

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL BASADO EN ALGEBRA LINEAL APLICADO EN LOS CONVERTORES USADOS EN EL MANEJO DE ENERGÍA DE UN SISTEMA HIBRIDO DE POTENCIA COMPUESTO POR UN ARREGLO DE PANELES FOTOVOLTAICOS Y BATERIAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**BRYAN GABRIEL BASANTES PROAÑO**

**DIRECTOR: PAÚL MARCELO POZO PALMA**

**Quito, octubre 2022**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Bryan Gabriel Basantes Proaño, bajo mi supervisión.

**PAÚL MARCELO POZO PALMA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Bryan Gabriel Basantes Proaño, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.



BRYAN GABRIEL BASANTES PROAÑO

## **DEDICATORIA**

A mis padres, hermanos, sobrinos, profesores, amigos y a toda aquella persona que han hecho este trabajo posible.

También al lector, espero que el presente trabajo le sea de ayuda para futuros proyectos.

# AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a mis padres Hugo y Sabina, su apoyo y cariño me han impulsado y motivado a conseguir mis metas, han sido el pilar fundamental de mi formación y el motor principal que me ha impulsado para salir adelante.

Al Dr. Ingeniero Marcelo Pozo, director del presente trabajo de titulación y a otros profesores que me han formado como profesional y me han dado las pautas y guías para conllevar con éxito el presente trabajo.

Agradezco a mi familia; que siempre han estado ahí para brindarme unas palabras de aliento y sobre todo a mis hermanas Myrian y Liliana, mis sobrinos Justin, David, Ismael, Diego, Nicolás y a mi primo David que me han apoyado en los buenos y malos momentos.

A mis amigos Evelyn, Danilo y David, magníficos amigos que siempre me extendieron su mano a pesar de las circunstancias y con los que he vivido grandes momentos y con los que espero seguir viviéndolos.

A Arianna, mi mejor amiga que me ha ayudado a ser la persona que soy hoy en día y que me ha brindado su amistad y confianza en los momentos más complicados de mi vida.

A Leslie, una persona muy especial para mí que me ha ayudado de sobremanera durante los últimos años dándome su apoyo y cariño, lo que me ha motivado a luchar para lograr mis metas.

Finalmente, a toda aquella persona que ha compartido conmigo unas palabras, una comida, un consejo o un momento de su vida y que me han brindado de una u otra manera una mano de ayuda cuando lo necesitaba.

**Bryan**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 ALCANCE .....	2
1.3 MARCO TEÓRICO.....	4
1.3.1 ANTECEDENTES.....	4
1.3.2 ENERGÍA SOLAR.....	4
1.3.2.1 Celdas Solares .....	5
1.3.2.2 Tipos de celdas solares .....	5
1.3.2.3 Paneles solares .....	6
1.3.2.4 Sistemas Fotovoltaicos.....	7
1.3.2.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos .....	8
1.3.3 BATERÍAS .....	8
1.3.3.1 Tipos de baterías usados en sistemas fotovoltaicos .....	9
1.3.4 CONVERTORES ESTÁTICOS DE POTENCIA .....	10
1.3.4.1 Convertidores DC-DC.....	11
1.3.5 MODELAMIENTO MATEMÁTICO .....	14
1.3.5.1 Modelamiento de paneles fotovoltaicos.....	14
1.3.5.2 Algoritmos de control en paneles fotovoltaicos.....	16
1.3.5.3 Modelamiento de baterías .....	19
1.3.5.4 Técnicas de carga de baterías .....	21
1.3.6 SISTEMAS DE CONTROL .....	24
1.3.6.1 Sistemas de tiempo continuo.....	24
1.3.6.2 Sistemas de tiempo discreto.....	24
1.3.7 CONTROL DE CONVERTORES ESTÁTICOS .....	25

