

Estudio de sistemas fotovoltaicos aislados de pequeña capacidad instalada mediante el uso de  
Matlab/Simulink

Mayra Alejandra Prada Guerrero y Sergio Andrés Prada Robles

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniera Electricista

Director:

Dr. German Alfonso Osma Pinto

Ingeniero Electricista e Ingeniero Industrial

Codirectora:

Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos

Ingeniera Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

## Dedicatoria

*A Dios, quien me enseñó su infinito amor y siempre me dio la seguridad que estaba conmigo en todo momento, a mi madre Martha Guerrero, mujer valiente que venció el cáncer y con ejemplo me enseñó a creer que todo es posible. A mi Padre, Nelson Prada, a quién admiro por esa nobleza que lo caracteriza, por su sacrificio y amor infinito para conmigo, esto es para ustedes que son mi motivación para seguir adelante*

*A mi hermano Luis Prada, a quien admiro por su tenacidad hacia la vida y quien sin muchas palabras me enseñó a esforzarme y ser mejor cada día. A William Prada, quien partió pronto y a quién le prometí este gran sueño, pero desde el cielo me acompaña.*

*A mi mamá adoptiva Lucrecia Álvarez, por su gran amor y cuidados para conmigo, a las hermanas que mamá Lucrecia me regalo Yulli y Pilar Torres quienes me enseñaron con su enorme corazón a ser mejor persona.*

*A mi mejor amiga Elizabeth Montenegro que es un gran ejemplo para mí por su valentía y coraje para enfrentar los problemas, quien me acompañó en los momentos más duros de este camino y quién siempre me motivo a seguir adelante, lo logramos mi Eli.*

*A mis tías Flor alba y Jenny Prada quienes me acogieron en su hogar durante mi proceso de formación y me brindaron consejos y apoyo cuando lo necesitaba. A mi abuela Rosalba y a mi tía Casilda por tenerme siempre en sus oraciones.*

*A mi primo, y compañero de proyecto y de carrera, gracias por su compromiso y paciencia pudimos sacar adelante este proyecto*

*A Olid Manrique quien estuvo en la culminación de mi etapa universitaria a quien admiro y las palabras no me alcanzan para describir el ejemplo que es para mí, solo me queda agradecerle por permitirme acompañarla en este camino llamado linfoma no hodking y por enseñarme que la felicidad es hoy y ahora, sé que vas a salir adelante mi Olid.*

***Mayra Alejandra Prada Guerrero.***

*Dedico este trabajo de grado primero que todo a Dios por darme la fortaleza en los momentos que intente desistir y permitirme lograr este sueño el cual es un gran logro para mi vida.*

*A mi padre Ciro Prada, quien es un gran ejemplo para mí, por permitirme seguir sus pasos, y confiar en todo momento en mí, por ser un hombre humilde, responsable y honesto. Gracias a la vida por premiarme con el mejor papá.*

*A mi madre Aleida Robles por enseñarme a valorar la vida y nunca rendirme, por sus oraciones, desveladas y por todos sus sacrificios. Gracias mami por creer en mi y por ser la mejor madre del mundo.*

*A mi hermano Edgar, por estar siempre presente, por brindarme su cariño, de quien aprendí a luchar por los retos que me propongo, A mi hermana Maria Fernanda por su apoyo, cariño y comprensión, espero poder ayudarla a cumplir sus sueños, y de quien me siento muy orgulloso.*

*A mi mejor amiga María Fernanda por brindarme su apoyo en los momentos más difíciles y fortalecerme con sus palabras de aliento y ánimo.*

*A mis amigos Daniel, Sebastián, Edison, Lina y Estephany, quienes me apoyaron cuando los necesite, por su excelente amistad, los mejores deseos para sus vidas.*

*A mi prima Alejandra, por su compromiso y entrega, gracias por ayudarme a cumplir esta meta, espero pueda conseguir los sueños que se propone.*

*A mis demás familiares y amigos que a lo largo de la carrera me brindaron su cariño y comprensión para poder culminar esta etapa.*

**Sergio Andres Prada Robles**

### **Agradecimientos**

*Al Doctor German Osma, director de este proyecto,  
Por todos sus aportes y su interés en la realización de este trabajo de grado.*

*A la Doctora María Alejandra Mantilla, codirectora de este proyecto, por la entrega, paciencia  
y, sobre todo por compartimos su valioso conocimiento.*

*Al Doctor Herminio Martínez García de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona  
quien desde la distancia nos brindó su tiempo para instruirnos en su área y hacer un gran  
aporte.*

*Al ingeniero Fabián Forero Ordóñez por toda su tiempo, paciencia y colaboración con este  
trabajo y a la MSc Yuly Ramírez por todos sus consejos, aportes y motivación.*

*A nuestros compañeros Jaime Andrés Machuca y Jefersson Arguello por su tiempo y  
colaboración*

*A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y  
de Telecomunicaciones (E3T) por permitirnos formarnos en sus aulas como profesionales y a  
todos sus docentes que estuvieron presentes permitiéndonos crecer académica y personalmente.*

**Mayra Alejandra Prada Guerrero**

**Sergio Andrés Prada Robles**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Descripción de los módulos de entrenamiento .....	20
1.1 Laboratorio AT205 (URE Y ER).....	20
1.2 Módulos de entrenamiento.....	20
1.3 Panel fotovoltaico .....	21
1.4 Controlador de carga.....	23
1.4.1 Controlador de carga MPPT .....	23
1.4.2 Controlador de carga PWM .....	25
1.5 Batería.....	26
1.5.1 Batería gel .....	26
1.5.2 Batería plomo acido .....	28
1.6 Inversor .....	29
1.6.1 Inversor de onda pura.....	29
1.6.2 Inversor de onda modificada.....	30
1.7 Medidores .....	32
1.7.1 Medidores AC.....	32
1.7.2 Medidores DC .....	33
1.8 Tablero de cargas .....	34

1.9 Esquema de los módulos.....	36
1.9.1 Configuración 1 del módulo de entrenamiento.....	36
1.9.2 Configuración 2 del módulo de entrenamiento.....	38
2. Modelo y simulación de los componentes del módulo de entrenamiento .....	39
2.1 Panel fotovoltaico .....	40
2.1.1 Modelado circuital .....	40
2.1.2 Simulación de las curvas I-V y P- V.....	42
2.1.3 Curva del punto de máxima potencia.....	44
2.2 Convertidor DC-DC reductor .....	44
2.2.1 Simulación del convertidor reductor.....	45
2.2.2 Control del convertidor .....	46
2.2.2.1 Control PWM.....	47
2.3 Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).....	47
2.3.1 Algoritmo perturbar y observar tradicional (P&O) .....	48
2.3.1.1 Simulación algoritmo MPPT - P&O tradicional.....	49
2.3.2 Algoritmo perturbar y observar modificado (P&O-PI) .....	50
2.3.2.1 Simulación Algoritmo PI-P&O.....	52
2.4 Batería.....	53
2.4.1 Simulación de la batería.....	53
2.5 Convertidor bidireccional .....	54
2.5.1 Simulación del convertidor reductor bidireccional.....	55
2.6 Gestión de la energía en la batería .....	57
2.6.1 Control de carga.....	57

---

2.6.2 Control de carga de doble lazo.....	59
2.6.3 Control de tensión .....	60
2.7 Inversor .....	61
2.7.1 Simulación del inversor monofásico.....	62
2.7.2 Estructura de control del inversor .....	63
2.7.2.1 Modulación SPWM. ....	64
2.7.2.2 Control PR. ....	64
3. Caracterización de la operación .....	66
3.1 Estrategia de gestión .....	66
3.2 Escenarios de operación.....	68
3.2.1 Modo 1: Potencia entregada por el generador fotovoltaico .....	69
3.2.2 Modo 2: Potencia entregada por el panel FV y carga de batería .....	69
3.2.3 Modo 3: Potencia entregada por el panel FV y carga de batería. ....	70
3.2.4 Modo 4: potencia entregada por el panel FV y la batería .....	71
3.2.5 Modo 5: desconexión del sistema .....	72
3.3 Selección de los escenarios de simulación.....	72
3.4 Resultados de la simulación.....	73
3.4.1 Modo 1 .....	73
3.4.2 Modo 2 .....	76
3.4.3 Modo 3 .....	79
3.4.4 Modo 4 .....	83
4. Desarrollo del aplicativo computacional .....	86
4.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI).....	86

---

4.2 Diseño de la interfaz gráfica .....	87
4.2.1 Ventana 1: Análisis horario .....	88
4.2.2 Ventana 2: Análisis minutal.....	89
4.2.3 Ventana 3: Gráficos .....	89
4.3 Componentes del interfaz gráfico .....	90
4.4 Resultados de la herramienta computacional.....	92
4.4.1 Análisis horario.....	93
4.4.2 Análisis minutal .....	94
4.4.3 Análisis gráfico .....	95
4.5 Exportación de datos.....	97
4.5.1 Filtro de matriz horaria .....	98
4.5.2 Filtro de matriz minutal. ....	99
5. Conclusiones.....	100
6. Recomendaciones .....	102
Referencias Bibliográficas.....	103

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Módulos de entrenamiento del Laboratorio AT205. ....	21
Figura 2. Panel solar JAsolar 380W. ....	22
Figura 3. Controlador de carga OLMO –ICM2024. ....	24
Figura 4. Controlador de carga Steca PR3030. ....	25
Figura 5. Batería SEC 12-TSG-250. ....	27
Figura 6. Batería Genesis NP200-12R. ....	28
Figura 7. Inversor de onda Pura. ....	30
Figura 8. Inversor de onda modificada. ....	31
Figura 9. Medidor SOCOMEC DIRIS A40. ....	32
Figura 10. Medidor ACCUENERGY- EV390 ....	33
Figura 11. Medidor ACCUENERGY- AcuDC240. ....	34
Figura 12. Medidor PWRcheck. ....	34
Figura 13. Tablero de cargas de los módulos de entrenamiento. ....	35
Figura 14 Configuración 1 del módulo de entrenamiento. ....	37
Figura 15. Configuración 2 del módulo de entrenamiento. ....	38
Figura 16. Modelo general del SFV aislado. ....	40
Figura 17. Modelo eléctrico equivalente de un panel FV. ....	41
Figura 18. Bloque PV Array-Simulink. ....	42

Figura 19. Curvas características del panel FV JAsolar 380W. ....	43
Figura 20. Curvas características del panel FV JAsolar 380W. ....	43
Figura 21. Curvas del panel FV seleccionado llegando al MPP.....	44
Figura 22. Topología convertidor Buck.....	45
Figura 23. Configuración del convertidor reductor en Simulink.....	46
Figura 24. Esquema de control del convertidor Buck en Simulink.....	47
Figura 25. Diagrama de flujo del algoritmo de perturbar y observar.....	49
Figura 26. Algoritmo P&O encontrar el MPPT implementado en el bloque Matlab Function..	50
Figura 27. Esquema del control P&O-PI.....	51
Figura 28. Algoritmo PI-P&O implementado en el bloque Matlab Function.....	53
Figura 29. Modelo de la batería en Simulink.....	54
Figura 30. Topología del convertidor bidireccional.....	55
Figura 31. Configuración del convertidor DC-DC bidireccional en Simulink.....	56
Figura 32. Control de corriente y tensión de la batería.....	58
Figura 33. Control de carga.....	59
Figura 34. Control de doble lazo de carga.....	60
Figura 35. Lazo de control de tensión.....	60
Figura 36. Topología del inversor monofásico de puente completo.....	61
Figura 37. Configuración del inversor monofásico en Simulink.....	63
Figura 38. Configuración lazo de control resonante.....	64
Figura 39. Diagrama de flujo para la gestión de la energía.....	67
Figura 40. Control de tensión.....	69
Figura 41. Bloque caso 2.....	70

Figura 42. Bloque caso 3. ....	71
Figura 43. Bloque caso 4. ....	71
Figura 44. Potencia y Tensión del panel FV.....	74
Figura 45. Potencia y tensión de salida de la carga. ....	74
Figura 46. Potencia y Tensión del panel FV.....	75
Figura 47. Potencia y tensión en la carga. ....	76
Figura 48. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	77
Figura 49. SOC y Corriente en la batería.....	77
Figura 50. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	78
Figura 51. SOC y Corriente en la batería.....	79
Figura 52. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	80
Figura 53. SOC y Corriente en la batería.....	81
Figura 54. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	82
Figura 55. SOC y Corriente en la batería.....	82
Figura 56. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	83
Figura 57. SOC y Corriente en la batería.....	84
Figura 58. Potencia del panel FV y Potencia en la carga.....	85
Figura 59. SOC y Corriente de la batería.....	85
Figura 60. Análisis horario del SFV .....	88
Figura 61. Análisis minutal del SFV.....	89
Figura 62. Gráficas del SFV .....	90
Figura 63. Ejemplo análisis horario del interfaz.....	93
Figura 64. Ejemplo análisis minutal del interfaz. ....	94

---

Figura 65. Ejemplo análisis Horario y minutal de Pn3.....	96
Figura 66. Ejemplo análisis Horario y minutal del SOC .....	97
Figura 67. Matriz de datos horarios exportada app Designer. ....	98
Figura 68. Filtro de datos horarios de la matriz.....	99
Figura 69. Filtro de datos minútales de la matriz.....	100

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características técnicas del panel solar.....	22
Tabla 2. Características técnicas del controlador de carga Olmo. ....	24
Tabla 3. Características técnicas del controlador de carga PWM.....	26
Tabla 4. Características técnicas de la Batería SEC 12-TSG-250. ....	27
Tabla 5. Características técnicas de la batería genesis NP200-12R.....	28
Tabla 6. Características técnicas del inversor XANTREX- PROwatt 600.....	30
Tabla 7. Características técnicas inversor COBRA CPI 400W. ....	31
Tabla 8. Componentes de tablero de cargas- Maqueta vivienda. ....	35
Tabla 9. Parámetros eléctricos del convertidor Buck. ....	46
Tabla 10. Parámetros de la Batería en Simulink.....	54
Tabla 11. Parámetros del convertidor bidireccional DC-DC.....	56
Tabla 12. Valores del filtro LCL.....	62
Tabla 13. Selección de los escenarios de simulación. ....	72
Tabla 14. Componentes empleados en el interfaz gráfico. ....	91

## Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos en el CD. Puede visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Panel fotovoltaico

Apéndice B. Controlador de carga

Apéndice C. Batería

Apéndice D. Inversor

Apéndice E. Medidores

Apéndice F. Maqueta vivienda familiar

Apéndice G. Configuraciones

Apéndice H. Batería

Apéndice I. Convertidores

Apéndice J. Control de la batería

Apéndice K. Filtro del inversor

Apéndice L. Curva de demanda diaria la ESSA

Apéndice M. Escenario 1

Apéndice N. Escenario 2

Apéndice O. Escenario 3

Apéndice P. Escenario 4

Apéndice Q. Escenario 5

Apéndice R. Escenario 6

Apéndice S. Escenario 7

Apéndice T. Escenario 8

Apéndice U. Ecuaciones implementadas en la interfaz grafica

Apéndice V. Código de la interfaz grafica

Apéndice W. Análisis grafico del sistema

## Resumen

**Título:** Estudio de sistemas fotovoltaicos aislados de pequeña capacidad instalada mediante el uso de Matlab/Simulink\*

**Autor:** Mayra Alejandra Prada Guerrero, Sergio Andrés Prada Robles\*\*

**Palabras Clave:** Sistema fotovoltaico aislado, módulos de entrenamiento, Matlab/Simulink, comportamiento energético.

### Descripción:

Este trabajo de grado tiene como objetivo estimar el comportamiento energético de una configuración de un sistema fotovoltaico aislado, perteneciente a uno de los módulos de entrenamiento ubicados en el Laboratorio AT205. Estos módulos, serán empleados en el proceso de formación de los estudiantes de Generación de Energía (asignatura de 8vo nivel del plan de estudios del programa de Ingeniería Eléctrica), que permitirá una mejor comprensión de los sistemas fotovoltaicos, siendo uno de ellos el aislado.

Se realiza una descripción de las características técnicas de los componentes que conforman los módulos de entrenamiento. Posteriormente, se escogió la configuración 1, que pertenece a uno de los módulos de entrenamiento, a partir de esta configuración se modelaron sus componentes en la herramienta Simulink de Matlab. Con base en esto, se hace una estrategia de gestión de la energía en la batería, planteando 5 modos de operación ante diversos perfiles de irradiancia solar, temperatura y demanda de carga.

Para obtener los resultados de simulación de la configuración 1 del sistema fotovoltaico aislado se plantearon 8 escenarios de operación, junto con una estrategia de tres controles para realizar la carga y descarga en la batería. Finalmente se desarrolló un aplicativo computacional en App Designer de Matlab, el cual caracteriza la operación de un sistema fotovoltaico aislado a partir de los flujos de potencia entre los componentes, validando su funcionamiento por medio de un ejemplo.

Como resultado, se obtuvieron diversos parámetros como tensiones, corrientes, potencias y SOC en diferentes puntos que validan el funcionamiento del sistema fotovoltaico aislado ante diversos perfiles de irradiancia solar, temperatura ambiente y demanda de carga. Por último, se proponen algunas recomendaciones con el fin de solucionar los problemas encontrados en la simulación de la configuración 1.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. German Osma Pinto, PhD. Ingeniería. Codirector: Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, PhD. Ingeniería.

## Abstract

**Title:** Study of isolated photovoltaic systems with small installed capacity using Matlab / Simulink\*.

**Author:** Mayra Alejandra Prada Guerrero, Sergio Andrés Prada Robles\*\*

**Keywords:** Isolated photovoltaic system, training modules, Matlab / Simulink, energy behaviour.

### Description:

This degree work aims to estimate the energy behaviour on an isolated photovoltaic system configuration, belonging to one of the training modules located in the AT205 Laboratory. These modules will be used in the training process of Energy Generation students (8th level subject of the Electrical Engineering program curriculum), which will allow a better understanding of photovoltaic systems, one of them being isolated.

A description of the technical characteristics of the components that make up the training modules is made. Subsequently, configuration 1 was chosen, which belongs to one of the training modules, from this configuration its components were modelled in the Matlab Simulink tool. Based on this, an energy management strategy is made in the battery, proposing 5 modes of operation in the presence of different profiles of solar irradiance, temperature, and load demand.

To obtain the simulation results of configuration 1 of the isolated photovoltaic system, 8 operation scenarios were proposed with a strategy of three controls to charge and discharge the battery. Finally, a computational application was developed in Matlab's App Designer, which characterizes the operation of a photovoltaic system isolated from the power flows between the components, validating its operation by means of an example.

As a result, various parameters such as voltages, currents, powers and SOC were obtained at different points that validate the operation of the isolated photovoltaic system in the presence of different profiles of solar irradiance, ambient temperature and load demand. Finally, some recommendations are proposed to solve the problems found in the simulation of configuration 1.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Faculty of Physical-mechanical Engineers. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineers. Director: Dr. German Osma Pinto, PhD. Engineering. Co-director: Dr. María Alejandra Mantilla Villalobos, PhD. Engineering.

## Introducción

Actualmente, el crecimiento de la demanda energética y el reto de asegurar un servicio eficiente de energía, que ayude a mitigar el cambio climático, han sido factores determinantes para la búsqueda de nuevas formas de generación de energía. Se aprecia la integración creciente de fuentes no convencionales de energía, especialmente aquellas que son de carácter renovable como la energía solar fotovoltaica (Congreso de Colombia, 2014).

En Colombia, el suministro de energía eléctrica es limitado en algunas regiones, pues no se cuenta con la infraestructura para garantizar este servicio. Una de las soluciones para esto son los sistemas fotovoltaicos (SFV) aislados, que tienen como principal característica el uso de acumuladores de energía (Koschmieder Lagos, 2015).

En la Universidad Industrial de Santander se han desarrollado proyectos relacionados con SFV aislados, como la implementación de modelos de baterías para una micro red (Betancur Castro & Pérez Ruiz, 2016), la implementación y validación de algoritmos de carga en baterías (Aparicio Gutiérrez & Pérez Ospino, 2017) y el dimensionamiento de SFV aislados a un presupuesto definido (Caro Silva & Moreno Pinzon, 2018).

Partiendo de lo anterior, este trabajo de grado busca caracterizar una configuración específica de un módulo de entrenamiento sobre SFV aislados, ubicado en el Laboratorio AT205 de Alta Tensión adscrito a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Para ello, se modelan y simulan en *Matlab/Simulink* los equipos que componen este módulo conformado por dos paneles fotovoltaicos (FV), un regulador-controlador,

un inversor monofásico y una batería. De esta forma, se posibilita el estudio del comportamiento del sistema a partir de la estimación de variables eléctricas como tensión, corriente y potencia.

El objetivo general de este trabajo de grado es *estimar el comportamiento energético de una configuración de sistema fotovoltaico aislado perteneciente a los módulos de entrenamiento ubicados en el Laboratorio AT205, a partir del modelado de sus componentes y simulación de escenarios*. Los objetivos específicos que lo soportan son:

- Realizar la descripción técnica de componentes pertenecientes a los módulos de entrenamiento sobre sistemas fotovoltaicos aislados ubicados en el Laboratorio AT205.
- Modelar los componentes de un sistema fotovoltaico aislado según los componentes identificados en el AT205.
- Caracterizar la operación de los módulos modelados para diversas capacidades y escenarios de operación
- Desarrollar un aplicativo computacional que describa la operación del módulo de entrenamiento para diversos perfiles de irradiancia solar, temperatura ambiente y demanda de carga.

El documento está conformado por cinco capítulos. El Capítulo 1 aborda la descripción técnica de los equipos que conforman los módulos de entrenamiento ubicados en el Laboratorio AT205. Luego, el Capítulo 2 presenta el modelado y simulación de los elementos del módulo de entrenamiento mediante la herramienta de *Matlab /Simulink*. El Capítulo 3 define y explica los escenarios de operación del sistema. El Capítulo 4 presenta una herramienta computacional para caracterizar la operación del sistema a partir de los flujos de potencia entre los componentes. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones con base en los resultados obtenidos y se propone recomendaciones para trabajos futuros.

## **1. Descripción de los módulos de entrenamiento**

Este capítulo presenta los módulos de entrenamiento y la descripción técnica de sus componentes ubicados en el Laboratorio AT205.

