

**Gestión y control de un sistema de almacenamiento de energía híbrido alimentado por  
paneles fotovoltaicos para la energización de un motor DC.**

**Cristian Alberto Gomez Montañez**

**Yollmar Ivan Cordoba Fragozo**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electricista**

**Director**

**María Alejandra Mantilla Villalobos**

**Dra. en Ingeniería**

**Codirector**

**Jaime Guillermo Barrero Pérez**

**Magíster en Ingeniería**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Bucaramanga**

**2019**

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante en mi formación como profesional.

A mi madre, mi padre y mi hermanita por ser los pilares más importantes en mi vida y demostrarme su cariño, comprensión y apoyo incondicional a pesar de las distancia que nos separa. A mi abuela Fidelina, por siempre estar ahí y darme ánimo con su frase "Para adelante Yomi". Tíos y primos que siempre tomaban de su tiempo para estar cuando más los necesité; de ustedes también es este logro y a mis amigos de los que estoy muy agradecido, que por medio de mensajes y consejos siempre me hacen mejorar; se han convertido en mi familia también. A todos ustedes y a los que de manera indirecta contribuyeron a lo que soy hoy, Muchas Gracias.

***Yollmar ivan cordoba fragozo.***

## **Contenido**

|                                                                          | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                       | 18          |
| 1. Marco Teórico.....                                                    | 19          |
| 1.1 Sistemas de almacenamiento de energía.....                           | 19          |
| 1.1.1. Sistemas de almacenamiento basados en baterías. ....              | 19          |
| 1.1.2. Sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores.....     | 21          |
| 1.2 Motor de imanes permanentes. ....                                    | 23          |
| 1.3 Sistema de generación – paneles solares - celdas fotovoltaicas ..... | 26          |
| 2. Información preliminar .....                                          | 28          |
| 3. Configuración del sistema.....                                        | 30          |
| 4. Dimensionamiento del sistema .....                                    | 33          |
| 4.1 Determinación del consumo .....                                      | 33          |
| 4.1.1. Consumo en el arranque.....                                       | 33          |
| 4.1.2. Consumo en estado estable. ....                                   | 35          |
| 4.2 Caracterización de la localización. ....                             | 35          |
| 4.3 Dimensionamiento de los componentes.....                             | 36          |
| 4.3.1. Generador fotovoltaico. ....                                      | 36          |
| 4.3.2. Baterías. ....                                                    | 39          |
| 4.3.3. Supercondensadores.....                                           | 41          |

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.4. Convertidores DC/DC.....                                                                                                                            | 42 |
| 5. Modelos y parámetros del sistema.....                                                                                                                   | 45 |
| 5.1 Modelo de los paneles fotovoltaicos.....                                                                                                               | 45 |
| 5.2 Modelo de los convertidores DC-DC. ....                                                                                                                | 51 |
| 5.2.1. Modelo promedio del convertidor unidireccional ‘boost’ para el generador fotovoltaico. ....                                                         | 52 |
| 5.2.2. Modelo promedio del convertidor bidireccional ‘CUK’ para el banco de baterías. ....                                                                 | 56 |
| 5.2.3. Modelo promedio del convertidor bidireccional ‘boost’ para los supercondensadores. ....                                                             | 59 |
| 5.3 Modelo de batería .....                                                                                                                                | 61 |
| 5.4 Modelo supercondensadores.....                                                                                                                         | 66 |
| 5.5 Modelo de motor DC. ....                                                                                                                               | 68 |
| 6. Adaptación de los modelos, simulación y análisis de resultados.....                                                                                     | 71 |
| 6.1 Controladores.....                                                                                                                                     | 71 |
| 6.1.1. Controlador del convertidor del generador fotovoltaico.....                                                                                         | 72 |
| 6.1.2. Controlador del convertidor del banco de baterías. ....                                                                                             | 76 |
| 6.1.3. Controlador del convertidor de los supercondensadores. ....                                                                                         | 78 |
| 6.2 Simulaciones y resultados.....                                                                                                                         | 79 |
| 6.2.1. Simulación #1: arranque directo del motor con carga nominal. ....                                                                                   | 79 |
| 6.2.2. Simulación #2: variación en el torque de carga del motor.....                                                                                       | 82 |
| 6.2.3. Simulación #3: respuesta del sistema frente a la variación en la irradiancia.....                                                                   | 85 |
| 6.2.4. Simulación # 4: respuesta al arranque del motor, de un sistema de almacenamiento compuesto de baterías sin la presencia de supercondensadores. .... | 88 |
| 7. Conclusiones .....                                                                                                                                      | 89 |
| 8. Recomendaciones .....                                                                                                                                   | 90 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Referencias Bibliográficas ..... | 91 |
|----------------------------------|----|

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                           | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Relación energía/peso en función de la relación potencia/peso de diferentes dispositivos acumuladores .....                     | 21          |
| Figura 2. Comparación de un condensador común y un supercondensador .....                                                                 | 22          |
| Figura 3. Esquema del funcionamiento básico del motor de corriente continua. ....                                                         | 23          |
| Figura 4. Circuito equivalente del motor DC de imanes permanentes.. ....                                                                  | 24          |
| Figura 5. Interpretación gráfica de horas solares pico. ....                                                                              | 27          |
| Figura 6. Sistema de paneles solares con estructura híbrida de almacenamiento.....                                                        | 28          |
| Figura 7. Posibles configuraciones para dos fuentes y una carga.....                                                                      | 31          |
| Figura 8. a) Gráfica de la corriente de arranque. b) Gráfica de energía. c) Gráfica de potencia, en función del tiempo del motor DC. .... | 34          |
| Figura 9. Promedio mensual de radiación global en la localización del sistema.....                                                        | 37          |
| Figura 10. Convertidor tipo Boost para el generador fotovoltaico. ....                                                                    | 43          |
| Figura 11. Convertidor tipo Cuk para las baterías. ....                                                                                   | 44          |
| Figura 12. Convertidor tipo Boost bidireccional para los supercondensadores.....                                                          | 45          |
| Figura 13. Bloque ‘PV Array’ Matlab-Simulink. ....                                                                                        | 45          |
| Figura 14. Parámetros del módulo de un panel fotovoltaico. ....                                                                           | 47          |
| Figura 15. Características (I-V) y (P-V) del módulo SPM 043602400 para diferentes valores de irradiancia a 25°C. ....                     | 49          |

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16. Características (I-V) y (P-V) del arreglo de módulos SPM 043602400 para temperatura de 25°C e irradiancia variable.....                                        | 50 |
| Figura 17. Características (I-V) y (P-V) del arreglo de módulos SPM 043602400 para diferentes temperaturas con una irradiancia de 1000W/m <sup>2</sup> . ....             | 50 |
| Figura 18. Corriente instantánea y promedio en un inductor.....                                                                                                           | 51 |
| Figura 19. Convertidor Boost con sus respectivas elementos.....                                                                                                           | 52 |
| Figura 20. Bloque de componentes de respuesta rápida. ....                                                                                                                | 53 |
| Figura 21. Modelo promedio del convertidor Boost del generador fotovoltaico, representado en MATLAB/Simulink. ....                                                        | 54 |
| Figura 22. Convertidor bidireccional Cuk, con sus respectivas señales de corriente y tensión. ..                                                                          | 56 |
| Figura 23. Circuito equivalente del modelo promedio del convertidor bidireccional ‘Cuk’ para el banco de baterías representado en MATLAB/Simulink. ....                   | 57 |
| Figura 24. Circuito equivalente del modelo promedio del convertidor bidireccional ‘Boost’ para los supercondensadores representado en MATLAB/Simulink. ....               | 59 |
| Figura 25. Bloque ‘battery’ Matlab-Simulink. ....                                                                                                                         | 61 |
| Figura 26. Estructura simplificada del modelo de batería. ....                                                                                                            | 62 |
| Figura 27. Estructura interna del modelo teórico-matemático de batería. ....                                                                                              | 62 |
| Figura 28. a) Curva de descarga nominal en función del tiempo. b) Curvas de descarga en función del tiempo para diferentes corrientes. ....                               | 65 |
| Figura 29. a) Curva de descarga nominal en función de la capacidad del banco. b) Curvas de descarga en función de la capacidad del banco para diferentes corrientes. .... | 66 |
| Figura 30. Bloque ‘supercapacitor’ Matlab-Simulink. ....                                                                                                                  | 67 |
| Figura 31. Modelo teórico simplificado de un Supercondensador. ....                                                                                                       | 67 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32. Bloque ‘DC Machines’ Matlab-Simulink. ....                                                                                                                                                         | 69 |
| Figura 33. Bloque ‘Permanent Magnet DC Machines’ Matlab-Simulink. ....                                                                                                                                        | 69 |
| Figura 34. Modelo eléctrico del circuito de armadura de un motor DC. ....                                                                                                                                     | 70 |
| Figura 35. Representación completa del sistema en MATLAB/Simulink. ....                                                                                                                                       | 72 |
| Figura 36. Método de IC representado en una curva P-V de un módulo solar.....                                                                                                                                 | 73 |
| Figura 37. Muestreo de las señales de tensión, corriente y sus diferenciales. ....                                                                                                                            | 74 |
| Figura 38. Implementación del algoritmo IC.....                                                                                                                                                               | 74 |
| Figura 39. Controlador del convertidor del generador fotovoltaico. ....                                                                                                                                       | 76 |
| Figura 40. Controlador del convertidor del banco de baterías.....                                                                                                                                             | 77 |
| Figura 41. Controlador del convertidor de los supercondensadores. ....                                                                                                                                        | 78 |
| Figura 42. Velocidad del motor DC.....                                                                                                                                                                        | 80 |
| Figura 43. Corrientes promedio de carga del sistema vistas desde la salida. Motor (Negro),<br>Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador PV (Verde). ....                                         | 81 |
| Figura 44. Tensión en la barra que alimenta el motor. ....                                                                                                                                                    | 81 |
| Figura 45. Corrientes promedio del sistema en la salida bajo el efecto de un cambio en la<br>corriente de la carga. Motor (Negro), Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador<br>PV (Verde). .... | 82 |
| Figura 46. Potencia consumida por el motor (Negro). Potencia entregada por el generador PV<br>(Verde), Baterías (Azul) y Supercondensadores (Rojo). ....                                                      | 84 |
| Figura 47. Tensión en la barra que alimenta el motor. ....                                                                                                                                                    | 85 |
| Figura 48. Irradiancia en el generador fotovoltaico.....                                                                                                                                                      | 86 |
| Figura 49. Corrientes promedio del sistema en la salida, ante la variación de la irradiancia.<br>Motor (Negro), Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador PV (Verde).....                        | 87 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 50. Tensión en la barra que alimenta el motor. ....                                                 | 87 |
| Figura 51. Corrientes promedio a la salida. Motor (Negro), Baterías (Azul) y Generador PV<br>(Verde). .... | 88 |
| Figura 52. Tensión en la barra que alimenta el motor. ....                                                 | 89 |

## Lista de Tablas

|                                                                                                                          | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. Variables de entrada y salida del bloque "PV Array".....                                                        | 46          |
| Tabla 2. Variables características del diodo. ....                                                                       | 47          |
| Tabla 3. Especificaciones un módulo solar de serie SPM 043602400. ....                                                   | 48          |
| Tabla 4. Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor del generador fotovoltaico. ....  | 54          |
| Tabla 5. Resumen de parámetros usados en el convertidor del generador fotovoltaico.....                                  | 56          |
| Tabla 6. Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor para el banco de baterías.....    | 57          |
| Tabla 7. Parámetros del convertidor bidireccional Cuk.....                                                               | 58          |
| Tabla 8. Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor para los supercondensadores. .... | 60          |
| Tabla 9. Resumen de parámetros usados en el convertidor de los supercondensadores. ....                                  | 61          |
| Tabla 10. Variables del modelo de carga y descarga de las baterías de ion-litio. ....                                    | 63          |
| Tabla 11. Parámetros característicos del modelo de la batería ion-litio de serie LIR18650. ....                          | 64          |
| Tabla 12. Parámetros característicos del modelo de un supercondensador de serie BCAP0310 P270 T10.....                   | 68          |
| Tabla 13. Variables de salida del Bloque ‘Permanent Magnet DC Machines’ .....                                            | 70          |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 14. Parámetros característicos del modelo del motor DC de imanes permanentes. .... | 70 |
| Tabla 15. Estado inicial de las variables controlables para la simulación #1. ....       | 79 |
| Tabla 16. Estado inicial de las variables controladas para la simulación #2. ....        | 83 |
| Tabla 17. Estado inicial de las variables controladas para la simulación #3. ....        | 85 |

## **Lista de Apéndices**

Ver documentos adjuntos en el CD, pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Datasheet Proyecto

Apéndice B. Simulador

## Resumen

**TÍTULO:** GESTIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO ALIMENTADO POR PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LA ENERGIZACIÓN DE UN MOTOR DC\*.

**AUTORES:** CRISTIAN ALBERTO GÓMEZ MONTAÑEZ  
YOLLMAR IVAN CORDOBA FRAGOZO.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Gestión de la energía, almacenamiento híbrido, supercondensadores, sistemas fotovoltaicos, convertidores DC-DC.

**DESCRIPCIÓN:** En este trabajo de grado se desarrolla la simulación de un sistema fotovoltaico aislado, con almacenamiento híbrido (Baterías Supercondensadores), para la alimentación de un motor DC de imanes permanentes. La interconexión de los elementos del sistema se realiza mediante convertidores DC-DC, utilizando una topología de alta flexibilidad que permita gestionar la energía a través de las diferentes fuentes de alimentación, aprovechando la máxima potencia entregada por el generador fotovoltaico, la alta densidad de energía de las baterías y la alta densidad de potencia de los supercondensadores.

Las simulaciones se realizaron en MATLAB/Simulink y se utilizaron los modelos de los elementos proporcionados por la librería Power Systems, se realizaron los modelos promedio de los convertidores eliminando el rizado en las señales, con el objetivo de disminuir los altos tiempos de simulación, que hacen imposible trabajar con un computador promedio.

La gestión de la energía y de la potencia se realiza de tal forma que se busque evitar cambios bruscos en la corriente de las baterías, producidos por el arranque del motor, variaciones de torque y cambios en la irradiancia, que pueden afectar la vida útil de estas.

El generador fotovoltaico es la fuente de alimentación principal de todo el sistema, por tal razón su objetivo es entregar la máxima potencia a las cargas del sistema, siempre y cuando esta sea demandada. Las cargas del sistema son: el motor, las baterías y los supercondensadores, si estos necesitan cargarse. Se emplea un algoritmo de seguidor del punto de máxima potencia además de un saturador que evita que entregue más potencia de la demandada.

Las baterías son la fuente de alimentación de respaldo que entregan la potencia que el generador PV no alcanza a entregar debido a una baja irradiancia. Además, estas se aseguran de establecer como prioridad la carga de los supercondensadores.

Los supercondensadores controlan la tensión del motor y se encargan de suministrar la potencia restante que demande la carga, debido a que el generador PV y las baterías no se les permite entregar potencia de forma instantánea.

Por último, se procede a realizar distintas simulaciones en las que se analiza la respuesta de los diferentes elementos frente al arranque del motor, variaciones en el torque, irradiancia, además de analizar el sistema sin la presencia de supercondensadores.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Directora: María Alejandra Mantilla Villalobos. Dra en Ingeniería Codirector: Msc. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Magister en Ingeniería

## **Abstract**

**TITLE:** MANAGEMENT AND CONTROL OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM POWERED BY PHOTOVOLTAIC PANELS FOR THE ENERGIZATION OF A DC MOTOR\*.

**AUTHORS:** CRISTIAN ALBERTO GÓMEZ MONTAÑEZ.  
YOLLMAR IVAN CORDOBA FRAGOZO.\*\*

**KEY WORDS:** Energy management, Hybrid storage, supercapacitor, photovoltaic systems, DC-DC converters.

**DESCRIPTION:** In this degree work, the simulation of an isolated photovoltaic system with hybrid storage (Supercapacitor-Batteries) is developed to feed a DC motor with permanent magnets. The interconnection of the elements of the system is done by DC-DC converters, using a topology of high flexibility that allows to manage the energy through the different power sources, taking advantage of the maximum power delivered by the photovoltaic generator, the high energy density of the batteries and the high power density of the supercapacitors.

The simulations were carried out in MATLAB / Simulink and the models of the elements provided by the Power Systems library were used, the average models of the converters were made to remove the ripple in the signals, with the aim of decreasing the high simulation times, making it impossible to work with an average computer.

The management of energy and power is carried out in such a way as to avoid sudden changes in the current of the batteries, produced by the motor starting, torque variations and changes in the irradiance, which can affect the useful life of the batteries.

The photovoltaic generator is the main power source of the entire system, for this reason its objective is to deliver the maximum power to the loads of the system, as long as it is demanded. The loads of the system are: the motor, the batteries and the supercapacitors, if these need to be charged. A maximum power point follower algorithm is used in addition to a saturator that prevents it from delivering more power from the demanded one.

The batteries are the backup power supply that deliver the power that the PV generator can not deliver due to a low irradiance. In addition, they ensure that the supercapacitors are charged as a priority.

The supercapacitors control the voltage of the motor and are responsible for supplying the remaining power that the load demands, because the PV generator and the batteries are not allowed to deliver power instantaneously. Finally, we proceed to perform different simulations in which the response of the different elements is analyzed in relation to engine starting, variations in torque, irradiance, as well as analyzing the system without the presence of supercapacitors

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physics Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Directress: Dr.Eng. María Alejandra Mantilla Villalobos. Dr. In Engineering Codirector: Msc. Jaime Guillermo Barrero Perez MSc In Engineering

## **Introducción**

Los sistemas fotovoltaicos aislados autónomos son fuentes de energía que necesitan de un sistema de almacenamiento confiable que satisfaga la demanda de forma adecuada sin que existan interrupciones o deficiencias durante el suministro de energía (Dougal, Liu, & White, 2002).

Tradicionalmente las baterías han sido siempre el sistema de almacenamiento predeterminado para los sistemas fotovoltaicos debido a su sencillez y flexibilidad, sin embargo, existen circunstancias que pueden reducir considerablemente la vida útil de las baterías (Glavin, Paul K.W, Sara, & W.G, 2008). Un ejemplo sería en sistemas de irrigación de agua, que requieren la continua energización de motores DC, estos traen consigo corrientes de arranque muy altas que, en caso de no haber supercondensadores, estas tienen que ser suplidas por la batería, que en su dimensionamiento deben satisfacer estos picos de potencia, lo que se traduce en baterías de mayor tamaño y, por lo tanto, un mayor precio.

La combinación de baterías y supercondensadores, conforman un sistema de almacenamiento de energía híbrido, lo cual incrementa la densidad de potencia del sistema. Con el control adecuado, es posible hacer que los supercondensadores se encarguen de soportar los cambios bruscos de corriente y evitar que la batería experimente estas variaciones.

Como objetivo general se pretende establecer una estrategia de gestión y control para un sistema de almacenamiento de energía híbrido baterías-supercondensadores alimentado por paneles fotovoltaicos para la energización de un motor DC.

De los objetivos específicos se tienen:

- Definir una configuración basada en convertidores DC-DC para la interconexión del sistema de generación fotovoltaico, el sistema de almacenamiento y la carga.
- Simular una estrategia de control que permita la gestión de la energía suministrada por el generador fotovoltaico y la energía almacenada por baterías y supercondensadores ante una carga motora DC.
- Comparar la respuesta y el comportamiento de un ESS y de un HESS (Hybrid-ESS), debido a cambios bruscos en la corriente de carga.

## **1. Marco Teórico**

### **1.1 Sistemas de almacenamiento de energía.**

Los sistemas de almacenamiento de energía representan una gran oportunidad para gestionar la energía e integrar sistemas de generación de energía poco estables, como pueden ser los sistemas de generación de energía basados en energía Eólica o Solar, estabilizando y controlando el flujo de energía para poder realizar un suministro regulado de la misma (Sánchez-Migallón, España).

**1.1.1. Sistemas de almacenamiento basados en baterías.** Las baterías son sistemas de almacenamiento de energía eléctrica basados en reacciones electroquímicas de reducción-oxidación que, en función de la tecnología o materiales utilizados, estas devuelven casi en su totalidad la energía eléctrica almacenada.

El ciclo de carga-descarga es un proceso de vida limitada por lo que se pierde eficiencia en función del número de ciclos y con ello la vida útil de la batería, de manera que se trata de un generador de electricidad constante con necesidad de un proceso previo de carga.

Al conectar una batería a un circuito, aporta la intensidad de corriente requerida por el circuito externo de forma constante hasta un mínimo definido por las características de la batería mientras esté cargada, y consumiendo corriente eléctrica si se produce un proceso de carga.

La batería está compuesta de tres elementos básicos, el ánodo, terminal de menor potencial eléctrico, el cátodo, el terminal de mayor potencial eléctrico y el electrolito, que es el elemento que permite el paso de los electrones de un terminal a otro, a medida que se extrae la corriente comienza a circular desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito (Sánchez-Migallón, España).

Las baterías actuales de gran capacidad que se utilizan en los sistemas de almacenamiento de energía están compuestas de distintos módulos de baterías, electrolitos, colocados en serie y paralelo formando una red para aumentar la tensión que soportan y la intensidad de corriente máxima que pueden ofrecer.

Existen distintos tipos de baterías según la electroquímica de la que estén compuestas, siendo específicos en algunos casos de campos de aplicación, las electroquímicas más importantes son: baterías de ácido-plomo, níquel-cadmio (NiCd), sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), níquel-metal hidruro (NiMH), entre otras, y las que se van a analizar en este trabajo son las de Ion-litio (Sánchez-Migallón, España).

Las baterías de Ion-Litio presentan un uso muy extendido tanto en pequeñas aplicaciones como teléfonos móviles u ordenadores portátiles como en aplicaciones de mayores densidades de energía como los vehículos eléctricos.

Una de sus principales características se observa en la figura 1; la energía específica de 100 Wh/kg y una energía específica promedio de 200 W/kg.

En la Figura 1, se observa la relación entre los distintos dispositivos acumuladores en función de su peso respecto a la energía que son capaces de desarrollar, para así seleccionar correctamente el tipo de batería en función de la potencia necesaria para la aplicación o la portabilidad que se pueda requerir de estos sistemas (Sánchez-Migallón, España).

