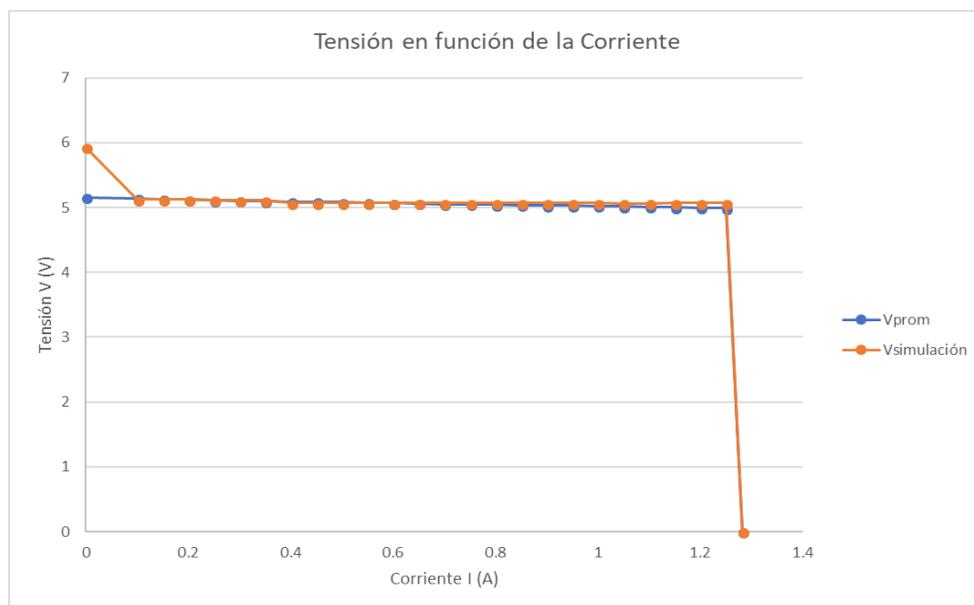


Figura 5.14: Convertidor TPS61235 con alimentación 3V. Elaboración propia utilizando Microsoft Excel.

Desde un punto de vista cualitativo, se puede observar que en las Fig. 5.11, 5.12 y 5.14, las mediciones realizadas en el sistema real poseen un comportamiento similar a la simulación, frente a las diferentes condiciones de carga, sin embargo, en el caso de los gráficos de la Fig. 5.13, existe un estado en el que el comportamiento y el voltaje cambian bruscamente.

En las Tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7, se muestran los cálculos obtenidos a partir de las mediciones realizadas que se representaron en las gráficas anteriores. En cada una se determina la calidad de las mediciones por medio de la desviación estándar, con la cual se observa la exactitud de las muestras que fueron tomadas, así como el porcentaje de error asociado a la comparación entre los datos obtenidos en la simulación y las mediciones del sistema real.

Ahora de forma cuantitativa es posible determinar en la Tabla 5.4, que los valores obtenidos en la simulación son bastante exactos para los estados de carga aplicados antes de que se active la protección contra el exceso de corriente.

En el caso de la Tabla 5.5, se observa el mismo comportamiento, pero bajo la tensión de alimentación asignada este elemento no es capaz de llegar a la tensión en la cual se desactiva el componente real, pero alcanza una condición de carga que se acerca lo suficiente para poder decir que los resultados siguen siendo bastante exactos, pues el porcentaje de error entre las corrientes que desconectan el sistema real y la simulación, no supera el 10%.

En la Tabla 5.6, se observa que para el convertidor a 5.000V en la simulación es necesario aplicar una carga, y esta carga no debe superar 1.400 A, cuando se alimenta el sistema a 4.200V, ya que a partir de este valor, el error comienza a incrementar partiendo del 13% con lo que ya no es correcto decir que la simulación se comporta de la misma forma que el componente físico.

La razón de este comportamiento puede estar ligado a que el diseño y elección de los capacitores e inductores de los convertidores TPS61235 y TPS63020 se configuran para que el límite de corriente que se les demanda sea de 2A, sin embargo, en el modelo de ingeniería, como se muestra en el Anexo A, se colocan protecciones para el exceso de corriente a la salida de estos convertidores que deben desconectar la carga a 1A, sin embargo, como se puede observar en las mediciones, la protección contra el exceso de corriente a la salida del TPS61235 no está cumpliendo su función y por el contrario se están generando comportamientos anómalos en el sistema real, lo que hace pensar que es la configuración de protección para el exceso de corriente la que está introduciendo estas anomalías, y como se dijo anteriormente, el bloque de protección no ha sido incorporado en la simulación.