### **1.1 Laboratorio AT205 (URE Y ER)**

El Laboratorio AT205 (URE y ER) está ubicado dentro del campus universitario de la Universidad Industrial de Santander, en el Edificio de Alta Tensión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Es un espacio integrado por un conjunto de equipos destinados al estudio del uso racional de la energía y otras fuentes de energías renovables. Este Laboratorio cuenta con módulos de entrenamiento para el estudio de SFV.

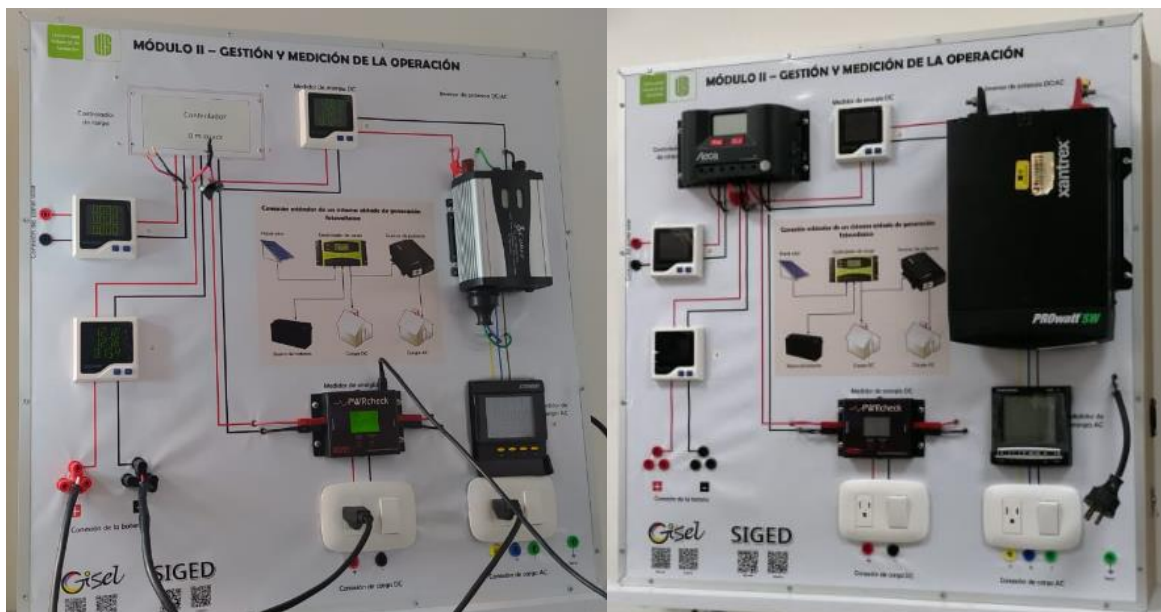
### **1.2 Módulos de entrenamiento**

Los módulos de entrenamiento, objeto de estudio, tienen como propósito lograr que los estudiantes de Ingeniería Eléctrica tengan una mejor comprensión de cómo funcionan los SFV, uno de esos tipos es el aislado. Para ello, se busca hacer prácticas dentro del campus, con los equipos físicos de los módulos, donde fácilmente los estudiantes puedan manipular la tecnología, hacer conexiones y ver cómo opera y se comporta el sistema ante ciertas condiciones.

Estos módulos constan de los siguientes componentes: paneles fotovoltaicos, reguladores, baterías, inversores, medidores de energía en AC /DC y, por último, entradas de cargas en AC / DC, como se observa en la Fig. 1. Por consiguiente, se busca caracterizar los módulos y sus equipos, logrando una mejor percepción sobre carga y descarga de una batería, la señal de alimentación del inversor, operación de cargas lineales y no lineales y estado de las variables eléctricas (tensión, corriente y potencia) en los nodos del módulo, entre otras.

**Figura 1.**

*Módulos de entrenamiento del Laboratorio AT205.*



### 1.3 Panel fotovoltaico

Los módulos de entrenamiento cuentan con uno o dos paneles fotovoltaicos (FV) de la marca JA solar, modelo JAM72S01 385/P, como se observa en la Fig.2. Este panel FV cuenta con células monocristalinas de alta eficiencia, posee una vida útil 25 años. Además, presenta

características como un coeficiente de temperatura bajo, que garantiza un mejor rendimiento y ofrece ventajas de una mayor potencia de salida (JAsolar, n.d.). La Tabla 1 presenta las características técnicas del panel FV empleado en este trabajo de grado. El Apéndice A presenta información más detallada proporcionada por el fabricante.

### Figura 2.

*Panel solar JAsolar 380W.*



### Tabla 1.

*Características técnicas del panel solar.*

<b>PANEL SOLAR JAsolar: JAM72S01 380/PR</b>	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
Potencia máxima nominal (Pmax)	380 W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	48.71 V
Voltaje de Potencia máxima(Vmp)	40.03 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	10.05 A
Corriente de potencia máxima (Imp)	9.50 A
Coeficiente térmico de potencia	-0.380 %/°C
NOCT	45 °C

<b>PANEL SOLAR JA solar: JAM72S01 380/PR</b>	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
<b>Características Mecánicas</b>	<b>Valor</b>
Célula	Monocrystalina
No. De células	72 (6x12)
Conexión	Serie
Peso	22 kg
Dimensiones	1960x991x40 mm

## 1.4 Controlador de carga

El controlador de carga es un dispositivo electrónico que se instala entre los paneles FV y el banco de baterías. Entre sus funciones principales están: gestionar la generación del panel FV, realizar la carga y descarga de baterías, evitar la sobrecarga y sobredescarga del banco de baterías (la descarga y protección de sobredescarga solo son aplicables a reguladores de 6 bornes) (Prieto Prieto, 2012). En el Laboratorio AT205, se cuenta con dos tipos de controladores de carga que son; controlador de carga, uno MPPT y el otro PWM, Ambos modelos de controlador cuentan con seis bornes que permiten conectar el generador FV (conjunto de paneles FV), banco de baterías e inversor. El Apéndice B presenta información más detallada de los modelos de controlador. A continuación, se presentan los controladores de carga.

### 1.4.1 Controlador de carga MPPT

El controlador de la marca OLMO modelo IMC-2024, como muestra la Fig. 3, utiliza tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia (*Maximum Power Point Tracking-*

MPPT). Es decir, el sistema siempre trabaja en el punto de máxima potencia de los paneles FV, bajo ciertas condiciones de temperatura e irradiancia. Este equipo cuenta con display LCD, salida USB y modo de carga de cuatro escenarios (absorción CC, absorción CV, flotación CC y flotación CV) (*SERIE OLMO CONTROLADOR DE CARGA MPPT ICM 10/20/30 24*, 2019).

### Figura 3.

*Controlador de carga OLMO –ICM2024.*



La Tabla 2 presenta las características eléctricas y mecánicas del controlador OLMO-ICM2024, el cual es empleado en este trabajo de grado.

### Tabla 2.

*Características técnicas del controlador de carga Olmo.*

CONTROLADOR DE CARGA MPPT: OLMO- ICM-2024	
Características eléctricas	Valor
Máxima corriente de carga	20 A
Voltaje del sistema de baterías	12 - 24 V
Máximo voltaje de circuito abierto PV	75 V
Máxima potencia de entrada	260 W (12V)
Voltaje de salida	11.0 ~ 14.3 VDC
Eficiencia de conversión	98 % (MPPT 99%)

---

 CONTROLADOR DE CARGA MPPT: OLMO- ICM-2024
 

---

Características Mecánicas	Valor
Temperatura de operación	-20 °C a 55 °C
Peso	526 g
Dimensiones	196 x 111 x 54 mm

---

### 1.4.2 Controlador de carga PWM

El regulador de la marca Steca modelo PR 3030, como muestra la Fig. 4, trabaja con modulación por ancho de pulsos (*Pulse Width Modulación- PWM*). Este dispositivo cuenta con funciones de protección eléctrica y desconexión por sobretensión en la batería, tiene display LCD gráfico, para visualizar datos como tensión, corriente y estado de carga (*State Of Charge – SOC*) (Steca Elektronik, 2018).

#### Figura 4.

Controlador de carga Steca PR3030.



Las características eléctricas y mecánicas de este controlador se encuentran en la Tabla 3.

**Tabla 3.***Características técnicas del controlador de carga PWM.*

CONTROLADOR DE CARGA: STECA PR3030	
Características eléctricas	Valor
Corriente de consumo	30 A
Tensión del sistema	12 – 24 V
Tensión de circuito abierto del PV	< 47 V
Consumo propio	12.5 mA
Tensión final de carga	13.9 - 27.8 V
Características Mecánicas	Valor
Temperatura de operación	-10 °C a 50 °C
Peso	350 g
Dimensiones	187 x 96 x 44 mm

## 1.5 Batería

La batería almacena la energía eléctrica generada por los paneles FV. En el Laboratorio AT205 se cuenta con dos tipos de batería, una de gel y la otra de plomo ácido, que se presentan a continuación. La información detallada de las fichas técnicas se encuentra en el Apéndice C.

### 1.5.1 Batería gel

La batería de marca SEC Energy Storage modelo 6/12-TSG, como se muestra la Fig. 5, tiene mono-bloques de tecnología de gel VRLA. Esta batería está diseñada para soportar las descargas profundas, tiene un riesgo menor de fuga térmica y vida útil más prolongada

(aproximadamente de 12 años), su tensión nominal es 12 V y su ciclo de vida es aproximadamente 420 ciclos (SEC Energy Storage, n.d.).

**Figura 5.**

*Batería SEC 12-TSG-250.*



A continuación, la Tabla 4 presenta las características eléctricas y mecánicas principales de esta batería.

**Tabla 4.**

*Características técnicas de la Batería SEC 12-TSG-250.*

Batería SEC: 12-TSG-250	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
Capacidad nominal	202 Ah
Corriente de carga máxima	40.0 A
Resistencia interna	2.2 mΩ
Tensión nominal	12 V
DOD	80 %
<b>Características Mecánicas</b>	<b>Valor</b>
Tipo de terminal	FT5
Peso	65 kg
Dimensiones	532x207x240 mm

### 1.5.2 Batería plomo ácido

Esta batería es de la marca Genesis modelo NP200-12R, como se observa en la Fig. 6. Esta sellada y compuesta por plomo y calcio de alta resistencia para garantizar una mejor vida útil de 3 a 5 años y que sea más confiable asegurando un menor mantenimiento. Sus características principales se encuentran en la Tabla 5, dentro de ellas está el rango de capacidad de 1-200 Ah, pueden realizar más de 1000 ciclos de carga/descarga dependiendo de la profundidad de descarga y una temperatura de operación de -15 °C y 50 °C (EnerSys, 2018).

#### Figura 6.

*Batería Genesis NP200-12R.*



#### Tabla 5.

*Características técnicas de la batería genesis NP200-12R.*

<b>Batería Genesis: NP200-12R</b>	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
Capacidad nominal	200 Ah
Corriente de descarga máxima	1600 A
Tensión nominal	12 V
Tensión de carga	14.4 - 15 V

<b>Batería Genesis: NP200-12R</b>	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
Resistencia interna	4 mΩ
<b>Características Mecánicas</b>	<b>Valor</b>
Terminal estándar	M6
Peso	63.60 kg
Dimensiones	522x240x218 mm

## 1.6 Inversor

Un inversor DC/AC es un dispositivo que convierte la corriente/tensión continua a una corriente/tensión de salida. En el Laboratorio AT205 se cuenta con dos tipos de inversores, un inversor de onda pura y la otra de onda modificada, que se presentan a continuación. El Apéndice D presenta información más detallada de las fichas técnicas de los dos modelos de inversor.

### 1.6.1 Inversor de onda pura

El inversor de onda sinusoidal pura como muestra la Fig. 7, marca XANTREX - modelo PROwatt SW600, permite alimentar diversos tipos de cargas eléctricas. Además, ofrece funciones de protección de desconexión por baja tensión, sobrecarga y sobretensión. La Tabla 6 presenta las características técnicas del inversor implementado en este proyecto de grado. Dentro de sus características tiene una pantalla digital integrada para tensión y potencia de salida en CC, un puerto USB y posee terminales de alta resistencia para conectar baterías (Xantrex, n.d.).

**Figura 7.***Inversor de onda Pura.***Tabla 6.***Características técnicas del inversor XANTREX- PROwatt 600.*

Inversor Xantrex: PROwatt SW 600	
<b>Características eléctricas</b>	<b>Valor</b>
Potencia nominal	540 Ah
Frecuencia de salida	60 Hz
Tensión nominal AC	12 V
Amplitud de tensión de salida	104 - 127 V
Consumo de corriente sin carga	Menos de 0.6 A
Eficiencia	90 %
<b>Características Mecánicas</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de funcionamiento	0 °C - 40 °C
Peso	3 kg
Dimensiones	89x220x310 mm

### ***1.6.2 Inversor de onda modificada***

La Fig. 8 muestra el inversor de onda sinusoidal modificada de marca Cobra - modelo CPI 400W. Este inversor puede entregar 400 W si se garantiza una tensión de entrada de 10 a 15 V<sub>DC</sub>.

Cuenta con una advertencia audible cuando el nivel de tensión cae por debajo de 10 V y una protección de sobrecarga de tensión y corriente de entrada en CC (Cobra, n.d.).

**Figura 8.**

*Inversor de onda modificada.*



La Tabla 7, se presenta información adicional de este inversor.

**Tabla 7.**

*Características técnicas inversor COBRA CPI 400W.*

Inversor Cobra CPI 400 W	
Características eléctricas	Valor
Potencia nominal	400 W
Consumo de corriente sin carga	< 0.5 A
Tensión de entrada AC	10.4 - 14.4 V
Frecuencia de salida	58 - 62 Hz
Tensión de salida	109 - 120 V
Eficiencia	> 83 %
Temperatura de funcionamiento	0 - 40 °C

## 1.7 Medidores

El objeto de los medidores es cuantificar diversas variables eléctricas para describir la operación de los módulos entre panel FV y regulador, regulador y batería, regulador e inversor e inversor y carga. A continuación, se presentan los medidores de energía usados. El Apéndice E presenta información detallada de los medidores.

### 1.7.1 Medidores AC

Este dispositivo de la marca SOCOMEC modelo DIRIS A40 como se muestra en la Fig. 9, realiza medición avanzada de tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y aparente, factor de potencia, energía promedio, corriente y tensión promedio entre otros. Presenta características estándar de tensión, corriente, potencias y energía; adicionalmente provee información sobre distorsión armónica total, componentes armónicas individuales (hasta 63), caídas, cortes y subidas de tensión, alarma de disparos e informes (SOCOMEC, n.d.).

#### Figura 9.

*Medidor SOCOMEC DIRIS A40.*



El segundo medidor es de marca ACCUENERGY – modelo EV390 como muestra la Fig. 10. Este dispositivo permite una medición confiable para parámetros como: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia y energía bidireccional. Tiene una pantalla LCD, para visualizar datos. Por último, para la comunicación cuenta con un protocolo Modbus RTU para el formato de datos y la verificación de errores (Accuenergy, n.d.).

**Figura 10.**

*Medidor ACCUENERGY- EV390*



**1.7.2 Medidores DC**

La Fig. 11 presenta el medidor de energía AcuDC420 de la marca ACCUENERGY, el cual es utilizado para monitorear y controlar sistemas de corriente continua. Este dispositivo puede medir parámetros como: tensión, corriente, potencia y energía, adicionalmente permite la medición de corriente bidireccional. Tiene pantalla LCD para visualización de datos en tiempo real y alarma de sobretensión (AcuEnergy, 2018).

**Figura 11.**

*Medidor ACCUENERGY- AcuDC240.*



El segundo medidor instalado en el módulo es de la marca PWRcheck mostrado en la Fig. 12. Este dispositivo permite medir la potencia considerando valores de tensión y corriente hasta 40 V y 40 A, respectivamente. Cuenta con una pantalla LCD para visualizar parámetros como: tensión, corriente, potencia, y energía (West Mountain Radio, 2012).

**Figura 12.**

*Medidor PWRcheck.*



## 1.8 Tablero de cargas

El Laboratorio AT205 cuenta con dos maquetas de una vivienda familiar que emula un tablero de cargas AC y un tablero de cargas DC a alimentar, como muestra la Fig. 13. Estas maquetas consideran sala-comedor, habitación principal, dos habitaciones auxiliares, baño principal, baño auxiliar, cocina y zona verde

**Figura 13.**

*Tablero de cargas de los módulos de entrenamiento.*



La Tabla 8 presenta los componentes que conforman esta maqueta de la vivienda familiar. El esquema de esta maqueta se puede ver de forma detallada en el Apéndice F.

**Tabla 8.**

*Componentes de tablero de cargas- Maqueta vivienda.*

<b>Lista de componentes maqueta vivienda familiar</b>	
<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>
Plafones de sobreponer rosca E - 27	7
Interruptores sencillos de sobreponer	7
Cajas de conexión rectangulares	20
Tomacorrientes sencillos de sobreponer con polo a tierra	6
Tapas para caja rectangular	20
Tablero de breaker enchufables de 4 posiciones	1
Tablero de 1 breaker-riel	1
Cable AWG 14 - 7 colores diferentes	20 m
Breaker enchufable	3
Breaker de riel	1

---

**Lista de componentes maqueta vivienda familiar**

<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>
Manguera de conexión eléctrica	10 m
Terminales para manguera de conexión	60
Clavijas de seguridad empotrables	2
Conectores (tomas) para las clavijas de seguridad empotrables	2

### **1.9 Esquema de los módulos**

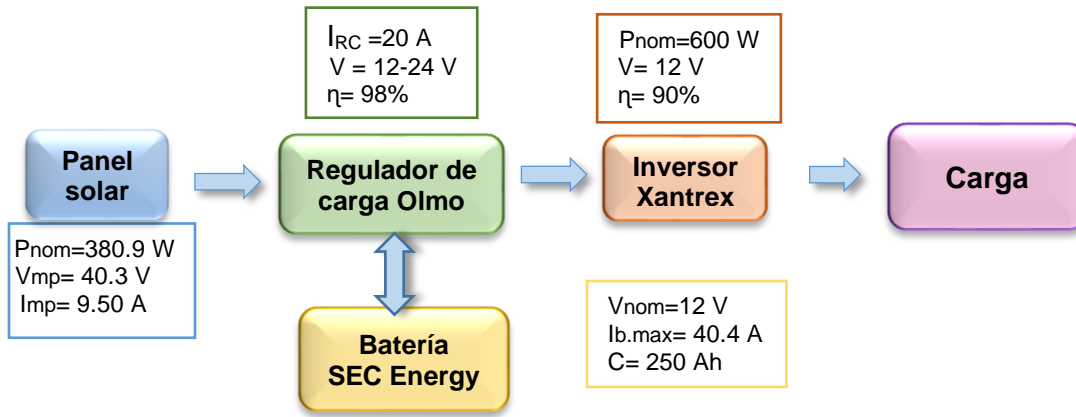
La configuración de los módulos consiste en el dimensionamiento e identificación de las características técnicas de los componentes descritos anteriormente, estos pueden presentar diversas conexiones entre ellos, generando por los menos cuatro configuraciones, A continuación, se presentan dos configuraciones de los módulos de entrenamiento que actualmente se encuentran en el Laboratorio AT205, las configuraciones funcionan de manera independiente, las cuales son descritas en detalle por el Apéndice G. Este trabajo de grado estudió la configuración 1 para realizar la simulación de sus componentes pertenecientes a uno de los módulos de entrenamiento.

#### ***1.9.1 Configuración 1 del módulo de entrenamiento***

La Fig. 14 muestra un esquema de bloques que indica cómo están conectados los componentes de la configuración 1 del módulo de entrenamiento.

**Figura 14**

*Configuración 1 del módulo de entrenamiento.*



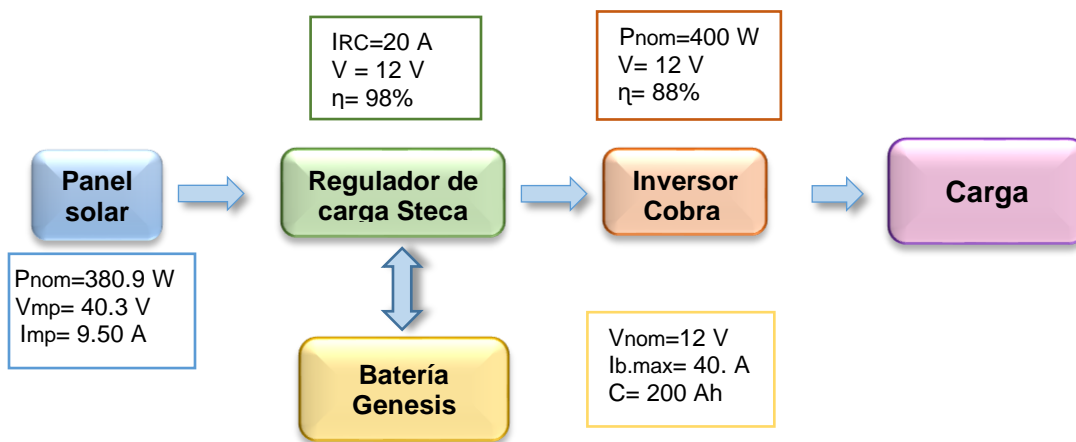
Para la configuración 1 se consideran cuatro elementos: el panel Solar JA solar, que entrega una potencia máxima de 380.9 W, la gestión de la energía será realizada por el regulador de carga marca Olmo, el cual trabaja con tecnología MPPT, que busca ubicar al panel FV en su punto de máxima potencia para obtener la mayor cantidad de energía, a una corriente máxima de carga ( $I_{RC}$ ) de 20 A, que gestiona el proceso de carga y descarga en la batería SEC Energy que tiene una capacidad de 250 Ah y una tensión nominal de 12 V. Por último, el inversor Xantrex puede entregar hasta 600 W; este dispositivo transforma la corriente/tensión de continua en alterna y presenta en su salida un tipo de onda sinusoidal pura, con una mejor calidad de energía. Estos elementos en conjunto alimentan cargas específicas de iluminación y tomacorrientes de aproximadamente 600 W, como muestra el tablero de cargas de la maqueta AC /DC.

### 1.9.2 Configuración 2 del módulo de entrenamiento

La Fig. 15 muestra un esquema de bloques que indica cómo están conectados los componentes de la configuración 2.