1.3.7.1	Controladores usados en convertidores de potencia.....	26
1.3.7.2	Controlador basado en álgebra lineal (LABC) .....	28
1.3.8	PLECS® .....	30
1.3.9	INTERFAZ GRÁFICA (GUI).....	32
2	METODOLOGÍA .....	35
2.1	CONSIDERACIONES INICIALES .....	35
2.2	DISEÑO DEL SISTEMA.....	36
2.2.1	ESQUEMA GENERAL.....	36
2.2.2	DISEÑO DEL SISTEMA .....	39
2.2.2.1	Paneles fotovoltaicos.....	39
2.2.2.2	Baterías .....	41
2.2.2.3	Convertidores DC-DC.....	45
2.3	DISEÑO DE CONTROLADORES BASADO EN ÁLGEBRA LINEAL (LABC).....	53
2.3.1	MODELAMIENTO DE CONVERTIDORES DC-DC.....	53
2.3.2	DISEÑO DE CONTROLADORES LABC .....	58
2.4	CONTROL DE FLUJO DE ENERGÍA .....	64
2.5	DISEÑO DE INTERFAZ GRÁFICA .....	67
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	71
3.1	SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES LABC .....	71
3.1.1	TIEMPO DE MUESTREO.....	71
3.1.2	CONTROL DE CORRIENTE .....	73
3.1.3	CONTROL DE VOLTAJE .....	75
3.1.4	RESÚMEN DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS.....	77
3.2	COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO ENTRE EL CONTROLADOR LABC Y EL CONTROL EN CASCADA .....	78
3.2.1	CASO IDEAL .....	79
3.2.2	CASO REAL .....	82
3.3	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.....	87
3.3.1	POTENCIA EN LA CARGA .....	88
3.3.2	POTENCIA GENERADA EN LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	89
3.3.3	POTENCIA GENERADA EN LAS BATERÍAS .....	91
3.3.4	VOLTAJE DE ENLACE.....	93
3.3.5	BUS DC .....	96
3.3.6	POTENCIA GENERADA VS POTENCIA CONSUMIDA.....	98
3.4	INTERFAZ GRÁFICA.....	100

4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
4.1.	CONCLUSIONES.....	105
4.2.	RECOMENDACIONES.....	107
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
	ANEXOS.....	114



# RESUMEN

El presente trabajo presenta una simulación de un sistema híbrido de potencia compuesto por paneles fotovoltaicos y baterías, cuyo principal enfoque será el evaluar el control basado en álgebra lineal o LABC sobre circuitos electrónicos de potencia.

Para hacerlo, se propone un arreglo de diferentes topologías de convertidores DC-DC que manejarán varios parámetros del sistema:

- La potencia suministrada por los paneles fotovoltaicos mediante algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracking) y PPT (Power Point Tracking).
- El flujo de potencia sobre las baterías y carga de las mismas mediante la técnica CC (Corriente Constante).
- El flujo de potencia suministrada a la carga.
- Voltaje sobre el bus DC.

En las diferentes secciones del documento se dimensionarán los elementos que componen el sistema, se delimitarán los niveles de potencia que manejará, se diseñarán los controladores de los convertidores y se validarán los resultados bajo diferentes perfiles de carga, irradiancias, temperaturas y perturbaciones en el bus DC.

Para evaluar el desempeño del control LABC, se comparó su funcionamiento con respecto a controladores convencionales PI, de manera que se pudo determinar la viabilidad, ventajas y desventajas del control LABC aplicado en sistemas de potencia.

Finalmente es importante recalcar que la topología del sistema propuesta, así como la técnica de control LABC son apartados novedosos que no han sido investigados a profundidad.

**PALABRAS CLAVE:** LABC, sistema fotovoltaico, sistemas híbridos de potencia, MPPT, PPT, Convertidores DC-DC, control bus DC.

## **ABSTRACT**

This document presents a simulation of a hybrid power system composed of photovoltaic panels and batteries, whose main focus will be to evaluate the linear algebra based control or LABC on power electronic circuits.

To do so, an array of different DC-DC converter topologies is proposed to handle various system parameters:

- The power supplied by the PV panels using MPPT (Maximum Power Point Tracking) and PPT (Power Point Tracking) algorithms.
- The power flow on the batteries and battery charging using the CC (Constant Current) technique.
- Power flow supplied to the load.
- Voltage over the DC bus.

On the following sections, the elements that compose the system will be dimensioned, the power levels that it will handle will be delimited, the converter controllers will be designed, and the results will be validated under different load profiles, irradiances, temperatures, and disturbances in the DC bus.

To evaluate the performance of the LABC control, its operation was compared with conventional PI controllers, to determine the feasibility, advantages, and disadvantages of LABC control applied in power systems.

Finally, it is important to emphasize that the proposed system topology, as well as the LABC control technique, are novel aspects that have not been investigated in depth.