Por otro lado, para la Tabla 5.7, excluyendo la condición sin carga, se obtienen porcentajes de error menores a 2%, para los valores de carga inferiores a los necesarios para que el sistema real sea desconectado por la protección contra exceso de corriente.

| Corriente I (A) | V _{prom} (V) | S _x (V) | Incertidumbre ($\pm V$) | V _{sim} (V) | Error (%) |
|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-----------|
| 0.0000 | 3.269 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.278 | 0.3 |
| 0.1000 | 3.250 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.278 | 0.9 |
| 0.1500 | 3.241 | 0.0008165 | 0.0004 | 3.278 | 1 |
| 0.2000 | 3.233 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.278 | 1 |
| 0.2500 | 3.224 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.278 | 2 |
| 0.3000 | 3.216 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.277 | 2 |
| 0.3500 | 3.206 | 0.0006325 | 0.0004 | 3.277 | 2 |
| 0.4000 | 3.198 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.277 | 2 |
| 0.4500 | 3.191 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.277 | 3 |
| 0.5000 | 3.181 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.276 | 3 |
| 0.5500 | 3.171 | 0.0004082 | 0.0003 | 3.276 | 3 |
| 0.6000 | 3.163 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 4 |
| 0.6500 | 3.153 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 4 |
| 0.7000 | 3.144 | 0.0008165 | 0.0004 | 3.275 | 4 |
| 0.7500 | 3.136 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.275 | 4 |
| 0.8000 | 3.128 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.275 | 5 |
| 0.8500 | 3.120 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.274 | 5 |
| 0.9000 | 3.110 | 0.0004082 | 0.0004 | 3.274 | 5 |
| 0.9460 | 0 | No aplica | No aplica | 3.274 | No aplica |

Tabla 5.4: Convertidor a 3.3V con alimentación de 4.2V

Finalmente en la Tabla 5.8, se muestran los resultados obtenidos por medio del segundo método de medición y se comparan con la simulación, la cual posee los componentes que se han podido incorporar a la simulación.

En esta comparación se identifican errores por debajo del 10%, que permite considerar la simulación como una herramienta de diseño cuando no se requiere comprobar el valor exacto de la salida. Sin embargo, la simulación en PSpice brinda la posibilidad de obtener una buena respuesta para el diseño de las regulaciones y detectar errores en la elección de valores de los componentes necesarios para construir las configuraciones deseadas.

| Corriente I (A) | V_{prom} (V) | S_x (V) | Incertidumbre ($\pm V$) | V_{sim} (V) | Error (%) |
|-----------------|-----------------------|-----------|---------------------------|----------------------|-----------|
| 0.0000 | 3.250 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.278 | 1 |
| 0.1000 | 3.241 | 0.0006325 | 0.0004 | 3.278 | 1 |
| 0.1500 | 3.232 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.278 | 1 |
| 0.2000 | 3.223 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.278 | 2 |
| 0.2500 | 3.215 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.277 | 2 |
| 0.3000 | 3.206 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.277 | 2 |
| 0.3500 | 3.197 | 0.0004082 | 0.0004 | 3.277 | 3 |
| 0.4000 | 3.188 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 3 |
| 0.4500 | 3.180 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 3 |
| 0.5000 | 3.171 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 3 |
| 0.5500 | 3.162 | 0.0008165 | 0.0004 | 3.275 | 4 |
| 0.6000 | 3.153 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.276 | 4 |
| 0.6500 | 3.145 | 0.0006325 | 0.0004 | 3.275 | 4 |
| 0.7000 | 3.135 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.274 | 4 |
| 0.7500 | 3.128 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.274 | 5 |
| 0.8000 | 3.119 | 0.0005164 | 0.0004 | 3.274 | 5 |
| 0.8500 | 3.110 | 0.0007528 | 0.0004 | 3.273 | 5 |
| 0.9000 | 3.103 | 0.001329 | 0.0006 | 0 | 100 |
| 0.9440 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 5.5: Convertidor a 3.3V con alimentación de 3V