**Figura 15.**

*Configuración 2 del módulo de entrenamiento.*



La configuración 2 cuenta con el panel FV JA solar, que entrega una potencia máxima de 380.9 w, la gestión de la energía es realizada por el regulador de carga, marca Steca que trabaja con una tecnología PWM esta se deriva de la técnica de reducción de tensión. Es decir, no siempre va a entregar la máxima potencia del generador, trabaja a una corriente máxima de carga ( $I_{RC}$ ) de 20 A, gestiona el proceso de carga y descarga en la batería Genesis que mantiene una tensión nominal de 12 V y tiene una capacidad de 200 Ah.

Por último, el inversor Cobra, que entrega una potencia de 400 W y transforma la corriente/tensión de continua en alterna, presenta una onda modificada de forma sinusoidal cuadrada, esto puede representar una desventaja para alimentar algunas cargas que sean sensibles

ante el tipo de onda. Estos elementos en conjunto alimentan cargas específicas de iluminación y tomacorrientes de aproximadamente 400 W, como muestra el tablero de cargas de la maqueta AC /DC.

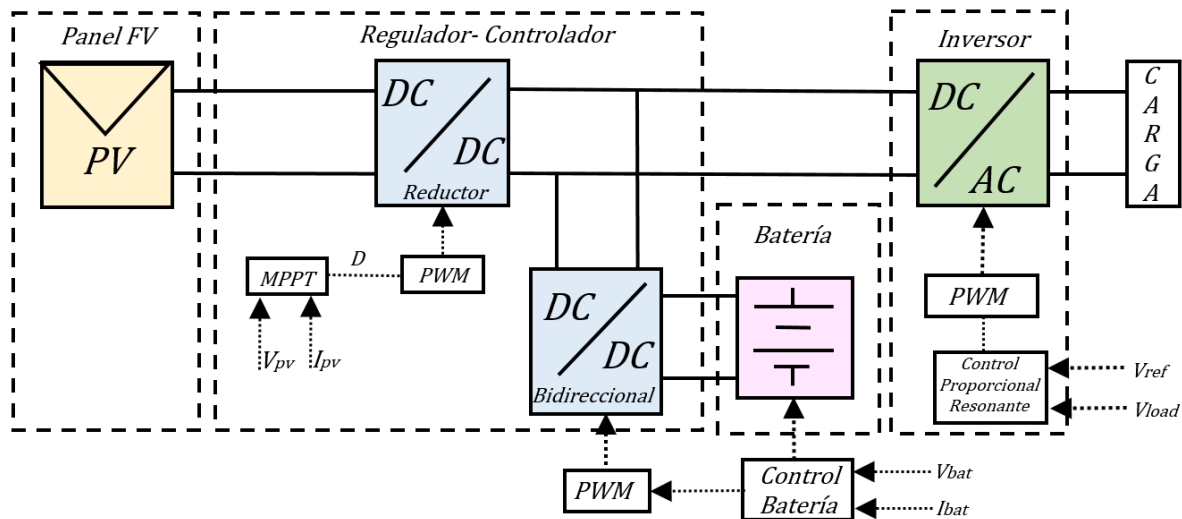
## 2. Modelo y simulación de los componentes del módulo de entrenamiento

Este capítulo presenta el modelado, los valores de los parámetros y la simulación de la operación de los componentes del SFV aislado, que corresponde a uno de los módulos de entrenamiento, ubicado en el Laboratorio AT205.

La Fig. 16 muestra los componentes implementados en el software de *Matlab/Simulink*, los cuales son: panel solar, convertidor DC/DC, convertidor DC/DC bidireccional, batería e inversor o convertidor DC-AC (*off-grid*). Los tres convertidores representan el regulador- controlador del SFV.

Figura 16.

Modelo general del SFV aislado.



## 2.1 Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico (FV) es un arreglo de celdas solares (monocristalinas, policristalinas o amorfas, entre otras), conectadas eléctricamente entre sí, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte. El panel FV proporciona una tensión y corriente continua en su salida (Díaz corcobado & Carmona Rubio, n.d.).

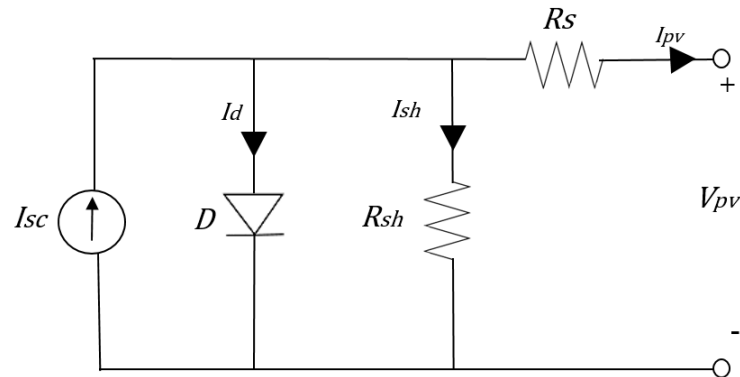
### 2.1.1 Modelado circuital

Un panel FV está conformado por la conexión serie-paralelo de celdas solares fotovoltaicas, las cuales están compuestas por material semiconductor tipo p-n, típicamente de silicio cristalino. La Fig. 17 muestra el modelo de una celda FV, caracterizado por cuatro parámetros, a saber: fuente de corriente continua ( $I_{sc}$ ), diodo en paralelo ( $D$ ), resistencia en

paralelo ( $R_{sh}$ ) que representa las pérdidas de corriente, y resistencia en serie ( $R_s$ ) que representa las pérdidas en las conexiones (Ruiz et al., 2010).

**Figura 17.**

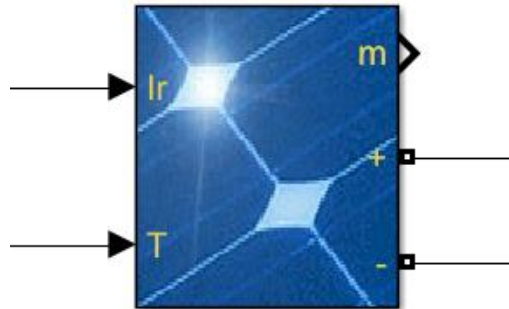
*Modelo eléctrico equivalente de un panel FV.*



El panel FV se implementa en *Matlab/Simulink*, a partir del bloque *PV Array*, como muestra la Fig. 18. Este bloque se encuentra ubicado en la librería *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Renowables/Solar*. Las entradas de este bloque son temperatura e irradiancia solar que pueden ser modificadas (manual o automáticamente) permitiendo estudiar su influencia en las variables de salida, tensión y corriente.

**Figura 18.**

*Bloque PV Array-Simulink.*



Este bloque permite modelar la generación FV, mediante la conexión de varios paneles FV conectados en serie o paralelo. Adicionalmente, permite ajustar las características predefinidas del módulo, según sea la necesidad.

### ***2.1.2 Simulación de las curvas I-V y P- V***

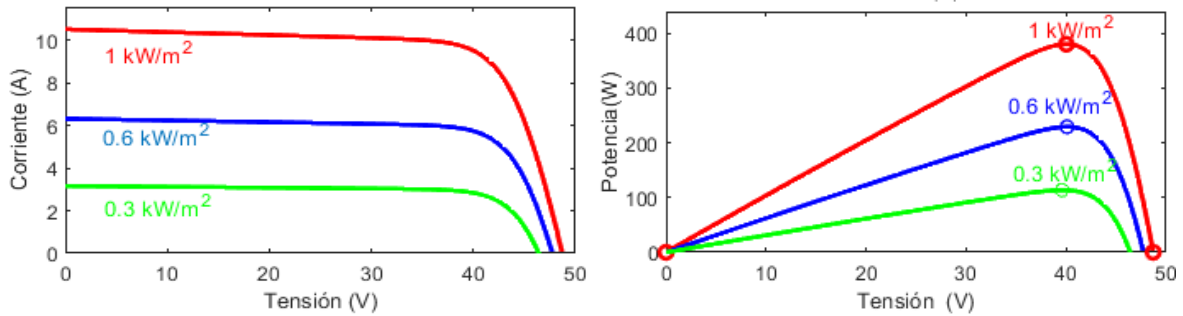
En los sistemas FV es primordial considerar el comportamiento que poseen las curvas características V-I y P-V de un panel FV ante diversas condiciones de operación. A continuación, se presentan las curvas características correspondientes al panel FV seleccionado para una temperatura constante de operación e irradiancia solar constante y variable respectivamente, con el fin de obtener los parámetros de tensión, corriente y potencia.

- *Curvas I-V y P-V con variación de irradiancia solar*

La Fig. 19 muestra las curvas características I-V (a) y P-V (b), pertenecientes al panel FV seleccionado, con irradiancia solar de 300, 600 y 1000 W/m<sup>2</sup> y una temperatura de operación constante de 25 °C.

**Figura 19.**

*Curvas características del panel FV JA solar 380W.*



a. Curva I-V.

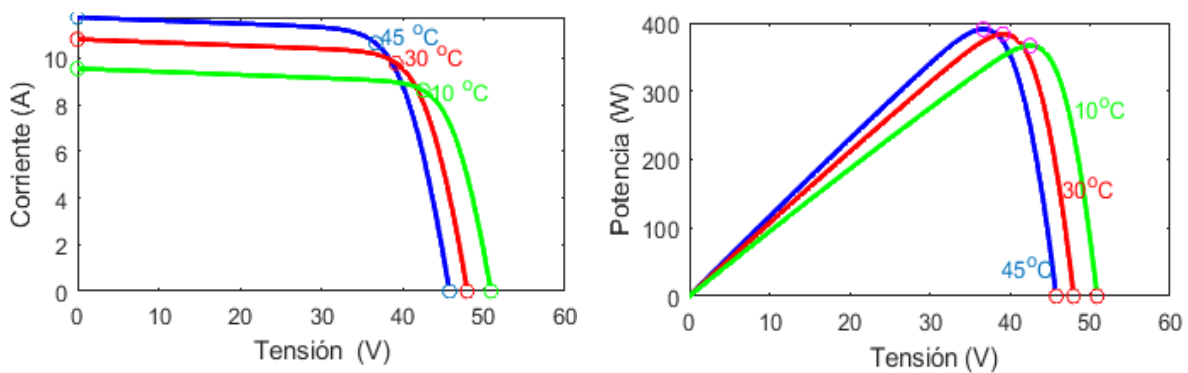
b. Curva P-V.

- Curvas I-V y P-V con variación de temperatura

La Fig. 20 muestra las curvas características I-V (a) y P-V (b) del panel FV considerando temperaturas de 10°, 30° y 45 °C e irradiancia solar de 1000 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 20.**

*Curvas características del panel FV JA solar 380W.*



a. Curva I-V

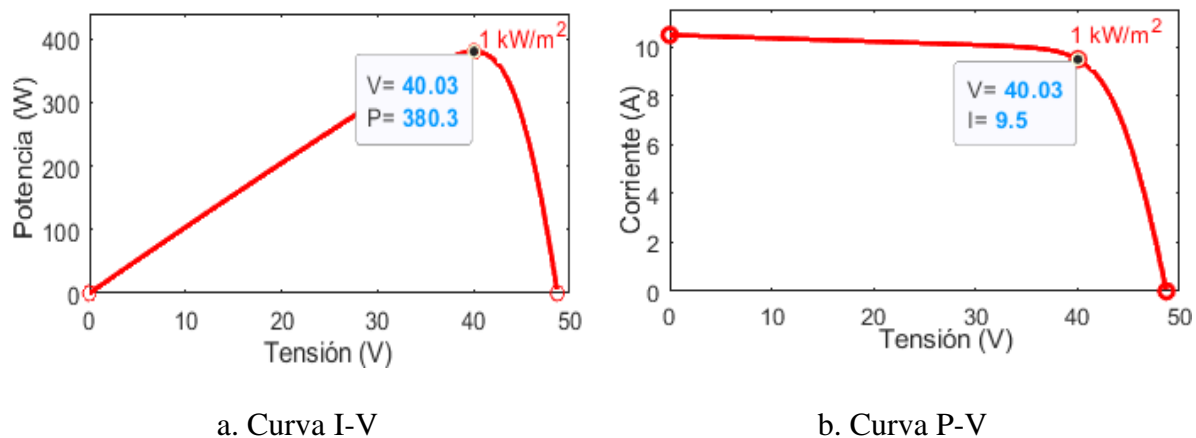
b. Curva P-V

### 2.1.3 Curva del punto de máxima potencia

La Fig. 21 muestra las curvas características I-V (a) y P-V (b), para una temperatura de operación de 25 °C y una irradiancia solar de 1000 W/m<sup>2</sup> constantes. Se encuentra que el punto de máxima potencia (*Maximum Power Point –MPP*) corresponde a los siguientes valores:

**Figura 21.**

*Curvas del panel FV seleccionado llegando al MPP.*

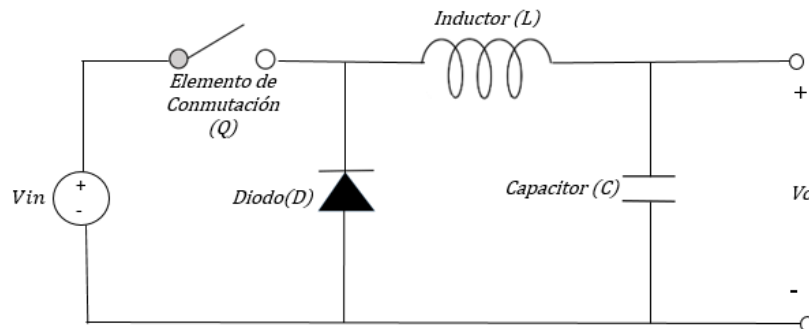


## 2.2 Convertidor DC-DC reductor

Un convertidor DC-DC reductor (Buck) es un dispositivo electrónico de potencia que reduce la tensión continua en la salida con respecto a la tensión de entrada. Este convertidor funciona por conmutación periódica de un interruptor, el cual puede estar abierto o cerrado (Hart, 2001). La Fig. 22, muestra el circuito del convertidor Buck conformado por: un interruptor ( $Q$ ), un diodo ( $D$ ), un inductor ( $L$ ) y un capacitor ( $C$ ).

**Figura 22.**

*Topología convertidor Buck.*



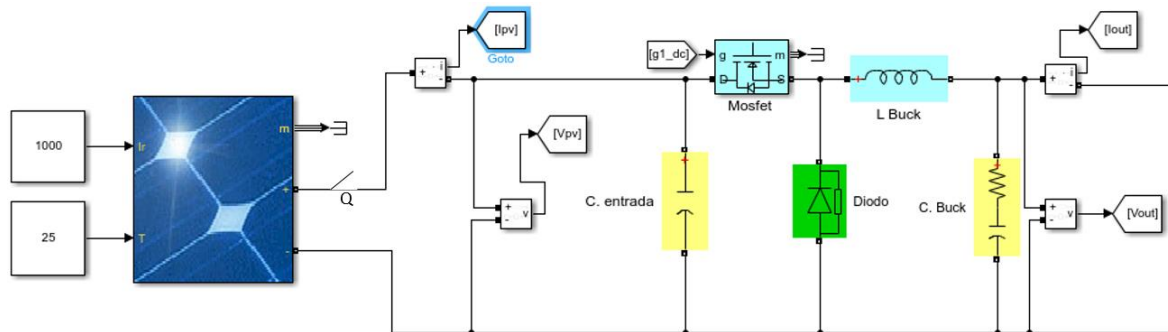
### 2.2.1 Simulación del convertidor reductor

El convertidor Buck se implementa en *Matlab/Simulink* como muestra la Fig. 23. Inicialmente, se encuentra el bloque *PV Array* que proporciona los valores de tensión y corriente del panel FV. El capacitor y el inductor se implementa mediante el bloque *Series RLC Branch* que permite ajustar sus parámetros. Estos bloques están en la librería "*Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements*".

Por otro lado, el interruptor se implementa mediante el modelo de un transistor "MOSFET" con diodo en antiparalelo que funciona como un interruptor ideal controlado por una señal. Por último, el diodo se implementa mediante el modelo *Diode*. Estos modelos se encuentran en la librería *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Power Electronic*.

**Figura 23.**

*Configuración del convertidor reductor en Simulink.*



La Tabla 9 presentan los valores de los parámetros correspondientes al modelo del convertidor Buck, empleado en este trabajo de grado.

**Tabla 9.**

*Parámetros eléctricos del convertidor Buck.*

Parámetros	Valor
Frecuencia de conmutación ( $f_s$ )	10 kHz
Tensión de MPPT del panel ( $V_s$ )	40.02 V
Tensión de salida ( $V_o$ )	20 V
Inductor ( $L$ )	0.25012 mF
Capacitor ( $C$ )	250 $\mu$ H

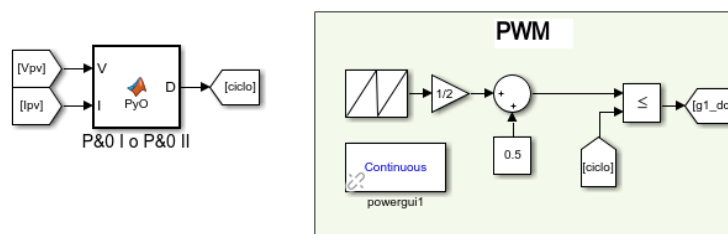
### 2.2.2 Control del convertidor

Para generar los pulsos de conmutación del convertidor Buck, se requiere utilizar una técnica conocida como modulación por ancho de pulsos como muestra la Fig. 24, la cual se explica a continuación.

**2.2.2.1 Control PWM.** La técnica por modulación de ancho de pulsos PWM compara dos señales, la señal portadora y la señal moduladora. La primera señal se implementa a partir del bloque *Triangle generator* que genera una onda triangular con una frecuencia de conmutación  $f_s=10$ [kHz]. La segunda señal es impuesta por el ciclo de trabajo (D), el cual es generado por el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, siglas en inglés). De esta forma, se obtiene a la salida una onda de pulsos cuadrada que activan y desactiva el *MOSFET*.

**Figura 24.**

*Esquema de control del convertidor Buck en Simulink.*



### 2.3 Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT)

La potencia generada por un panel FV corresponde al producto de los valores de salida de tensión y corriente para un mismo instante, cada panel FV posee un punto de operación donde la transferencia de potencia es máxima MPP y depende principalmente de la irradiancia solar y temperatura (Bolaños Navarrete, 2015).

Los SFV buscan maximizar la potencia en la salida de los paneles FV, por tanto, existen diversos algoritmos que cumplen con este fin, por ejemplo: perturbar y observar, conductancia incremental y lógica difusa, entre otros. Estos algoritmos se diferencian por algunos indicadores de desempeño como: tiempo de convergencia, la eficiencia, costos de implementación, etc. (Ortiz

Valencia, 2017). Para este trabajo de grado se implementó el algoritmo perturbar y observar (P&O), ya que es el más utilizado debido a su fácil implementación y su buen desempeño.

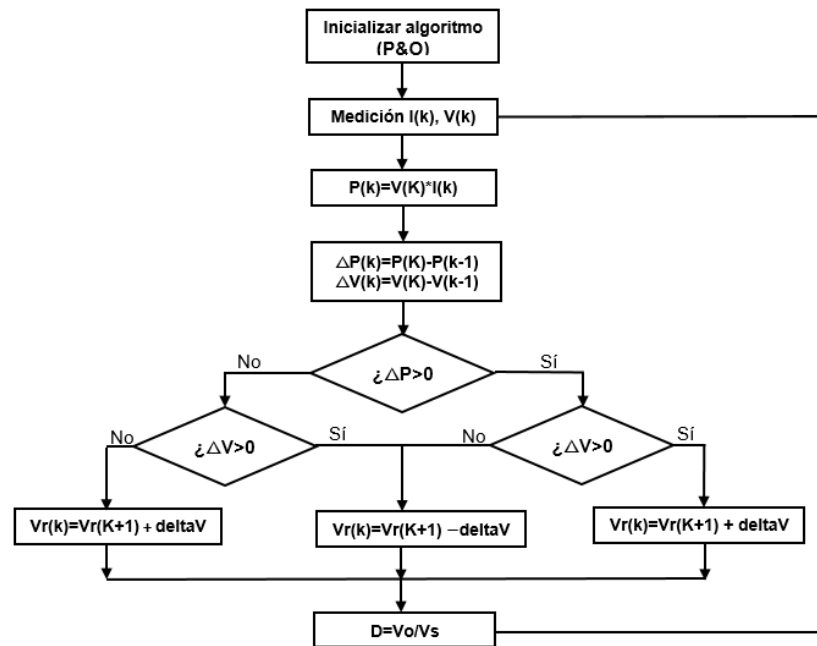
### ***2.3.1 Algoritmo perturbar y observar tradicional (P&O)***

Este método se basa en perturbar (variar) en cierta dirección, positiva o negativa, la tensión de operación del panel FV, con el fin de observar la variación de potencia. Esto permite realizar una comparación de la potencia generada para cada perturbación y, de esta manera, encontrar el punto de máxima potencia (Subirón Micolau, 2016).

La Fig. 25 muestra el diagrama de flujo de este algoritmo, que tiene como propósito variar el ciclo de trabajo (D) con un paso definido de perturbación ( $\Delta V$ ). Inicialmente, se miden los valores de tensión y corriente del panel FV. Con estas medidas se calcula el cambio en la potencia ( $\Delta P$ ) y en la tensión ( $\Delta V$ ) entre el instante actual ( $k$ ) y el previo ( $k-1$ ), siendo  $k$  cada una de las iteraciones realizadas. De aquí en adelante se siguen los pasos que se presenta en el diagrama de flujo, donde se van midiendo los cambios de potencia y tensión ( $\Delta P$  y  $\Delta V$ ), para que el algoritmo tome la decisión de aumentar o disminuir la tensión de referencia del panel FV.

Figura 25.

Diagrama de flujo del algoritmo de perturbar y observar.



**2.3.1.1 Simulación algoritmo MPPT - P&O tradicional.** Este algoritmo se implementó en Matlab/ Simulink mediante el bloque *Matlab function*, como muestra la Fig. 26. Este bloque presenta la facilidad de crear entradas, salidas y archivos de *script*. Su función es hacer que el panel FV entregue su máxima potencia.