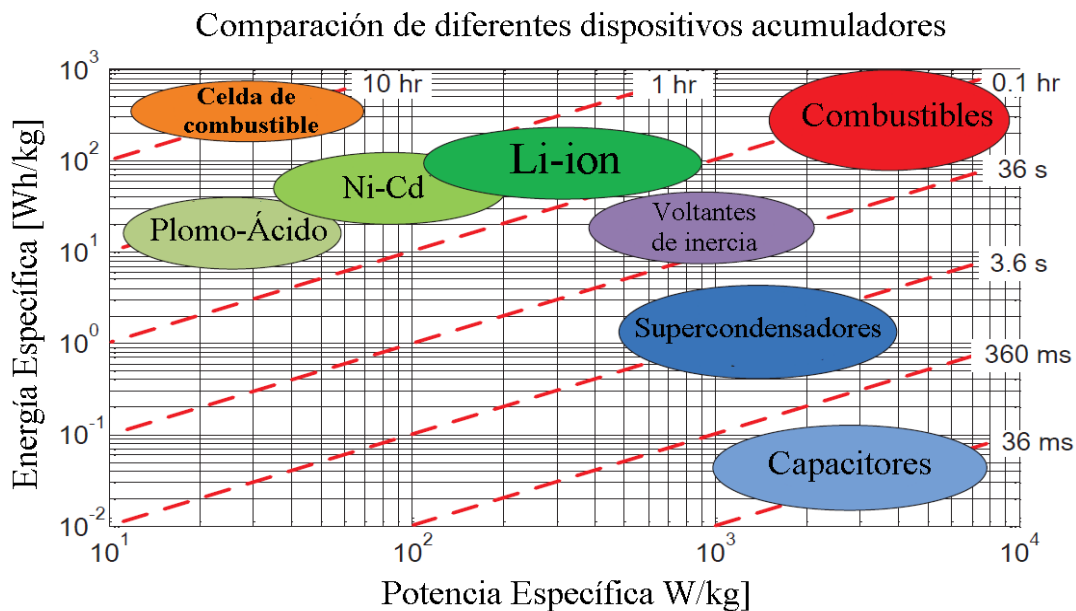


Figura 1. Relación energía/peso en función de la relación potencia/peso de diferentes dispositivos acumuladores

**1.1.2. Sistemas de almacenamiento basados en supercondensadores.** Los supercondensadores representan una de las innovaciones más recientes en el campo del almacenamiento de energía eléctrica. Estos encuentran su lugar en muchas aplicaciones donde pueden ayudar a entregar altas demandas de potencia en cortos periodos de tiempo. En

comparación con los condensadores comunes, estos nuevos componentes permiten una densidad de energía mucho más alta (Rufer & Barrade, 2002), como se muestra en la figura 2.



FOTOGRAFÍA 1. Condensador electroquímico común, 1000µF/16V. E=12.8 Joules.



FOTOGRAFÍA 2. Supercondensador, 800F/2.5V. E=2500 Joules.

*Figura 2. Comparación de un condensador común y un supercondensador . Adaptado de: (Rufer & Barrade, 2002)*

La energía almacenada en estos supercondensadores es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada siguiendo la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

Donde, C corresponde a la capacitancia del elemento.

Estos supercondensadores llegan a alcanzar valores de hasta 5 kF, el inconveniente principal que tienen es su baja tensión de operación que ronda en alrededor de los 3.5 V.

Para formar un sistema de mayor tensión de operación es posible la interconexión de distintos supercondensadores en serie, sin embargo, la capacitancia equivalente disminuye.

Estos elementos presentan una muy baja resistencia interna por lo que la constante de tiempo de descarga es muy pequeña haciendo de estos elementos unos de los más rápidos en reaccionar, pudiendo alcanzar densidades de potencia mucho mayores que las que pueden aportar las baterías.

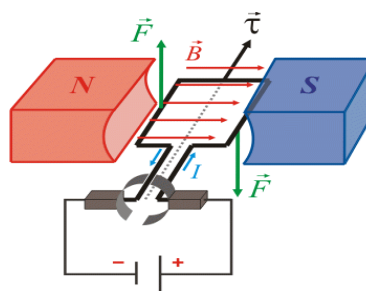
La aplicación principal para este tipo de elemento de almacenamiento de energía son sistemas para los que se necesite rápida respuesta y grandes cantidades de potencia, su tiempo de vida varía mucho en función de las condiciones de trabajo, es decir, en función de la temperatura y del número de ciclos de vida del elemento (Sanchez Migallón, 2016).

## 1.2 Motor de imanes permanentes.

Los motores eléctricos de imanes permanentes utilizan la combinación de campos magnéticos de naturaleza permanente correspondiente a los imanes y campos magnéticos inducidos producidos por la corriente de excitación externa que fluye a través de los devanados del estator para su movimiento.

El funcionamiento de un motor de corriente continua de imanes permanentes se basa en la fuerza que se produce sobre un conductor eléctrico por el cual recorre una intensidad de corriente eléctrica en presencia de un campo magnético, según la expresión de la ley de Lorentz:

$$F = B L I \quad (2)$$



*Figura 3.* Esquema del funcionamiento básico del motor de corriente continua. Adaptado de: Automatismo industrial (s.f.) Principios de funcionamiento Recuperado de: <https://automatismoindustrial.com/motores/1-3-5-motores-de-corriente-continua/1-3-5-2-principios-de-funcionamiento/>

Donde,  $B$  es el campo magnético en teslas (T),  $L$  es la longitud del conductor cortado por líneas de campo metros (m),  $I$  es la intensidad que recorre al conductor amperios (A) y  $F$  es la fuerza que se produce sobre el conductor newton (N).

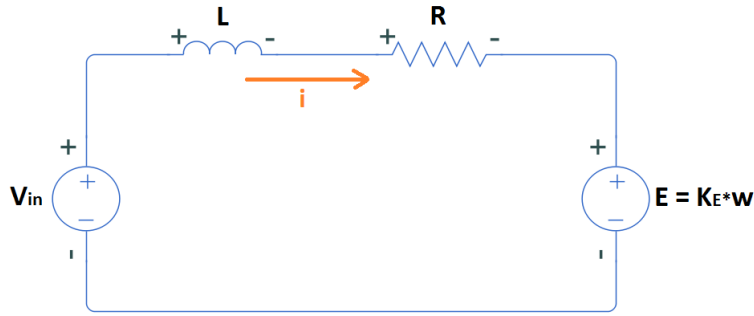


Figura 4. Circuito equivalente del motor DC de imanes permanentes. Adaptada de (Kenny, 2003).

En la figura 4, se muestra el circuito equivalente de un motor de corriente continua de imanes permanentes el cual se describe por las siguientes ecuaciones:

La parte mecánica implementa la siguiente ecuación:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + T_L + B_m \omega + T_f \quad (3)$$

Dónde:  $T_e$  es el par electromecánico,  $J$  es la inercia,  $B_m$  es el coeficiente de fricción viscosa y  $T_f$  es el par de fricción de Coulomb.

Mientras la parte eléctrica se presenta como:

$$V_s = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + E \quad (4)$$

El circuito de la armadura presenta una resistencia y un inductor en serie con la fuerza contraelectromotriz ( $E$ ).

Los orígenes de la resistencia y los componentes inductivos presentan la siguiente explicación. La resistencia en el modelo es el resultado de la resistencia finita por unidad de longitud del cable

utilizado para construir las bobinas en la armadura. El inductor es un resultado de bobinas de alambre que componen los devanados de la armadura. Todas las bobinas de alambre actúan como inductores.

La fuerza contraelectromotriz es proporcional a la velocidad de la máquina (Kenny, 2003):

$$E[V] = K_E[V.s] * \omega[s^{-1}] \quad (5)$$

Donde,  $K_E$  es la constante de tensión y  $\omega$  es la velocidad de la máquina.

Por otro lado, se tiene el par electromecánico desarrollado por la máquina, que es el resultado de la corriente que fluye en las bobinas de la armadura en presencia del campo magnético del estator. Este efecto se conoce como la ley de fuerza de Lorentz y se describe mediante las ecuaciones de Maxwell y conducen a la ley de Faraday, que describe el resultado del movimiento de una bobina a través de un campo magnético externo, se genera una diferencia de potencial.

La ley de Faraday es el efecto de la inclusión del componente de la fuerza contraelectromotriz ( $E$ ) al modelo eléctrico de un motor de DC de imán permanente. La armadura está girando dentro del campo creado por el estator, esto induce una tensión a través de la bobina mientras gira. Esta tensión se opone a la tensión colocada a través de la bobina que hace que el rotor gire en primer lugar, por tanto, par electromecánico desarrollado por la máquina es proporcional a la corriente de inducido  $I_a$  (Kenny, 2003):

$$T_e[N.m] = K_T \left[ \frac{N.m}{A} \right] * I_a[A] \quad (6)$$

Donde,  $K_T$  es la constante de par, que es igual a la constante de tensión  $K_E$ .

La convención de signos para  $T_e$  y  $T_L$  es:

$T_e, T_L > 0$ : Modo motor.

$T_e, T_L < 0$ : Modo generador.

Un motor de imanes permanentes de corriente continua no presenta corriente de campo, ya que los imanes establecen el flujo de excitación y las constantes  $K_T$  y  $K_E$  mencionadas anteriormente son constantes de la máquina. (Kenny, 2003)

También se tiene el colector, el encargado de permitir el cambio constante de polaridad de la corriente en la bobina del electroimán del rotor para que sus polos cambien constantemente. Este cambio ocurre cada vez que el electroimán gira media vuelta y pasa por la zona neutra, momento en que sus polos cambian para que se pueda mantener el rechazo que proporciona el imán permanente.

Sobre el colector están las escobillas, permiten la alimentación al rotor del motor en movimiento con corriente continua, procurando que el electroimán del rotor se mantenga girando constantemente mientras se le suministre corriente eléctrica (Vidal Martinez, 2012).

### **1.3 Sistema de generación – paneles solares - celdas fotovoltaicas**

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos fabricados generalmente a base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, siendo capaces de generar cada una de 2 a 4 Amperios, a una tensión de 0.46 a 0.48 Voltios. Estas celdas se colocan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir una tensión adecuado a las aplicaciones eléctricas.

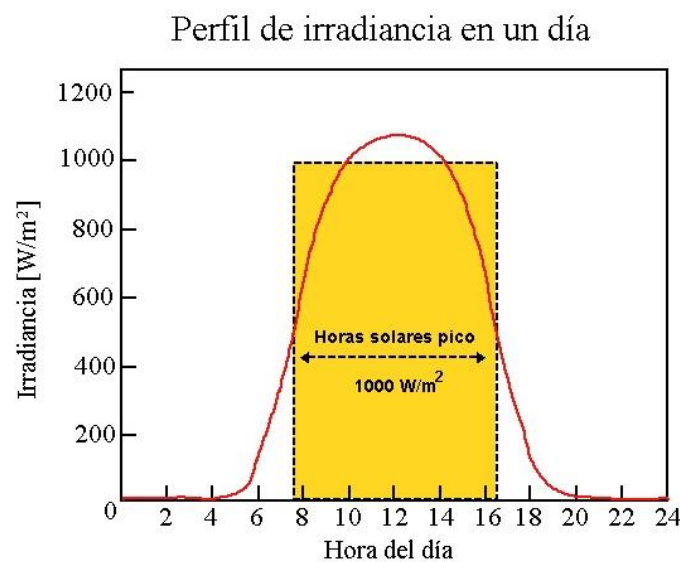
Los paneles captan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua según su tamaño, eficiencia y cuánta radiación solar reciban.

Los disponibles para uso hogareño y comercial tienen una eficiencia menor al 20 por ciento, lo que significa que menos del 20 por ciento de la energía del sol captada por el panel solar es absorbida y convertida en electricidad.

La potencia que puede alcanzar un panel solar y la potencia que entrega son dos temas diferentes. Si un determinado panel está calificado como 180 W, entonces rendirá hasta ese nivel con las condiciones más favorables de acuerdo con las normas técnicas de fabricación de paneles solares (IEC 61 730) que presenta la cualificación de seguridad del módulo fotovoltaico con relación con los requisitos constructivos y reglas de ensayo (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015).

Para el diseño de un sistema de generación se debe estimar el número de "Horas Solar Pico" que recibe el arreglo fotovoltaico (PV) en la zona de localización a instalar. Se define como "HSP" el tiempo en horas en el que se produce el mejor índice de irradiación solar en un día.

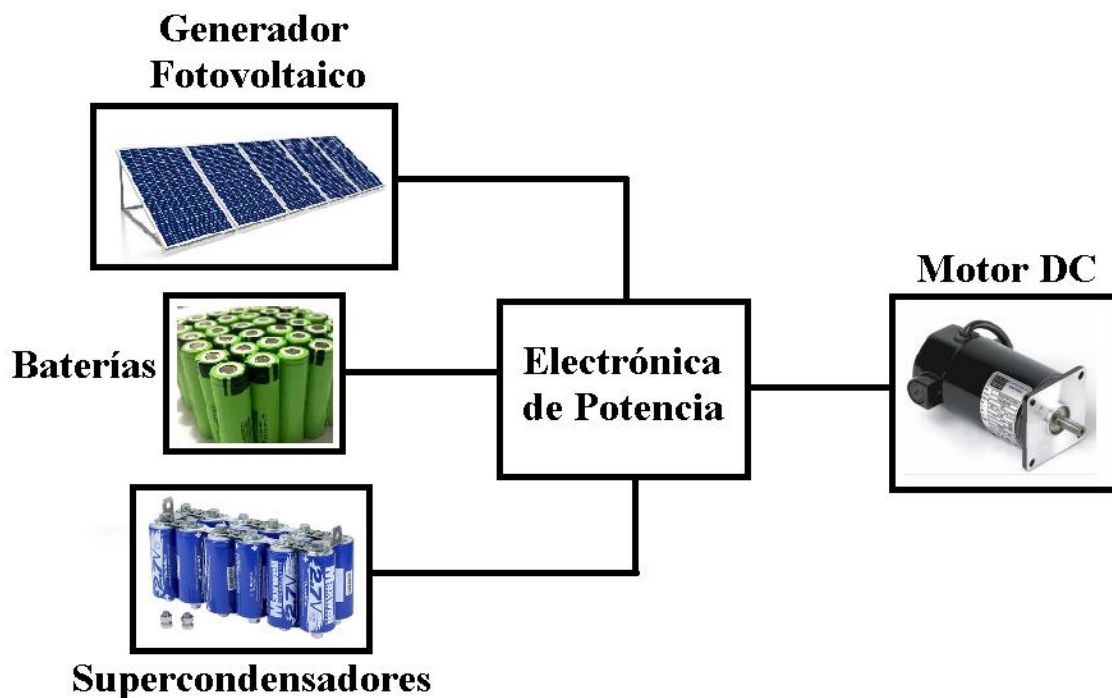
Una Hora Solar Pico en condiciones ideales es una hora de radiación equivalente  $1000 \text{ W/m}^2$  de luz solar. Con esta aproximación mostrada en la figura 5 se puede predecir cuánta potencia puede generar determinado panel solar, multiplicando la potencia pico (W) por la cantidad de horas solar pico (HSP) (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015).



*Figura 5.* Interpretación gráfica de horas solares pico. Adaptada de (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015).

## 2. Información preliminar

Un sistema de energía fotovoltaico aislado como el que se muestra en la figura 6, está conformado principalmente por una fuente de energía principal (conjunto de paneles fotovoltaicos) y un sistema de almacenamiento que suministre energía a la carga en periodos de tiempo prolongados o cortos, debido a las variaciones en la irradiancia y cambios de carga (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015).



*Figura 6.* Sistema de paneles solares con estructura híbrida de almacenamiento.

El sistema de almacenamiento que se analiza en este trabajo es híbrido, es decir está compuesto de batería/s y supercondensador/es. Estos componentes se pueden ubicar de distintas

formas dando lugar a diferentes configuraciones, por lo tanto, se hace una revisión bibliográfica y se analizan las diferentes topologías de convertidores DC-DC que se encargan de controlar la energía suministrada o consumida por cada componente.

Las simulaciones serán realizadas en el software MATLAB/Simulink.

El modelo de carga que se usa es uno que simule un motor DC, debido a los cambios bruscos y a la alta potencia que demanda durante el arranque. Se simulan diferentes comportamientos de la carga, variando parámetros como irradiancia, estados de carga (SOC) y distintos perfiles de corriente en la carga, con el objetivo de garantizar una adecuada repartición de potencia entre los diferentes elementos.

En los sistemas de almacenamiento de energía que se analizan en este proyecto se presenta el uso de baterías tipo Li-ion (ion de litio) del fabricante EEBM de serie LIR18650-2600mAh y supercondensadores del fabricante Maxwell Technologies de 2.7 V de tensión nominal.

La carga del sistema va a estar representada por un motor DC de imanes permanentes de serie PENTA 4L30-900W del fabricante MOTOR POWER, mientras que el módulo solar a utilizar corresponde al fabricante BlueSolar de serie SPM 043602400.

Nota: A lo largo del trabajo se dan a conocer parámetros característicos de los elementos anteriormente mencionados, los cuales presentan una ficha técnica (*datasheet*) en la parte de anexos.

### **3. Configuración del sistema**

El sistema cuenta con 3 elementos que alimentan la carga: generadores fotovoltaicos, baterías y supercondensadores.

Los paneles solares fotovoltaicos son muy sensibles a variaciones en la irradiancia lo que hace imprescindible el uso de un convertidor DC/DC, el cual posea un algoritmo de seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT-Maximum Power Point Tracking), incorporado en el circuito de control.

Esto deja a los sistemas de almacenamiento de energía baterías-supercondensadores con 7 posibles configuraciones entre ellos para alimentar el motor DC que se tiene como carga, como se muestra en la figura 7:

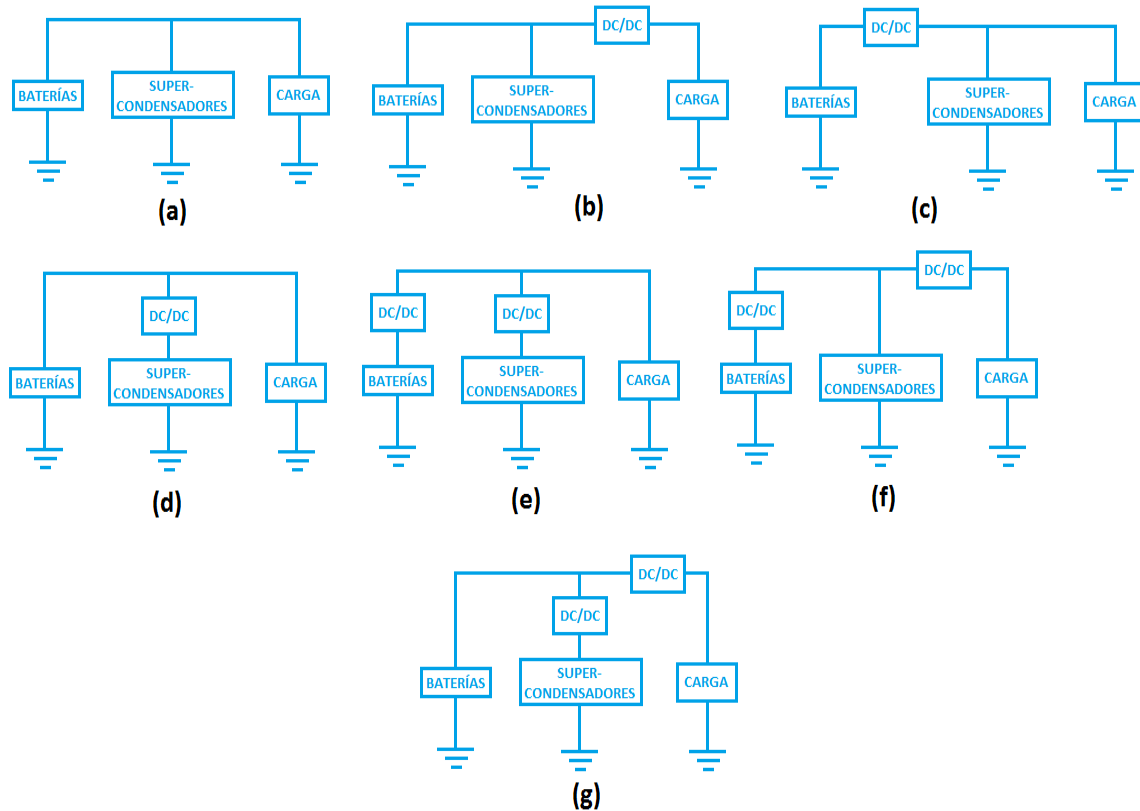


Figura 7. Posibles configuraciones para dos fuentes y una carga.

Seleccionar la configuración más apropiada, depende algunos factores como: la aplicación, el nivel de potencia, la confiabilidad, flexibilidad, limitaciones, complejidad de los controladores y precio.

La configuración más simple se muestra en la figura 7.a), en la cual la batería y el supercondensador están conectados en paralelo con la carga. Esta topología presenta varias limitaciones:

- La distribución de potencia entre ambos elementos no se puede controlar y esta depende de los parámetros internos.
- Debido a que la tensión es la misma para todos los elementos, esta es impuesta por la batería y por lo tanto no se puede controlar, además que se produce un

desaprovechamiento de la energía del supercondensador, debido a que su rango de potencia es mayor que el de la batería.

Si se incluye el uso de un convertidor en el sistema, la flexibilidad aumenta, pero se sigue careciendo de un sistema robusto para lograr el objetivo de gestionar la energía en ambos elementos de forma satisfactoria.

En la figura 7.b) se regula la tensión de salida, pero se desaprovecha la energía en los supercondensadores.

El convertidor en el supercondensador que se muestra en la figura 7.c) permite un mejor control en el sistema, siendo esta configuración ampliamente usada debido a su mayor control en la distribución de potencia entre los dos elementos, en comparación a las topologías previas.

En la figura 7.e) se encuentra una de las configuraciones más comunes debido a la inclusión de un convertidor adicional en la batería. Posee tensiones de operación flexibles, una mejor distribución de la energía y de potencia.

En las figuras 7. f) y g), existe el mismo número de convertidores que en la configuración anterior, pero esta vez hay una doble transformación de la potencia, lo que puede disminuir la eficiencia del sistema en general. Además, estas topologías son similares a las d y c, por lo tanto, no trae consigo una mejora apreciable en comparación a las demás.