| Corriente I(A) | V _{prom} (V) | S _x (V) | Incertidumbre (\pm V) | V _{sim} (V) | Error (%) |
|----------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|-----------|
| 0.0000 | 5.178 | 0.0004083 | 0.0003 | 5.930 | 15 |
| 0.1000 | 5.175 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.125 | 1 |
| 0.1500 | 5.159 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.119 | 1 |
| 0.2000 | 5.143 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.114 | 1 |
| 0.2500 | 5.130 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.114 | 0.3 |
| 0.3000 | 5.119 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.114 | 0.1 |
| 0.3500 | 5.110 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.114 | 0.1 |
| 0.4000 | 5.101 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.111 | 0.2 |
| 0.4500 | 5.095 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.070 | 0.5 |
| 0.5000 | 5.089 | 0.0009832 | 0.0005 | 5.072 | 0.3 |
| 0.5500 | 5.083 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.2 |
| 0.6000 | 5.078 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.1 |
| 0.6500 | 5.071 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.02 |
| 0.7000 | 5.066 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.070 | 0.1 |
| 0.7500 | 5.060 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.2 |
| 0.8000 | 5.052 | 0.0008165 | 0.0004 | 5.072 | 0.4 |
| 0.8500 | 5.042 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.6 |
| 0.9000 | 5.038 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.071 | 0.7 |
| 0.9500 | 5.029 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.9 |
| 1.000 | 5.024 | 0.0004082 | 0.0003 | 5.072 | 1 |
| 1.050 | 5.020 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.073 | 1 |
| 1.100 | 5.012 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.070 | 1 |
| 1.150 | 5.004 | 0.0009832 | 0.0005 | 5.068 | 1 |
| 1.200 | 4.999 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.070 | 1 |
| 1.250 | 4.988 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.073 | 2 |
| 1.300 | 4.985 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 2 |
| 1.350 | 4.981 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 2 |
| 1.400 | 4.510 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 13 |
| 1.450 | 4.220 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 20 |
| 1.500 | 3.709 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.070 | 37 |
| 1.550 | 3.684 | 0.0004082 | 0.0003 | 5.072 | 39 |
| 1.600 | 3.662 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 39 |
| 1.650 | 3.636 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 40 |
| 1.700 | 3.610 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.071 | 40 |
| 1.750 | 3.580 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 42 |
| 1.800 | 3.545 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.072 | 43 |
| 1.850 | 3.504 | 0.0009832 | 0.0005 | 5.072 | 45 |
| 1.900 | 3.441 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.073 | 47 |
| 1.950 | 3.321 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.072 | 53 |
| 1.960 | 0 | No aplica | No aplica | 5.072 | No aplica |

Tabla 5.6: Convertidor a 5V con alimentación de 4.2V

| Corriente I (A) | V _{prom} (V) | S _x (V) | Incertidumbre ($\pm V$) | V _{sim} (V) | Error (%) |
|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-----------|
| 0.0000 | 5.161 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.930 | 15 |
| 0.1000 | 5.145 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.122 | 0.4 |
| 0.1500 | 5.132 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.123 | 0.2 |
| 0.2000 | 5.122 | 0.0009832 | 0.0005 | 5.123 | 0.02 |
| 0.2500 | 5.113 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.118 | 0.1 |
| 0.3000 | 5.106 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.114 | 0.2 |
| 0.3500 | 5.100 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.111 | 0.2 |
| 0.4000 | 5.094 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.070 | 0.5 |
| 0.4500 | 5.088 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.072 | 0.3 |
| 0.5000 | 5.082 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.2 |
| 0.5500 | 5.076 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.072 | 0.08 |
| 0.6000 | 5.070 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.072 | 0.04 |
| 0.6500 | 5.064 | 0.0004082 | 0.0003 | 5.072 | 0.2 |
| 0.7000 | 5.053 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.070 | 0.3 |
| 0.7500 | 5.049 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.072 | 0.5 |
| 0.8000 | 5.043 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.6 |
| 0.8500 | 5.037 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.072 | 0.7 |
| 0.9000 | 5.032 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.072 | 0.8 |
| 0.9500 | 5.030 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.071 | 0.8 |
| 1.000 | 5.024 | 0.0005164 | 0.0004 | 5.073 | 1 |
| 1.050 | 5.015 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.067 | 1 |
| 1.100 | 5.010 | 0.0006325 | 0.0004 | 5.066 | 1 |
| 1.150 | 5.004 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.073 | 1 |
| 1.200 | 4.997 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.071 | 1 |
| 1.250 | 4.990 | 0.0007528 | 0.0004 | 5.073 | 2 |
| 1.280 | 0 | No aplica | No aplica | 5.073 | No aplica |

Tabla 5.7: Convertidor a 5V con alimentación de 3V

| V _{prom} (V) | S _x (V) | Incertidumbre ($\pm V$) | V _{sim} (V) | Error (%) |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-----------|
| 3.278 | 0.0004 | 0.0003 | 3.364 | 3 |
| 5.000 | 0.0004 | 0.0003 | 5.383 | 8 |

Tabla 5.8: Comparación de los resultados utilizando el método 2 de medición

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

Se identificaron los componentes electrónicos que forman parte del sistema eléctrico de potencia utilizado en los nanosatélites del proyecto BIRDS 2 y se realizaron diagramas de bloques a distintos niveles que ubican los componentes en las etapas de funcionamiento para este sistema eléctrico de potencia.