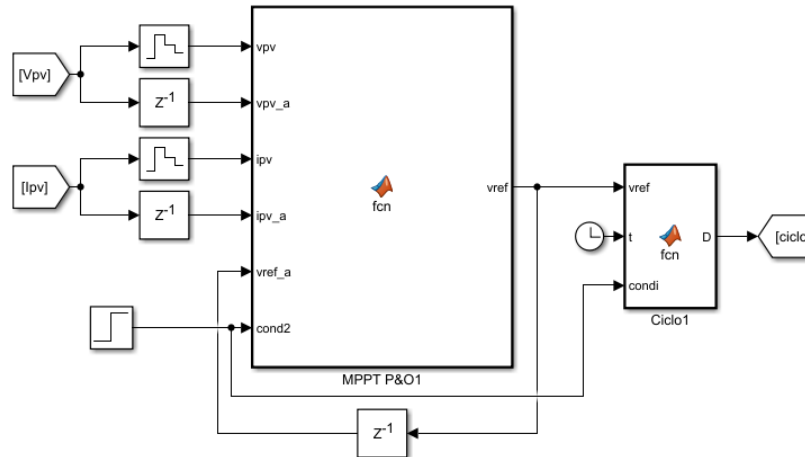
Los parámetros de entrada del bloque son: valores actuales y anteriores de tensión y corriente del panel FV, valor anterior de la tensión de referencia ( $V_{ref\_a}$ ), y el parámetro de salida del bloque es la tensión de referencia actual ( $V_{ref}$ ).

Se implementa un segundo bloque *Matlab function* con las mismas características. Este bloque tiene como valores de entrada la tensión de referencia del MPPT ( $V_{ref}$ ), una variable denominada *Cond* (retrasa la entrada del panel FV cuando se requiera) y un bloque llamado *Clock*

(permite ver el tiempo de simulación en cada paso). A la salida del bloque se obtiene el ciclo de trabajo  $D$ , que gestiona el funcionamiento del convertidor *Buck*.

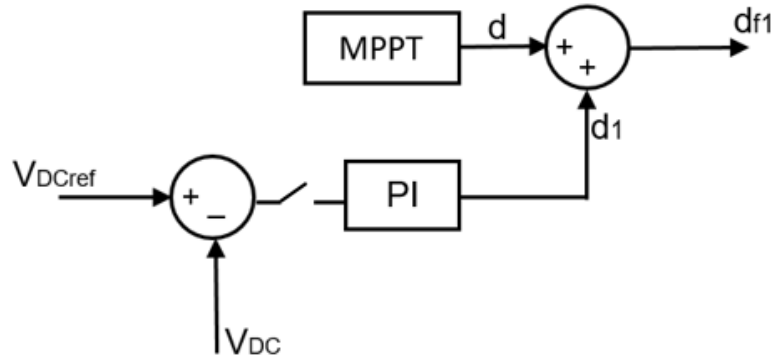
**Figura 26.**

*Algoritmo P&O encontrar el MPPT implementado en el bloque Matlab Function.*



### 2.3.2 Algoritmo perturbar y observar modificado (P&O-PI)

El algoritmo MPPT modificado se basa en el algoritmo P&O y el uso de un controlador PI (proporcional integral). Esta modificación provoca un cambio en el ciclo de trabajo del convertidor Buck, sacándolo del punto de máxima potencia, como se muestra la Fig. 27. (Ruiz et al., 2010).

**Figura 27.***Esquema del control P&O-PI.*

Este algoritmo MPPT modificado se implementa para limitar la potencia del panel FV sacándolo del punto de máxima potencia. Esta modificación es requerida solo cuando la potencia total demandada por la carga y la batería, es menor a la potencia máxima que puede generar el panel, dado que si no se limita la potencia del panel, la tensión de salida del convertidor DC-DC ( $V_{DC}$ ) se incrementa por encima de su valor de referencia.

De esta manera, el controlador PI actúa solo cuando el error en su entrada es negativo, lo cual se consigue cerrando el interruptor implementado en la entrada del bloque del regulador PI. Cuando la señal de error es positiva, el interruptor se abre y el controlador PI es reiniciado a cero, por lo que actúa solo el bloque MPPT.

Para obtener el nuevo ciclo de trabajo se utiliza la Ec. (2.1):

$$d_{f1} = d_1 + d \quad (2.1)$$

Cuando el error es negativo, el controlador PI se activa, generando un ciclo de trabajo ( $d_1$ ) que se suma al ciclo de trabajo del MPPT ( $d$ ). El control PI se encuentra definido por la Ec. (2.2), es decir:

$$d_1 = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt] = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (2.2)$$

Donde:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$K_i$ : Ganancia integral.

$T_i$ : Tiempo requerido para que la acción integral iguale el valor de la acción proporcional.

A partir de ello, el error se formula según la Ec. (2.3):

$$e(t) = V_{DCref} - V_{DC} \quad (2.3)$$

Donde:

$V_{DCref}$ : Tensión de referencia en DC.

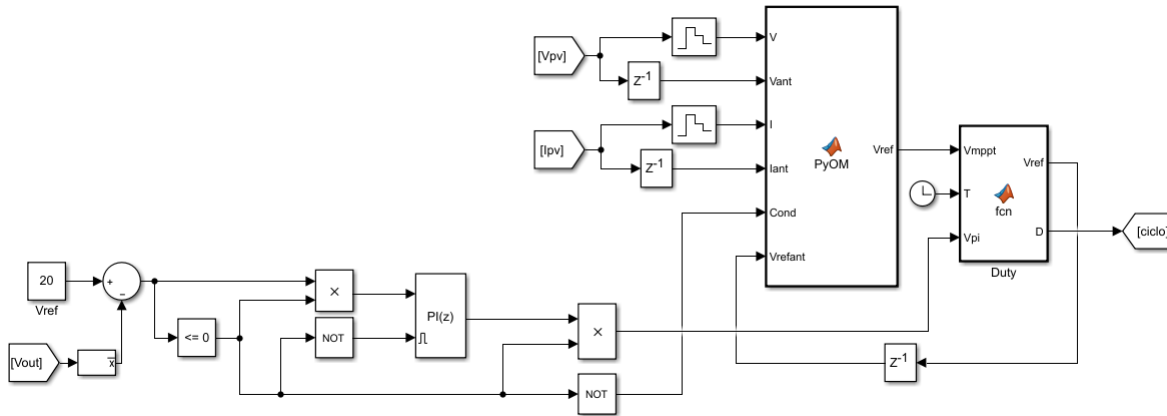
$V_{DC}$ : Tensión de salida del convertidor Buck.

Basado en las ecuaciones anteriores (Castellanos Martínez & Quiñones González, 2013), se seleccionaron los siguientes valores correspondientes a las constantes del controlador PI:  $K_p = 0.01$  y  $K_i = -0.007$

**2.3.2.1 Simulación Algoritmo PI-P&O.** Este algoritmo se implementó con las mismas características del algoritmo P&O mencionado, presentando una entrada adicional *cond* que corresponde a la señal del controlador PI como muestra la Fig. 28. El controlador PI se configuró mediante el bloque *PID controller* de *Simulink*, que permite ajustar las ganancias  $k_p$  y  $k_i$ . Se implementa un segundo bloque de *Matlab function*, el cual calcula el nuevo ciclo de trabajo (d).

**Figura 28.**

Algoritmo PI-P&O implementado en el bloque Matlab Function.



## 2.4 Batería

La batería es un dispositivo que cumple la función de almacenar la energía generada por un panel FV, con el fin de disponer de esta cuando sea necesario. Usualmente se carga durante el día cuando la potencia generada por el panel supera la potencia demandada por la carga, y se descarga durante la noche o cuando el panel FV no puede entregar la suficiente energía a la carga (Malo Rojas, 2015). El modelo dinámico del circuito equivalente empleado para la batería se muestra en el Apéndice H.

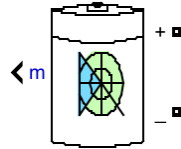
### 2.4.1 Simulación de la batería

La batería se implementa en *Matlab/Simulink* a partir del bloque *Battery* como muestra la Fig. 29. El bloque permite ajustar el tipo de batería, así como sus características predefinidas, adicionalmente, presenta tres señales de salida; estado de carga (SOC), corriente y tensión de la

batería. Este bloque está disponible en la librería *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Electric Drives / Extra Sources*.

### Figura 29.

*Modelo de la batería en Simulink.*



La Tabla 10 presenta los valores de los parámetros principales del modelo de la batería simulada en este trabajo de grado.

### Tabla 10.

*Parámetros de la Batería en Simulink.*

Parámetros	Valor
Tensión nominal	12 V
Capacidad nominal	250 Ah
Estado inicial de carga	86%
Tiempo de respuesta	0.0001 s

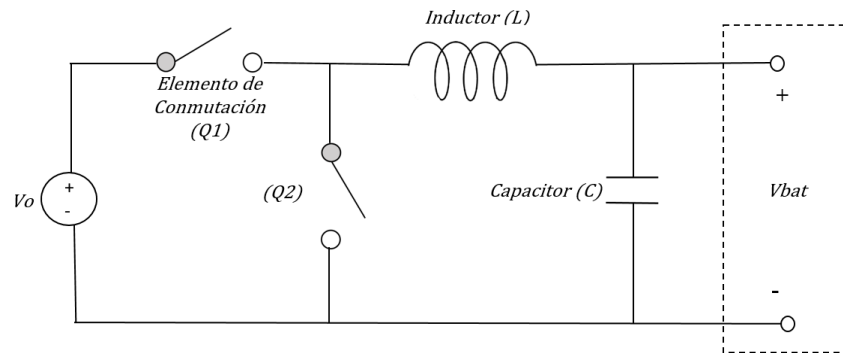
## 2.5 Convertidor bidireccional

La Fig. 30 muestra el convertidor bidireccional que permite el flujo de potencia en dos direcciones, acoplando la batería y la salida del convertidor Buck (tensión de entrada del inversor).

Está conformado por dos interruptores (Q1 y Q2), un capacitor (C) y un inductor (L) (Malo Rojas, 2015).

**Figura 30.**

*Topología del convertidor bidireccional.*

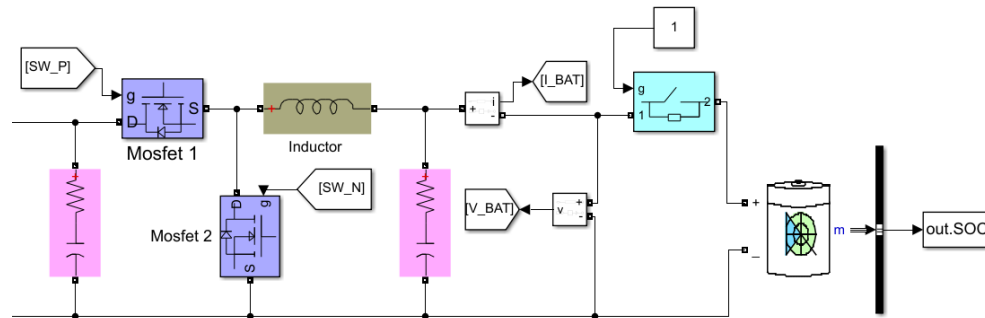


### 2.5.1 Simulación del convertidor reductor bidireccional

El convertidor bidireccional se implementa en *Matlab/Simulink* como muestra la Fig. 31. Los elementos como el capacitor (C), inductor (L), transistor con diodo en antiparalelo (Q) y resistencias (R) se modelan de igual manera que el convertidor Buck. Adicional a estos elementos, se incluye el bloque *ideal Switch* que funciona mediante una lógica de conmutación 0 (abierto) o 1 (cerrado) el cual está conectado en serie al bloque *Battery*.

**Figura 31.**

Configuración del convertidor DC-DC bidireccional en Simulink.



La Tabla 11 presenta los valores de los parámetros correspondientes al modelo del convertidor bidireccional Buck empleado en este trabajo de grado.

**Tabla 11.**

Parámetros del convertidor bidireccional DC-DC.

Parámetros	Valor
Frecuencia de conmutación ( $f_s$ )	10 kHz
Tensión de entrada ( $V_s$ )	20 V
Tensión nominal de salida ( $V_o$ )	12 V
Inductor ( $L$ )	0.12 mF
Capacitor ( $C$ )	416.67 $\mu$ H

La forma como se establecieron los valores de los parámetros de los convertidores se encuentra en detalle en el Apéndice I.

### Control del convertidor bidireccional

Para generar los pulsos de conmutación del convertidor bidireccional se requiere utilizar una técnica conocida como modulación por ancho de pulsos PWM ya mencionada anteriormente, que permite la conmutación de los 2 transistores.

## **2.6 Gestión de la energía en la batería**

El proceso para la gestión de energía en la batería involucra un convertidor bidireccional que permite el flujo de energía en dos direcciones. Normalmente, se necesita controlar este proceso de carga y descarga para proteger la batería, además de trabajar en función de las necesidades requeridas por el SFV aislado, que pueden ir desde la generación del panel FV, el estado de carga de la batería o la potencia demandada por la carga.

### **2.6.1 Control de carga**

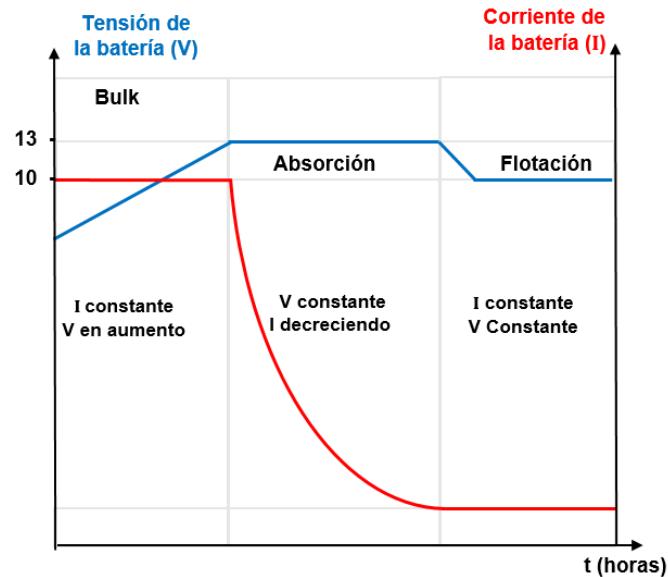
Cuando la demanda de la carga es menor a la potencia generada por el panel, se genera un excedente de potencia que puede ser enviado a la batería para cargarla.

Para controlar la carga de la batería se establece un control de dos fases (control corriente –tensión o control IU), como muestra la Fig. 32. En este control de dos fases, primero se carga la batería mediante el suministro de una corriente constante, y posteriormente, cuando se ha alcanzado un valor de tensión en la batería determinado, se cambia a control de tensión, en donde se busca mantener una tensión de carga constante. Para lo anterior, primero se emplea un control PI que busca regular que la corriente de la batería sea de 10A ( $I_{ref}$ ). Cuando la tensión en la batería

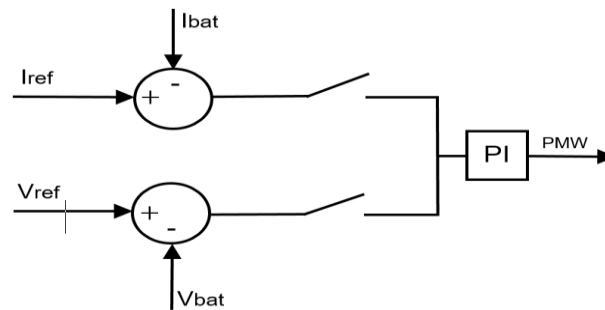
ha alcanzado un valor determinado, se apaga el control de corriente y se activa el control de tensión para mantener la tensión en 13.02 V.

**Figura 32.**

*Control de corriente y tensión de la batería.*



Se ajustó un único controlador PI para los lazos de corriente y tensión, cuya señal de entrada se activa por medio de un interruptor según el lazo empleado. La señal de salida del controlador PI ingresa al PWM, con el fin de generar los pulsos de disparo del convertidor bidireccional, como muestra la Fig. 33.

**Figura 33.***Control de carga.*

### 2.6.2 Control de carga de doble lazo

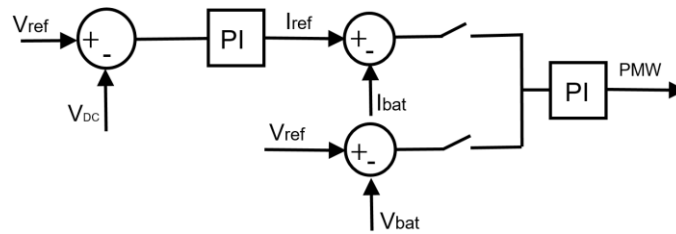
Cuando el panel no genera la suficiente potencia para mantener la corriente de carga de la batería en 10A en la fase inicial, se debe incluir un control de doble lazo, como se muestra en la Fig. 34, que regula la tensión en el bus de continua ( $V_{DC}$ ), tensión de salida del convertidor DC-DC) en 20V, y así determinar la corriente que puede entregar el sistema para cargar la batería.

#### Control

Este control cuenta con dos controladores PI independientes. El error del primer controlador PI compara la tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) y la tensión en bus continua ( $V_{DC}$ ), generando un error que se convierte en la señal de entrada de la corriente de referencia ( $I_{ref}$ ) del lazo de corriente en la batería. Este lazo funciona de forma simultánea con el lazo de tensión de la batería, los cuales se encargan de garantizar la carga por tensión y corriente de manera independiente, tal como se mencionó en el control de carga.

**Figura 34.**

*Control de doble lazo de carga.*



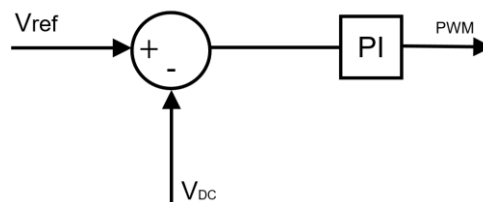
### 2.6.3 Control de tensión

El control de descarga de la batería se realiza indirectamente mediante el control de la tensión  $V_{DC}$  (tensión de salida del convertidor DC-DC o tensión del bus de continua del inversor). Para lo anterior, se configura el lazo de control de tensión que se muestra en la Fig. 35.

Este control compara dos señales de tensión, la señal de referencia ( $V_{ref}$ ) se establece en 20 V, que es el valor deseado, la cual se resta con la señal de tensión medida ( $V_{DC}$ ), logrando un error cercano a 0. La señal de salida del controlador PI ingresa al PWM, generando los pulsos para controlar los interruptores del convertidor bidireccional y así mantener la tensión de referencia.

**Figura 35.**

*Lazo de control de tensión.*



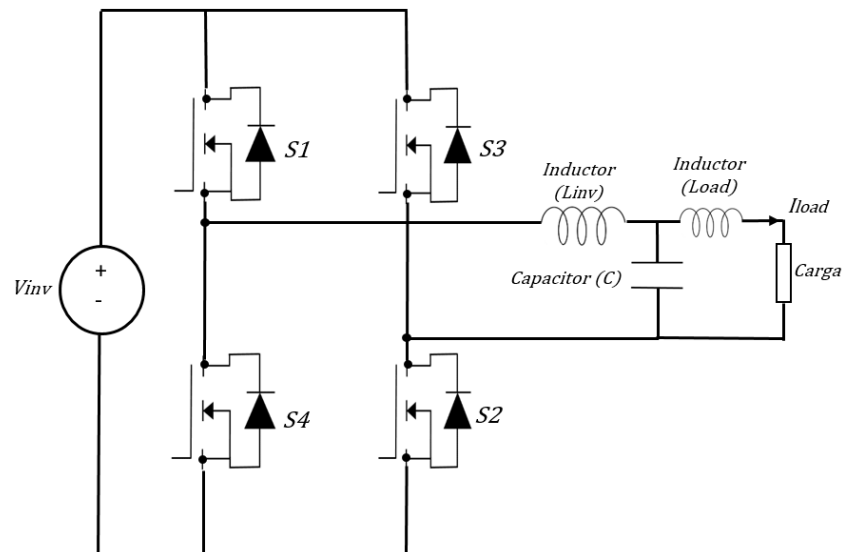
La implementación en Simulink de estos esquemas de control mencionados se encuentran en el Apéndice J.

## 2.7 Inversor

En este trabajo de grado se implementó la topología de un inversor monofásico de puente completo como se muestra en la Fig. 36, conformado por cuatro interruptores (S1 a S4) en forma de puente (H), permitiendo obtener cambios de polaridad y, así, generar a la salida una tensión/corriente alterna (Astudillo Calderón & Lema Galarza, 2017).

**Figura 36.**

*Topología del inversor monofásico de puente completo.*



El inversor está conformado por: un condensador, la topología de puente completo y un filtro de salida LCL que remueve armónicos de alta frecuencia debidos a la conmutación del

inversor. El filtro está conformado por un inductor (L1) conectado en el lado del inversor, un capacitor en paralelo y un segundo inductor (L2) conectado en el lado de la carga.

El diseño del filtro se realiza mediante la función de transferencia que corresponde con la Ec. (2.4)

$$\frac{I_{load}(j\omega)}{V_{inv}(j\omega)} = \frac{1}{L_{inv}L_{load}C_{fil}(j\omega)^3 + (L_{inv} + L_{load})j\omega} \quad (2.4)$$

Al realizar un análisis de la expresión presentada en (2.4), la cual se encuentra en el dominio de la frecuencia, se encuentran los valores correspondientes al filtro LCL (Jayaraman & Sreedevi, 2017). La Tabla 12 presenta los valores de los parámetros correspondientes al filtro del inversor monofásico empleado en este trabajo de grado. La forma como se establecieron los valores del filtro LCL se explica en detalle en el Apéndice K.