**KEYWORDS:** LABC, photovoltaic system, hybrid power systems, MPPT, PPT, DC-DC converters, DC bus control.

# 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente existen varias alternativas para la generación eléctrica basadas en energías renovables, entre las más populares están los sistemas fotovoltaicos que han ido ganando terreno a lo largo de las últimas décadas gracias a su practicidad y portabilidad. Estos sistemas al depender de la radiación solar deben contar con sistemas de baterías para suplir a la carga en cualquier momento del día. Otro aspecto por considerar es que necesitan de convertidores de potencia tanto para controlar la carga y descarga de baterías, así como el flujo de energía de los paneles, esto hace necesario aplicar algoritmos de control capaces de manejar eficientemente la energía. Al ser un sistema no lineal y al funcionar con diversas clases de perturbaciones y cambios de referencia, es necesario un control robusto. En este aspecto Scaglia et. al han propuesto una técnica llamada control basado en álgebra lineal o de acuerdo con sus siglas en inglés LABC, la cual es basada como su nombre indica en las ecuaciones lineales del sistema y ofrece gracias a sus propiedades un mejor seguimiento de trayectorias que controladores clásicos, este ha sido probado principalmente en vehículos no tripulados y procesos químicos, pero nunca en convertidores estáticos de potencia.

Evaluando estos aspectos, LABC cuenta con características importantes que pueden ser aplicadas en sistemas de conversión de energía el cual sea capaz de manejar las variables involucradas en un sistema fotovoltaico aislado de la red o como se llamará en adelante off-grid.

El presente proyecto consiste en el diseño y simulación de un sistema off-grid que consiste en un arreglo de paneles solares y baterías, en el cual se regulará el flujo de potencia con diferentes topologías de convertidores DC-DC y se utilizará LABC con el fin de evaluar su desempeño en este tipo de sistema y comparar su funcionamiento con respecto a controladores clásicos.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Diseñar y simular controladores basados en álgebra lineal aplicados a los convertidores usados en el manejo de energía de un sistema híbrido de potencia compuesto por un arreglo de paneles fotovoltaicos y baterías.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de las topologías de convertidores usados en un sistema híbrido de potencia off-grid, así como las características de diferentes tipos de controladores usados en circuitos de conversión de energía.
- Diseñar un sistema híbrido de potencia basado en paneles fotovoltaicos y baterías capaz de suplir cargas variables y mantener un voltaje constante en el bus DC.
- Diseñar e implementar controladores basados en álgebra lineal LABC en los convertidores para regular el flujo de potencia en el sistema híbrido de energía y comparar su funcionamiento con respecto a controladores en cascada clásicos.
- Realizar pruebas, analizar y validar el desempeño de los controladores ante perfiles de potencia y en presencia de perturbaciones en el voltaje y la corriente, mediante índices de desempeño ISE e TVU.

## **1.2 ALCANCE**

- Se realizará una revisión bibliográfica de la estructura y funcionamiento de sistemas híbridos de potencia, específicamente los sistemas basados en paneles solares fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de energía en baterías.
- Se realizará una revisión bibliográfica acerca de las topologías de convertidores DC-DC, incluyendo convertidores DC-DC bidireccionales para procesos de carga y descarga de baterías, y convertidores para el manejo de energía solar fotovoltaica.
- Se realizará una revisión bibliográfica acerca de sistemas fotovoltaicos, especialmente acerca de los algoritmos de control PPT (Power Point Tracking) y MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- Se realizará una revisión bibliográfica acerca de las características de diferentes tipos de controladores en cascada utilizados para convertidores estáticos en sistemas híbridos de energía con fuentes solar fotovoltaica y almacenamiento de energía.
- Se realizará una revisión bibliográfica acerca del diseño del controlador basado en álgebra lineal – LABC, así como las aplicaciones en las cuales ha sido implementado, analizando sus ventajas y desventajas.
- Se realizará un análisis y estudio para determinar el tipo de carga, potencia y elementos a dimensionar de un sistema híbrido compuesto por una fuente de energía solar fotovoltaica con un sistema de conversión DC/DC unidireccional y un sistema de