Partiendo de la revisión realizada, en este trabajo se selecciona la configuración presentada en la figura 7.e) teniendo en cuenta la flexibilidad y mayor capacidad de gestión de energía.

## 4. Dimensionamiento del sistema

En el presente capítulo se analizan los procedimientos para dimensionar un sistema DC aislado de almacenamiento híbrido con fuente generadora fotovoltaica. El procedimiento para el diseño del sistema aislado se presenta de la siguiente forma. Primeramente, se determina el consumo de la carga a suministrarle energía, posteriormente se pasa a caracterizar la localización y de manera siguiente se caracterizan y dimensionan los componentes del sistema (De Kuyper & Ximon, 2014).

### 4.1 Determinación del consumo

Este entorno, se divide en dos partes al momento de analizar la energía suministrada al motor DC para el análisis de los componentes que conforman el sistema. Se analiza la energía consumida durante el arranque, el cual es de carácter transitorio y la energía que consume en estado estable.

**4.1.1. Consumo en el arranque.** El objetivo principal de este sistema es garantizar que los cambios bruscos en potencia sean suministrados por los supercondensadores por su alta densidad de potencia y rápido tiempo de respuesta. Por tanto, es esencial conocer la energía a suministrar al motor durante el arranque.

Como cálculo aproximado se define el consumo durante el arranque como:

$$C_{arr} = \int_0^{t_a} P_{motor} dt \quad (7)$$

Donde, la  $P_{motor}$  es la potencia instantánea del motor que corresponde a la tensión aplicada en los terminales multiplicado por la corriente de armadura y  $t_a$  al tiempo de arranque.

El consumo de energía durante el arranque depende del tiempo de arranque y este a su vez de la inercia del motor y de la inercia de la carga.

A continuación, se presentan las gráficas de corriente, potencia y energía correspondiente al motor DC de serie PENTA 4L30 con sus respectivos parámetros en la simulación, donde se seleccionó una inercia para la carga 5 veces mayor que la del motor.

Por tanto, la inercia del motor DC y de carga son  $0.0029 \text{ kgm}^2$  y  $0.0145 \text{ kgm}^2$ , respectivamente.

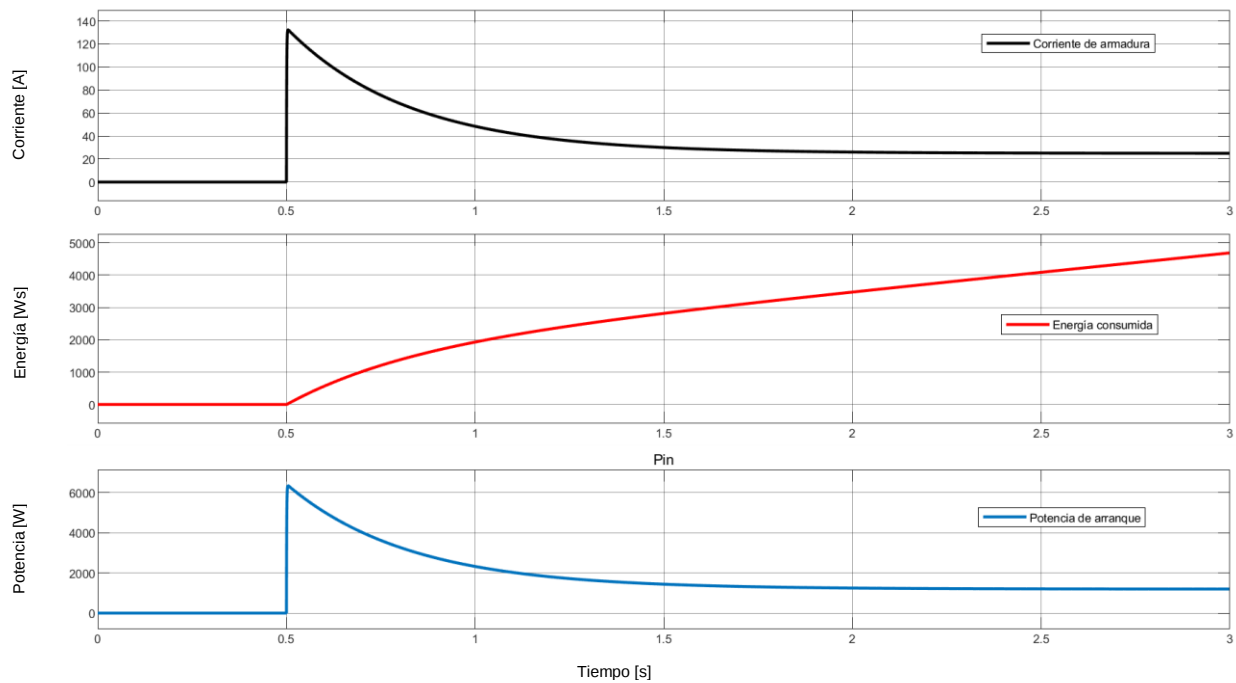


Figura 8. a) Gráfica de la corriente de arranque. b) Gráfica de energía. c) Gráfica de potencia, en función del tiempo del motor DC.

De acuerdo con la figura 8, se observa que la duración del arranque es aproximadamente 0.8 segundos, que corresponde a una energía de 2100 Ws.

**4.1.2. Consumo en estado estable.** Se determina el consumo en estado estable mediante la potencia demandada y las horas de funcionamiento del motor DC, expresado en la siguiente ecuación:

$$L_{md} = P_{in.m} * H = (V_{N.m} * I_{N.m}) * H \quad (8)$$

Donde,

$P_{in.m}$ : Potencia demandada por el motor DC.

$H$ : Horas de funcionamiento.

$(V_{N.m} * I_{N.m})$ : Tensión y corriente nominal del motor.

Para el valor de potencia demandada del motor, equivalente a la tensión y corriente nominal, se presenta el uso de un motor DC de serie PENTA 4L30, con tensión y corriente nominal de 48 V y 25 A respectivamente, obteniendo una potencia demandada de 1200 W, que estableciendo un funcionamiento de 5 horas se tiene un consumo de energía en estado estable de:

$$L_{md} = 1200 * 5 = 6000 \text{ Wh}$$

## 4.2 Caracterización de la localización.

Para instalación de un sistema fotovoltaico es necesario conocer la ubicación donde se desea instalar, para obtener los datos de radiación y construir la tabla de irradiaciones dadas en J/m<sup>2</sup>/día o Wh/m<sup>2</sup>/día. Estos datos dependen de la posición geográfica y las condiciones medioambientales de la zona a estudiar, estas irradiaciones están dadas en promedios mensuales.

Como caso de estudio, para los datos correspondientes a irradiación se tiene que el sistema se va a localizar en La Junta, corregimiento de San Juan del Cesar- municipio de La Guajira, con latitud: 10.774627 y longitud -73.145525.

#### **4.3 Dimensionamiento de los componentes.**

**4.3.1. Generador fotovoltaico.** Para su dimensionamiento (Pareja Aparicio, 2010), se tiene presente el término de “Horas de Pico Solar” (HPS), que indica el “número de horas en que se dispone de una irradiancia solar constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ ”, así como el valor de la irradiancia global horizontal media (IGH) en  $[\text{W/m}^2]$ .

El valor de las horas pico solares se obtiene al dividir el valor de la irradiación incidente por el valor de irradiancia en condiciones estándar de medida ( $1000 \text{ W/m}^2$ ):

$$HPS = I_{INC}/I_{GH} \quad (9)$$

Se dimensiona teniendo en cuenta los datos obtenidos del cociente anterior, y se considerar el mes crítico, por lo que en los otros meses se tenga en el peor de los casos se produzca un excedente de energía.

En la siguiente figura, se presenta el esquema promedio mensual de radiación por día de la localización del sistema, que se obtuvo del Atlas de Radiación solar del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) con actualización de diciembre de 2014 para el departamento de la Guajira.

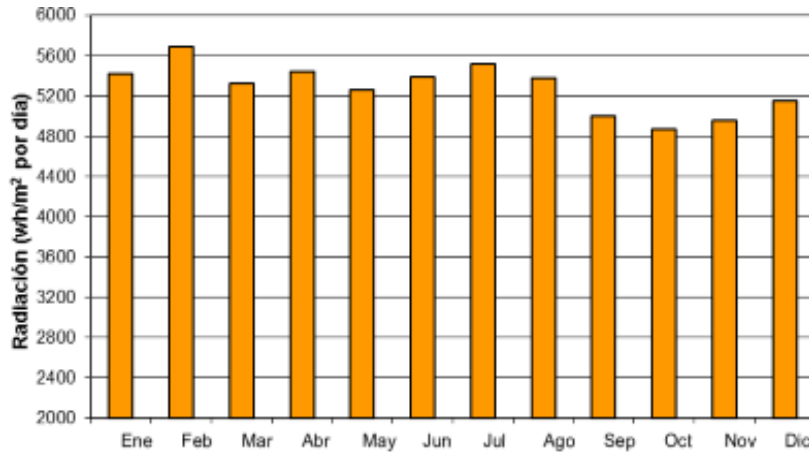


Figura 9. Promedio mensual de radiación global en la localización del sistema (IDEAM (Instituto de Hidrología, 2014)).

Para el cálculo de las horas pico solares de acuerdo con la figura 9, se presenta a octubre como mes crítico con una radiación de 4865.5 Wh/m<sup>2</sup> (IDEAM (Instituto de Hidrología, 2014)), que de acuerdo con la ecuación 8, corresponden 4.8655 HPS a dicho mes.

Para calcular el número de módulos ( $N_T$ ) necesarios para satisfacer la energía requerida, se considera el consumo de energía en estado estable ( $L_{md}$ ) presentado en la ecuación (7), y la energía generada por cada módulo ( $E_p$ ):

$$N_T \geq \frac{L_{md}}{E_p} \quad (10)$$

Nota: se escoge el mayor valor entero por confiabilidad.

La energía fotovoltaica generada por cada panel se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_p = P_{MPP} * HPS * PR \quad (11)$$

Donde,

$P_{MPP}$ : Potencia pico del módulo medida en condiciones estándar.

$HPS$ : Número de horas pico solar del mes más crítico.

$PR$ : Factor global de funcionamiento del módulo que varía entre 0.65 y 0.95.

Para el valor de energía fotovoltaica de cada módulo, se presenta el uso de un módulo solar de serie SPM 043602400 de fabricante BlueSolar, el cual consta de una potencia pico de 360 W en condiciones estándar. Dando lugar de acuerdo con los parámetros anteriores a una energía fotovoltaica de:

$$E_p = 360 * 4.8655 * 0.95 = 1664 \text{ Wh/módulo}$$

Que para satisfacer el consumo de energía requerida ( $L_{md}$ ), se ha de requerir la siguiente cantidad de módulos:

$$N_T = \frac{6000}{1664} = 3.6 \text{ módulos}$$

Partiendo de la anterior ecuación, se seleccionan 4 módulos solares fotovoltaicos.

La estructuración global del sistema generador (serie-paralelo) de los módulos fotovoltaicos se calcula teniendo presente datos como la tensión del banco de baterías a utilizar  $V_{b.bat}$  y la tensión máxima nominal del módulo ( $V_{Mmod}$ ), como también variables anteriormente mencionadas como el número de módulos necesarios para satisfacer la energía requerida ( $N_T$ ).

Para la disposición de número de módulos en serie ( $N_s$ ) se tiene:

$$N_s \geq V_{b.bat}/V_{Mmod} \quad (12)$$

Nota: se escoge el mayor valor entero por confiabilidad.

Para la disposición de número de módulos en paralelo ( $N_p$ ) va a corresponder a la misma cantidad de módulos totales  $N_T$  a utilizar para suplir el consumo de energía, por tanto:

$$N_p = N_T \quad (13)$$

Se establece la tensión del banco de baterías a un valor cercano a la tensión del motor DC, en 41 V.

Por tanto, para la disposición de número de módulos en serie se tiene:

$$N_s = \frac{41}{38.4} = 1.068 \text{ módulos en serie}$$

Por lo tanto, se selecciona un (1) solo módulo para la conexión serie. Mientras que para el número de módulos en paralelo:

$$N_p = 4 \text{ módulos en paralelo}$$

**4.3.2. Baterías.** Las baterías son los dispositivos que cumplen la función de almacenar parte de la energía que generan los paneles fotovoltaicos y suministrarla al motor en estado estable.

Inicialmente datos como la máxima profundidad de descarga ( $P_{Dmax}$ ) y los días de autonomía se tienen en cuenta para la selección de la capacidad de este componente en el sistema.

La capacidad de la batería o carga eléctrica se define como la cantidad de electricidad que puede suministrar y se mide en amperios por hora [Ah].

La capacidad nominal del banco de baterías en función de la descarga máxima ( $C_{nb}$ ) (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$C_{nb}(A.h) \geq \frac{L_{md} N}{P_{Dmax} V_{b.bat} n_{c.b}} \quad (14)$$

Donde,

$L_{md}$ : Consumo de energía nominal demandada por el motor DC en estado estable.

$P_{Dmax}$ : Profundidad de descarga máxima.

$N$ : Días de autonomía en el que el sistema deberá operar bajo una mínima irradiación y se consumirá más energía de la que el sistema PV pueda generar.

$V_{b.bat}$ : Tensión del banco de batería.

$n_{c.b}$ : Eficiencia del convertidor del banco de baterías.

La explicación de la ecuación (14) comprende, en que se quiere generar una energía con las baterías ( $L_{md}$ ), pero que se pueda disponer de ellas durante un tiempo designado sin sol, permitiendo solamente un definido porcentaje (%) de descarga máxima que, al dividirla entre la tensión del banco de baterías, se obtiene la capacidad mínima que se necesita para el sistema de acumulación en función de la máxima descarga durante los días de autonomía.

Se plantea por lo encontrado en el estado del arte una profundidad de descarga no mayor al 80% de la capacidad nominal de la batería ya que ello conllevaría al decrecimiento en la eficiencia de esta provocada por los ciclos de carga-descarga (Roitman, Mestrallet, Aramburu, & Rossi, 2015).

Respecto a los días de autonomía y tensión del banco de baterías se establece 1 día de autonomía, equivalente a las 5 horas que se va a encontrar el motor en funcionamiento en un día y 41 V de tensión del banco de baterías mencionada anteriormente.

La capacidad nominal del banco de baterías se establece de:

$$C_{nb}(A.h) = \frac{6000 * 1}{0.8 * 40 * 0.9} \approx 204 Ah$$

Una vez conocida la capacidad nominal del banco y presente la capacidad y tensión de cada batería, se procede a realizar un arreglo para cumplir los parámetros anteriores de tensión del sistema y capacidad del banco de baterías.

Se presenta el uso de la batería ion-litio de serie LIR18650 de capacidad de 2600 mA y tensión 3.7 V.

Para cumplir el requerimiento de tensión del sistema se requiere la conexión de las baterías en serie, que es el resultado de la división de la tensión del banco entre la tensión de una batería:

$$Bat_{serie} \geq \frac{41}{3.7} = 11.08 \text{ baterías en serie.}$$

Mientras que para cumplir la condición de capacidad del banco se conectan las baterías en paralelo para aumentar la capacidad del arreglo, y el valor está dado por la división de la capacidad del banco entre la capacidad de una batería.

$$Bat_{paralelo} \geq \frac{204}{2.6} = 78,46 \text{ baterías en paralelo.}$$

Por lo tanto, se seleccionan 79 baterías en conexión paralelo y 11 ramales de estas en serie.

**4.3.3. Supercondensadores.** Los supercondensadores son los dispositivos que cumplen la función de almacenar parte de la energía que se genera del arreglo solar y suministrarla al motor DC en caso se presentarse altas demandas de potencia en cortos periodos de tiempo.

Como parámetro para el dimensionamiento se establece la tensión del banco de supercondensadores de 43.2 V y la capacidad de suplir la energía demandada de 6 arranques del motor DC.

Se presentan los supercondensadores de la serie BCAP0310 con una tensión de 2.7 V.

Para cumplir el requerimiento de tensión del banco se requiere la conexión de los supercondensadores en serie, que es el resultado de la división de la tensión del banco entre la tensión de un supercondensador:

$$SC_{serie} = \frac{43.2}{2.7} = 16 \text{ supercondensadores en serie.}$$

Del consumo durante el arranque calculado anteriormente se tiene una energía de 2100 Ws. Por lo tanto, 6 arranques corresponden a una energía de 12600 Ws del lado del motor, que al referirla a través de la eficiencia del convertidor y estableciendo una profundidad de descarga de los supercondensadores de 80% se tiene la energía demandada total para calcular la capacidad del elemento:

$$Esc_{TOTAL} = \frac{12600}{0.9 * 0.8} = 17500 \text{ Ws}$$

Dado que la energía almacenada en un supercondensador es:

$$Esc_{TOTAL} = \frac{C * V^2}{2} [F * V^2] = \left[ \frac{A * s}{V} * V^2 \right] = [V * A * s] = [Ws] \quad (15)$$

Que despejando de la ecuación (15) la capacidad equivalente en Faradios se tiene:

$$C_e = \frac{2 * Esc_{Total}}{V^2} = 18.75F$$

Debido a que la capacidad de estos elementos disminuye al estar en serie, se tiene que la capacidad de un supercondensador es:

$$C_{sc} = 18.75 * 16 = 300F$$

Por consiguiente, bajo las condiciones del sistema y para la serie BCAP0310 de supercondensadores, se selecciona el supercondensador de 310 F que presenta su ficha técnica en los anexos.

**4.3.4. Convertidores DC/DC.** Los convertidores DC/DC son los dispositivos electrónicos esenciales para controlar la potencia que entregan los paneles fotovoltaicos y gestionar la energía entre los distintos elementos almacenadores.

Los tipos de convertidores dependen de factores como: el rango de variación de la tensión de entrada y la tensión de salida, el número de componentes pasivos, cantidad de interruptores, corrientes continuas o pulsantes, acoples magnéticos en los inductores y aislamiento.

En este proyecto, se pretende elegir los convertidores teniendo en cuenta su simplicidad y eficiencia, por lo tanto, no se contemplarán convertidores que incorporen transformadores de alta frecuencia, los cuales disponen de aislamiento entre la fuente y la carga.

### A. Convertidor del generador fotovoltaico

Este convertidor es unidireccional y debe tener un rango de variación alto para la tensión de entrada que corresponde a los paneles fotovoltaicos, cuya tensión varía en función a la potencia que entrega.

Debido a que la tensión en el motor es de 48 V y las tensiones de circuito abierto y de máxima potencia de los módulos son 47.4 V y 38.4 V, es posible seleccionar un convertidor tipo ‘Boost’, que eleve la tensión, debido a su simplicidad. Este garantiza un bajo rizado en el panel debido a que cuenta con un inductor a la entrada. Sin embargo, se presenta una señal de salida, pulsante, por lo tanto, es imprescindible el uso de capacitores.

Además del inductor a la entrada y un capacitor a la salida, este convertidor cuenta con un diodo rectificador y un transistor como se muestra en la figura 10. Este último como dispositivo semiconductor se encarga de cargar y descargar el inductor a altas frecuencias. Los más usados son los MOSFET y los IGBT.

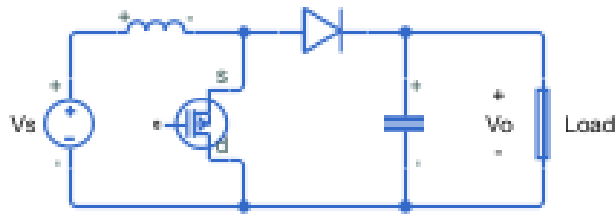


Figura 10. Convertidor tipo Boost para el generador fotovoltaico.

### B. Convertidor para las baterías.

Las baterías son los elementos de mayor cuidado debido a su vulnerabilidad en condiciones de altas o bajas temperaturas, altas profundidades de descarga, humedad, etc. El convertidor bidireccional ‘Cuk’ mostrado en la figura 11, tiene la ventaja de un bajo rizo en las corrientes de

entrada y salida, por lo que este resulta ser una elección adecuada para aplicaciones como circuitos que involucren batería-supercondensador, manejos de flujos de potencia y mantener la vida útil en dispositivos de almacenamiento de energía (Tytelmaier, Husev, Veligorskyi, & Yershov, 2016).

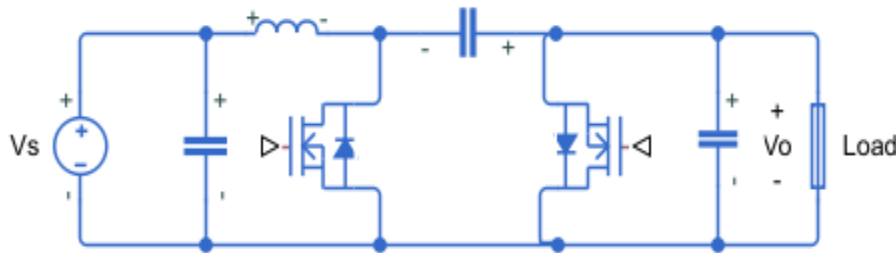


Figura 11. Convertidor tipo Cuk para las baterías.

Al ser un convertidor bidireccional, cuenta con dos transistores que son controlados para que la batería genere y consuma energía respectivamente, dependiendo de la demanda. Se tienen dos inductores que garantizan bajos rizados en las corrientes de entrada y salida; y un capacitor que almacena energía cuya función principal es amortiguar los cambios de tensión.

### C. Convertidor para los supercondensadores.

Los supercondensadores presentan una larga vida útil. Pueden soportar grandes variaciones de carga, por lo tanto, es esencial seleccionar un convertidor con tiempos de respuesta relativamente cortos, es decir, un bajo número de componentes. Una de las mayores limitaciones de los supercondensadores es su limitada tensión nominal, que para lograr una tensión de 43.2 V fue necesario realizar un arreglo en serie de estos hasta lograr dicha tensión correspondiente a la tensión del banco de supercondensadores. Esta tensión a diferencia de las baterías varía en un amplio rango que depende de la energía instantánea, por consiguiente, se selecciona de la misma forma que el panel, un convertidor tipo ‘Boost’ bidireccional, mostrado a continuación.