**Tabla 12.**

*Valores del filtro LCL.*

Parámetro	Valor
Capacitor del filtro ( $C_{fil}$ )	198.94 $\mu$ F
Inductor del lado del inversor ( $L_{inv}$ )	0.1360 mH
Inductor del lado de la carga ( $L_{load}$ )	0.1360 mH
Resistencia de amortiguación ( $R_{fil}$ )	0.0602 $\Omega$

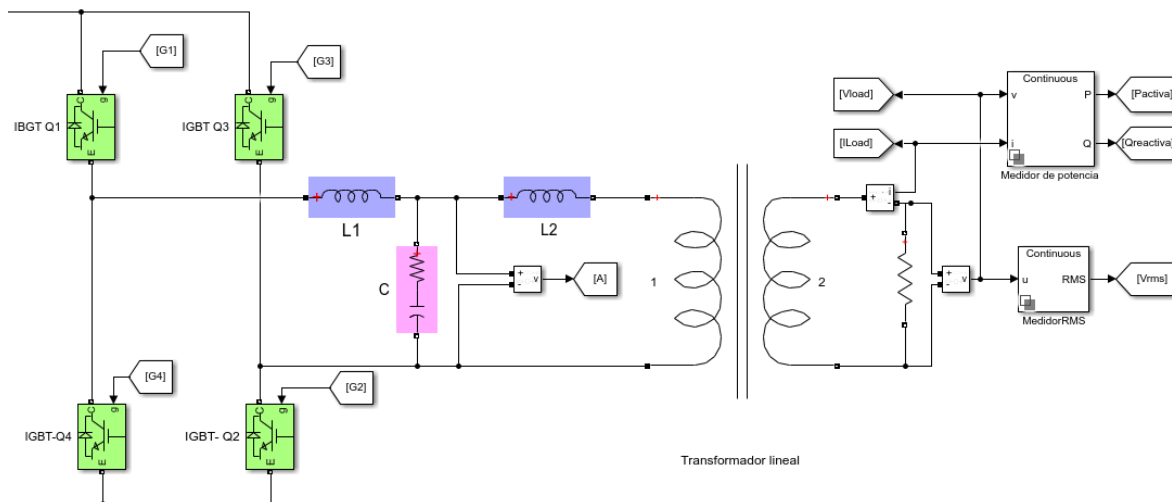
### 2.7.1 Simulación del inversor monofásico

El modelado del inversor monofásico se realizó en *Matlab/Simulink* como muestra la Fig. 37. Los cuatro interruptores se implementan mediante el bloque *IGBT/Diode*. Los elementos del filtro LCL se implementan mediante el bloque *Series RLC Branch*. El bloque *Linear Transformer*

modela un transformador con relación: (2/17); esta relación se hace necesaria debido a que la salida del inversor presenta una tensión pico de 20 V y se debe garantizar en la carga una tensión pico de 170 V y 120 Vrms. Por último, se encuentra el bloque *Series RLC Load* que simula la carga del SFV. Estos bloques se encuentran en la librería *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Power Electronics*.

**Figura 37.**

*Configuración del inversor monofásico en Simulink.*



### 2.7.2 Estructura de control del inversor

El control del inversor se realiza mediante el control proporcional resonante junto con la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal (*Pulse Width Modulation Sinusoidal – SPWM*) que se explican a continuación.

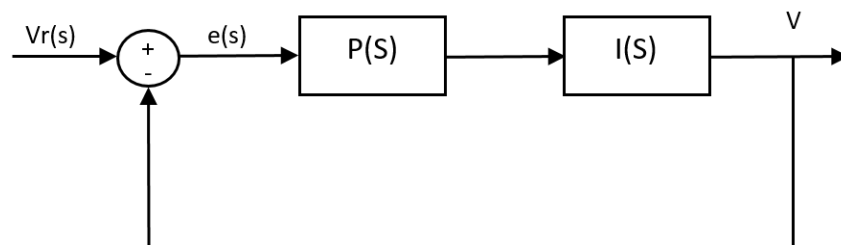
**2.7.2.1 Modulación SPWM.** La técnica *SPWM* unipolar utiliza una señal moduladora sinusoidal y una señal portadora triangular, para generar un ancho de pulso variable que se aplica por separado a cada rama del puente (Q1, Q4) y (Q2, Q3), pero comparten la misma señal portadora con una frecuencia conmutación de 10 kHz, con el fin de obtener a la salida del inversor una tensión  $+V_{DC}$  o  $-V_{DC}$ , donde  $V_{DC}$  es la tensión del bus de continua (Astudillo Calderón & Lema Galarza, 2017).

**2.7.2.2 Control PR.** Para controlar la tensión de salida del inversor, se utiliza la técnica de control proporcional resonante (PR), la cual busca regular la forma de onda de la tensión además de su amplitud. Este control presenta una ventaja sobre el control PI tradicional que tiene errores de estado estable ante seguimiento de señales de referencia sinusoidales y una capacidad limitada de rechazo a las perturbaciones.

Por lo tanto, el control PR proporciona ganancias a una determinada frecuencia y elimina los errores de estado estable (Cossoli et al., 2018). Sin embargo, falta un estudio sistemático de los procedimientos de diseño del controlador PR y la amortiguación activa del filtro LCL del inversor (Zhang et al., 2014). En la Fig. 38 se muestra el lazo del control resonante.

**Figura 38.**

*Configuración lazo de control resonante.*



La función de transferencia de Laplace de un controlador PR ideal, ver Ec. (2.5), se obtiene del lazo de control resonante.

$$C(s)_{PR} = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (2.5)$$

Donde

$K_p$ : Ganancia proporcional.

$\omega_o$ : frecuencia resonante

$K_r$ : Ganancia resonante en  $\omega_o$ .

El controlador PR proporciona una ganancia infinita a la frecuencia resonante (que es la frecuencia seleccionada). Para evitar problemas de estabilidad asociados con una ganancia infinita, se prefiere el controlador PR no ideal; el término integral se ha aproximado utilizando un filtro de pasa baja de alta ganancia (Zhang et al., 2014), generando la siguiente Ec. (2.6):

$$C(s)_{PR} = K_p + \frac{2K_r \omega_{pr} s}{s^2 + 2\omega_{pr} s + \omega_o^2} \quad (2.6)$$

Donde,  $\omega_{pr}$  controla el ancho de banda alrededor de la frecuencia de resonancia. El objetivo de esta mejora es reducir la influencia de la variación de frecuencia fundamental. La ganancia proporcional  $K_p$  determina principalmente la dinámica del controlador, mientras que  $K_r$  determina la ganancia de amplitud y controla el ancho de banda de su alrededor (Zhang et al., 2014). A partir de la Ec. (2,6) se obtienen los siguientes parámetros del controlador,  $K_r = 0.0005$ ,  $\omega_{pr} = 2\pi 60$  [rad/s].

### **3. Caracterización de la operación**

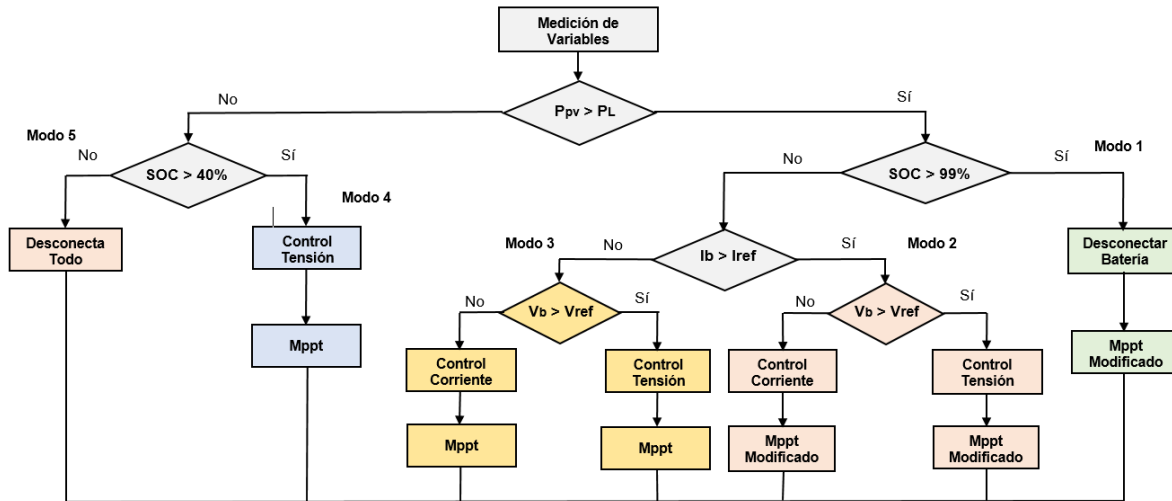
Este capítulo presenta la descripción de los escenarios de gestión de la energía en el SFV, la simulación del SFV con diferentes valores de temperatura, irradiancia solar, carga y, por último, los resultados obtenidos.

#### **3.1 Estrategia de gestión**

Al momento de considerar el SFV aislado, la lógica de carga y descarga de la batería no resulta simple, por esto, es necesario implementar diferentes esquemas de control para garantizar su funcionamiento. La Fig. 39 muestra un diagrama de flujo donde se plantearon 5 modos de operación para gestionar la energía en el SFV aislado.

Figura 39.

Diagrama de flujo para la gestión de la energía.



Inicialmente, se analiza la potencia generada por el panel FV ( $P_{pv}$ ) y la consumida por la carga ( $P_L$ ). Si  $P_{pv}$  es mayor a  $P_L$ , se debe verificar el estado de carga de la batería (SOC).

Si el SOC es mayor a 99% indica que la batería se encuentra cargada y el panel FV suplente la potencia demanda por la carga, pero es limitada por la implementación del algoritmo MPPT modificado. En esto consiste el modo de operación 1.

Si el SOC no es mayor a 99% indica que la batería no está totalmente cargada, por lo que el sistema opera en modo 2 o 3. Si la corriente que el sistema puede suministrar a la batería ( $I_b$ ) es mayor o igual a la corriente de referencia de carga ( $I_{ref}$ ) establecida en 10 A, entra en operación el modo 2. Para esto, se requiere del algoritmo MPPT modificado limitando la potencia del panel FV, entregando solo lo requerido por la carga del sistema y la batería. De igual manera se mide la tensión en la batería ( $V_b$ ) para determinar si es mayor o igual a la tensión de referencia de carga ( $V_{ref}$ ) establecida en 13.02 V. Si esta condición se cumple se activa el control de tensión que

cargará la batería a la tensión de referencia de carga; si  $V_b$  es menor a  $V_{ref}$ , se inhabilita el control de tensión y se enciende el control de corriente para cargar la batería.

Si  $I_b$  es menor a  $I_{ref}$ , se activa el modo de operación 3, el cual requiere el algoritmo MPPT que entrega la máxima potencia del panel FV, con el fin de cargar la batería e inyectar potencia a la carga demandada. Si  $V_b$  es menor a  $V_{ref}$  se activa el control de corriente, pero si  $V_b$  es mayor a  $V_{ref}$ , se inhabilita el control corriente y se activa el control de tensión para cargar la batería.

Por otro lado, si  $P_{pv}$  es menor a  $P_L$ , indica que el panel FV no puede suplir la demanda total de la carga, por lo que entra en modo de operación 4 o 5. Si el SOC es mayor a 40%, se activa el modo de operación 4, en el cual la batería se descarga entregando potencia para suplir el resto de demanda de la carga. Para este modo, se implementa el algoritmo MPPT, así el panel FV entrega su máxima potencia y se activa el control de tensión para regular la entrega de energía de la batería. Por último, si el SOC es menor a 40 %, se entra en modo 5, en donde se desconecta todo el sistema para evitar daños en los elementos del SFV.

### 3.2 Escenarios de operación

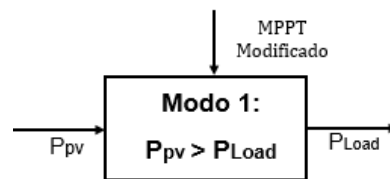
Al momento de trabajar con un SFV aislado, se deben considerar diversos casos de operación para gestionar la energía. A continuación, se resumen los 5 modos de operación establecidos.

### 3.2.1 Modo 1: Potencia entregada por el generador fotovoltaico

La batería se encuentra cargada con un SOC mayor al 99% y, la potencia demandada por la carga del sistema es menor a la potencia generada por el panel FV. Se hace necesario implementar el algoritmo MPPT modificado, que limita la potencia generada por el panel FV evitando que entregue su máxima potencia para suplir la potencia requerida por la carga, como se muestra en la Fig. 40.

#### Figura 40.

*Control de tensión.*



### 3.2.2 Modo 2: Potencia entregada por el panel FV y carga de batería

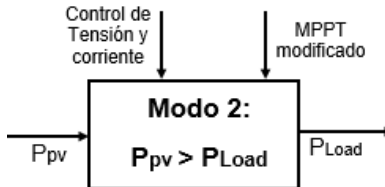
La batería presenta un estado de carga inferior al SOC máximo y, la potencia demanda por la carga es menor, por lo tanto, no se requiere que el panel FV entregue su máxima potencia. Para limitar esta generación de potencia se implementa el algoritmo MPPT modificado, como muestra la Fig. 41.

La potencia que genera el panel FV es mayor a la de la carga, ocasionando un excedente de potencia que se usa para cargar la batería. Para inyectar esta potencia se implementó un control por tensión y corriente constante, que depende del estado de carga de la batería. El control de corriente se activa hasta garantizar una corriente de carga de 10 A en la batería y se desactiva

cuando la tensión de la batería llega a 13.02 V. En ese instante se activa el control de tensión que conserva esta tensión constante hasta cargar completamente la batería.

**Figura 41.**

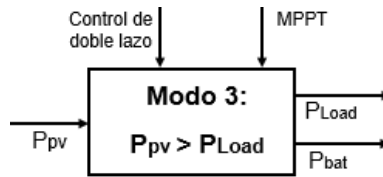
*Bloque caso 2.*



### 3.2.3 Modo 3: Potencia entregada por el panel FV y carga de batería.

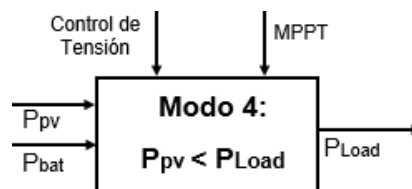
En este modo de operación la potencia generada por el panel FV es mayor a la potencia demandada por la carga, que tiene la particularidad de aproximarse a la carga máxima. Aun así, se genera un pequeño valor de potencia excedente. Para poder suplir la carga, el panel FV emplea el algoritmo MPPT que se encarga de entregar la máxima potencia, como muestra la Fig. 42.

Al existir un excedente de potencia más reducido, se aprovecha para cargar la batería. En este punto, la corriente de carga de la batería se reduce debido al valor de la carga. Por esto, es importante mantener la tensión de continua del convertidor DC-DC en 20 V, esto se garantiza con el control de doble lazo. De la misma forma permite cargar la batería a una corriente menor a la corriente nominal de carga de 10 A, activando el control de corriente, hasta llegar a una tensión de 13.02 V. De esta manera, se inhabilita el control de corriente, para activar el control de tensión que mantiene la tensión constante en la batería hasta que se cargue completamente.

**Figura 42.***Bloque caso 3.***3.2.4 Modo 4: potencia entregada por el panel FV y la batería**

La potencia demandada por la carga excede la potencia generada por el panel FV y, se hace necesario que la batería supla la potencia faltante a la carga. Para que el panel FV entregue su potencia máxima se implementa el algoritmo MPPT, como muestra la Fig. 43.

Como la potencia demanda por la carga presenta un valor considerable, genera una caída de tensión en el bus de continua y, es necesario controlar esta tensión por medio de un control de tensión que garantiza un valor de 20 V, permitiendo operar a la batería como una fuente entregando potencia y, de esta manera, se comienza a descargar.

**Figura 43.***Bloque caso 4.*

### 3.2.5 Modo 5: desconexión del sistema

Cuando el sistema no es capaz de suplir la carga debido a que la batería se encuentra descargada o el panel FV no es capaz de suplir la potencia requerida por la carga, se implementó un interruptor que desconecta la totalidad del sistema para proteger los equipos.

### 3.3 Selección de los escenarios de simulación

Para realizar un análisis de la operación de un SFV aislado, se seleccionaron los escenarios de simulación que se presentan en la Tabla 13. Se realizaron variaciones en los parámetros de irradiancia solar y temperatura, dado que son los parámetros de mayor influencia sobre un panel FV, provocando un cambio en las curvas características I- V y P-V. Finalmente, otro parámetro para tener en cuenta es la carga, que fue tomada respecto a la curva de la ESSA de un estrato 5, que se encuentra en el Apéndice L.

**Tabla 13.**

*Selección de los escenarios de simulación.*

Escenario	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura [°C]	Carga [W]
1	1000	25	306
2	600	30	171
3	1000	25	171
4	600	30	50
5	1000	25	306
6	600	30	198

Escenario	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura [°C]	Carga [W]
7	1000	25	450
8	600	30	306

### 3.4 Resultados de la simulación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada escenario. De igual forma, se observó el comportamiento del sistema ante diferentes parámetros de operación. Con el fin, de comprobar que las estrategias de control implementadas funcionan de forma correcta.

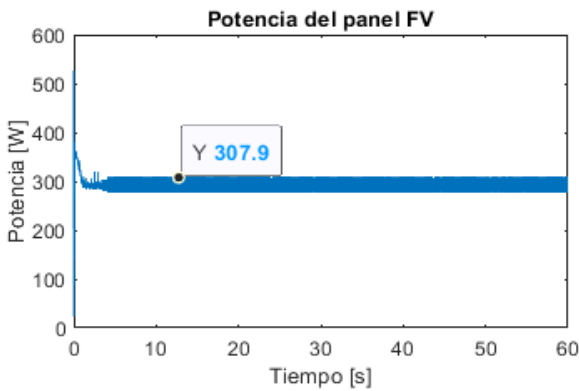
#### 3.4.1 Modo 1

- Escenario 1

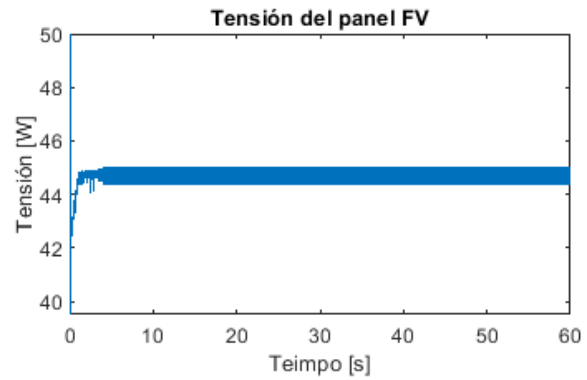
En este escenario la batería se encuentra totalmente cargada, por esta razón, el panel FV trabaja bajo el algoritmo MPPT modificado, generando una potencia alrededor de 307.9 W, como muestra la Fig. 44 (a). La tensión del panel FV confirma que no se encuentra en el punto de máxima potencia, como muestra la Fig. 44 (b), adaptándose a la demanda de la carga sin presentar excedentes de energía.

**Figura 44.**

*Potencia y Tensión del panel FV.*



(a)

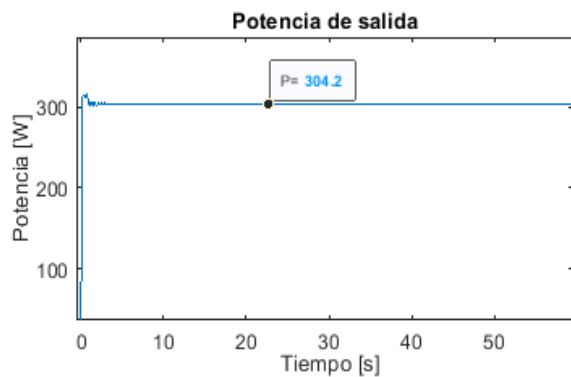


(b)

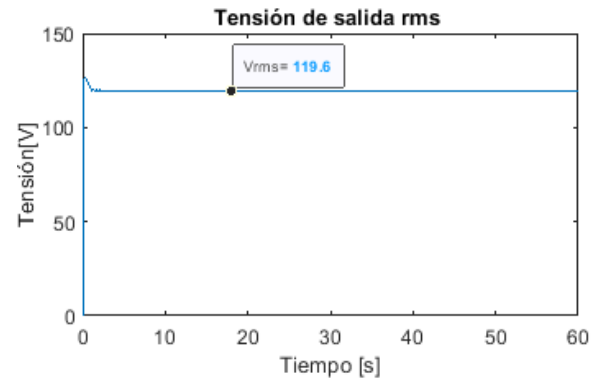
La potencia generada por el panel FV es suficiente para suplir la demanda de la carga de 304.2 W, como muestra la Fig. 45 (a). Como el control proporcional resonante se encuentra funcionando, este asegura una tensión RMS de salida del sistema de 119.6 V<sub>RMS</sub>, como muestra la Fig. 45 (b).

**Figura 45.**

*Potencia y tensión de salida de la carga.*



(a)



(b)

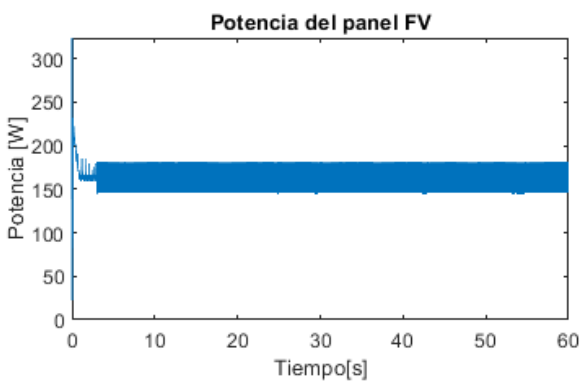
Las demás graficas que describen en detalle el escenario 1 se encuentran en el Apéndice M.

- Escenario 2

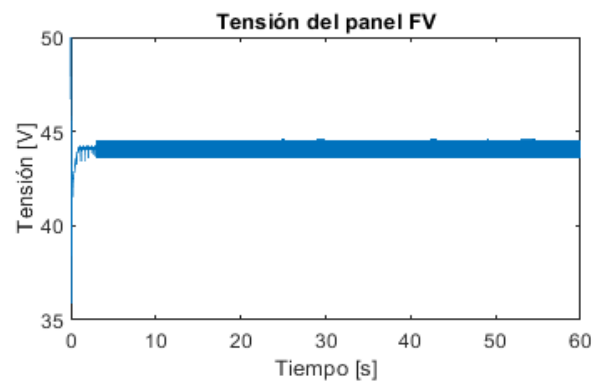
Al igual que el escenario anterior, la batería se encuentra totalmente cargada y, el algoritmo del MPPT modificado está trabajando en un punto diferente al de la máxima potencia, generando una potencia alrededor de 170 W como muestra la Fig. 46 (a). Esta potencia generada por el panel FV presenta un valor menor, debido a que la irradiancia solar que incide sobre este es de  $600 \text{ W/m}^2$  y, se adapta a la demanda de la carga de 170.4 W, como muestra la Fig. 47(a). Por otro lado, el control PR está asegurando una tensión de salida de  $120 \text{ V}_{\text{RMS}}$  como muestra la Fig. 47 (b). En los demás escenarios, se obtienen los mismos resultados que comprenden la tensión de salida del sistema.