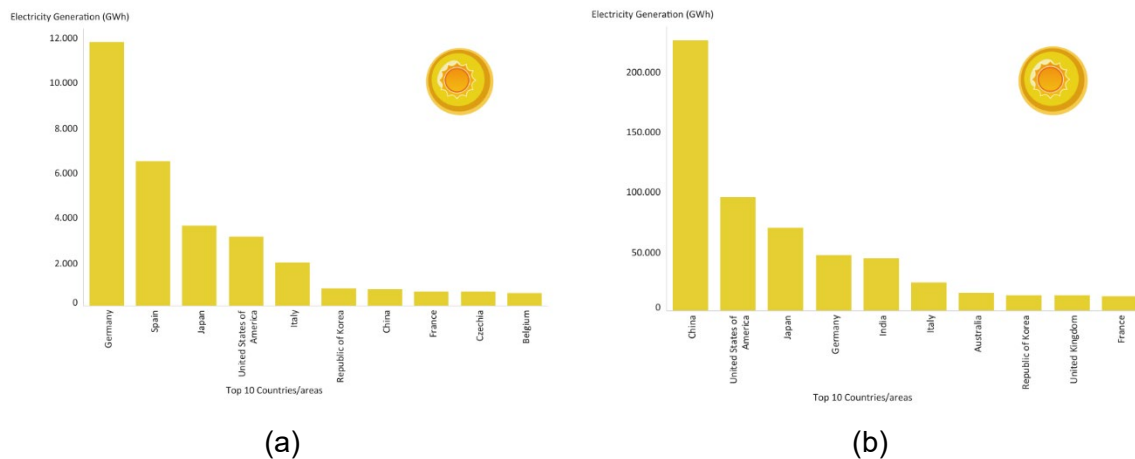
almacenamiento de energía en baterías con un sistema de conversión de energía DC/DC bidireccional.

- Se seleccionará un algoritmo MPPT y PPT para el seguimiento respectivamente del punto de máxima potencia y de la potencia en un punto de operación en los paneles solares fotovoltaicos.
- Se establecerán los parámetros de control, variables, valores en estado estable, perfiles de carga y perturbaciones en la respuesta para considerarlos en el diseño del controlador.
- Se modelarán matemáticamente los convertidores estáticos mediante espacios de estado, con el fin de obtener el sistema de ecuaciones lineales requeridos para el diseño de controladores.
- Se diseñarán e implementarán controladores LABC en los convertidores de acuerdo con los parámetros establecidos en el sistema híbrido de potencia.
- Se diseñarán e implementarán controladores en cascada PI de acuerdo con los parámetros establecidos en el sistema híbrido de potencia.
- Se simulará el modelo dinámico correspondiente al sistema híbrido de potencia usando un software especializado en electrónica de potencia y su control.
- Se simularán los esquemas de control en cascada PI, así como el LABC aplicados a los convertidores del sistema híbrido de potencia.
- Se implementará un interfaz humano máquina con el sistema híbrido de potencia para visualizar los resultados de manera gráfica.
- Se realizarán pruebas, se analizará y validará la operación de los controladores ante cambios de referencia de voltaje y corriente, así como ante perturbaciones.
- Se analizará el desempeño de los controladores en estado estable mediante los índices de desempeño ISE e TVU.
- Se validarán los resultados y de acuerdo con los mismos se obtendrán las ventajas, desventajas y aplicabilidad que tiene el controlador basado en álgebra lineal LABC sobre sistemas de conversión de energía.

## 1.3 MARCO TEÓRICO

### 1.3.1 ANTECEDENTES

Actualmente, el uso de sistemas de generación basadas en paneles solares se ha ido incrementado en varios puntos del mundo. De acuerdo con el reporte de la Agencia Internacional de Energías Renovables [1] países han incrementado a gran escala el uso de sistemas fotovoltaicos; por ejemplo, Estados Unidos ha pasado de generar 3GWh en 2010 a superar los 90GWh en el 2020 como se representa en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** GWh generados en base a sistemas fotovoltaicos en (a) 2010 (b) 2019

En el caso del Ecuador en el año 2013, el Estado firmó contratos para la construcción de proyectos fotovoltaicos capaces de generar hasta 200MW, pero al final del 2014 apenas se instalaron 25MW. Por otro lado, se han apostado por sistemas a pequeña escala off-grid que se instalan en antenas de telecomunicaciones, sistemas de bombeo, instalaciones domiciliarias en zonas remotas y estas siendo las de mayor difusión [2].