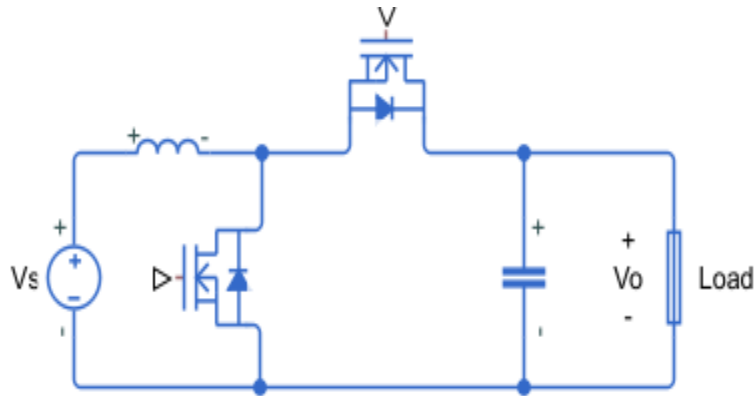


Figura 12. Convertidor tipo Boost bidireccional para los supercondensadores.

## 5. Modelos y parámetros del sistema

### 5.1 Modelo de los paneles fotovoltaicos

El modelado del generador fotovoltaico mediante la herramienta Simulink se encuentra en la librería Simscape/Electrical/SpecializedPowerSystems/ Renewables/Solar y corresponde al siguiente bloque:

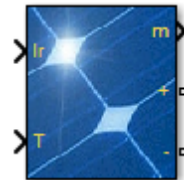


Figura 13. Bloque 'PV Array' Matlab-Simulink.

Este bloque presenta el modelo de un arreglo de módulos fotovoltaicos (PV) a través de cadenas de módulos conectados en paralelo y en serie, permitiendo modelar una generación fotovoltaica a gran escala.

El bloque “PV Array” (figura 13), presenta las siguientes señales de entradas y salidas del modelo:

Tabla 1.

*Variables de entrada y salida del bloque "PV Array".*

| Señal     |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Lr</i> | Entrada | Se conecta la variación de la irradiación solar en $\text{W/m}^2$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <i>T</i>  | Entrada | Se conecta la temperatura variable del generador en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <i>m:</i> | Salida  | Presenta las siguientes señales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{\text{PV}}</math>: Tensión del generador fotovoltaico (V).</li> <li>• <math>I_{\text{PV}}</math>: Corriente de matriz fotovoltaica (A).</li> <li>• <math>I_{\text{diode}}</math>: Corriente de diodo (A).</li> <li>• Irradiancia: Irradiancia (<math>\text{W/m}^2</math>).</li> <li>• Temperatura: Temperatura en grados Celsius (<math>^{\circ}\text{C}</math>).</li> </ul> |

El modelado de un módulo presenta cinco parámetros donde utiliza una fuente de corriente  $I_L$  (corriente generada por la irradiancia incidente), diodo (parámetros  $I_0$  y  $nI$ ), resistencia en serie ( $R_s$ ) y resistencia en derivación ( $R_{sh}$ ) para representar las características de corriente y tensiones dependientes de la irradiancia y la temperatura del módulo, como se muestra en la figura 14.

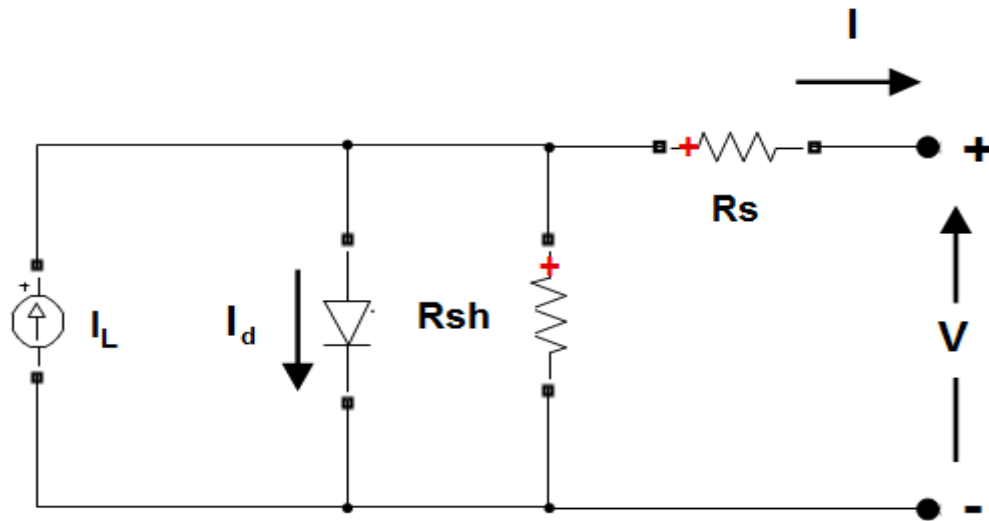


Figura 14. Parámetros del módulo de un panel fotovoltaico.

Las características de tensión y corriente de un diodo para un solo módulo están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$V_T = \frac{kT}{q} * nl * N_{cell} \quad (16)$$

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \quad (17)$$

Donde,

Tabla 2.

Variables características del diodo.

| Variable   | Descripción                                             |
|------------|---------------------------------------------------------|
| $T$        | Temperatura del generador (K).                          |
| $q$        | Carga de electrones = 1.6022e-19 C.                     |
| $k$        | Constante de Boltzman = 1.3806e-23 JK <sup>-1</sup> .   |
| $nl$       | Factor de idealidad del diodo, un número cercano a 1.0. |
| $N_{cell}$ | Número de celdas conectadas en serie en un módulo.      |
| $I_0$      | Corriente de saturación del diodo (A).                  |

| Variable | Descripción             |
|----------|-------------------------|
| $V_d$    | Tensión del diodo (V).  |
| $I_d$    | Corriente de diodo (A). |

La selección del módulo solar de serie SPM 043602400 de fabricante BlueSolar presenta las siguientes especificaciones\* que son las usadas en el modelo:

Tabla 3.

*Especificaciones un módulo solar de serie SPM 043602400.*

| Serie                                          | SPM 043602400.  |
|------------------------------------------------|-----------------|
| Fabricante                                     | BlueSolar.      |
| Tipo                                           | Monocristalino. |
| Máxima potencia [W]                            | 360             |
| Número de celdas por módulo Ncell              | 72              |
| Tensión de circuito abierto Voc [V]            | 47.4            |
| Corriente de corto circuito Isc [A]            | 10.24           |
| Tensión del punto de máxima potencia Vmp [V]   | 38.4            |
| Corriente del punto de máxima potencia Imp [A] | 9.38            |
| Coeficiente de temperatura de Voc [%/°C]       | -0.35           |
| Coeficiente de temperatura de Isc [%/°C]       | 0.04            |

\*STC (Condiciones de prueba estándar): 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM (masa de aire) 1,5.

Por la variación de la temperatura, los dos últimos parámetros se definen como:

- *Coeficiente de temperatura de Voc* (%/°C). Define la variación del  $V_{oc}$  en función de la temperatura. La tensión de circuito abierto a temperatura  $T$  se obtiene como:

$$V_{ocT} = V_{oc} \left( 1 + \beta_{V_{oc}}(T - 25) \right) \quad (18)$$

Donde:  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto a 25 °C,  $V_{ocT}$  es la tensión de circuito abierto a temperatura  $T$  (en grados C),  $\beta_{V_{oc}}$  es el coeficiente de temperatura (en% / grados Celsius) y  $T$  es la temperatura en grados Celsius.

- *Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$  (%/°C).* Define la variación de  $I_{sc}$  en función de la temperatura. La corriente de cortocircuito a temperatura  $T$  se obtiene como:

$$I_{scT} = I_{sc} \left( 1 + \alpha_{I_{sc}} (T - 25) \right) \quad (19)$$

Donde:  $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito a 25 °C,  $I_{scT}$  es la corriente de cortocircuito a temperatura  $T$  (en grados Celsius),  $\alpha_{I_{sc}}$  es el coeficiente de temperatura (en% / grados Celsius) y  $T$  es la temperatura en grados Celsius.

A continuación, se muestran las características ( $I$ - $V$ ) y ( $P$ - $V$ ) de un módulo y del arreglo dimensionado para irradiancia variable a una temperatura de 25 °C y para temperaturas variables con una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.

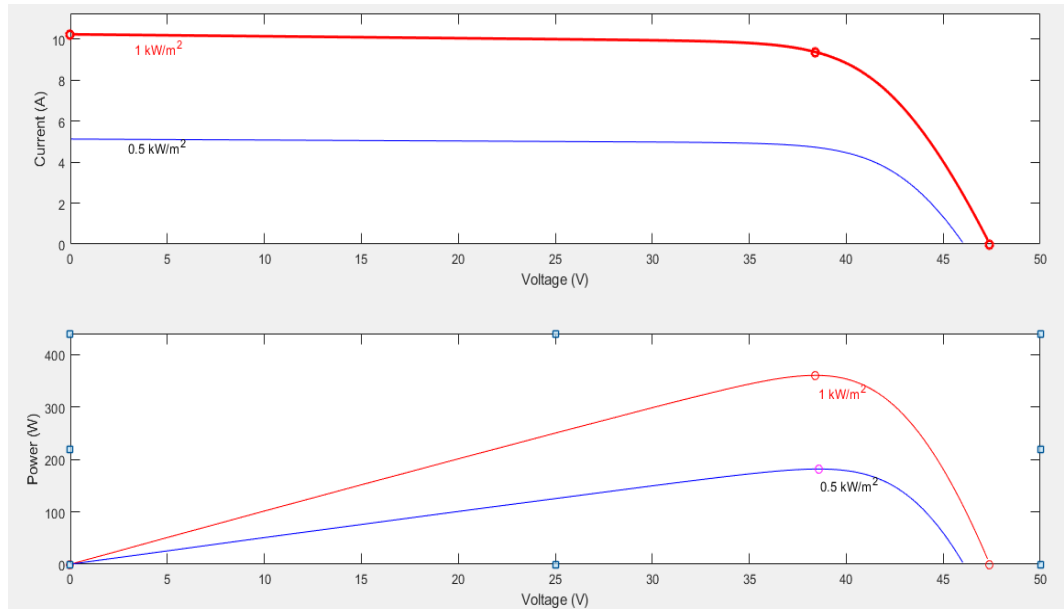


Figura 15. Características ( $I$ - $V$ ) y ( $P$ - $V$ ) del módulo SPM 043602400 para diferentes valores de irradiancia a 25°C.

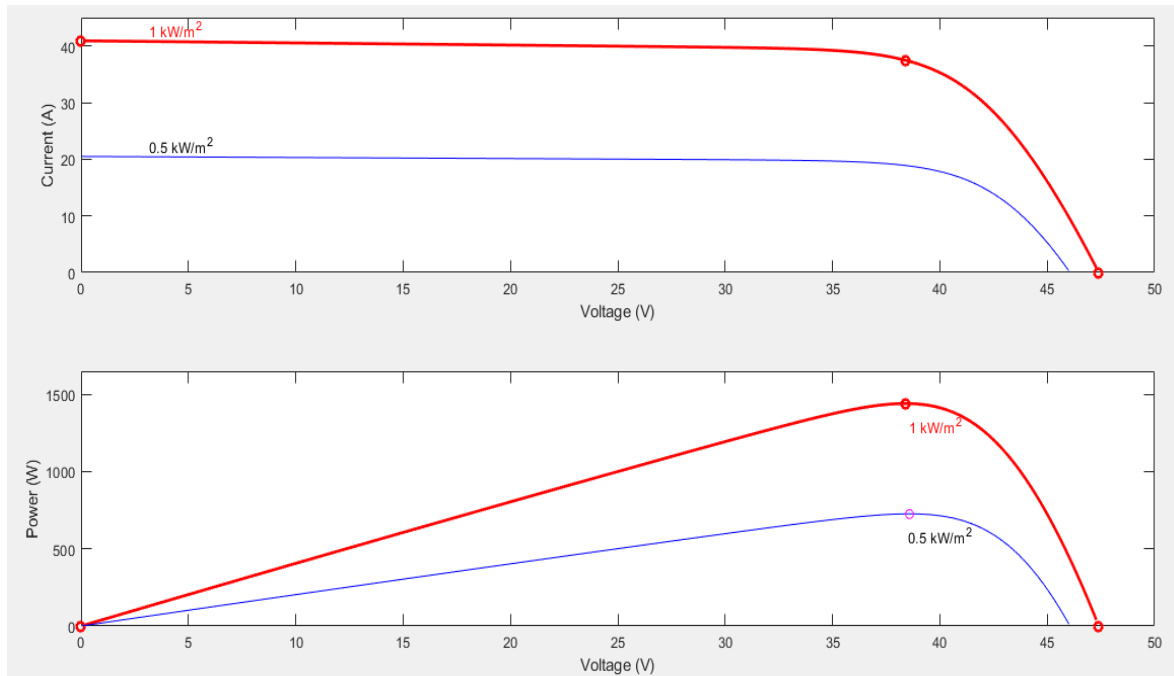


Figura 16. Características (I-V) y (P-V) del arreglo de módulos SPM 043602400 para temperatura de 25°C e irradiancia variable.

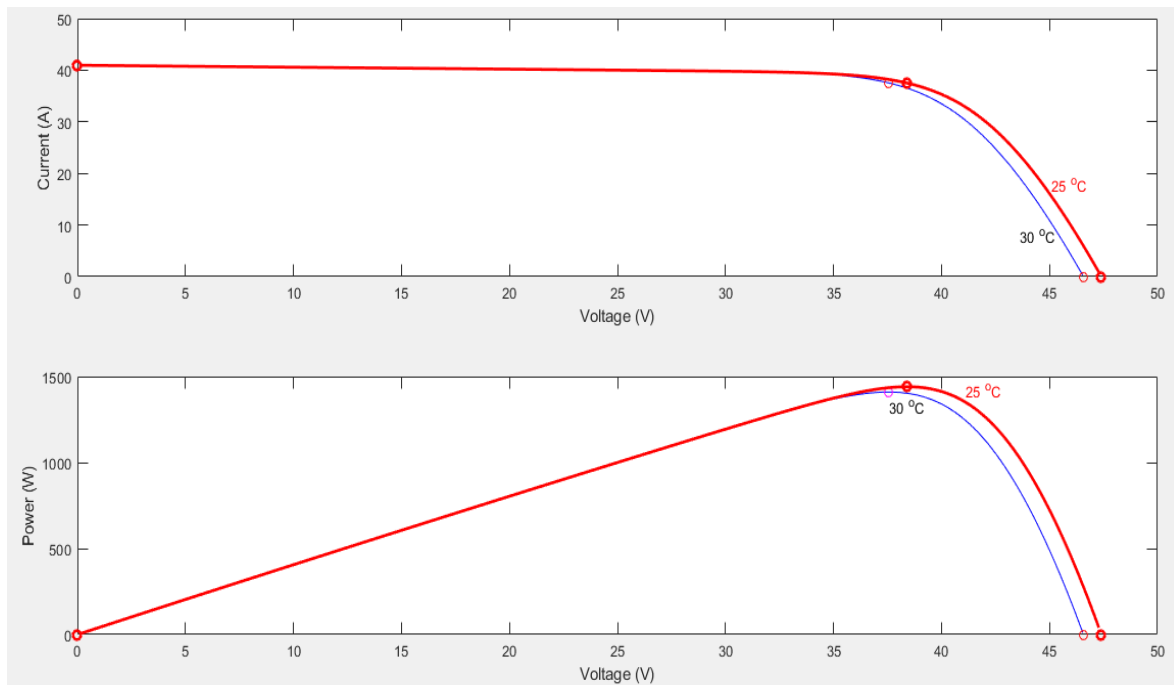


Figura 17. Características (I-V) y (P-V) del arreglo de módulos SPM 043602400 para diferentes temperaturas con una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

## 5.2 Modelo de los convertidores DC-DC.

Los convertidores DC-DC almacenan la energía de entrada temporalmente y luego la liberan produciendo una tensión mayor o menor que la entrada. Este almacenamiento de la energía se logra con capacitores y/o inductores. La conversión se logra a través de transistores que conmutan a altas frecuencias con altas eficiencias y reducida disipación de calor. Las altas frecuencias de conmutación (del orden de los kHz) producen armónicos en las señales de tensión y corriente, los cuales pueden filtrarse y así obtener un valor promedio como se muestra en la figura 18.

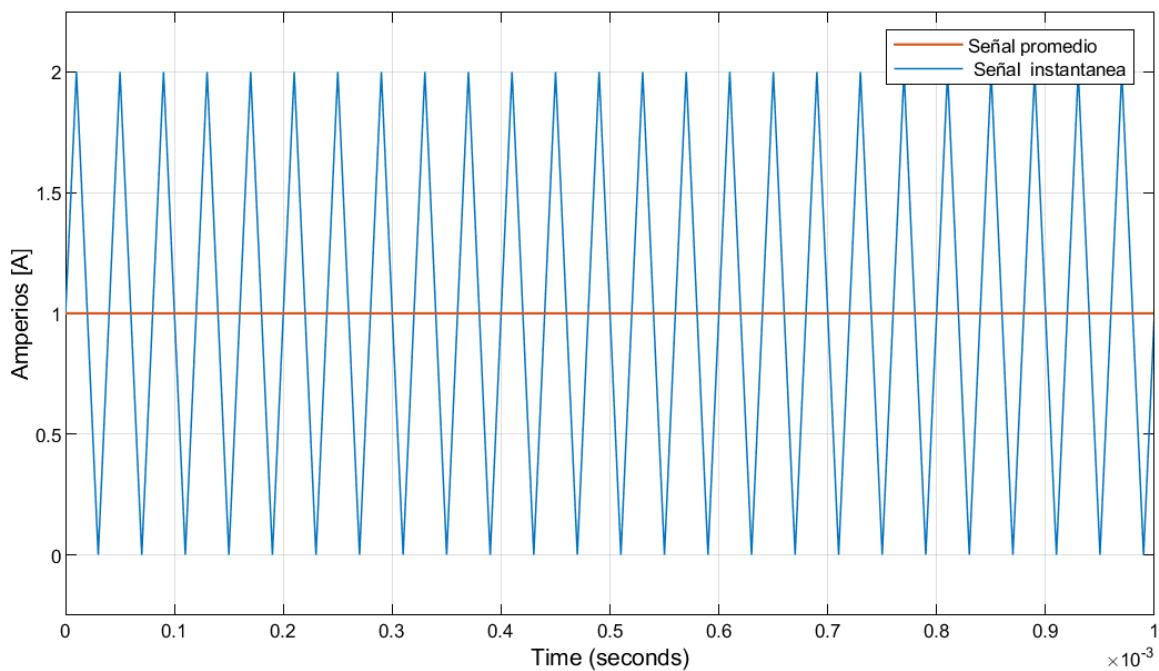


Figura 18. Corriente instantánea y promedio en un inductor.

Estas señales de alta frecuencia implican tiempos de muestreo relativamente altos, lo que se traduce en tiempos de simulación prolongados.

El enfoque del trabajo consiste en el reparto de potencias y gestión energética entre los diferentes elementos del sistema.

A continuación, se plantean los modelos correspondientes a los convertidores teniendo en cuenta únicamente el valor de las señales promedio.

**5.2.1. Modelo promedio del convertidor unidireccional ‘boost’ para el generador fotovoltaico.** La figura 19, presenta el esquema de un convertidor *Boost*, con sus respectivos elementos.

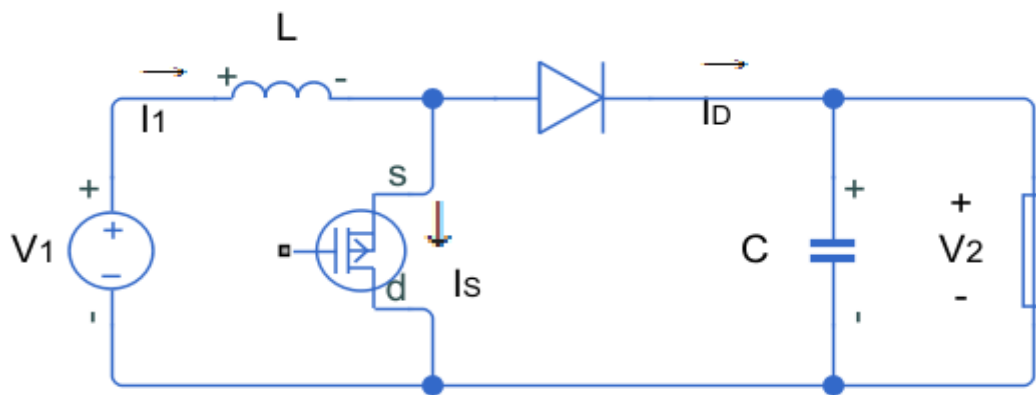


Figura 19. Convertidor Boost con sus respectivas elementos.

El procedimiento para obtener el modelo promedio es el siguiente (Michael Tse, 2011):

Se separa el convertidor en dos partes, la parte ‘rápida’ que corresponde a los elementos de conmutación como diodos y MOSFETs mostrados en la figura 20; y la parte ‘lenta’ con los componentes restantes.

Los componentes no lineales (MOSFETs y diodos) se remplazan por fuentes de tensión y corriente dependientes, cuyos valores representan los valores promedio de las señales.

Se procede a obtener la parte compuesta de elementos que conmutan (figura 20), para identificar las señales de tensión y corriente cuyos valores sean dependiente, y así representarlos mediante fuentes de tensión o de corriente respectivamente.

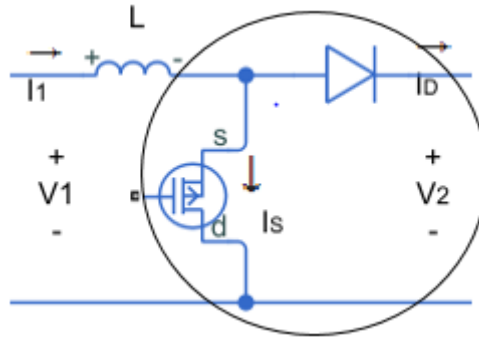


Figura 20. Bloque de componentes de respuesta rápida.

Las variables independientes son:  $I_1$  y  $V_2$ ; y las dependientes:  $V_1$  e  $I_D$ .