### Figura 46.

*Potencia y Tensión del panel FV.*



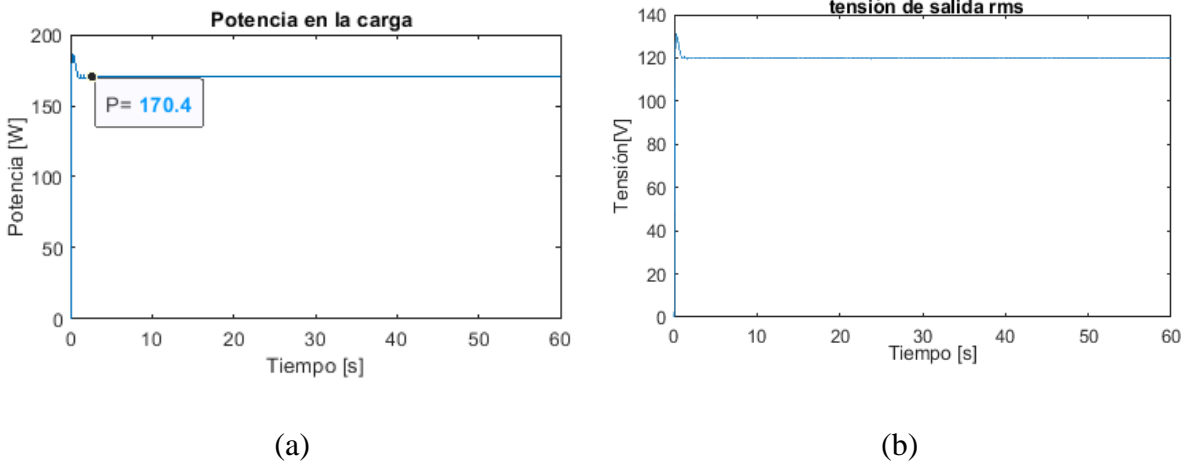
(a)



(b)

**Figura 47.**

*Potencia y tensión en la carga.*



Las demás graficas que describen en detalle el escenario 2 se encuentran en el Apéndice N.

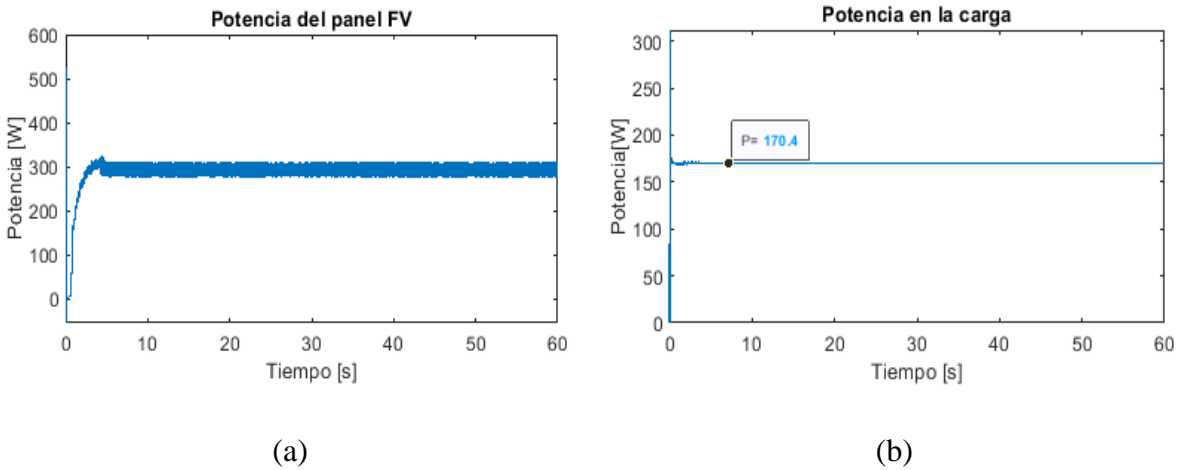
### 3.4.2 Modo 2

- Escenario 3

En este escenario, la Fig.48 (a) muestra la potencia generada por el panel FV, en un valor de 300 W aproximadamente. Lo cual indica que el algoritmo MPPT modificado asegura que el panel FV no entregue su máxima potencia. La Fig. 48 (b) muestra como la carga está consumiendo una potencia de 170 W. Es decir, que la potencia generada por el panel FV es suficiente para suplir la demanda de la carga y, la excedente es usada para cargar la batería.

**Figura 48.**

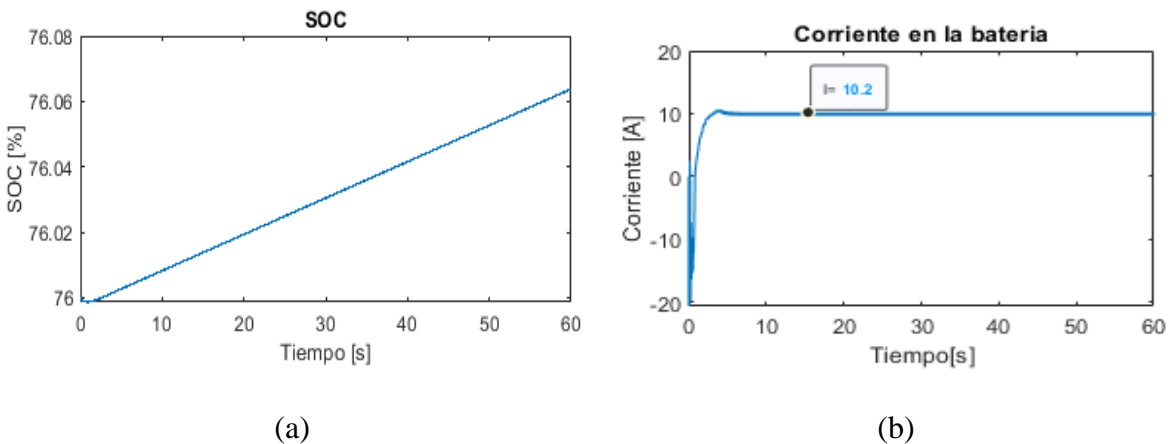
*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*



El SOC inicialmente es de 76% y va incrementando respecto al tiempo, esto indica que la batería se está cargando a una corriente constante de 10.2 A gracias al control de corriente, como muestra la Fig. 49 (a) y (b), ocasionando que el panel FV no opere en el MPP. El control de corriente se inhabilita cuando la batería alcanza una tensión de 13.02 V.

**Figura 49.**

*SOC y Corriente en la batería.*



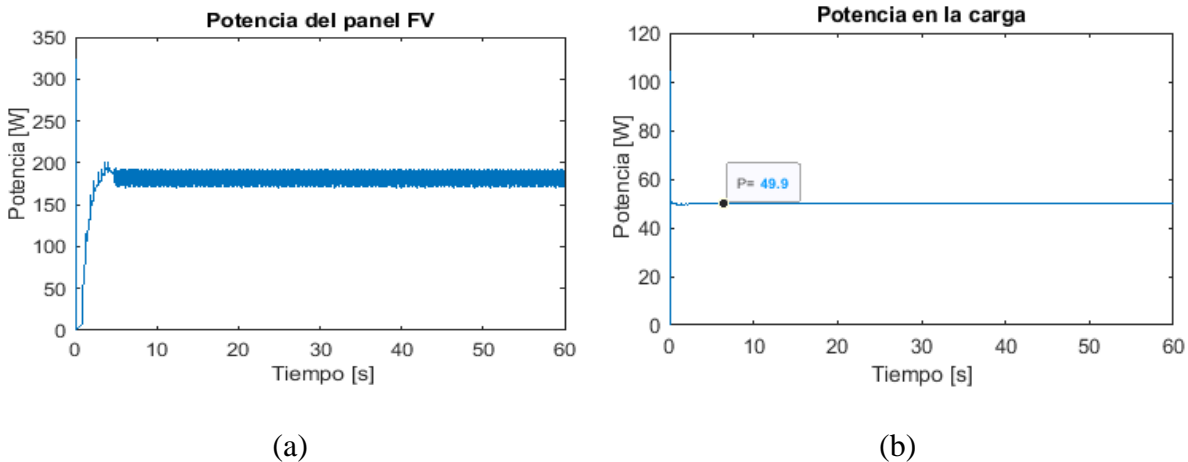
Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 3, se encuentran en el Apéndice O.

- Escenario 4

Al igual que el escenario anterior, la potencia generada por el panel FV alimenta la carga y el excedente de potencia carga la batería. En este escenario, se presenta una reducción en la potencia generada de aproximadamente 170 W, como muestra la Fig. 50 (a). Debido a que la irradiancia solar incidente es de  $600 \text{ W/m}^2$ . Aun así, la potencia generada logra suplir la demanda de la carga de 49.9 W, como muestra la Fig. 50 (b). Activando nuevamente el algoritmo MPPT modificado, para garantizar la potencia requerida.

**Figura 50.**

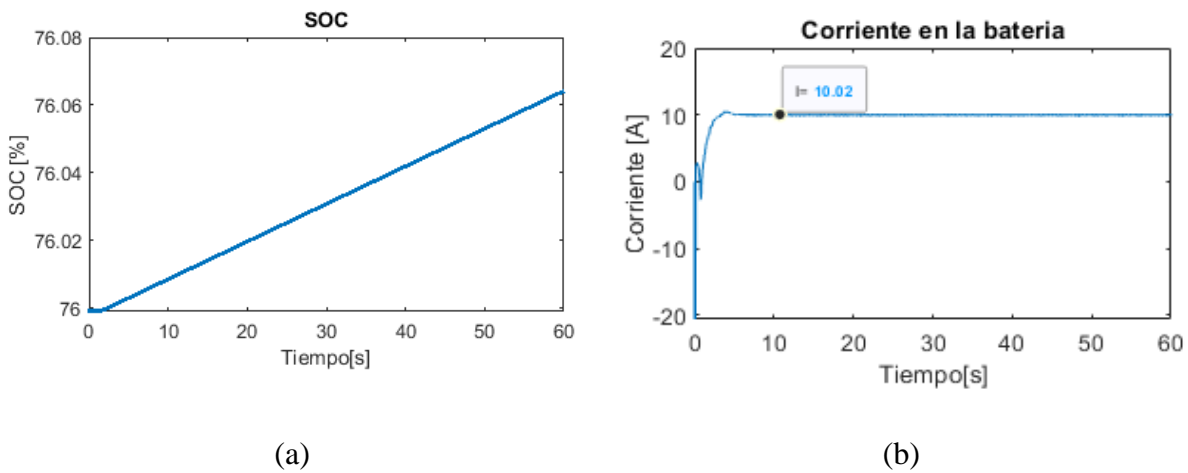
*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*



El SOC inicialmente es de 76% y va incrementando respecto al tiempo de forma constante, evidenciando que la batería se carga a una corriente constante de 10.02 A, como muestra la Fig. 51 (a), la cual es controlada por el control de corriente de la batería como muestra la Fig. 51 (b).

**Figura 51.**

*SOC y Corriente en la batería.*



Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 4, se encuentran en el Apéndice P.

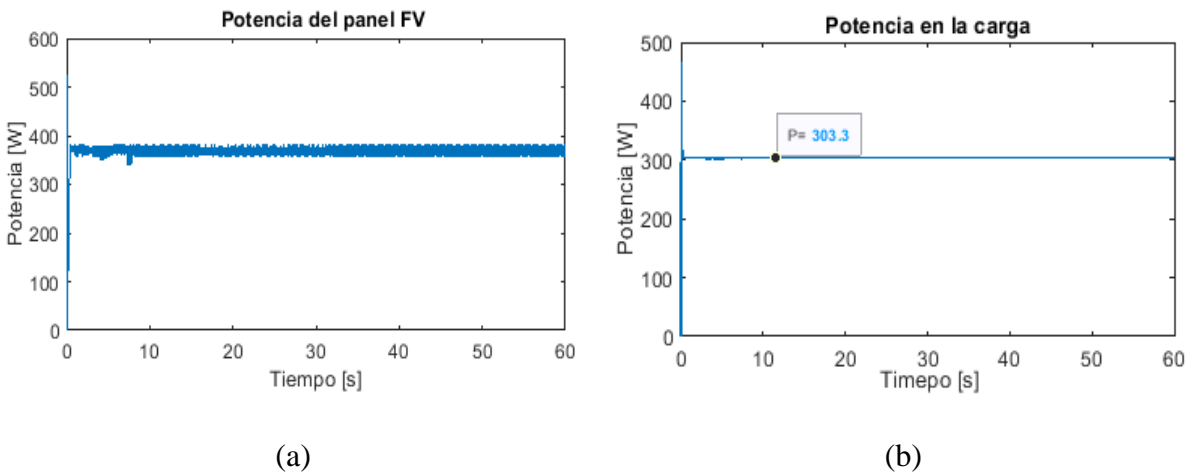
### 3.4.3 Modo 3

- Escenario 5

En ese escenario, la Fig. 52 (a) muestra como el panel FV genera la máxima potencia de 380 W, mediante algoritmo MPPT. La carga consume una potencia de 303.3 W, como muestra la Fig. 52 (b), mayor al escenario 3 y 4. Sin embargo, la potencia generada por el panel FV es suficiente para atender la carga e inyectar potencia a la batería a una corriente menor a la corriente nominal de carga. Es necesario garantizar en el bus de continua una tensión de 20 V, para un óptimo funcionamiento del control de carga.

**Figura 52.**

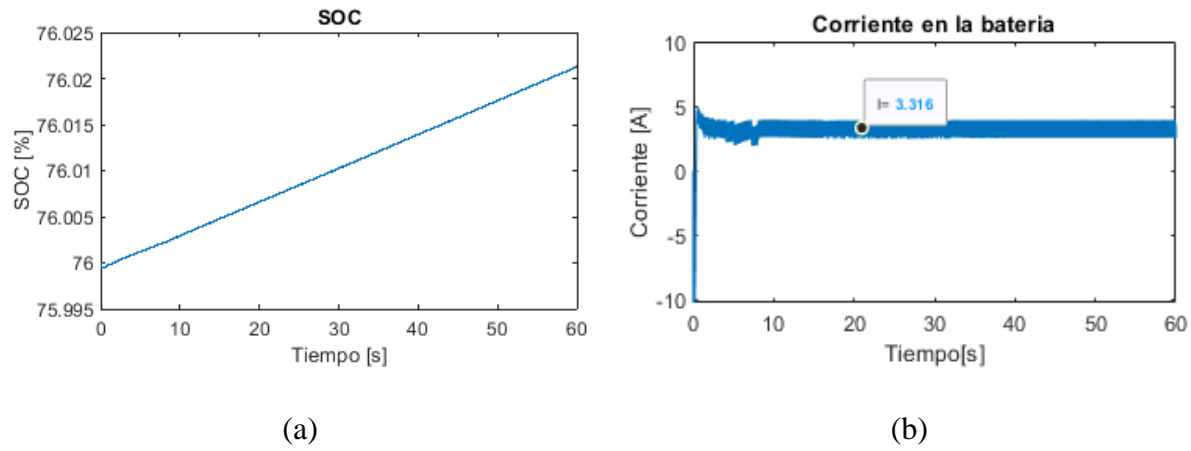
*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*



El estado de carga de la batería es de 76%, como muestra la Fig. 53 (a). La batería se carga de una forma más lenta, a una corriente de 3.316 A, menor a la corriente nominal de carga del escenario 3 y 4 que se establece en 10 A, como muestra la Fig. 53 (b). Se observa como a los 60 segundos, el SOC alcanza un 76.02 %, mientras que en el caso 3 y 4 en el mismo tiempo el SOC llega a un 76.06 %. Este proceso de carga se da gracias al control de doble lazo que se encuentra activado y permite una carga más lenta de la batería.

**Figura 53.**

*SOC y Corriente en la batería.*



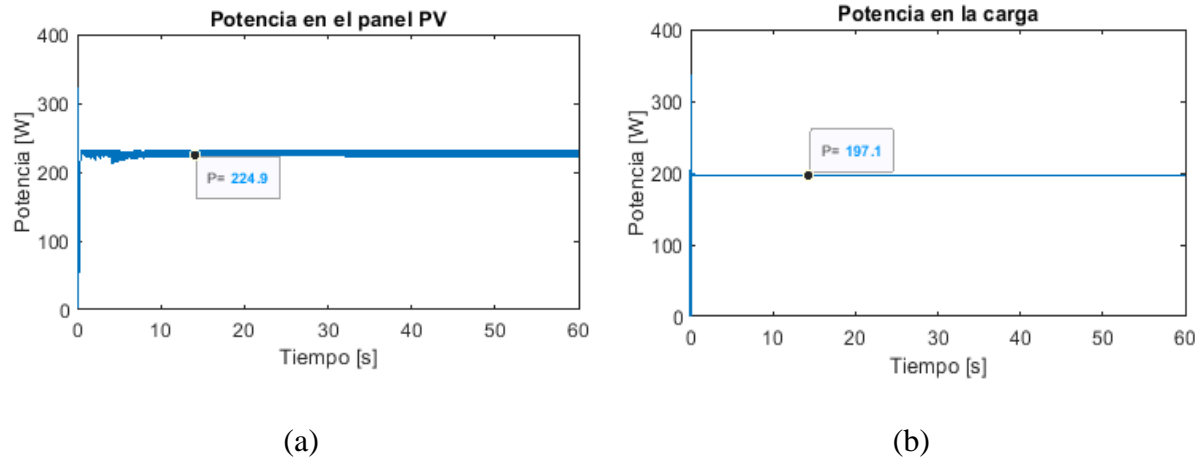
Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 5, se encuentran en el Apéndice Q.

- Escenario 6

La potencia generada del panel FV supe la carga y la potencia excedente carga la batería a una corriente menor. En este caso particular, la potencia generada por el panel FV es menor a la del escenario anterior, debido a que la irradiancia solar que incide en el panel FV es de un valor menor, generando una potencia de 224.9 W, como muestra la Fig.54 (a) y supe una carga que 197.1 W como muestra la Fig. 54 (b).

**Figura 54.**

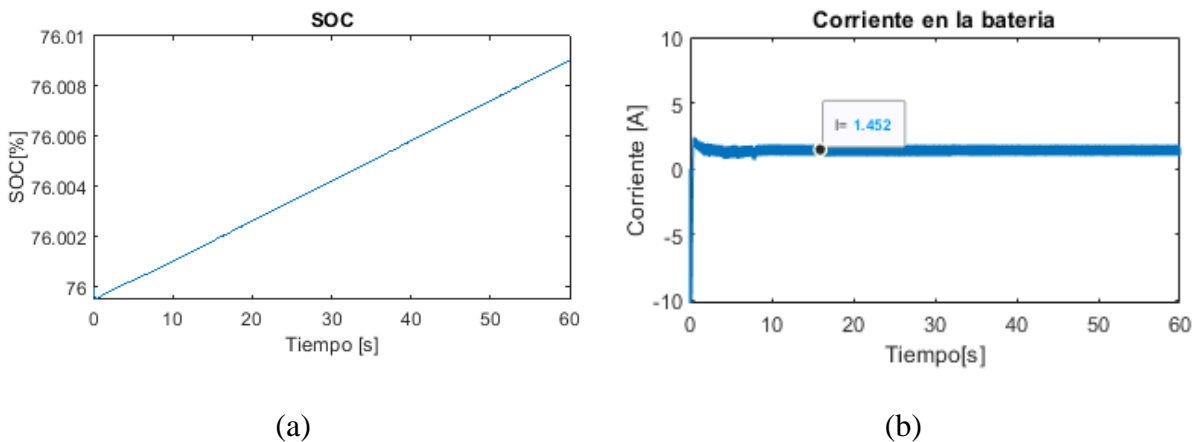
*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*



El estado de carga de la batería es de 76%, la Fig. 55 (a) muestra como la batería se carga de forma lenta, a una corriente de 1.452 A, menor a la corriente de carga del escenario 5, como muestra la Fig. 55 (b). Se observa como a los 60 s el SOC alcanza un 76.008%. Este proceso de carga se da gracias al control de doble lazo que se encuentra activado.

**Figura 55.**

*SOC y Corriente en la batería.*



Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 6, se encuentran en el Apéndice R.

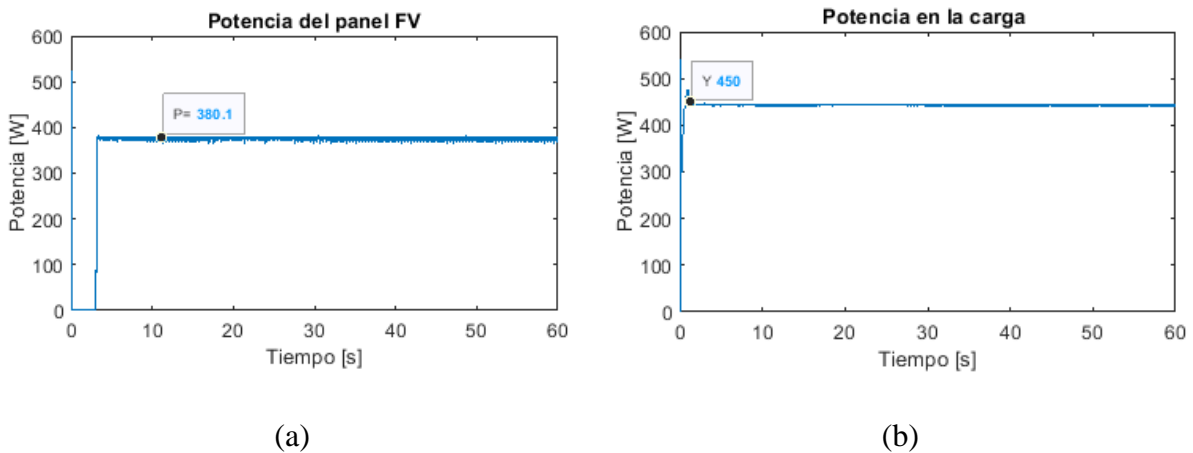
### 3.4.4 Modo 4

- Escenario 7

En este escenario, la Fig. 56 (b) muestra como la potencia demandada por la carga de 450 W, excede la potencia generada por el panel FV, por ende, la batería entra a suplir la potencia faltante. El panel FV se encuentra operando en el punto de máxima potencia, gracias al MPPT, generando una potencia máxima de 380 W, como muestra la Fig. 56 (a).