Toda esta información da a entender el potencial que tienen los sistemas de generación fotovoltaicos off-grid a pequeña escala y la importancia que tiene el buscar diseños eficientes y capaces de suplir los requerimientos de carga bajo cualquier condición.

### 1.3.2 ENERGÍA SOLAR

El sol es una fuente casi infinita de energía, los rayos solares liberan aproximadamente  $10^7$  Joules de energía por segundo a la Tierra. Contextualmente, el sol puede liberar lo que la humanidad consume en un año en una hora, traduciéndose en  $1.2 \times 10^5$  TW, lo cual supera con creces a cualquier otra fuente de energía renovable o no renovable [3].

Otro aspecto para considerar es la versatilidad con la que cuenta, la radiación solar puede ser transformada en electricidad al excitar electrones en una celda solar, puede sintetizar combustible químico mediante fotosíntesis natural en plantas o en sistemas creados por el hombre, luz solar concentrada produce calor para uso directo o conversión a electricidad.

Actualmente el ser humano aprovecha una parte muy pequeña de la misma, siendo aproximadamente un minúsculo 0.015% de la generación de electricidad a nivel mundial, por otro lado, combustibles fósiles producen entre el 80% y 85%, produciendo gases de invernadero en el proceso y solamente alcanzable en ciertos países, en contraste, la radiación solar no está restringido por fronteras geopolíticas y no afectan negativamente al medio ambiente en el proceso.

### **1.3.2.1 Celdas Solares**

En 1839, Edmond Becquerel descubrió que dos placas diferentes de latón inmersos en un líquido producen una corriente continua cuando eran iluminados con luz solar. En la década de 1870, Willoughby Smith et al descubrieron un efecto fotovoltaico en selenio y después Fitts colocó una placa de selenio en un metal y cubriendo el selenio con una capa de oro transparente, reportó que este arreglo de selenio produce una corriente continua, constante y fuerza considerable al ser expuesta al sol [4].

Con el descubrimiento de la mecánica cuántica en 1954 Chapin et al en Laboratorios Bell descubrieron y mostraron una celda solar con un 6% de eficiencia, lo cual supera por mucho a los intentos anteriores. Así es como el día de hoy su uso se ha extendido a diferentes aplicaciones; alcanzando el 22.7% [5] de eficiencia en celdas comerciales y hasta un 41% para tecnologías basadas en silicio hidrogenado, telurito de cadmio y CIGS.

### **1.3.2.2 Tipos de celdas solares**

Las celdas solares generalmente están construidas de silicio como cristal individual, cristal múltiple o sólidos amorfos.

**Silicio de cristal individual:** Es la más eficiente, ya que el cristal está libre de defectos en la malla que tiende a disminuir la conductividad eléctrica y térmica del material.

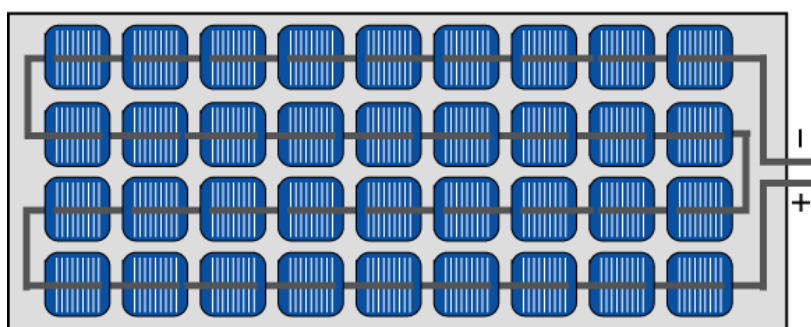
**Silicio de cristal múltiple:** Contiene el efecto en la malla que disminuyen su eficiencia.

**Silicio amorfo:** Es la forma no cristalina del silicio donde los átomos están ubicados en forma aleatoria, lo cual hace que ciertos átomos se enlacen lo que interrumpe el flujo de electrones. De todas es la menos eficiente pero la más barata de producir.

El silicio ha probado ser confiable y duradero, pero el costo de la purificación de este es alto y puede llegar al 50% del costo total de los módulos. Por lo que se están investigando el uso de otros materiales y tecnologías que reduzcan costos y traigan nuevas funcionalidades como el producir módulos flexibles o transparentes.