La ecuación que relaciona la tensión de salida y de entrada con el ciclo de trabajo “D”, está dada por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1-D} \quad (20)$$

Luego, se procede a determinar las variables dependientes en función del ciclo de trabajo y las variables independientes:

$$\bullet \quad \bar{V}_1 = \bar{V}_2 - \bar{V}_D = \bar{V}_2 - \frac{D}{1-D} \bar{V}_1$$

$$\bar{V}_1 = (1 - D) \bar{V}_2 \quad (21)$$

$$\bullet \quad \bar{I}_D = \frac{1-D}{D} \bar{I}_1 = \frac{1-D}{D} (\bar{I}_L - \bar{I}_D)$$

$$\bar{I}_D = (1 - D) \bar{I}_L \quad (22)$$

El modelo del circuito equivalente promedio del convertidor *Boost* conectado a la salida del generador fotovoltaico, representado en MATLAB/Simulink, se muestra en la siguiente figura:

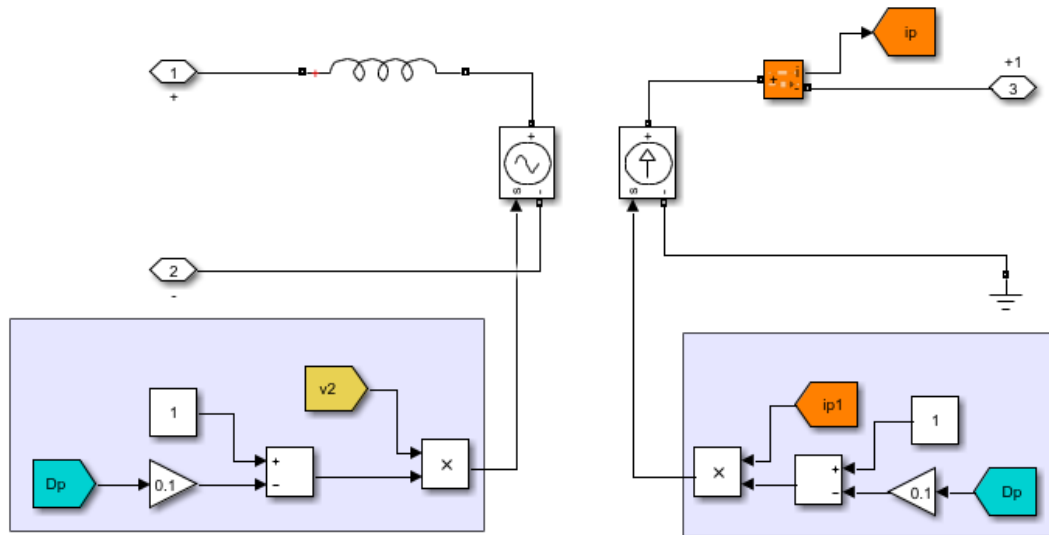


Figura 21. Modelo promedio del convertidor Boost del generador fotovoltaico, representado en MATLAB/Simulink.

Los parámetros del sistema utilizados para hallar los componentes del convertidor del generador fotovoltaico son los siguientes:

Tabla 4.

Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor del generador fotovoltaico.

|                                                    |        |
|----------------------------------------------------|--------|
| Tensión nominal del motor (V2) [V]                 | 48     |
| Corriente nominal del motor (I2) [A]               | 25     |
| Tensión de máxima potencia - arreglo PV (V1) [V]   | 38.4   |
| Corriente de máxima potencia - arreglo PV (I1) [A] | 37.52  |
| Frecuencia de conmutación [Hz]                     | 10000  |
| Ciclo de trabajo (D)                               | 0.2    |
| Potencia máxima - arreglo PV [W]                   | 1440.4 |
| Eficiencia del convertidor (n)                     | 0.9    |

Donde se obtiene un ciclo de trabajo de la ecuación (20) de:

$$D = \frac{V_2 - V_1}{V_2} = \frac{48 - 38.52}{48} = 0.2$$

Se halla el inductor y el capacitor del convertidor (Fathah, 2013) respectivamente, a través de las siguientes ecuaciones, considerando un rizo de corriente de 0.1 A en el inductor y un rizo de tensión de 0.1 V en el capacitor:

$$L = \frac{V_2 * D}{f * \Delta I_2} \quad (23)$$

$$C = \frac{I_2 * D}{f * \Delta V_2} \quad (24)$$

Obteniendo:

$$L = \frac{48 * 0.2}{10000 * 0.1} = 9.6mH$$

$$C = \frac{9 * 0.2}{10000 * 0.1} = 7.5mF$$

Se hace la consideración de los MOSFETs y los diodos como ideales y las pérdidas por conmutación y calentamiento se incluyen en una resistencia, esta se halla con base en la eficiencia del convertidor previamente seleccionada y los valores de potencia en estado nominal, mediante la ecuación (25):

$$P_{in} = P_{out} + i_1^2 R \quad (25)$$

$$R = \frac{(1 - \eta) P_{in}}{i_1^2} = 0.1023 \Omega$$

A continuación, se presenta una tabla representativa con los valores de los elementos del convertidor unidireccional *Boost*, del generador fotovoltaico.

Tabla 5.

*Resumen de parámetros usados en el convertidor del generador fotovoltaico.*

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Inductor [mH]            | 9.6   |
| Capacitor [mF]           | 7.5   |
| Resistencia [ $\Omega$ ] | 0.102 |

### 5.2.2. Modelo promedio del convertidor bidireccional ‘Cuk’ para el banco de baterías.

De la misma forma que en el convertidor anterior, se presenta en la figura 22 el convertidor bidireccional ‘Cuk’ y se realiza el procedimiento descrito anteriormente, obteniendo las ecuaciones (26) y (27):

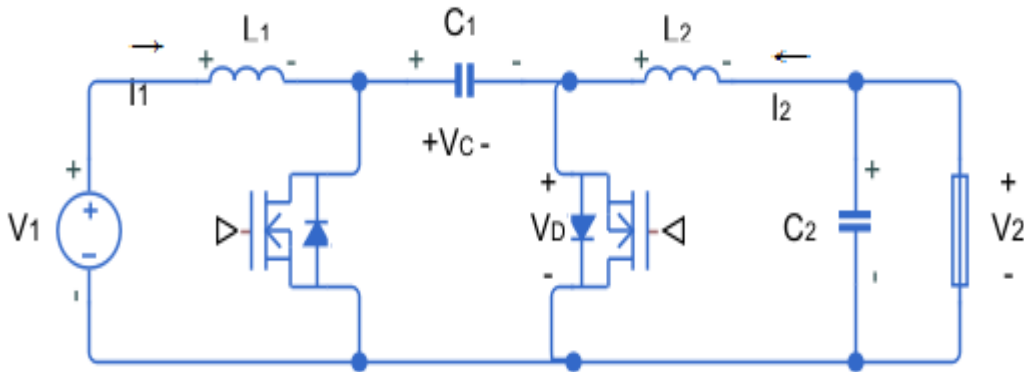


Figura 22. Convertidor bidireccional Cuk, con sus respectivas señales de corriente y tensión.

$$\bullet \begin{cases} \bar{V}_1 = (1 - D)\bar{V}_c \\ \bar{V}_D = D \bar{V}_c \end{cases} \Rightarrow \bar{V}_1 = \frac{(1-D)}{D} \bar{V}_D \quad (26)$$

$$\bullet \begin{cases} \bar{I}_1 = D (\bar{I}_1 + \bar{I}_2) \\ \bar{I}_D = (1 - D) (\bar{I}_1 + \bar{I}_2) \end{cases} \Rightarrow \bar{I}_1 = \frac{D}{(1-D)} \bar{I}_D \quad (27)$$

El modelo del circuito equivalente promedio del convertidor bidireccional ‘Cuk’ del banco de baterías, representado en MATLAB/Simulink se muestra en la siguiente figura:

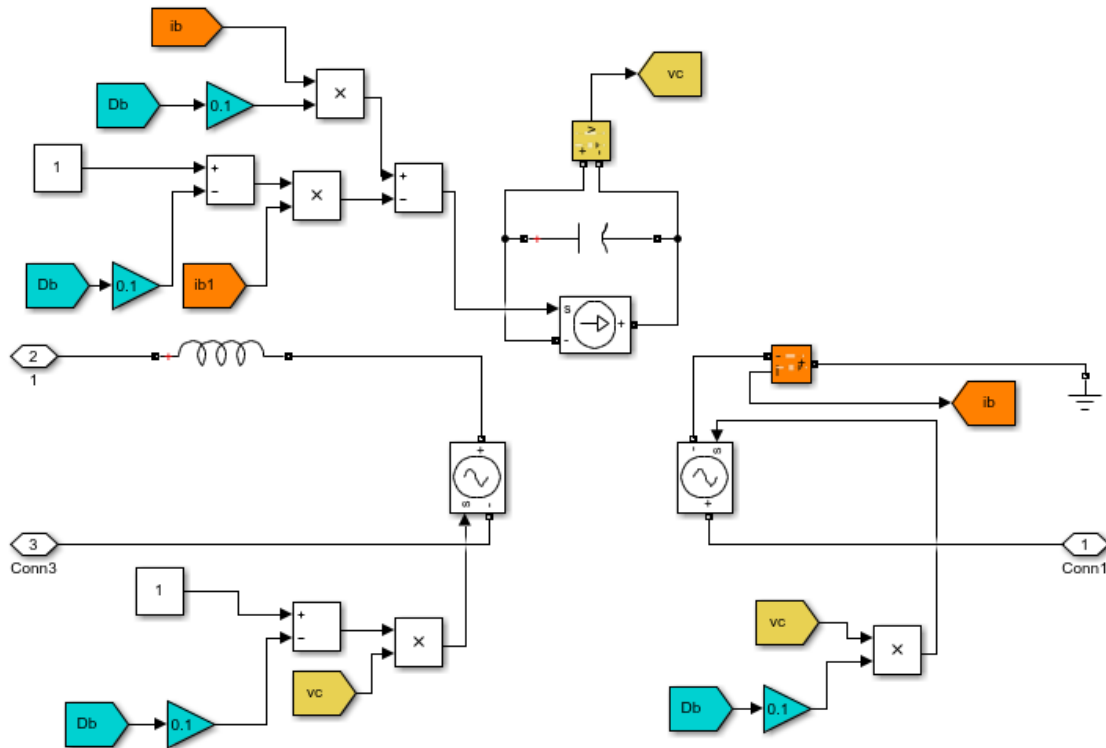


Figura 23. Circuito equivalente del modelo promedio del convertidor bidireccional ‘Cuk’ para el banco de baterías representado en MATLAB/Simulink.

Los parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor del banco de baterías son los siguientes:

Tabla 6.

Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor para el banco de baterías.

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| Tensión nominal del motor (V2) [V]               | 48    |
| Corriente nominal del motor (I2) [A]             | 25    |
| Tensión de las baterías (V1) [V]                 | 41    |
| Frecuencia de conmutación [Hz]                   | 10000 |
| Corriente nominal del banco de baterías (I1) [A] | 41.08 |

|                                        |        |
|----------------------------------------|--------|
| Ciclo de trabajo (D)                   | 0.54   |
| Potencia máxima del motor [W]          | 1200   |
| Eficiencia del convertidor n           | 0.9    |
| Potencia máxima referida del motor [W] | 1333.3 |

Donde se obtiene un ciclo de trabajo de la ecuación (26) de:

$$D = \frac{V_2}{V_2 + V_1} = 0.54$$

Se hallan los inductores, los capacitores y la resistencia que representa las pérdidas por conmutación y calentamiento del convertidor ‘Cuk’ (DC to DC Converters) respectivamente, a través de las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = \frac{V_1 * D}{f * \Delta I_1} \quad (28)$$

$$L_2 = \frac{V_1 * D}{f * \Delta I_2} \quad (29)$$

$$C_1 = \frac{I_2 * D}{f * \Delta V_{C1}} \quad (30)$$

$$C_2 = \frac{V_1 * D}{8f^2 * L_2 * \Delta V_2} \quad (31)$$

$$R = \frac{(1-n)P_{in}}{i_1^2} \quad (32)$$

A continuación, se presenta una tabla representativa con los valores obtenidos de los elementos del convertidor Cuk bidireccional para el banco de baterías:

Tabla 7.

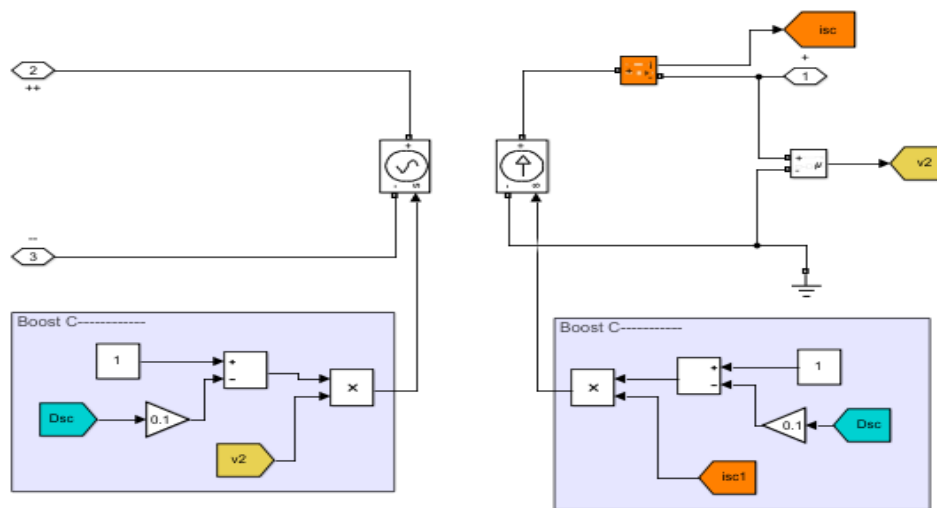
*Parámetros del convertidor bidireccional Cuk.*

|                  |      |
|------------------|------|
| Inductor 1 [mH]  | 22   |
| Inductor 1 [mH]  | 22   |
| Capacitor 1 [mF] | 1.35 |

|                          |      |
|--------------------------|------|
| Capacitor 2 [mF]         | 12   |
| Resistencia [ $\Omega$ ] | 0.07 |

**5.2.3. Modelo promedio del convertidor bidireccional ‘boost’ para los supercondensadores.** Este convertidor se resuelve exactamente de la misma manera que el unidireccional, debido a que el diodo al ser reemplazado por un segundo MOSFET, actúa como un dispositivo conmutador, la única diferencia radica en que el diodo no permitía el paso de corriente en la dirección opuesta que, al ser reemplazado por el transistor conmuta con un ciclo de trabajo establecido.

El modelo del circuito equivalente promedio del convertidor bidireccional Cuk para los supercondensadores, representado en MATLAB/Simulink se muestra en la siguiente figura:



*Figura 24.* Circuito equivalente del modelo promedio del convertidor bidireccional ‘Boost’ para los supercondensadores representado en MATLAB/Simulink.

Los parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor para los supercondensadores son los siguientes:

Tabla 8.

*Parámetros del sistema necesarios para hallar los componentes del convertidor para los supercondensadores.*

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| Tensión nominal del motor (V2) [V]         | 48    |
| Corriente nominal del motor (I2) [A]       | 25    |
| Tensión de los supercondensadores (V1) [V] | 43.2  |
| Frecuencia de conmutación [Hz]             | 10000 |
| Ciclo de trabajo D                         | 0.1   |
| Potencia de arranque referida [W]          | 6666  |
| Eficiencia del convertidor (n)             | 0.9   |

Donde se obtiene un ciclo de trabajo de:

$$D = \frac{48 - 25}{48} = 0.1$$

Se halla el inductor, el capacitor y la resistencia que representa las pérdidas por conmutación y calentamiento del convertidor, a través de las siguientes ecuaciones:

$$L = \frac{V_2 * D}{f * \Delta I_2} \quad (33)$$

$$C = \frac{I_2 * D}{f * \Delta V_2} \quad (34)$$

$$R = \frac{(1-n)P_{in}}{i_1^2} \quad (35)$$

A continuación, se presenta una tabla representativa con los valores obtenidos de los elementos del convertidor boost bidireccional para los supercondensadores:

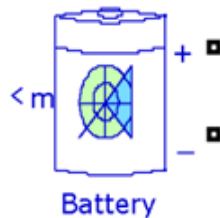
Tabla 9.

*Resumen de parámetros usados en el convertidor de los supercondensadores.*

|                          |      |
|--------------------------|------|
| Inductor [mH]            | 0.05 |
| Capacitor [mF]           | 2    |
| Resistencia [ $\Omega$ ] | 0.03 |

### 5.3 Modelo de batería

La herramienta Matlab presentan distintos tipos de baterías, a partir de las librerías proporcionadas por Simulink. El modelo de batería proporcionado por Simulink, se encuentra en la librería Simscape/SimPowerSystems/SpecializedTechnology/ ElectricDrives/ExtraSources de Simulink y corresponde al siguiente bloque:



*Figura 25. Bloque ‘battery’ Matlab-Simulink.*

La estructura simplificada del modelo contempla tres interfaces correspondientes a las conexiones de los terminales “positivo” y “negativo” de la batería y un terminal “*m*” que proporciona datos internos de la pila como el porcentaje de carga, la tensión y la intensidad instantánea.

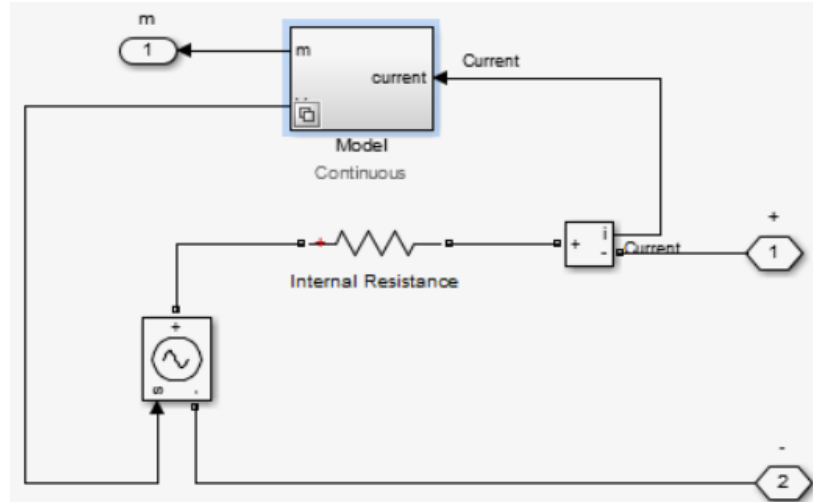


Figura 26. Estructura simplificada del modelo de batería.

En la Figura 26, se presenta el primer nivel de abstracción del modelo. Se observa que está compuesto por la resistencia interna, y un modelo teórico-matemático de la pila que contiene la lógica matemática que implementa los distintos modelos en función de las propiedades seleccionadas en las opciones de configuración.

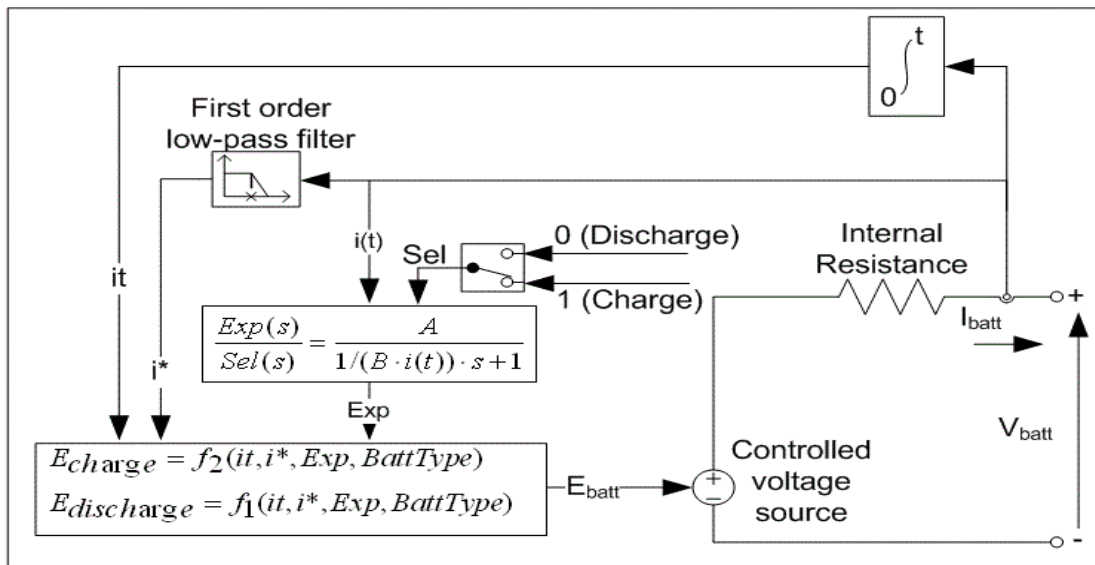


Figura 27. Estructura interna del modelo teórico-matemático de batería.

El modelo teórico-matemático de la figura 27, presenta un sistema dinámico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables.

Para el tipo de batería Ion-Litio, se tienen las siguientes ecuaciones:

- Modelo de descarga ( $i^* > 0$ )

$$f1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A e^{(-B*it)} \quad (36)$$

- Modelo de carga ( $i^* > 0$ )

$$f2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it-0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A e^{(-B*it)} \quad (37)$$

Donde se definen las siguientes variables como:

Tabla 10.

*Variables del modelo de carga y descarga de las baterías de ion-litio.*

| Variable   | Descripción                                                                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{Batt}$ | Tensión no lineal, en V.                                                                                                   |
| $E_0$      | Tensión constante, en V.                                                                                                   |
| $Exp(s)$   | Dinámica de zona exponencial, en V.                                                                                        |
| $Sel(s)$   | Representa el modo de la batería. $Sel(s)=0$ durante la descarga de la batería, $Sel(s)=1$ durante la carga de la batería. |
| $K$        | Constante de polarización, en V/Ah, o la resistencia de polarización, en ohmios.                                           |
| $i^*$      | Dinámica de la corriente de baja frecuencia, en A.                                                                         |
| $I$        | Corriente en Amperios de la batería.                                                                                       |
| $It$       | Capacidad que se extrae, en Ah.                                                                                            |
| $Q$        | Capacidad máxima de la batería, en Ah.                                                                                     |
| $A$        | Tensión exponencial, en V.                                                                                                 |
| $B$        | Capacidad exponencial, en $Ah^{-1}$ .                                                                                      |

Los parámetros característicos de la batería ion-litio de serie LIR18650 a partir de los cuales Simulink modela el comportamiento de este tipo de batería son los siguientes.