Para el análisis del sistema eléctrico de potencia del proyecto BIRDS 2, se identifican y establecen como parámetros críticos las tensiones a la salida de los convertidores TPS61235, TPS63020 y la corriente que demanda la carga a estos convertidores, para niveles de carga de la batería de 3V y 4.2V.

Se logró simular el comportamiento de las tensiones a la salida de los convertidores TPS61235 y TPS63020, frente a los cambios de corriente exigidos por una carga electrónica con niveles de carga de la batería de 3V y 4.2V.

Además se realizó la simulación simplificada del sistema eléctrico de potencia de BIRDS 2, mediante la integración de los bloques del panel solar, regulación 1, batería y regulación. En los cuales se excluyen los componentes LTC4059, LMP8640, LTC4361-2, ACS722, debido a la ausencia de modelos disponibles para la simulación en PSpice.

Se analizó la validez de la simulación del sistema eléctrico de potencia por medio de su comparación con valores obtenidos en las mediciones del modelo de ingeniería del sistema eléctrico de potencia de BIRDS 2, bajo las mismas condiciones de corriente en la carga y tensión de la batería. Se comparan estos datos por medio del cálculo de porcentajes de error, con lo que se determina que las tensiones a la salida de los convertidores TPS61235 y TPS63020 en la simulación son bastante exactas, excepto para el TPS61235 cuando la corriente de la carga no se encuentra entre 0.1000A y 1.400A.

6.2 Recomendaciones

Para las simulaciones se recomienda utilizar siempre las condiciones iniciales para los capacitores e inductores, puesto que al utilizar estos parámetros se mejoran los tiempos de simulación.

Para el convertidor TPS61235, utilizado en el sistema eléctrico de potencia de BIRDS 2, se aconseja simular para cargas ubicadas entre 0.1000A y 1.400A, para obtener datos con una exactitud aceptable, ya que fuera de este rango el modelo no se comporta de la misma forma que lo hace el sistema real.

Por último, implementar una simulación como herramienta de diseño permite reducir costos y tiempos en el proceso. Por esta razón, se recomienda que durante el diseño del sistema eléctrico de potencia se tomen en cuenta los componentes con modelos disponibles para su simulación. Con esto se puede lograr una reproducción bastante fiel del sistema real y crear mejores predicciones.

Bibliografía

- [1] Characteristics and applications of semiconductor power devices : Power mosfet and igtbt transistors [online, visitado el 21 de junio de 2018]. URL <https://steemit.com/steemstem/@biomanu/>.
- [2] Analog Devices. Ltspice [online, visitado el 21 de junio de 2018]. URL <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html?domain=www.linear.com>.
- [3] Labcenter Electronics. Proteus: Commercial price list [online, visitado el 21 de junio de 2018]. URL <https://www.labcenter.com/pricing/comm/>.
- [4] Umberto Grasselli, Luigi Schirone, and Antonio De Luca. Overcurrent protection performance evaluation. *Space Power, Proceedings of the Sixth European Conference*, (6):411, 2002.
- [5] D. Gutiérrez, N. Murillo, and D. Venegas. *Manual de Laboratorio: Laboratorio de Física General I*. Tecnológico de Costa Rica, 2013.
- [6] N. Mohan. *Power Electronics A First Course*. Don Fowley, 2da edition, 2012.
- [7] Laboratory of Spacecraft Environment Interaction Engineering. Introduction [online, visitado el 21 de junio de 2018]. URL <http://laseine.ele.kyutech.ac.jp/english/intro.html>.
- [8] Knut Olav. Design and implementation of the electrical power system for the cubestar satellite. Master's thesis, University of Oslo, 2013.
- [9] M. Patel. *Spacecraft Power Systems*. CRC Press, 2005.
- [10] C. Quintáns. *Simulación de circuitos electrónicos con OrCAD 16 Demo*. Digitalia, 2008.
- [11] H. Rashid. *Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Prentince Hall, 2da edition, 1993.
- [12] H. Wayne and G. Fink. *Power Electronics Circuits, Devices, and Applications*. McGraw Hill, 16 edition, 2012.

Anexo A

Esquemático del Sistema Eléctrico de Potencia