### 1.3.2.3 Paneles solares

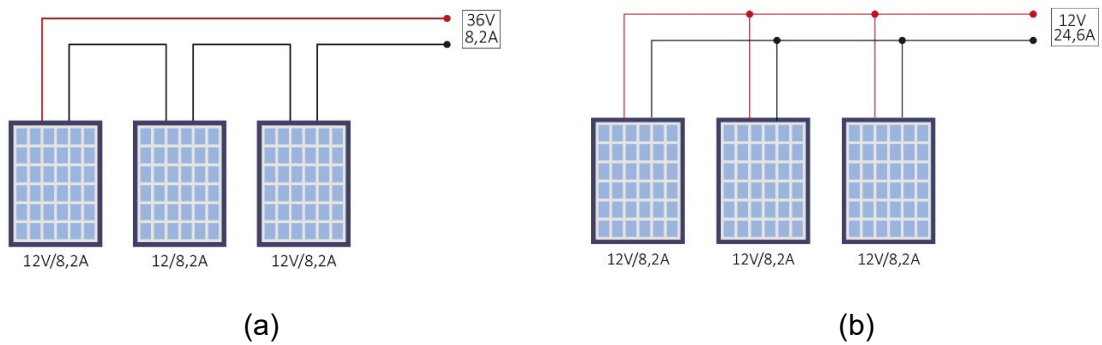
El voltaje generado por una celda es extremadamente bajo por lo que es necesario agrupar varias en un arreglo en serio que permita obtener un voltaje lo suficientemente alto para uso en diferentes aplicaciones como se muestra en la Figura 1.2. A este arreglo de celdas, se lo conoce como panel o módulo solar y es el que se utiliza comercialmente.



**Figura 1.2.** Estructura interna de un panel solar

Los paneles fotovoltaicos o solares tienen un límite de potencia que pueden entregar individualmente, por lo que generalmente se utilizan dos o más de estos para suplir la demanda de la carga. Existen dos formas de conectar los paneles; serie y paralelo. La conexión en serie se puede incrementar el voltaje, pero manteniendo el límite de corriente de los paneles, en cambio la conexión en paralelo se mantiene el mismo voltaje, pero se puede aumentar la corriente del sistema; ambas conexiones se muestran en la Figura 1.3, en cualquier caso se puede aumentar la potencia generada y su uso depende de la aplicación y requerimientos de la carga, por lo que es común la conexión de varios paneles en un arreglo en serie y paralelo.





**Figura 1.3.** Conexión de paneles solares (a) en serie (b) en paralelo.

Para aprovechar completamente los paneles y evitar daños en los mismos es necesario utilizar paneles de similares características.

### 1.3.2.4 Sistemas Fotovoltaicos

Se denominan sistemas fotovoltaicos a aquellos que tienen como fuente uno o más paneles solares. Alrededor de la década de 1970, el principal uso de estos eran energizar campers o botes y eran usados para aplicaciones temporales o para situaciones de emergencia. Hoy en día, son considerados como la mejor manera y la más barata de producir energía eléctrica gracias al incremento de demanda energética.

Actualmente son usados principalmente en:

- Satélites espaciales
- Sistemas autónomos remotos
- Pequeños módulos para dispositivos electrónicos
- Zonas residenciales y comerciales conectados a la red mediante inversores
- Campos de paneles solares para generación de energía eléctrica a pequeña y gran escala

Hoy en día, los sistemas fotovoltaicos generalmente están conformados además de paneles solares, de dispositivos de almacenamiento de energía como baterías con el fin de tener generación eléctrica continua a pesar de la ausencia de radiación solar y de circuitos de conversión de energía que permitan controlar la potencia generada.

### 1.3.2.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos han seguido tres líneas de diseño importantes [6]:

- **Sistemas stand-alone u off-grid** donde la energía es generada y consumida en el mismo lugar y no interactúa con la red principal. Normalmente, la electricidad consumida o utilizada es parte del sistema, por ejemplo, sistemas solares en viviendas, iluminación pública, linternas solares y plantas de energía solar.
- **Sistemas conectados a la red** donde el sistema fotovoltaico es conectado a la red. El sistema puede estar fijo a la red, el cual solamente puede inyectar potencia a la red y dicho sistema no puede suplir durante cortes de energía o emergencias porque estos tienen que ser desconectados completamente de la red y tienen que ser apagados para cumplir con estándares internacionales de seguridad eléctrica. Algunos sistemas de este tipo cuentan con sistemas de almacenamiento de energía que también pueden suplir energía en modo aislado.
- **Sistemas híbridos** donde otros sistemas de generación de energía como eólicos, de biomasa o Diesel están conectados al sistema fotovoltaico para suplir la demanda requerida. En estos, el objetivo general es tener un mayor grado de confiabilidad frente a cualquier escenario.