Tabla 11.

*Parámetros característicos del modelo de la batería ion-litio de serie LIR18650.*

| <b>Serie</b>                                           | <b>LIR18650</b>         |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| Fabricante                                             | EEMB                    |
| Capacidad [mAh] ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ )           | 2600                    |
| Tensión nominal [V]                                    | 3.7                     |
| Tensión de corte de descarga [V]                       | 3.0                     |
| Tensión máxima de carga [V]                            | $4.20 \pm 0.05\text{V}$ |
| Corriente nominal de descarga [A]                      | 0.52                    |
| Corriente nominal de carga [A]                         | 0.52                    |
| Resistencia interna de la batería [ $\text{m}\Omega$ ] | $\leq 70$               |

A continuación, en las figuras 28 y 29 se muestran las curvas características y de rendimiento del modelo correspondiente al banco de baterías, formado por el arreglo de baterías ion-litio de serie LIR18650, que proporcionan una comparación entre 3 distintas corrientes de descarga, entre ellas la nominal de 41 A, como también las zonas de trabajo donde se obtiene un óptimo rendimiento del banco.

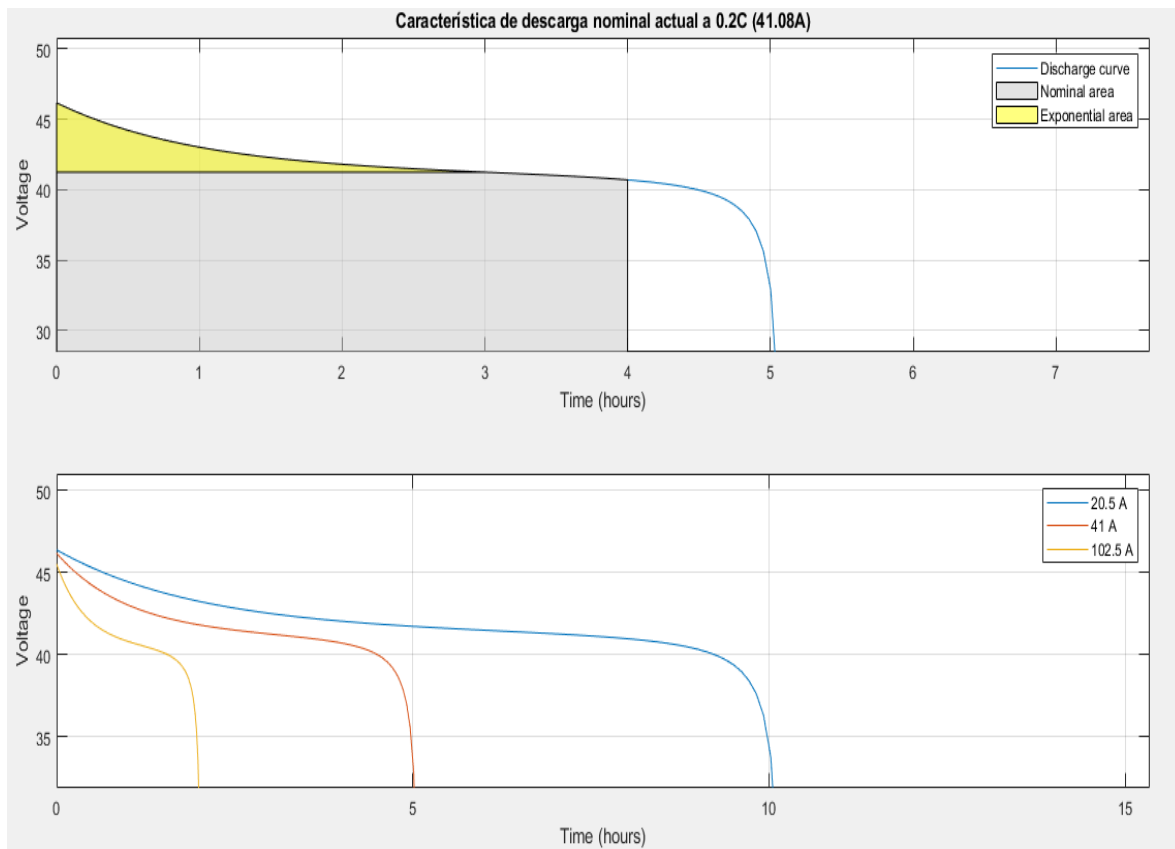


Figura 28. a) Curva de descarga nominal en función del tiempo. b) Curvas de descarga en función del tiempo para diferentes corrientes.

La Figura 28. a), corresponde a una curva de descarga típica que consta de tres secciones. La primera sección representa la caída de la tensión exponencial cuando la batería está cargada. La segunda parte representa la carga que puede extraerse de la batería hasta que la tensión cae por debajo de la tensión nominal y la tercera sección representa la descarga total cuando la tensión cae rápidamente.

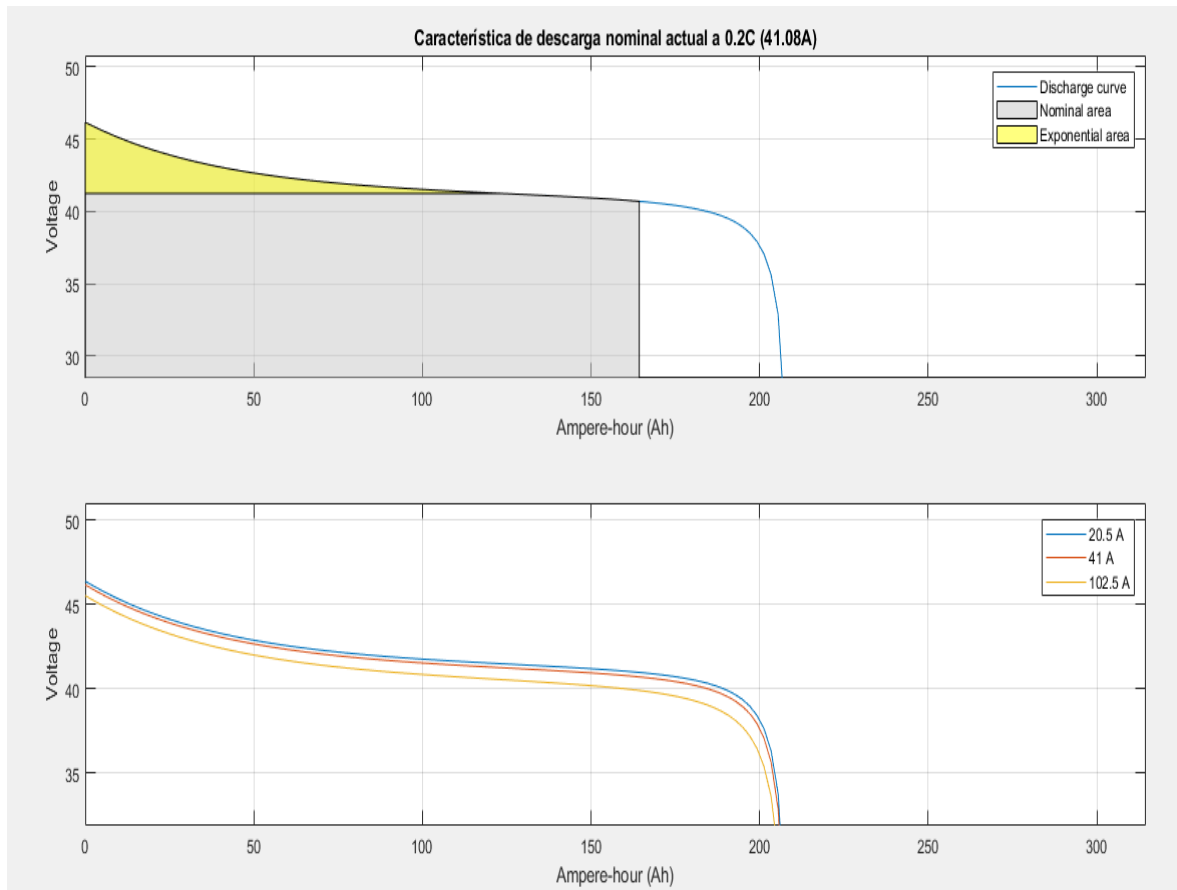


Figura 29. a) Curva de descarga nominal en función de la capacidad del banco. b) Curvas de descarga en función de la capacidad del banco para diferentes corrientes.

## 5.4 Modelo supercondensadores

Se presenta el modelo de supercondensador proporcionado por Simulink en la librería Simscape/SimPowerSystems/SpecializedTechnology/ElectricDrives/Extra Sources, que corresponde al siguiente bloque:

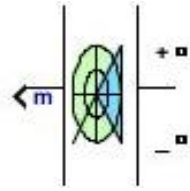


Figura 30. Bloque ‘supercapacitor’ Matlab-Simulink.

La estructura simplificada del modelo del supercapacitor mostrado en la figura 30, contempla tres interfaces similares a las de la batería, correspondiente a las conexiones de los terminales “positivo” y “negativo” de la batería y un terminal “m” que proporciona datos internos del elemento como la intensidad que atraviesa el supercondensador, su tensión de salida del condensador y el rendimiento del supercondensador.

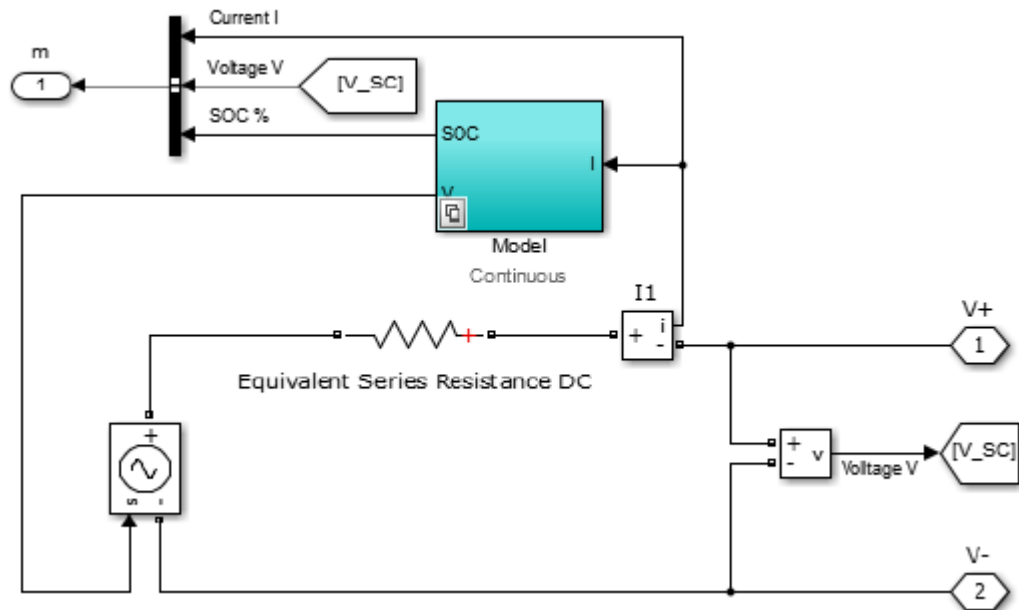


Figura 31. Modelo teórico simplificado de un Supercondensador.

El modelo recreado de la Figura 31, corresponde al modelo teórico simplificado, más las características internas del supercondensador.

El modelo de un supercondensador se basa en la fórmula de la tensión en un condensador normal:

$$V(t) = \int \frac{i(t)}{c} dt \quad (38)$$

Que teniendo condiciones iniciales de carga previamente establecidas la ecuación anterior se ve afectada, quedando:

$$V(t) = \frac{Q}{c} = \int_0^t \frac{i(t)}{c} dt + \frac{q_0}{c} \quad (39)$$

Siendo la tensión del supercapacitor, la suma de la carga inicial más la carga instantánea, esta última dada por la integral de la intensidad en función del tiempo.

Los parámetros característicos del supercondensador de serie BCAP0310 P270 T10 a partir de los cuales Simulink modela el comportamiento de este tipo de condensador son los siguientes:

Tabla 12.

*Parámetros característicos del modelo de un supercondensador de serie BCAP0310 P270 T10.*

| Serie                    | BCAP0310 P270 T10    |
|--------------------------|----------------------|
| Fabricante               | Maxwell Technologies |
| Capacidad nominal [F]    | 310                  |
| Resistencia interna [mΩ] | 22                   |
| Tensión nominal [V]      | 2.7                  |

## 5.5 Modelo de motor DC.

El modelo general correspondiente al motor DC presente en Simulink se encuentra en la librería Simscape Electrical/SpecializedPowerSystems/MotorsandGenerators y corresponde al siguiente bloque:

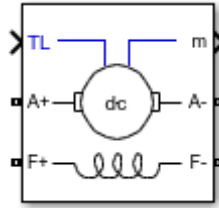


Figura 32. Bloque ‘DC Machines’ Matlab-Simulink.

En el bloque DC Machines se puede implementar el modelo de máquina DC de campo devanado o una máquina de imán permanente de corriente continua.

La carga acoplada al sistema se representada por un motor DC de imanes permanentes de serie PENTA 4L30-900W del fabricante MOTOR POWER. El objetivo es caracterizar la demanda de la carga (tensión y corriente) frente a los requerimientos de torque que va a presentar el motor al estar conectado al arreglo solar y a los sistemas almacenadores de energía través de los convertidores.

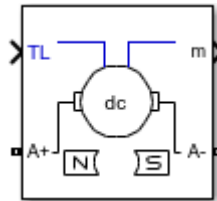


Figura 33. Bloque ‘Permanent Magnet DC Machines’ Matlab-Simulink.

La figura 33, corresponde al bloque de un motor de DC de imanes permanentes. Este bloque dispone de una señal de entrada correspondiente al par de la carga “ $T_L$ ” y también de una salida denominada por “ $m$ ”, que presenta un vector con tres señales de salida de medición. Estas tres señales son:

Tabla 13.

*Variables de salida del Bloque 'Permanent Magnet DC Machines'*

| señal    | Definición                               |
|----------|------------------------------------------|
| $\omega$ | La velocidad angular ( $\frac{rad}{s}$ ) |
| $I_a$    | La corriente de armadura (A)             |
| $T_e$    | El par electromecánico (N.m).            |

El circuito de la armadura consiste en una serie de tres componentes eléctricos básicos: una resistencia, un inductor en serie con una fuerza contraelectromotriz ( $E$ ), o de tensión, como se puede observar en la figura 34.

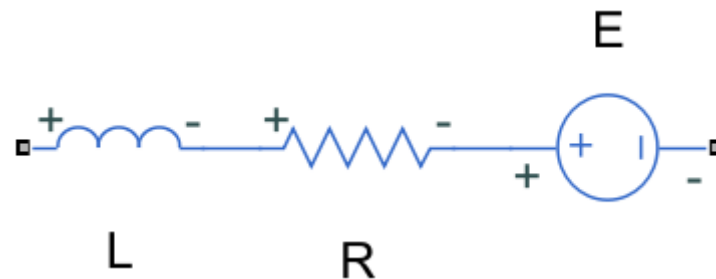


Figura 34. Modelo eléctrico del circuito de armadura de un motor DC.

El motor seleccionado corresponde a la serie PENTA 4L, cuyos parámetros característicos en el modelo se presentan a continuación:

Tabla 14.

*Parámetros característicos del modelo del motor DC de imanes permanentes.*

| Serie                   | PENTA 4L30 |
|-------------------------|------------|
| Potencia nominal [W]    | 900        |
| Velocidad nominal [rpm] | 3000       |
| Torque nominal [Nm]     | 2.86       |

| Serie                                | PENTA 4L30 |
|--------------------------------------|------------|
| Tensión nominal [V]                  | 48         |
| Corriente nominal [A]                | 25         |
| Corriente pico [A]                   | 125        |
| Resistencia de armadura [ $\Omega$ ] | 0.36       |
| Inductancia de armadura [mH]         | 0.25       |
| Constante de tensión [V/krpm]        | 14.5       |
| Inercia [ $\text{kgm}^2$ ]           | 0.0029     |

## 6. Adaptación de los modelos, simulación y análisis de resultados.

### 6.1 Controladores.

Un diagrama general del sistema estudiado en este trabajo de grado se presenta en la Figura 35. La gestión del sistema se realiza mediante el control de los convertidores DC-DC. Para lo anterior se utilizan tres controladores, uno para cada convertidor. A continuación, se describen los controladores del sistema:

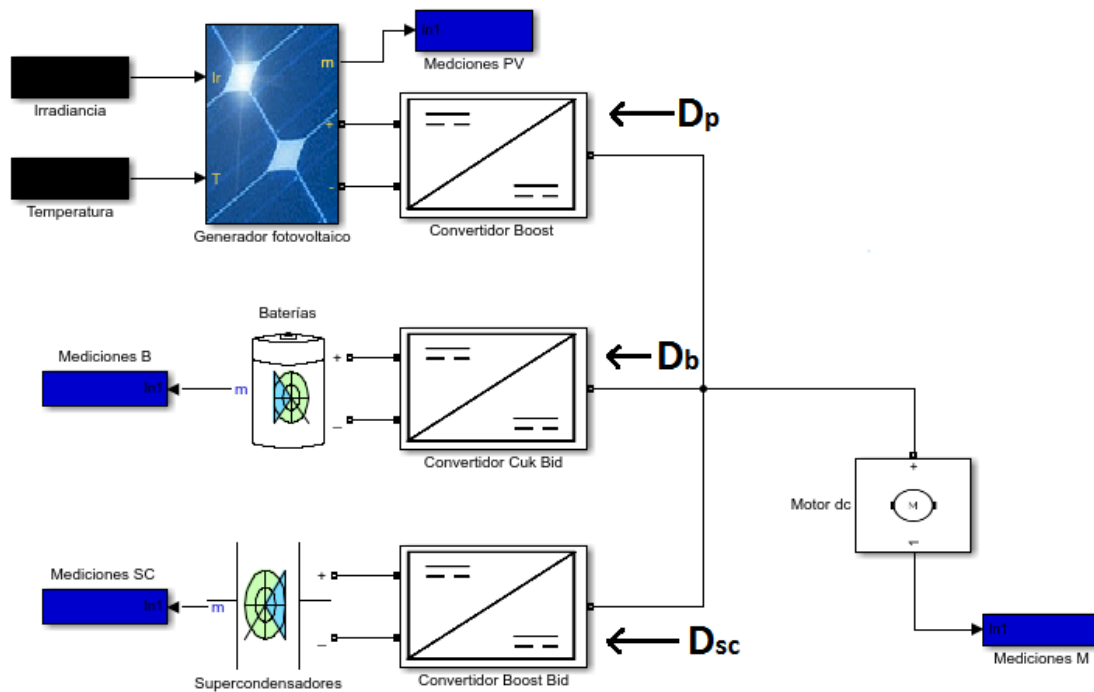


Figura 35. Representación completa del sistema en MATLAB/Simulink.

**6.1.1. Controlador del convertidor del generador fotovoltaico.** El objetivo principal del generador fotovoltaico es ser la fuente principal de energía de todo el sistema, es decir, es el encargado de entregar la mayor cantidad de potencia que este permite a la carga además de cargar las baterías y supercondensadores, cuando estos lo requieran. Por tal motivo es imprescindible el uso de un algoritmo que extraiga la mayor cantidad de potencia del arreglo de paneles fotovoltaicos. Entre los más comunes están: la técnica IC (*Incremental Conductance*) y el método P&O (*Perturbe and Observe*).

**Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).** Estos algoritmos MPPT son usados en sistemas fotovoltaicos para maximizar la potencia de los arreglos de paneles PV, independientemente de la temperatura, irradiancia y las características eléctricas de la carga (PG & Bhaskar, 2012).

La desventaja del método de P&O para seguir el pico de máxima potencia bajo rápidas variaciones en las condiciones atmosféricas, es superada por el método de IC, debido a que este puede determinar cuando el MPPT haya alcanzado la máxima potencia y dejar de perturbar el punto de operación.

La figura 35, muestra que la pendiente del arreglo fotovoltaico es cero en el punto de máxima potencia (MPP), a la izquierda esta es positiva y a la derecha negativa.

Las ecuaciones básicas del método IC son las siguientes:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{en MPP} \quad (40)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{a la izquierda del MPP} \quad (41)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{a la derecha del MPP} \quad (42)$$

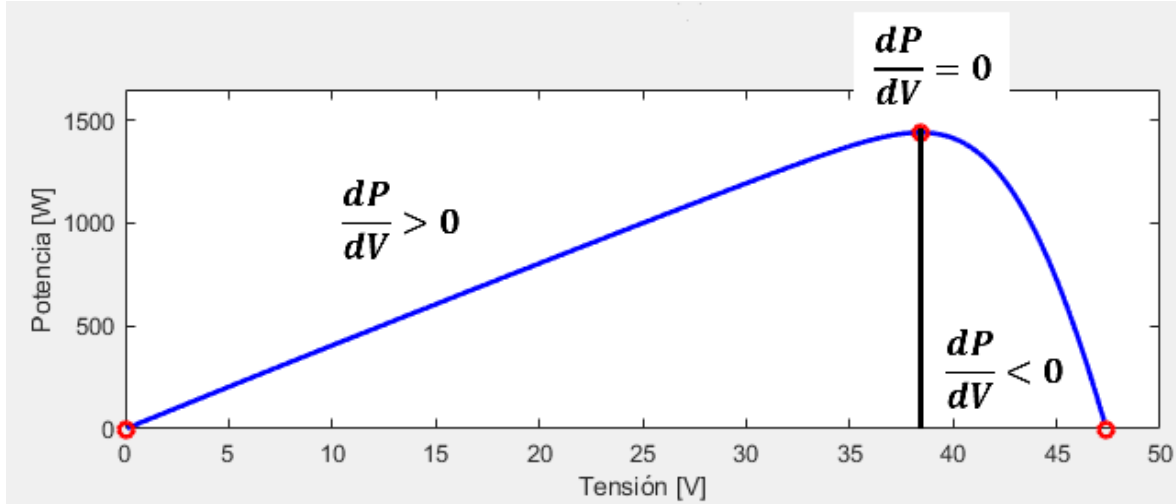


Figura 36. Método de IC representado en una curva P-V de un módulo solar.