#### Figura 56.

*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*

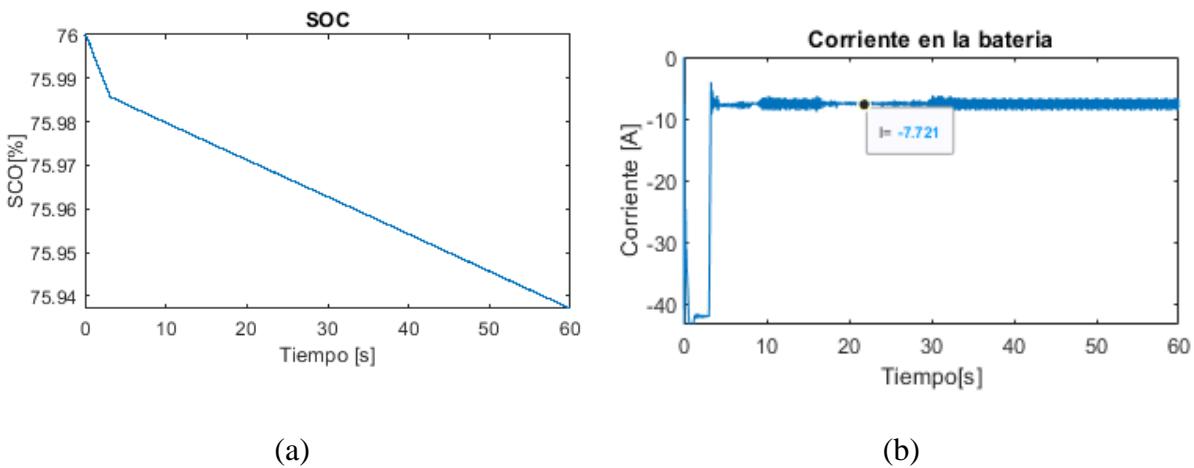


El SOC inicialmente es de 76% como muestra la Fig. 57 (a) y va decreciendo. Esto indica que la batería se está descargando hasta alcanzar su SOC mínimo y, la corriente en la batería presenta un valor de -7,721 A, como muestra la Fig.57 (b). Este proceso de carga se da gracias al

control de tensión que se encuentra activado, el cual, garantiza una tensión constante de 20 V en la entrada del convertidor bidireccional, asegurando que la batería entregue la corriente requerida por la carga.

**Figura 57.**

*SOC y Corriente en la batería.*



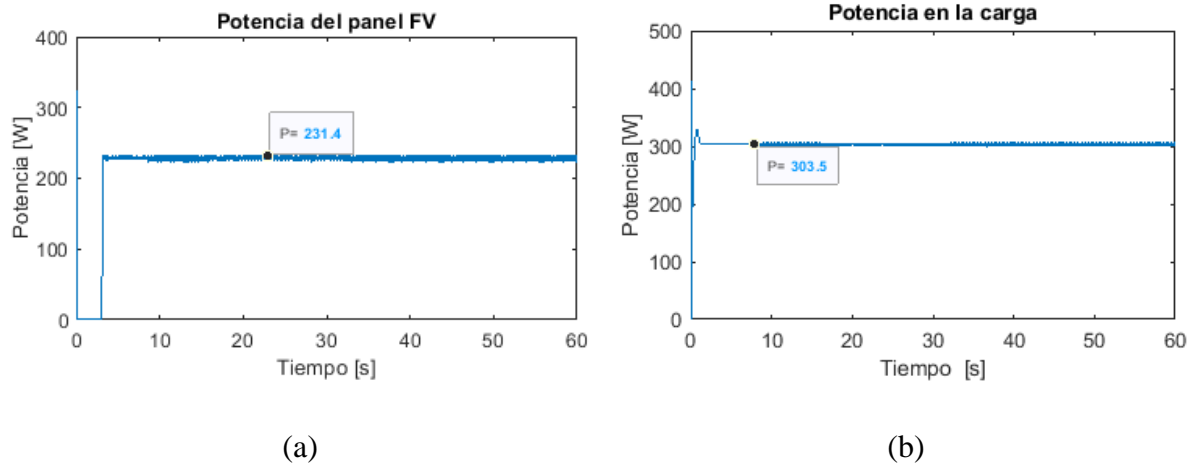
Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 7, se encuentran en el Apéndice S.

- Escenario 8

La Fig. 58 (b) muestra como la carga consume una potencia de 303.5 W mayor a la potencia generada por el panel FV, de 231.4 W, tal como muestra la Fig. 58 (a). La potencia generada es menor en comparación al escenario 7, ya que, la irradiancia solar que incide sobre el panel FV es de 600 W/m<sup>2</sup>. Por ende, es necesario que la batería ayude a suplir la potencia que demanda la carga.

**Figura 58.**

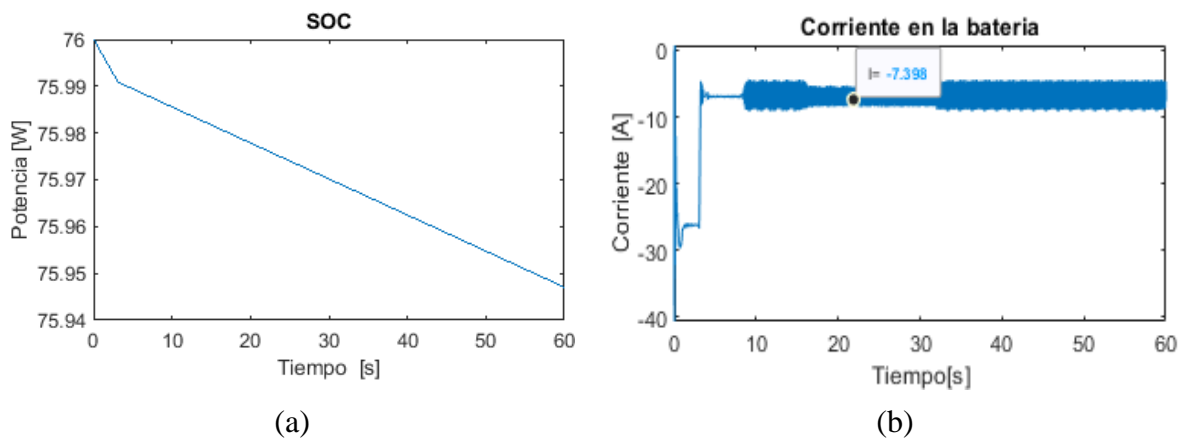
*Potencia del panel FV y Potencia en la carga.*



El SOC inicialmente es de 76% como muestra la Fig. 59(a) y va decreciendo con respecto al tiempo, esto indica, que la batería se está descargando. La corriente de descarga de la batería presenta un valor de  $-7,398$  A, como muestra la Fig. 59 (b) y, se mantiene una tensión constante de 20 V en el convertidor bidireccional gracias al control de tensión.

**Figura 59.**

*SOC y Corriente de la batería.*



Las demás graficas que describen en detalle el funcionamiento del escenario 8, se encuentran en el Apéndice T.

#### **4. Desarrollo del aplicativo computacional**

Este capítulo inicialmente presenta el desarrollo de una herramienta computacional mediante *App Designer* de *Matlab*, la cual se diseña con el objetivo de caracterizar la operación de un SFV aislado, a partir de los flujos de potencia entre los componentes. Por último, se valida el funcionamiento de la aplicación por medio de un ejemplo.

##### **4.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI)**

*App Designer* ofrece un entorno integrado para el desarrollo de la herramienta computacional, que permite diseñar una interfaz gráfica de usuario (*Graphical User Interface-GUI*). Adicionalmente, la interfaz se puede programar para definir el comportamiento de la aplicación, lo que permite tener control sobre su diseño y desarrollo. Esta herramienta es de fácil uso y comprensión para obtener espacios interactivos lo más amigablemente posibles con el usuario (MathWorks, 2020).

## 4.2 Diseño de la interfaz gráfica

El desarrollo del aplicativo computacional se realizó mediante *App Designer* utilizando la herramienta *GUI de Matlab*. La interfaz diseñada describe la operación de un SFV aislado a partir del flujo de potencias entre sus componentes, en donde este flujo de potencias se da en 4 nodos principales: i) nodo 1: Potencia generada por el generador FV según el Regulador Controlador (RC). ii) nodo 2: Potencia suministrada al inversor. iii) nodo 3: Potencia suministrada al banco de baterías. iv) nodo 4: Potencia suministrada a la carga por el inversor.

El aplicativo toma cuatro datos de entrada: irradiancia, temperatura, factor de potencia y la carga. Para este proyecto de grado se trabajó con base en la curva de estrato 5 de la ESSA, con valores diferentes para cada día. Estos datos son generados por el archivo “*TESIS.xlsx*” (tipo de archivo Excel) y posteriormente se almacenan para ser utilizados en la programación del código de la interfaz.

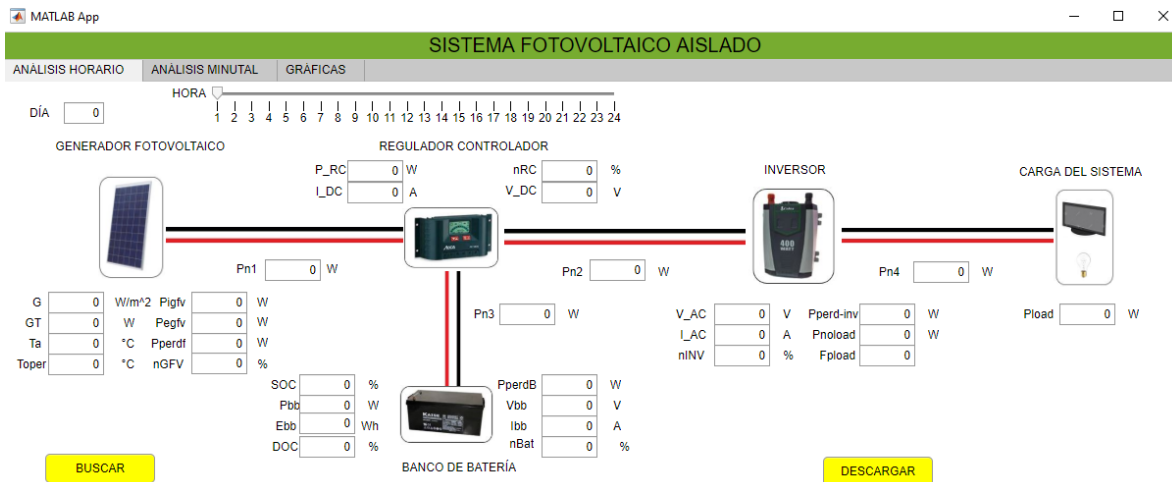
El funcionamiento de esta interfaz gráfica, consiste en crear dos matrices principales, una matriz de entrada de datos horarios de (720x4) y otra matriz de entrada de datos minútales de (43200x4). Estas matrices almacenan los datos de cada minuto u hora en un periodo de 30 días. Permitiendo, interactuar con los datos de varios parámetros del SFV, para que el usuario realice gráficos de análisis por hora o minutos (Rojas Muñoz, 2017). A continuación, se describen de forma general las tres ventanas diseñadas que conforman la herramienta:

### 4.2.1 Ventana 1: Análisis horario

La Fig. 60 muestra el diseño de la *GUI* de la ventana nombrada “ANÁLISIS HORARIO”. En esta ventana, el usuario debe ingresar el número del día en la casilla que se indica con el nombre “DÍA” y con la barra de control deslizante llamada “HORA” puede elegir la hora del día que desea analizar. Posteriormente, se da *click* en el botón “BUSCAR” para obtener tanto los valores de los flujos de potencia en los diferentes puntos de los componentes y parámetros como: irradiancia solar, temperatura ambiente, tensiones, corrientes, eficiencias, pérdidas, energía en la batería, SOC, DOC y la potencia de carga para el día y la hora escogida por el usuario.

**Figura 60.**

#### Análisis horario del SFV

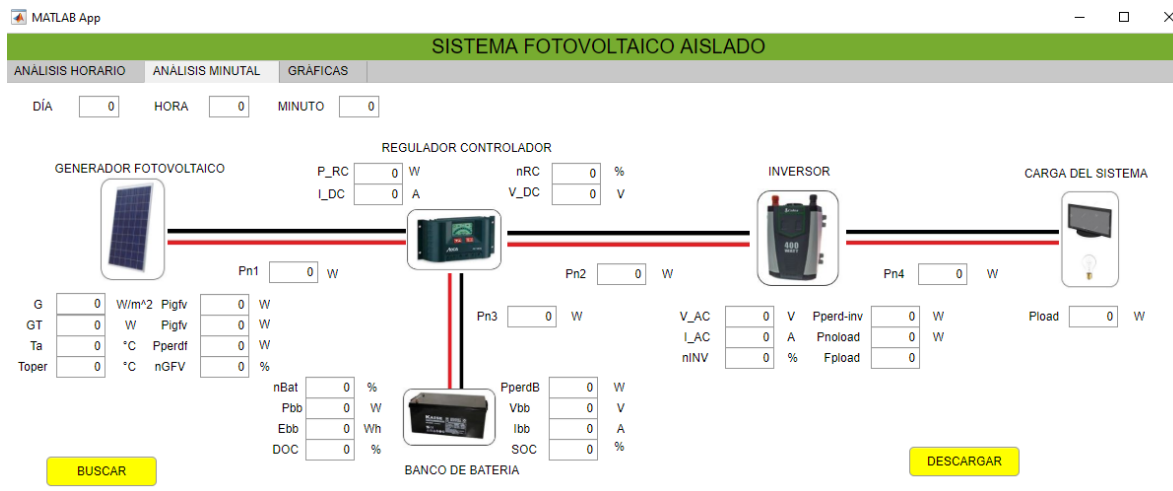


### 4.2.2 Ventana 2: Análisis minutal

La Fig. 61 muestra el diseño de la GUI de la ventana nombrada “ANÁLISIS MINUTAL”. Esta ventana, ejecuta las mismas funciones de la Ventana 1, pero realiza el análisis para el tiempo en minutos. Es decir, el usuario debe ingresar en las casillas de nombre “DÍA”, “HORA” y “MINUTO” los datos del instante que desee visualizar.

**Figura 61.**

#### Análisis minutal del SFV



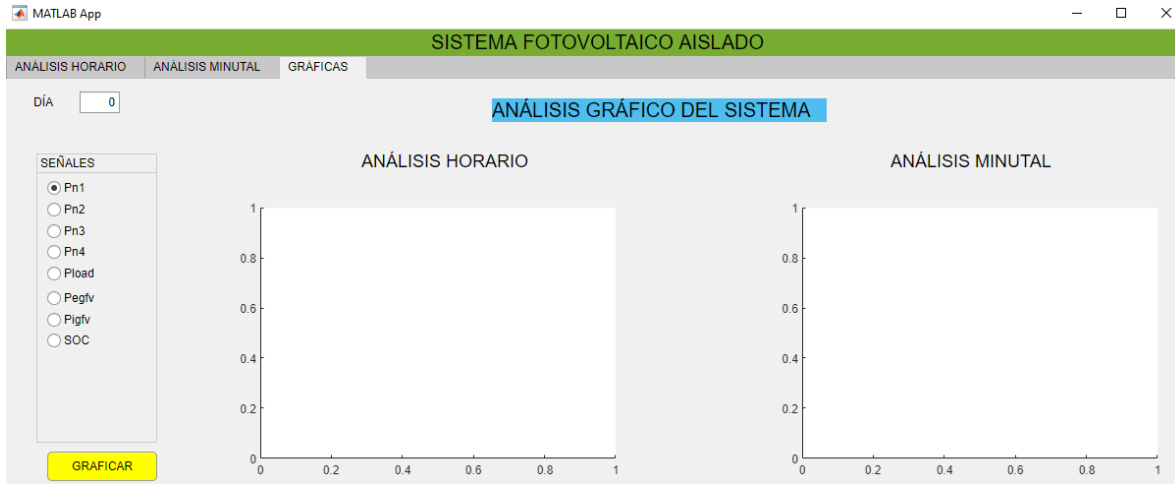
### 4.2.3 Ventana 3: Gráficos

La Fig. 62, muestra el diseño de la GUI de la ventana nombrada “GRÁFICAS”. En esta ventana, el usuario se encuentra con un menú denominado “SEÑALES”, en donde hay un conjunto de opciones tales como: P<sub>n1</sub>, P<sub>n2</sub>, P<sub>n3</sub>, P<sub>n4</sub>, P<sub>load</sub>, P<sub>egFV</sub>, P<sub>igFV</sub> y el SOC. El usuario puede elegir una de estas opciones dando un *click* sobre algún tipo de señal Y Posteriormente da *click* en

el botón “GRAFICAR”. Además, esta ventana permite hacer el ingreso del día que se desea analizar y, en el interfaz se muestran las gráficas horaria y minutal de dos días de operación.

### Figura 62.

#### Gráficas del SFV











### 4.3 Componentes del interfaz gráfico

*App designer* ofrece una librería con un amplio número de componentes como botones, casillas editables y de verificación, listas desplegables, entre otros. La librería de componentes, permite arrastrar y colocar los elementos en la zona de diseño para crear una aplicación más personalizada y de fácil uso (MathWorks, 2020). La Tabla 14 muestra las funciones y componentes empleados para el diseño y desarrollo de la interfaz gráfica para este trabajo de grado.

Tabla 14.

*Componentes empleados en el interfaz gráfico.*

Librería de componentes empleados en el interfaz gráfico		
Componente	Nombre	Función
 <b>Label</b>	Generador fotovoltaico, regulador controlador, banco de baterías, inversor, Carga del sistema, día, hora, minutos, W, V, A, °C, W/m <sup>2</sup> , %.	Permite dar nombre a diferentes elementos del interfaz gráfico como, análisis gráfico del sistema, análisis horario, análisis minutal, entre otros.
 <b>Image</b>	Panel FV, Regulador controlador, Batería, inversor, carga del sistema.	Permite exportar imágenes, para mejorar la visualización de la interfaz
 <b>Edit field (Numeric)</b>	Día, hora, minuto,	Permite cargar valores numéricos, como el número de días, hora o minutos.
 <b>Edit field (Numeric)</b>	G, GT, Ta, Toper, Pigfv, Pperd1, nGFV, P_RC, I_DC, nRC, V_DC, SOC, Pbb, Ebb, DOC, Vbb, Ibb, nBat, V_AC, I_AC, nINV, Pnload, Pload, Pn1, Pn2, Pn3, Pn4.	Permite visualizar el resultado de los valores de los parámetros del SFV como la irradiancia, temperatura, potencias, tensiones y corrientes, entre otros.
 <b>Slider</b>	Hora	El control deslizante, permite seleccionar un valor de 1 a 24, que hace referencia a las horas del día
 <b>Button</b>	CALCULAR, GRAFICAR, DESCARGAR	Este botón se ejecuta cuando se presiona y suelta, modificando los valores
 <b>Group</b>	Pn1, Pn2, Pn3, Pn4, Pload, Pegfv, Pigfv, SOC.	Permite crear un conjunto de opciones dentro de un grupo de

Librería de componentes empleados en el interfaz gráfico		
Componente	Nombre	Función
<b>Radio Button Group</b>		botones. El usuario puede elegir una opción del conjunto
	Pn1, Pn2, Pn3, Pn4, Pload, Pegfv, Pigfv, SOC.	Permite graficar los valores de las matrices de las potencias en los nodos, en el panel FV y el SOC de la batería
<b>Axes</b>		

Cada uno de los componentes de la Tabla 14 fueron definidos. Es decir, programados y cargados mediante la vista *Code View*, que es el editor que ofrece *App Designer*, para definir el comportamiento de la aplicación, mediante la ejecución de un código fuente. En el Apéndice U se describen las ecuaciones que se implementaron en el código fuente que detalla el funcionamiento de la interfaz gráfica y, en el Apéndice V se encuentra el código fuente.

#### 4.4 Resultados de la herramienta computacional

Para corroborar el funcionamiento del aplicativo, se realiza una prueba de la aplicación, en donde se considera un caso específico que verifica los resultados de la herramienta computacional. El ejemplo de validación comprende las características del SFV de la configuración 1, nombrada en el capítulo 1. El dimensionamiento del sistema está conformado por 6 paneles, con la siguiente configuración: 3 en serie, 2 en paralelo y, por último, 3 baterías en serie.

#### 4.4.1 Análisis horario

Para el análisis horario, el usuario ingresa el día que desea analizar, en este caso, se escoge el día 12, la hora 13 y se aplica el botón “buscar” arrojando los valores que muestra la Fig. 63. La potencia generada por el panel FV, considerando el efecto térmico es de 1544 W, como la carga demandada en este instante corresponde a un valor de 410.4 W, se generan unas pérdidas por no operación del panel FV en el punto de máxima potencia de 1079 W. Obligando al panel FV a entregar una potencia de 465.3 W al RC, como indica Pn1, es decir, el panel FV atiende únicamente la carga y la batería se encuentra cargada, con un SOC de 0.9902 %, por esto, el RC no le suministra potencia a la batería como se observa en Pn3 es de 0 W. La potencia requerida por el inversor es de 456 W, como indica Pn2 para suplir la carga de 410.4 W.

**Figura 63.**

*Ejemplo análisis horario del interfaz*



#### 4.4.2 Análisis minutil

Para el análisis minutil el usuario ingresa el día que desea analizar, en este caso, se escoge el día 17, la hora 20 y el minuto 35 y se da *click* en el botón “buscar”, para obtener los resultados que se muestran la Fig. 64. La potencia generada por el panel FV, considerando el efecto térmico es de 0.6114 W, la cual es un valor muy reducido debido a que la irradiancia solar incidente es de tan solo 0.2667 W/m<sup>2</sup>, de manera que, al ser tan baja la potencia generada por el panel FV no se generan pérdidas por MPPT.

La potencia demandada por la carga es de 404.7 W. Por ende, se hace necesario suplir esta carga con la energía almacenada en el banco de baterías. Esto se evidencia con la potencia Pn3 de -449.7 W, en donde el valor negativo indica que está saliendo potencia del banco de baterías y por ello, el SOC se reduce a un valor de 0.866 %, lo que lleva a que se descargue la batería. La potencia suministrada al inversor es de 449.7 W y la potencia entregada a la carga finalmente es la requerida.