En el proyecto el algoritmo se implementó en MATLAB y se puede observar en las figuras 37 y 38:

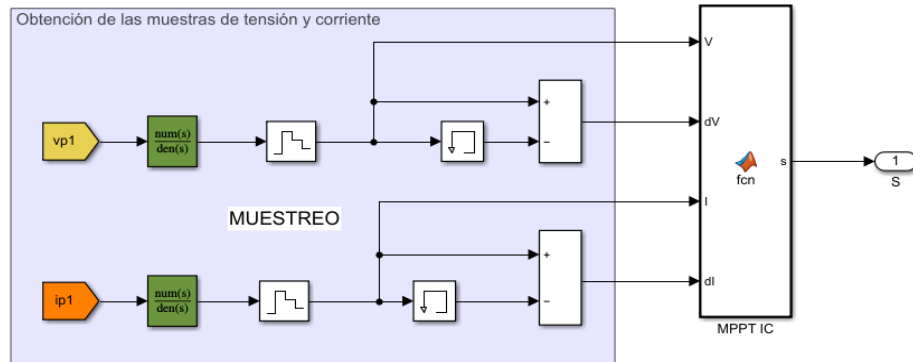


Figura 37. Muestreo de las señales de tensión, corriente y sus diferenciales.

```

MPPT/MPPT IC* x +
1  function s = fcn(V,dV,I,dI)
2
3  if dV==0
4
5      if dI==0
6          s=0;
7          return
8
9      else
10         if dI>0
11             s=-1;
12         else
13             s=+1;
14         end
15     end
16
17 else
18     if I/V+(dI/dV)==0
19
20         s=0;
21         return
22     else
23         if I/V+(dI/dV)>0
24             s=-1;
25         else
26             s=+1;
27         end
28     end
29 end
30 end

```

Figura 38. Implementación del algoritmo IC.

El algoritmo calcula la posición en la que se encuentra el generador PV con base en el valor del signo “S”. Si “S” es positivo, significa que está en la parte derecha de la curva P-V, por lo

tanto, debe disminuir la tensión del generador PV, pero si este fuese negativo, significa que está en la parte izquierda, por lo que debe aumentar la tensión.

Los convertidores son controlados a través de unas señales de disparo provocadas por una señal de PWM que proviene de la comparación de una señal triangular que funciona a frecuencias en el orden de los kHz, con una señal de control conocida como ciclo de trabajo “D”. En el proyecto no se consideran los modelos reales de los transistores, debido a que los convertidores son representados con el modelo promedio. Por tal motivo, se desprecian estas altas frecuencias y se trabaja únicamente con la señal de control “D”.

En el generador fotovoltaico, el ciclo de trabajo está dado por:

$$D_{k+1} = D_k + \Delta D * S * E \quad (43)$$

Donde,

$D_{k+1}$ : Es el ciclo de trabajo en el siguiente periodo de muestreo.

$D_k$ : Es el ciclo de trabajo actual.

$\Delta D$ : Es la máxima variación del ciclo de trabajo cada vez que ocurre un muestreo de las señales de tensión y corriente, tiene un valor de 0.005.

$S$ : Es el signo que es calculado con el algoritmo del MPPT.

$E$ : Es el error que hay entre la corriente de referencia del generador PV y la corriente actual.

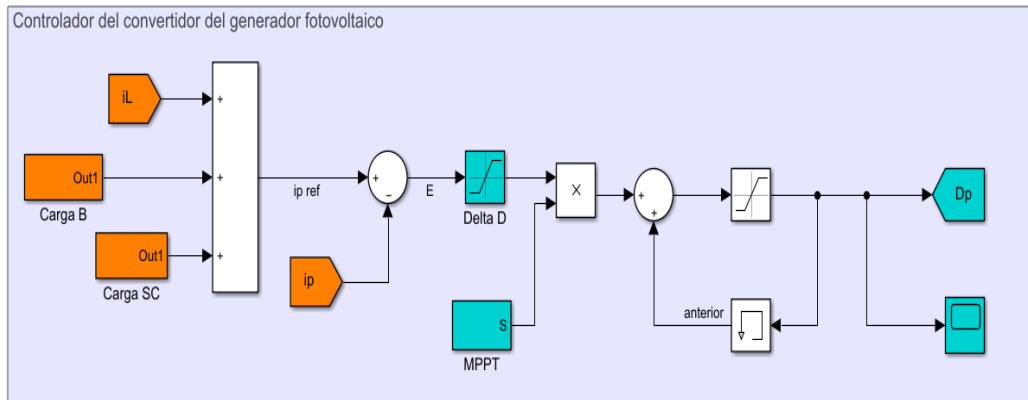


Figura 39. Controlador del convertidor del generador fotovoltaico.

Finalmente, la figura 39 presenta el controlador del convertidor del generador fotovoltaico. La corriente de referencia del arreglo PV corresponde a la suma total de las corrientes de salida que debe alimentar, la corriente en el motor  $I_L$ , la corriente de carga de la batería y la corriente de carga de los supercondensadores. Esta pequeña modificación asegura que el generador PV entregue una corriente limitada por la corriente de referencia. Esto se hace debido a que si existe el caso en el cual el generador PV tenga energía de sobra, pero no tenga carga que alimentar (o una carga que consuma una potencia menor a lo que puede entregar la máxima potencia (MP)), esta potencia será limitada.

Si no se tuviera este límite, el generador PV entregaría siempre su MP, entonces si las baterías y los supercondensadores están totalmente cargados; y el motor consume una cantidad menor a la MP del generador PV, existiría un desequilibrio en las potencias dando lugar a un sistema inestable, una sobrecarga en los supercondensadores o a una elevación en la tensión en la barra.

**6.1.2. Controlador del convertidor del banco de baterías.** El objetivo principal de las baterías es entregar la energía residual que el generador PV no pueda llegar a entregar. Además, debido a que los supercondensadores van a controlar la tensión en la barra y estos se cargan y

descargan más rápido, son predominantes en el sistema, es decir, son los que deben estar siempre cargados o permanecer cerca de su carga nominal.

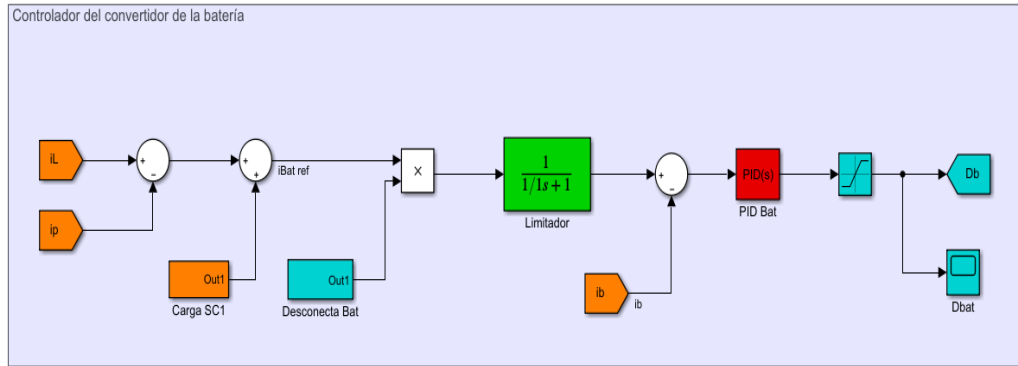


Figura 40. Controlador del convertidor del banco de baterías.

El controlador del convertidor del banco de baterías mostrado en la figura 40, se compone de un regulador proporcional integral (PI) cuya corriente de referencia está dada por:

$$I_{bat_{ref}} = I_L - I_p + I_{sc_{carga}} \quad (44)$$

Donde:

$I_L$  : Es la corriente en la carga (motor).

$I_p$  : Es la corriente promedio a la salida del generador PV.

$I_{sc_{carga}}$  : Es la corriente de referencia con la que se deben cargar los supercondensadores.

Posteriormente hay un bloque que desconecta el banco, si la tensión de este supera la tensión de corte (33 V).

### Limitador de pendiente

En la figura 39, el bloque “verde” contiene una función de transferencia de primer orden presentada en la ecuación (45), que limita la pendiente de referencia del banco de baterías. Esta se

crea teniendo en cuenta que si la corriente de referencia fuese 125 A (corriente de arranque), esta llegaría a alcanzarla (teóricamente) a los 5 segundos, es decir:

$$\frac{1}{s\tau+1} \quad (45)$$

$$5\tau = 5 \text{ segundos}$$

$$\tau = 1 \text{ segundo}$$

Donde  $5\tau$  hace referencia al número de constantes de tiempo en el cual una señal se estabiliza.

**6.1.3. Controlador del convertidor de los supercondensadores.** Los supercondensadores son los encargados de controlar la tensión en la barra y reaccionan ante cualquier variación brusca en el sistema, supliendo la potencia que los demás no entregan en cortos periodos de tiempo.

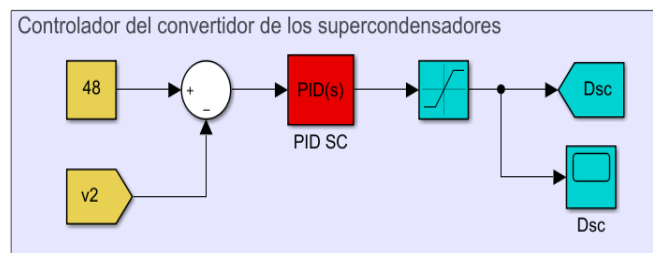


Figura 41. Controlador del convertidor de los supercondensadores.

El controlador del convertidor de los supercondensadores mostrado en la figura 41, consta de simplemente una acción integral que varía a medida que los supercondensadores se descargan. No es necesario emplear una ganancia proporcional, sino que su rápida actuación se logra haciendo que los otros elementos (generador PV y Baterías) actúen lentamente y así satisfacer la rápida respuesta en los supercondensadores.

## 6.2 Simulaciones y resultados.

Para evaluar el funcionamiento del sistema, se realizaron cuatro pruebas de simulación en MATLAB/Simulink. A continuación, se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

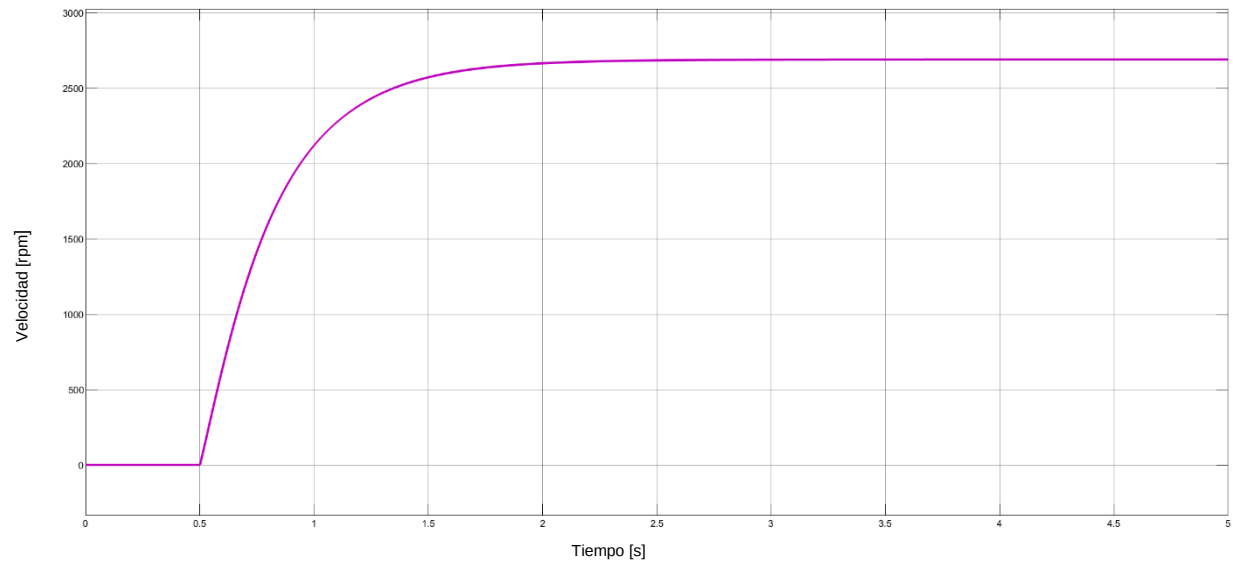
**6.2.1. Simulación #1: arranque directo del motor con carga nominal.** En esta simulación se analiza la respuesta del sistema frente al arranque del motor. El estado en el que se encuentran las variables previo a la simulación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15.

*Estado inicial de las variables controlables para la simulación #1.*

|                                                     |               |
|-----------------------------------------------------|---------------|
| Irradiancia [ $W/m^2$ ]                             | 1000          |
| Estado de carga inicial de las baterías %           | 100           |
| Estado de carga inicial de los supercondensadores % | 100           |
| Estado inicial del motor                            | Sin energizar |
| Torque de carga del motor [Nm]                      | 2.86          |

El motor se encuentra desenergizado, a los 0.5 s se acciona el interruptor que conecta el motor con la barra y este acelera durante 1.5 s hasta alcanzar una velocidad de 2690 rpm, como se muestra en la figura 42.



*Figura 42.* Velocidad del motor DC.

En la figura 43, se observa que la corriente que consume el motor durante el arranque es casi totalmente suministrada por los supercondensadores, el generador fotovoltaico comienza a suministrar energía hasta que a los 2 segundos aproximadamente, este alimenta únicamente la carga, debido a que los SOC de las baterías y los supercondensadores están aproximadamente al 100%.

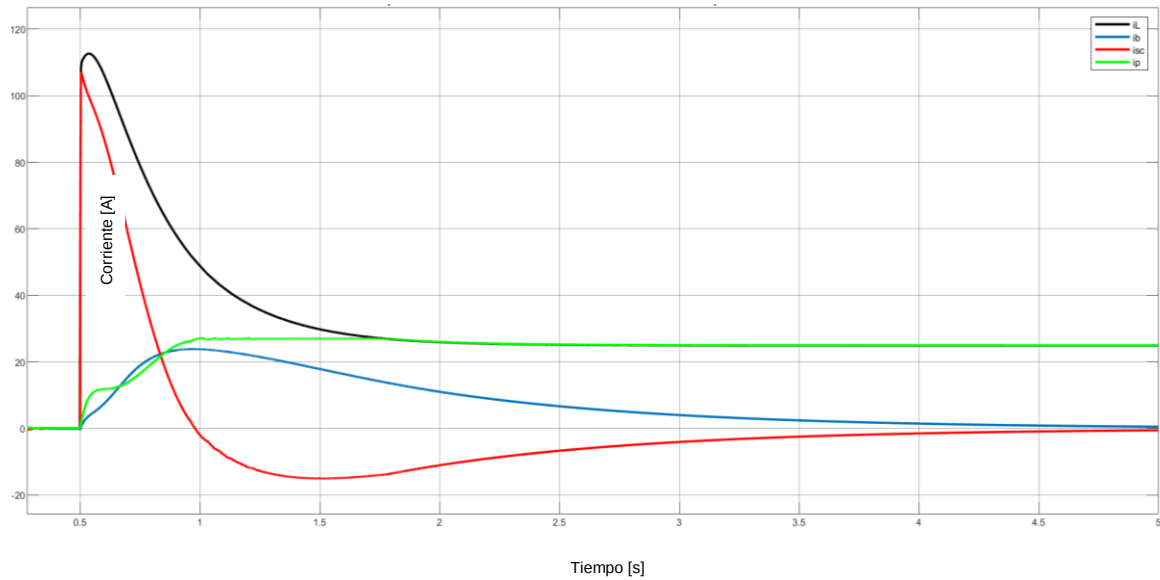


Figura 43. Corrientes promedio de carga del sistema vistas desde la salida. Motor (Negro), Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador PV (Verde).

La función del convertidor de los supercondensadores es controlar la tensión en la barra, para que esta permanezca constante en 48 V, cuando se produce el arranque, la tensión baja a 42 V y se recupera aproximadamente en 0.2 s, como se aprecia en la figura 44.

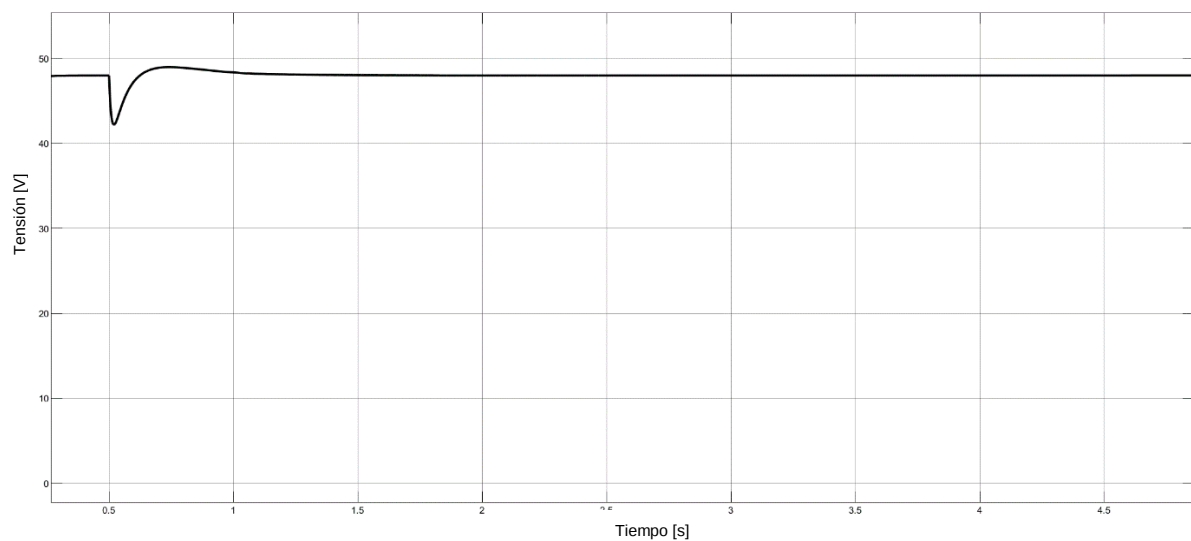
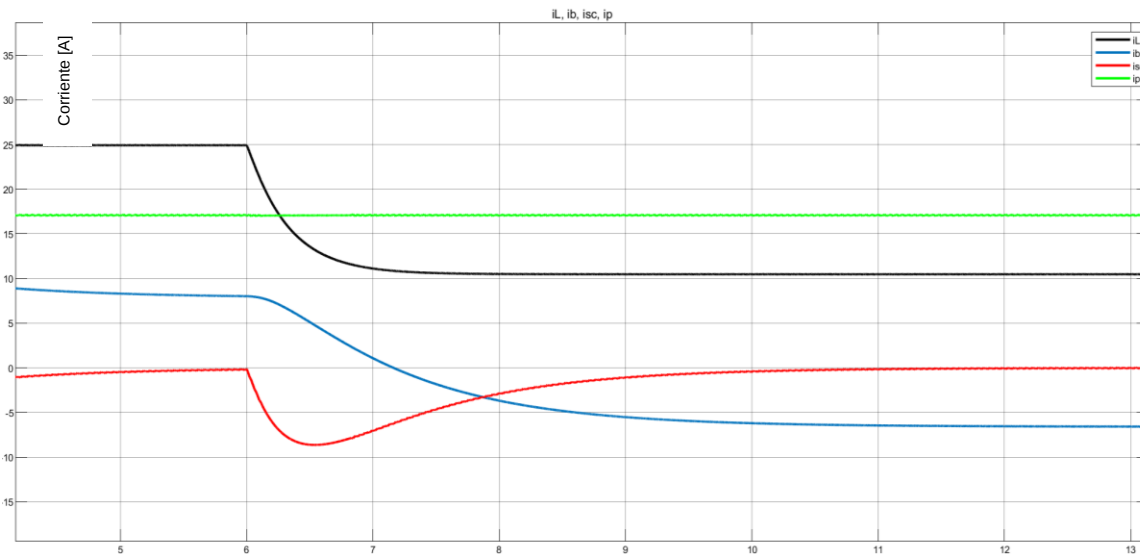


Figura 44. Tensión en la barra que alimenta el motor.

Los supercondensadores mantienen la tensión en la barra en 48 V. Aunque el generador fotovoltaico absorbe una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , este no entrega energía antes del arranque del motor, debido a que las baterías y los supercondensadores se encuentran al 100% del SOC y no es necesario cargarlos.

**6.2.2. Simulación #2: variación en el torque de carga del motor.** En esta prueba, se considera que inicialmente el motor se encuentra en estado estable consumiendo una corriente nominal de 25 A. En el instante  $t = 6 \text{ s}$ , hay una variación en el torque de carga del motor, lo que produce una disminución en el consumo de corriente del motor a 10.5 A, como se muestra en la figura 45.



*Figura 45.* Corrientes promedio del sistema en la salida bajo el efecto de un cambio en la corriente de la carga. Motor (Negro), Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador PV (Verde).

El estado inicial de las variables se muestra en la siguiente tabla:

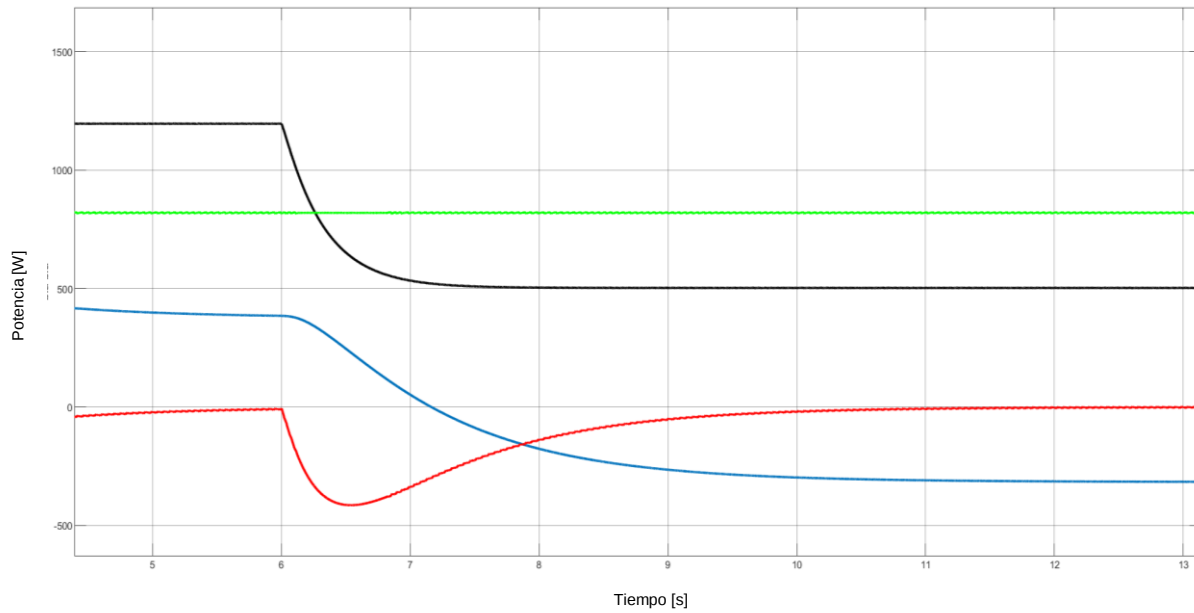
Tabla 16.

Estado inicial de las variables controladas para la simulación #2.

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| Irradiancia [ $W/m^2$ ]                             | 600        |
| Estado de carga inicial de las baterías %           | 80         |
| Estado de carga inicial de los supercondensadores % | 100        |
| Estado inicial del motor                            | Energizado |

El generador fotovoltaico absorbe constantemente una baja irradiancia de 600 [ $W/m^2$ ], el MPPT garantiza el seguimiento de la máxima potencia que este puede entregar, de 820 W. Sin embargo, esta potencia no es suficiente para alimentar por completo el motor que consume 25 A, es decir 1200 W. La labor de las baterías es entregar la corriente que el generador PV no puede suministrar a la carga, por lo tanto, entrega la energía restante, aun teniendo un SOC del 80%. Mientras esto ocurre, los supercondensadores mantienen la tensión constante sin entregar corriente.

En el instante  $t = 6$  s, se produce la variación en la corriente del motor. El generador PV continúa entregando la máxima potencia debido a que la batería pide (teóricamente) 17 A (816 W). El motor pasa de consumir 1200 W a 504 W, por lo tanto, el generador PV dispone de aproximadamente 315 W para cargar la batería, ilustrado en la figura 46.



*Figura 46.* Potencia consumida por el motor (Negro). Potencia entregada por el generador PV (Verde), Baterías (Azul) y Supercondensadores (Rojo).

Debido a que el controlador del convertidor posee un limitador que evita cambios bruscos en la corriente de la batería, esta no cambia abruptamente, por lo que los supercondensadores consumen esta corriente transitoria cargándose momentáneamente y manteniendo constante la tensión, con una pequeña variación de 0.1 V, presentado en la figura 47.

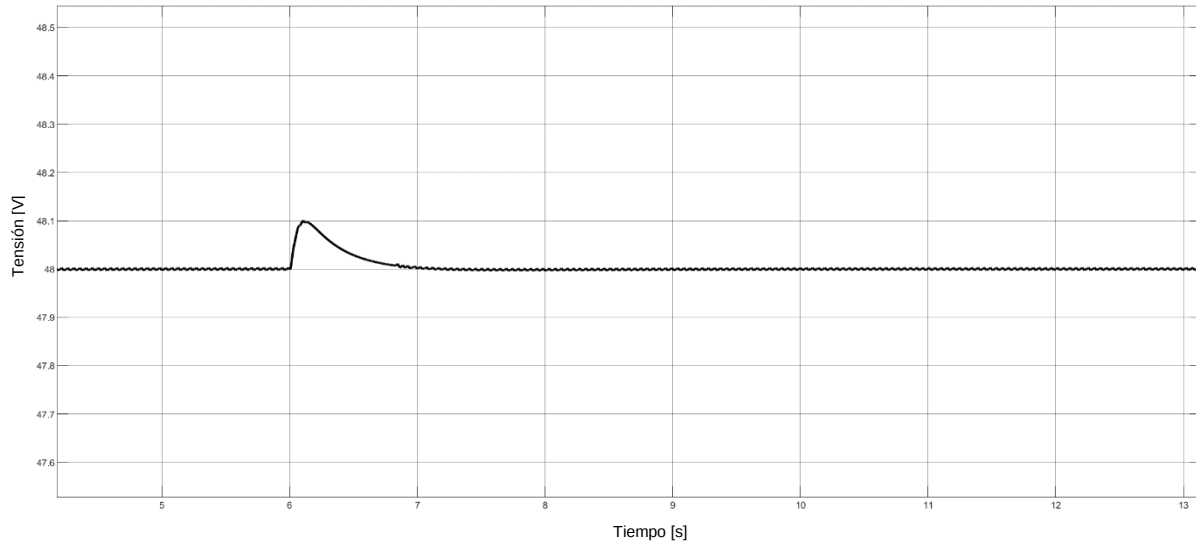


Figura 47. Tensión en la barra que alimenta el motor.

**6.2.3. Simulación #3: respuesta del sistema frente a la variación en la irradiancia.** En esta prueba se analiza la respuesta del sistema ante un cambio de irradiancia. El estado inicial de las variables se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17.

*Estado inicial de las variables controladas para la simulación #3.*

| <b>Irradiancia [<math>W/m^2</math>]</b>             | <b>Variable</b> |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Estado de carga inicial de las baterías %           | 100             |
| Estado de carga inicial de los supercondensadores % | 100             |
| Estado inicial del motor                            | Energizado      |

Inicialmente, la irradiancia que absorbe el generador PV es de  $1000 \text{ W/m}^2$ , sin embargo, entre los tiempos  $t = 6 \text{ s}$  y  $7 \text{ s}$ , esta disminuye hasta los  $500 \text{ W/m}^2$ , como se muestra en la figura 48.

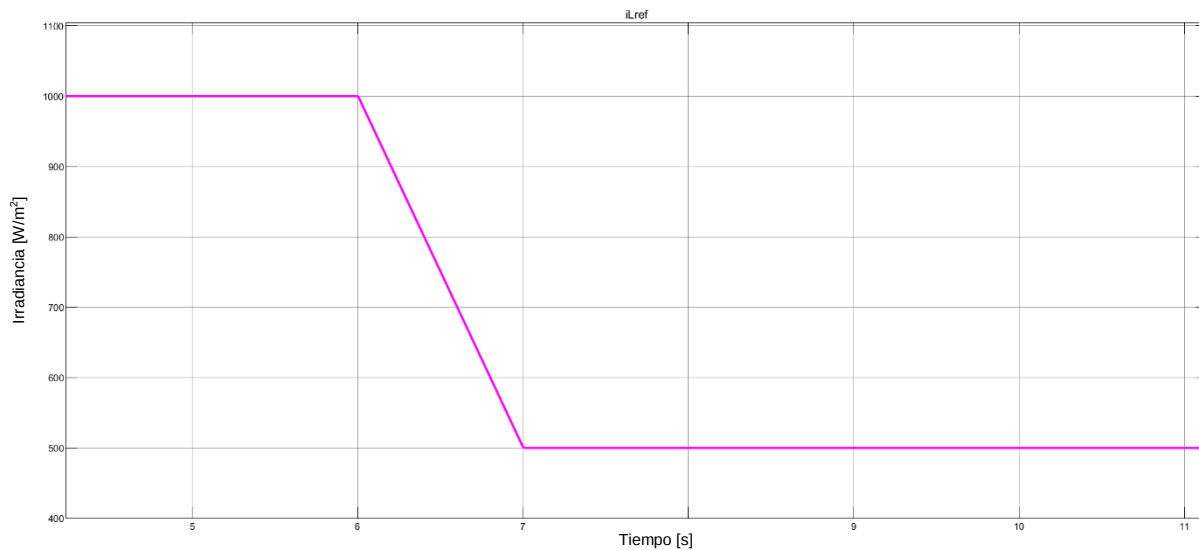


Figura 48. Irradiancia en el generador fotovoltaico.

En la Figura 48, se presentan las corrientes promedio del sistema. Inicialmente, los elementos de almacenamiento de energía se encuentran totalmente cargados, por lo que el generador PV solo puede entregar la máxima potencia que consume el motor,  $1200 \text{ W}$  ( $25 \text{ A}$ ).

Al disminuir la irradiancia, la máxima potencia que puede entregar el generador PV también lo hace, esto provoca que la potencia que este entrega sea insuficiente para alimentar el motor, por lo que la batería tiene que suplir esta energía faltante.

En la figura 49, el generador PV comienza a entregar menos potencia desde los  $6 \text{ s}$ , lo que hace que la referencia de corriente de las baterías empiece a elevarse, pero la variación es limitada, por lo tanto, los supercondensadores suplen esta necesidad y llegan a entregar transitoriamente lo que les hace falta a las baterías, mientras la corriente entregada por ellas alcanza los  $10.5 \text{ A}$ .

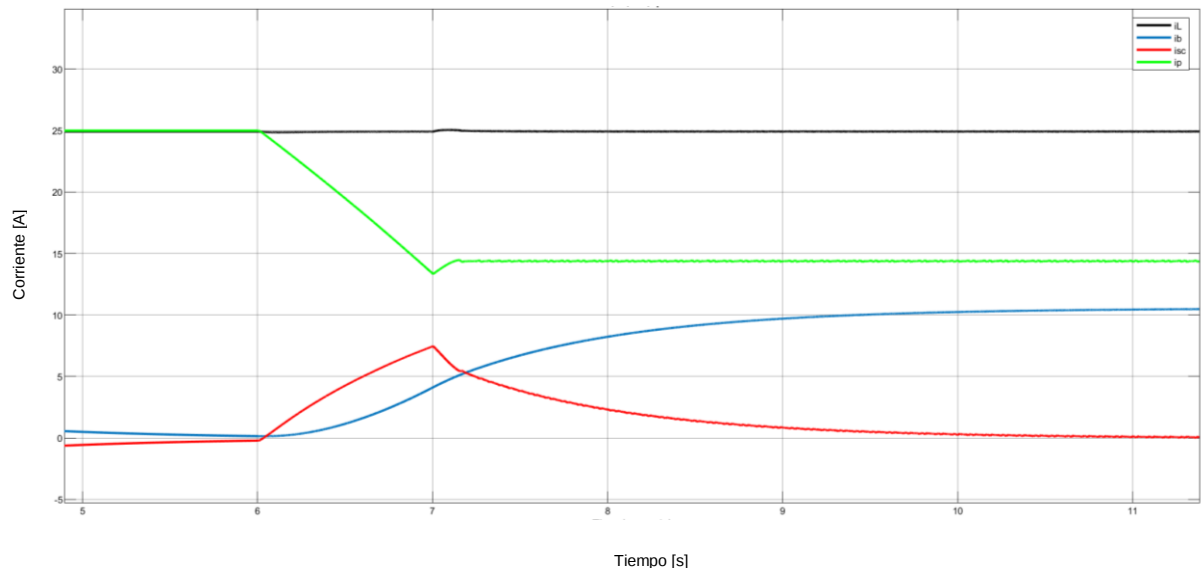


Figura 49. Corrientes promedio del sistema en la salida, ante la variación de la irradiancia. Motor (Negro), Baterías (Azul), Supercondensadores (Rojo) y Generador PV (Verde).

La variación en la tensión es insignificante, aproximadamente 0.03 V y se muestra en la siguiente figura:

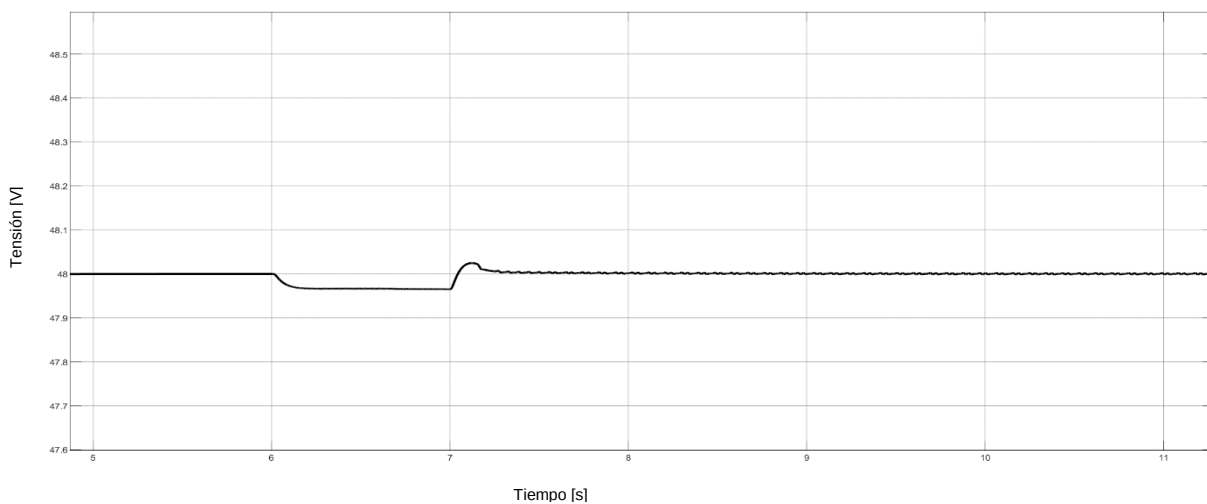
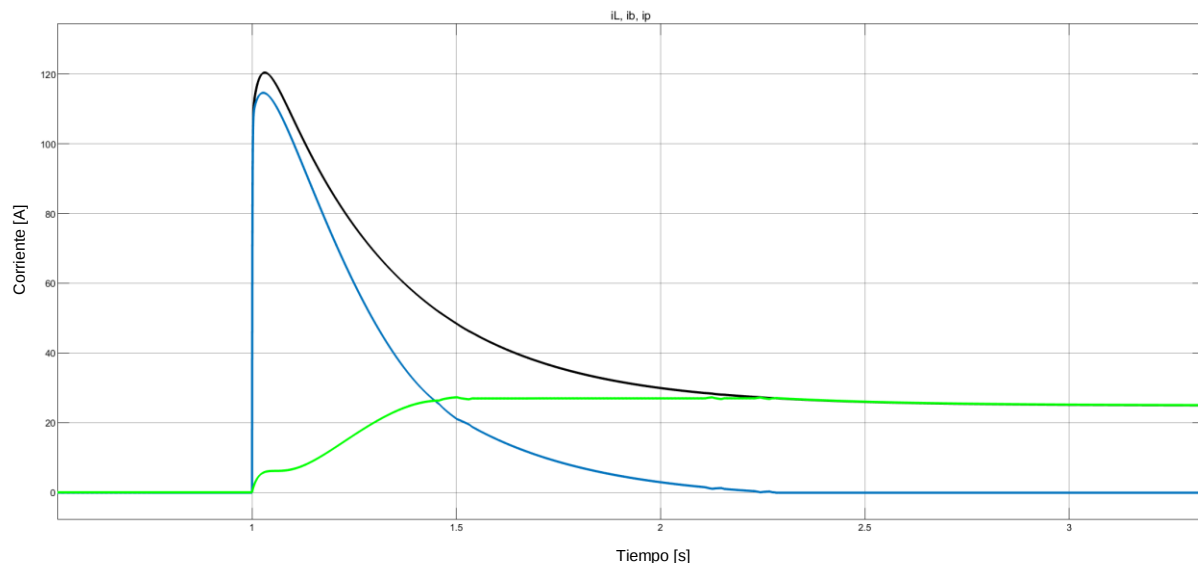


Figura 50. Tensión en la barra que alimenta el motor.

**6.2.4. Simulación # 4: respuesta al arranque del motor, de un sistema de almacenamiento compuesto de baterías sin la presencia de supercondensadores.** En este sistema, el elemento que controla la tensión son las baterías, estas se encargan de entregar la energía restante y soportar los cambios bruscos que ocurren a causa de una perturbación.

El generador fotovoltaico cumple la misma función que en el sistema anterior, entregar la mayor cantidad de energía con ayuda del algoritmo de MPPT y cargar las baterías cuando disponga de energía de sobra.

Al energizarse el motor, se produce un pico de corriente de 120 A, que es suministrado por las baterías debido a que el generador fotovoltaico no fue dimensionado para suplir potencias tan altas, mostrado en la figura 51.



*Figura 51.* Corrientes promedio a la salida. Motor (Negro), Baterías (Azul) y Generador PV (Verde).

La tensión en terminales del motor presenta una caída aproximadamente de 11V durante el arranque, como se muestra en la figura 52.

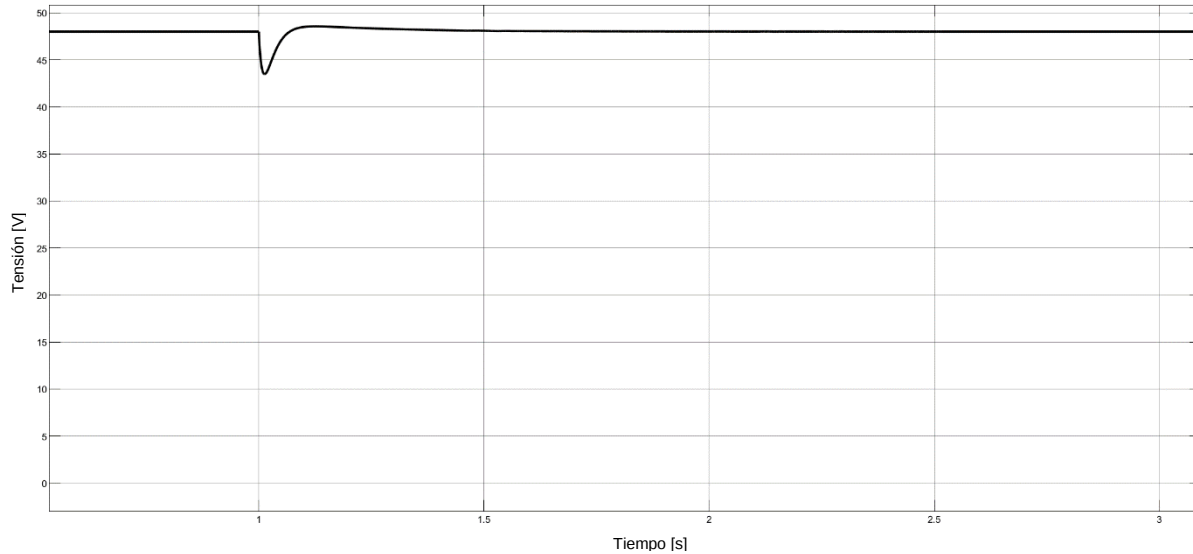


Figura 52. Tensión en la barra que alimenta el motor.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo de grado analizó mediante simulaciones, la gestión y el control de un generador fotovoltaico y un sistema de almacenamiento híbrido basado en baterías y supercondensadores, para la alimentación de un motor DC. La interconexión de los diferentes elementos del sistema se realizó mediante una configuración a base de convertidores DC-DC.

El sistema de control presentado en el trabajo permitió gestionar de manera adecuada la energía de los diferentes elementos del sistema durante el arranque del motor, logrando que los supercondensadores suministraran grandes cantidades de potencia en cortos periodos de tiempo, evitando cambios bruscos en la corriente entregada por la batería.

Las simulaciones presentadas muestran que, mediante el uso de supercondensadores, se logró limitar convenientemente la razón de cambio de la corriente de las baterías frente a cambios de

irradiancia, arranque de motores de DC y/o perturbaciones en la carga. Tal como se evidenció, en un sistema de almacenamiento de energía, compuesto únicamente por baterías (sin supercondensadores), estas son sometidas a cambios bruscos de corriente.

Adicionalmente, el punto de operación del generador fotovoltaico se controló para que este entregara la máxima potencia, siempre y cuando esta fuera requerida por el sistema.

Se logró la gestión de la energía en el sistema, empleando técnicas de control PI poco complejas con resultados satisfactorios, que facilitan considerablemente su entendimiento e implementación.

## **8. Recomendaciones**

Los modelos empleados para realizar la simulación de los convertidores DC-DC corresponden a modelos promedio, teniendo en cuenta que al emplear modelos más reales los cuales contemplan la conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia, se requiere un paso de simulación reducido y altas frecuencias de muestreo, que puede conllevar a tiempos de simulación prolongados y a mayores capacidades de almacenamiento del equipo de cómputo empleado.

Realizar el análisis de armónicos y rizos de las señales en el sistema y observar el comportamiento transitorio del mismo, mediante el uso de convertidores DC-DC con modelos que más se asemejen a los reales.

### Referencias Bibliográficas

- De Kuyper, J., & Ximon. (2014). *Fuentes de energía renovables y no renovables. Aplicaciones*. Alfaomega.
- Dougal, R. A., Liu, S., & White, R. E. (2002). Power and Life Extension of Battery–Ultracapacitor Hybrids. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES*, 2(1), 3-4.
- Fathah, A. (2013). *Design of a Boost Converter*. Rourkela.
- Gabriel, C., Ladislao, M., Emanuel, M., & Pedro, M. (28 de marzo de 2014). Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad. *FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, 1(1), 62.
- Glavin, M., Paul K.W, C., Sara, A., & W.G, H. (2008). A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System. *Power Electronics and Motion Control*. Obtenido de <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijrse>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, M. y. (2014). *Atlas IDEAM*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Anexo-Promedios-mensuales-de-Irradiacion-Global-Media.pdf>
- Kenny, C. (2003). Permanent Magnet DC Motor Characteristics.
- Michael Tse, C. (2011). Topologies and Models of DC/DC Converters. Hong Kong Polytechnic University.
- Pareja Aparicio, M. (2010). *Energía solar fotovoltaica - Cálculo de una instalación aislada*. marcombo.

- PG, M., & Bhaskar, K. (2012). Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking. *International Journal of Engineering Research and*, 2, 1420-1424.
- Roitman, M., Mestrallet, A., Aramburu, M. D., & Rossi, R. (2015). Dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica para una vivienda familiar de la Ciudad de Córdoba. *FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, 2(2), 39-40.
- Rufer, A., & Barrade, P. (October de 2002). A Supercapacitor-Based Energy Storage System for Elevators with Soft Commutated Interface. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-2.
- Sanchez Migallón, A. C. (2016). *Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores*.
- Sánchez-Migallón, Á. C. (España). *Estudio de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores (Tesis de pregrado)*. Universidad D ALCALÁ, Alcalá de Henares.
- Tytelmaier, K., Husev, O., Veligorskyi, O., & Yershov, R. (2016). A Review of Non-Isolated Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems. *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*, 22-26.
- Vidal Martinez, I. (2012). *Modelización del sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales*. Cartagena: Industriales.