**Figura 64.**

*Ejemplo análisis minutil del interfaz.*



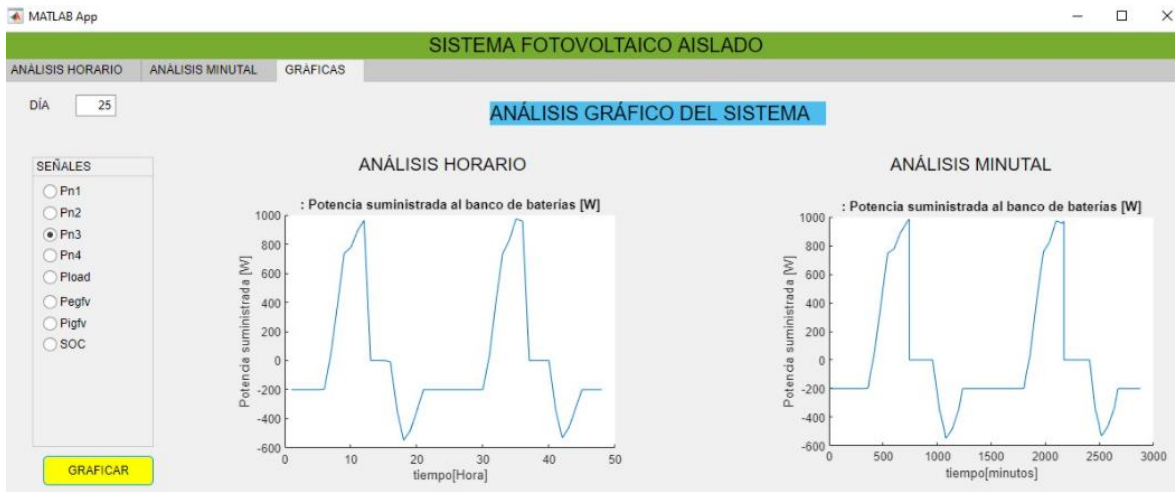
#### *4.4.3 Análisis gráfico*

Para el análisis gráfico se selecciona el día 25 y la señal Pn3 y SOC. La señal Pn3, permite visualizar los datos de la potencia suministrada a la batería, como muestra la Fig. 65. En donde se muestra que el día 25 en la franja horaria de 1 a.m. a 7 a.m. la batería se descarga, en contraste en la franja horaria de 7 a.m. a 1 p.m. la batería se carga hasta llegar a su carga máxima, En la franja horaria de 1 p.m. a 4 p.m. la batería se mantiene en su estado de carga, pero en la franja horaria de 4 p.m. a 6 a.m. del siguiente día, la batería se descarga debido a que el panel FV no suministra la potencia requerida por la carga. Por último, el banco de baterías se carga aproximadamente hasta la 1pm debido a la potencia generada por el panel FV. Las demás franjas horarias se comportan de igual forma que el día anterior.

Respecto al análisis minotal, se observa el mismo comportamiento de la gráfica horaria, pero presenta un comportamiento más detallado respecto a la variación de la potencia suministrada al banco de baterías respecto al tiempo. Generando un mejor análisis del comportamiento del sistema.

**Figura 65.**

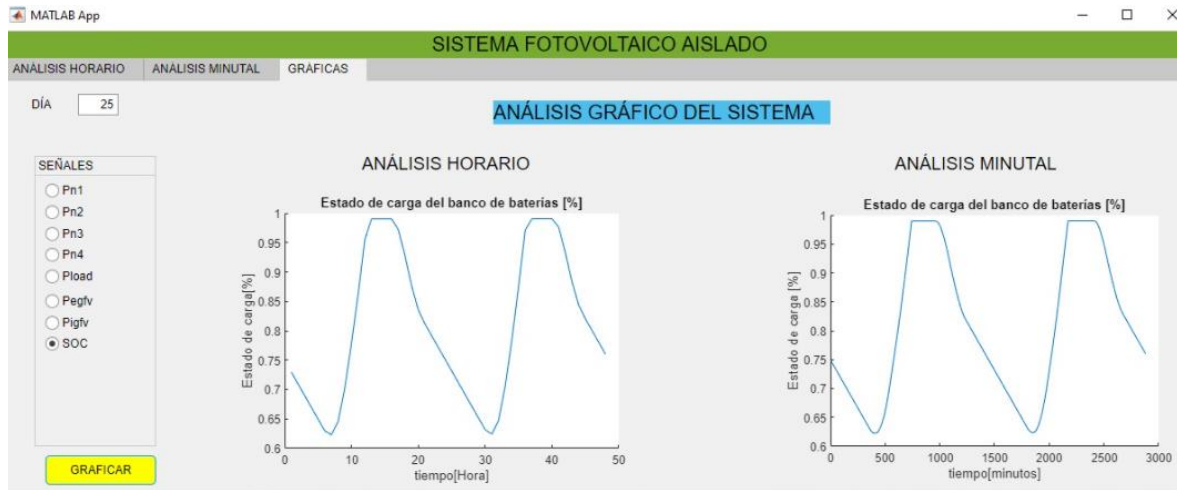
*Ejemplo análisis Horario y minutal de Pn3*



Por otro lado, al seleccionar la señal tipo SOC, como muestra la Fig. 66 el SOC descende en los intervalos de tiempo de 1 a.m. a 9 a.m., de 7p.m. a 6 a.m. del día siguiente y, por último, de 5 p.m. a 12 p.m., esto ocurre cuando la batería se encuentra entregando energía para suplir la potencia demanda por la carga, debido a que el panel FV no puede suplir toda la potencia. En los intervalos de tiempo donde el SOC se mantiene en un valor constante cercano a 1, indica que la batería se encuentra cargada al 100 %. Por último, los intervalos de tiempo donde el SOC asciende denotan que la potencia suministrada al banco de baterías se da gracias a que la generación del panel FV es mayor a la demandada por la carga.

**Figura 66.**

*Ejemplo análisis Horario y minutal del SOC*



Las demás graficas de las señales del día 25 y 26 que describen el funcionamiento del sistema, se encuentran en el Apéndice W.

#### 4.5 Exportación de datos

De forma general la interfaz carga, filtra, imprime y por último representa los datos mediante gráficas para su respectivo análisis (Rojas Muñoz, 2017). Una función implementada en la interfaz es el botón “DESCARGAR”, el cual permite imprimir las matrices de datos del sistema tanto minútales como horarios, lo que facilita una visualización más detallada de los valores de los parámetros, que son guardados y almacenados en archivos con formato *.xls* (archivo de Excel), como muestra la Fig. 67.

Figura 67.

*Matriz de datos horarios exportada app Designer.*

Tiempo	G	Tamb	Pload	FP	GT	Topep	Pigfv	Pegfv	Pperdb	nGFV	Pbb	Ebb	Debb	Vbat
1	0	22	18	0,85	0	22	0	0	0	0	-200	8997	-3	12,999
2	0	22	18	0,86	0	22	0	0	0	0	-200	8994	-3	12,999
3	0	22	18	0,87	0	22	0	0	0	0	-200	8991	-3	12,998
4	0	22	18	0,88	0	22	0	0	0	0	-200	8988	-3	12,997
5	0	22	18	0,89	0	22	0	0	0	0	-200	8985	-3	12,997
6	0	22	18	0,9	0	22	0	0	0	0	-200	8982	-3	12,996
7	50,5	24	18	0,91	588,529	25,578	115,352	115,098	0,253	0,085	0	8982	0	12,996
8	229	26	18	0,92	2668,775	33,156	523,080	506,868	16,212	0,085	0	8982	0	12,996
9	456,8	28	122,4	0,93	5323,565	42,275	1043,419	974,924	68,495	0,576	0	8982	0	12,996
10	642,2	29	273,6	0,94	7484,224	49,069	1466,908	1332,743	134,165	0,847	0	8982	0	12,996
11	782	31	327,6	0,95	9113,459	55,438	1786,238	1579,637	206,601	0,847	0	8982	0	12,996
12	818,7	31	334,8	0,96	9541,163	56,584	1870,068	1645,621	224,447	0,847	0	8982	0	12,996
13	841,2	31	259,2	0,97	9803,378	57,288	1921,462	1685,713	235,749	0,847	0	8982	0	12,996
14	741,9	30	147,6	0,98	8646,132	53,184	1694,642	1513,145	181,497	0,695	0	8982	0	12,996
15	581,8	29	252	0,99	6780,320	47,181	1328,943	1216,928	112,015	0,847	0	8982	0	12,996
16	388,2	27	342	1	4524,098	39,131	886,723	839,107	47,616	0,847	0	8982	0	12,996
17	192,1	26	360	0,99	2238,741	32,003	438,793	427,116	11,677	0,847	0	8982	0	12,996
18	35,8	25	352,8	0,98	417,215	26,119	81,774	81,426	0,348	0,847	-312,202	8977,317	-4,683	12,995
19	0,6	24	306	0,97	6,992	24,019	1,371	1,376	-0,005	0,000	-339,976	8972,217	-5,100	12,994
20	0,1	24	219,6	0,96	1,165	24,003	0,228	0,229	-0,001	0,000	-243,999	8968,557	-3,660	12,993

#### 4.5.1 Filtro de matriz horaria

Al momento de descargar los datos de la matriz horaria que se obtienen de *App Designer*, se puede realizar un filtro de datos para que el usuario pueda comprenderlos de una forma adecuada, como muestra la Fig. 68. La fila 1 presenta los nombres de los respectivos datos de salida y, la columna A presenta los intervalos de tiempo en horas desde el día 1 hasta el 30, generando un total de 720 intervalos de tiempo. Para un mejor filtrado de datos horarios se utiliza la Ec. (4.1).

$$Tiempo = (Dia - 1) * 24 + Hora \quad (4.1)$$

Donde:

*Día*: número del día del mes.

*Hora*: Numero de la hora

Luego de obtener el resultado, se procede a buscar el valor en la columna A.

Un ejemplo aplicado para comprender la filtración de datos se basa en encontrar los resultados del día 12 a la hora 13, como muestra la Ec. (4.2).

$$Tiempo = (12 - 1) * 24 + 13 \quad (4.2)$$

$$Tiempo = 277$$

El resultado obtenido es 277 el cuál se ingresa en el buscador de Excel que contiene la matriz general, y arroja los valores del intervalo requerido.

### Figura 68.

*Filtro de datos horarios de la matriz*

Tiempo	G	Tamb	Pload	FP	GT	Topep	Pigfv	Pegfv	Pperdb	nGFV	Pbb	Ebb	Debb	Vbat
277	762,4	31	410,4	0,82	8885,04	54,83	1741,47	1544,10	197,37	0,85	0	8916,14	0	12,98

#### 4.5.2 Filtro de matriz minutal.

Para el caso de filtro de datos de salida minutal, como muestra la Fig. 69 se requiere un análisis más detallado, debido a que el número de datos a analizar es más extenso, esta matriz se expande de los datos horarios obtenidos anteriormente. La matriz de salida presenta en la fila 1 el nombre de las variables de salida del sistema, en la columna A los intervalos de tiempo en minutos de los 30 días del mes, generando un total de 43200 datos. Para un mejor filtro en los datos minútales se utiliza la Ec. (4.3).

$$Tiempo = (Dia - 1) * 1440 + (Hora - 1) * 60 + Minuto \quad (4.3)$$

Dónde:

*Día*: número del día a filtrar.

*Hora*: número de la hora a filtrar.

*Minuto*: minuto analizar a filtrar.

Luego de obtener el resultado de la ecuación se procede a buscar en la columna A de la matriz el valor correspondiente a este intervalo de tiempo.

Un ejemplo para mejor comprensión de la filtración de datos minútales, es buscar los resultados del día 17 a la hora 20, del minuto 35 como muestra la Ec. (4,4).

$$Tiempo = (17 - 1) * 1440 + (20 - 1) * 60 + 35 \quad (4,4)$$

$$Tiempo = 24215$$

El resultado obtenido es 24215 el cuál se ingresa en el buscador de Excel que contiene la matriz general y, permite obtener los valores del intervalo requerido.

### Figura 69.

*Filtro de datos minútales de la matriz.*

Tiempo	G	Tamb	Pload	FP	GT	Toper	Pigfv	Pegfv	Pperdb	nGFV	Pbb	Ebb	Debb	Vbat
24215	0,267	24	404,7	0,846	3,108	24,008	0,609	0,611	-0,002	4,08E-07	-449,662	7799,271	-6,745	12,733

## 5. Conclusiones

La simulación de los componentes del SFV aislado pertenecientes al módulo de entrenamiento de la configuración 1 del laboratorio AT205, se realizó mediante el software Matlab/Simulink. Esta herramienta, permitió crear un entorno de simulación basado en los modelos circuitales como la topología del inversor y el convertidor. Algunos elementos como el

panel FV y la batería, se establecieron mediante bloques prediseñados que ofrece el programa. Se logró la verificación y validación de la simulación, obteniendo una estabilidad optima del sistema.

El algoritmo MPPT seleccionado es el de perturbar y observar (P&O), para implementar este algoritmo se caracterizó con un convertidor DC/DC Buck, que presenta un ciclo de trabajo de 0.5, este algoritmo responde de manera adecuada ante el cambio de las variables de entrada de temperatura e irradiancia solar. Adicionalmente, se incluyó un segundo algoritmo P&O que implementa un controlador PI, con el propósito de sacar al panel del punto de máxima potencia, generando un nuevo ciclo de trabajo, para suplir la demanda del sistema.

El desarrollo de la herramienta computacional se realizó mediante el software App Designer de Matlab versión 2020a, que permite visualizar e interactuar con el flujo de potencias y diversos parámetros del SFV aislado y, dentro de su funcionamiento se destaca la capacidad de almacenar, graficar e imprimir datos para su análisis, convirtiéndose en una herramienta de fácil uso y amigable con el usuario.

Se implementó un convertidor DC/DC bidireccional, que permitió el flujo de energía en la batería en dos direcciones y, una serie de controles que caracterizaron la operación del sistema ante 5 escenarios de operación. Los controles, se activan para mantener la carga por tensión y corriente constante en la batería, cuando el sistema así lo requiera, sin embargo, presenta una limitación ya que los controles trabajan de manera independiente, pues la implementación de un algoritmo que agrupe la consolidación de estos controles requiere de un estudio más amplio y detallado.

## 6. Recomendaciones

Uno de los inconvenientes que se encontraron en el desarrollo de este trabajo de grado, fue el tiempo de simulación, se hizo necesario hacer uso de los recursos del centro de supercomputación y calculo científico de la Universidad Industrial de Santander, para obtener una simulación máxima de 60 segundos. Ante esto, se hace necesario implementar modelos promediados de los componentes del sistema para realizar una simulación con mayor tiempo y lograr un mejor acoplamiento de los controles.

El panel FV, tiene una naturaleza que se asemeja a una fuente de corriente y proporciona una corriente constante independiente de la tensión. Cuando se inyecta corriente a la entrada del convertidor Buck, esta se interrumpe debido al interruptor que presenta la topología. Cuando se implementa el algoritmo P&O, la corriente que proporciona el panel se está interrumpiendo en cada periodo y, posiblemente el algoritmo no presente su mayor eficiencia, por esto, se recomienda para futuros estudios implementar un convertidor DC/DC tipo Boost, ya que su topología presenta el interruptor en la salida. Así, se puede mejorar la eficiencia del algoritmo.

Por último, la herramienta computacional se le pueden incorporar características operacionales a futuro para mejorar su código y visualización de la interfaz.

### Referencias Bibliográficas

- Accuenergy. (n.d.). *EV/DV300 Series Three Phase Multifunction Power and Energy Meters*. <https://doi.org/1.888.610.7664>
- AcuEnergy. (2018). *AcuDC 240 Series DC Power and Energy Meters*. <https://www.accuenergy.com/files/acudc/AcuDC-240-DC-Power-Energy-Meter-Brochure.pdf>
- Aparicio Gutiérrez, L. C., & Pérez Ospino, L. C. (2017). *Implementación y validación de algoritmos de carga en baterías de NiCd y ion-Litio utilizando la herramienta de simulación Simulink de Matlab* [Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Colombia]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Astudillo Calderón, W. V., & Lema Galarza, O. Ma. (2017). *Simulación de un sistema fotovoltaico residencial con regulación de potencia inyectada a la red* [Trabajo de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14331/1/UPS-CT007039.pdf>
- Betancur Castro, Y. K., & Pérez Ruiz, Y. A. (2016). *Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación Simulink de Matlab* [Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Colombia]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bolaños Navarrete, M. A. (2015). *Técnicas de optimización en paneles solares : seguimiento del punto de máxima potencia*. [Proyecto de Grado]. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Caro Silva, J. X., & Moreno Pinzon, A. M. (2018). *Diseño y evaluación por simulación de estrategias directas de gestión de la demanda para adaptar el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos aislados a un presunto predefinido* [Trabajo de Grado, Universidad

- industrial de Santander, Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, Colombia]. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712107005>
- Castellanos Martínez, C. E., & Quiñones González, G. A. (2013). *Integración De Sistemas Fotovoltaicos a La Red: Técnicas De Control Para El Seguimiento Del Punto De Máxima Potencia. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista* (Vol. 11) [Trabajo de Grado, Universidad industrial de Santander, facultad de ingenierías fisicomecánicas]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/148376.pdf>
- Cobra. (n.d.). *400 watt power inverter CPI 480*. Retrieved September 12, 2020, from <https://images.carid.com/cobra/power-inverters/pdf/cpi490-users-manual.pdf>
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. *Diario Oficial*, 104.
- Cossoli, P., Caceres, M., Vera, L., Firman, A., & Busso, A. (2018). Proportional-Resonant Controller and LCL Filter Design for Single-Phase Grid-Connected PV Micro-Inverters. *Proceedings of the 2018 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D-LA 2018*, 0–4. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2018.8511669>
- Díaz corcobado, T., & Carmona Rubio, G. (n.d.). Instalaciones solares fotovoltaicas. In *Instalaciones solares fotovoltaicas* (p. 14). Mc Graw Hill.
- EnerSys. (2018). *Battery Range Summary*. <https://www.osibatteries.com/images/document/genesis-np-range-summary.pdf>
- Hart, D. W. (2001). *Electrónica de Potencia*. Pearson Education, S.A.
- JAsolar. (n.d.). *385W PERC Module JAM72s01 365-385/PR*. Retrieved September 12, 2020, from <https://www.jasolar.com.cn/uploadfile/2018/0930/20180930024825527.pdf>
- Jayaraman, M., & Sreedevi, V. T. (2017). Implementation of LC and LCL passive filters for harmonic reduction in PV based renewable energy systems. *2017 National Power Electronics Conference, NPEC 2017, 2018-Janua*. <https://doi.org/10.1109/NPEC.2017.8310486>

- Koschmieder Lagos, M. C. (2015). *Diseño básico de generación para un sistema de potabilización en ZNI* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, DEpartamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Colombia]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17430/u713585.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Malo Rojas, J. E. (2015). *Simulación en tiempo real de un sistema de almacenamiento de energía a base de baterías*. [Trabjao de Grado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Colombia]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17695/u714101.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MathWorks. (2020). *App Designer Cree apps web y de escritorio en MATLAB*. <https://la.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>
- Ortiz Valencia, P. A. (2017). *Metodologías de diseño conjunto de controladores y algoritmos MPPT para sistemas fotovoltaicos*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Faculta de Ingeniería y Arquitectura, Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/65003/1/43613885.2017.pdf>
- Prieto Prieto, L. A. (2012). *Diseño y construcción de un sistema de medición para adquisiscion de datos del arreglo fotovoltaico del edificio mario laserna* [Trabajo de Grado, Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rojas Muñoz, A. (2017). *Interfaz gráfica para el analisis del funcionamiento de paneles solares fotovoltaicos en concentración* [Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial]. <http://oa.upm.es/36382/>
- Ruiz, L. ., Beristáin, J. J., Sosa, I. ., & Hernandez, J. L. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (RIEE&C)*, 8(1), 7. [https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf\\_estudio\\_del\\_algoritmo\\_de\\_seguimiento\\_de\\_punto\\_de\\_maxima\\_potencia\\_perturbar\\_y\\_observar.pdf](https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_seguimiento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf)
- SEC Energy Storage. (n.d.). *The CELLYTE TSG Series 6/12 Volt flat plate solar monoblocs*. Retrieved September 10, 2020, from <http://secbattery.com/product/cellyte-tla-2/>

- SERIE OLMO CONTROLADOR DE CARGA MPPT ICM 10/20/30 24.* (2019). <http://intipv.com/es/wp-content/uploads/2019/02/Ficha-Técnica-Olmo.pdf>
- SOCOMEK. (n.d.). *DIRIS A the multi- function measurement range for managing your electrical networks.* Retrieved September 13, 2020, from <https://docs.rs-online.com/c8e1/0900766b80ed4978.pdf>
- Steca Elektronik. (2018). *Steca PR 1010, 1515, 2020, 3030.* [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ZF8yeWI1OAgJ:https://www.steca.com/frontend/standard/popup\\_download.php%3Fdatei%3Dproductdatasheet/Steca-PR-es.pdf%26tfn%3DSteca%2BPR%2Bproductdatasheet%2BES+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ZF8yeWI1OAgJ:https://www.steca.com/frontend/standard/popup_download.php%3Fdatei%3Dproductdatasheet/Steca-PR-es.pdf%26tfn%3DSteca%2BPR%2Bproductdatasheet%2BES+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co)
- Subirón Micolau, E. (2016). *Desarrollo de una aplicación en Matlab para la evaluación de algoritmos MPPT y GMPPT* [Trabajo de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de ingeniería Electronica, Barcelona]. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87736/Dessarollo\\_de\\_una\\_aplicación\\_en\\_Matlab\\_para\\_la\\_evaluación\\_de\\_algoritmos\\_MPPT\\_y\\_GMPPT\\_ENRIC\\_MICOL.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87736/Dessarollo_de_una_aplicación_en_Matlab_para_la_evaluación_de_algoritmos_MPPT_y_GMPPT_ENRIC_MICOL.pdf)
- West Mountain Radio. (2012). *PWRchek.* <https://www.master-instruments.com.au/file/63386/1/West Mountain Radio-PWRcheck.pdf>
- Xantrex. (n.d.). *Inversores de onda sinusoidal PROwatt SW.* Retrieved September 12, 2020, from [http://www.xantrex.com/documents/Power-Inverters/PROwatt-SW/DS20141008\\_Prowatt\\_SW\\_600\\_1000\\_2000.pdf](http://www.xantrex.com/documents/Power-Inverters/PROwatt-SW/DS20141008_Prowatt_SW_600_1000_2000.pdf)
- Zhang, N., Tang, H., & Yao, C. (2014). A Systematic Method for Designing a PR Controller and Active Damping of the LCL Filter for Single-Phase Grid-Connected PV Inverters. *Energies*, 3934–3954. <https://doi.org/10.3390/en7063934>