### 1.3.3 BATERÍAS

Las baterías son dispositivos electromecánicos que convierten la energía química en energía eléctrica y viceversa, en el caso de ser baterías recargables. En sistemas fotovoltaicos, la energía generada y los requerimientos de energía de la carga no son iguales, ya que la necesidad de un sistema de almacenamiento incrementa para limitar los efectos de la variación de la energía producida, debido a las variaciones de la radiación solar o la temperatura. Si en sistemas off-grid se utilizan sistemas de respaldo de baterías, la capacidad debe ser alta para suplir energía sin interrupción durante temporadas invernales. En este aspecto, se debe considerar que la mínima capacidad de almacenamiento para sistemas fotovoltaico es la energía necesaria para suplir la carga durante una noche y la máxima depende de la autonomía requerida [7].

Otros parámetros para considerar en el dimensionamiento de baterías para sistemas fotovoltaicos son:

- Eficiencia energética

- Vida útil
- Mantenimiento y construcción
- Confiabilidad y auto descarga
- Rango de temperatura de operación
- Costo

### 1.3.3.1 Tipos de baterías usados en sistemas fotovoltaicos

Para aplicaciones basadas de sistemas fotovoltaicas se utilizan principalmente baterías de Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio o hidruro de Ni-Metal y iones de Litio [8].

Actualmente, las baterías de Plomo-Ácido son las más utilizadas en este tipo de aplicaciones, específicamente las basadas en gel son usadas para aplicaciones remotas donde se requiera de nulo mantenimiento.

Para aplicaciones portables, las baterías de Níquel-Cadmio o hidruro de Ni-Metal son utilizados, su ciclo de vida depende de los ciclos de carga y descarga, temperatura y otros parámetros.

Finalmente, las baterías basadas en iones de Litio han ido ganando terreno en sistemas fotovoltaicos, gracias a su alta densidad energética y mayor vida útil; por el otro lado, su uso se ve limitado a su alto costo en comparación a otras y la necesidad de utilizar sistemas de regulación de baterías o BMS (Battery Management System) para su máximo aprovechamiento e incrementar la seguridad de uso.

A continuación, se muestra un resumen de las principales características de los tipos de baterías usados en sistemas fotovoltaicos en la Tabla 1.1.

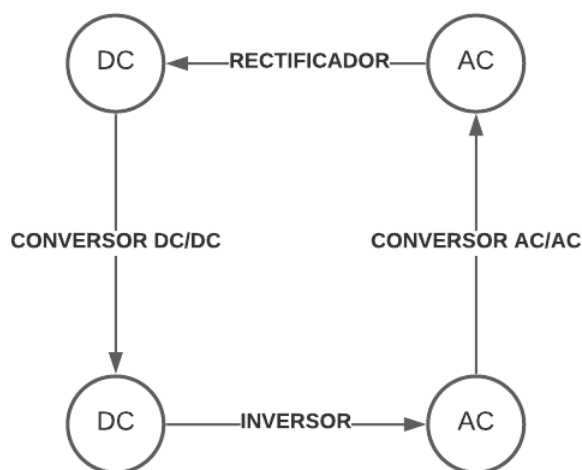
**Tabla 1.1.** Comparación de parámetros de baterías usadas en sistemas fotovoltaicos

Tipo de batería	Voltaje nominal de la celda (V)	Auto descarga (% por mes)	Vida útil (No. De ciclos)	Densidad energética (Wh/Kg)
Plomo-Ácido	2	5	700	30
Níquel-Cadmio	1.2	10	1000-1500	45
Iones de Litio	3.7	3-5	500-1000	90

### 1.3.4 CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTENCIA

Los conversores estáticos de potencia son dispositivos electrónicos basados en semiconductores, enfocados en la transformación de la energía entre un generador y una carga. La conversión de energía generalmente se realiza mediante dispositivos electromecánicos que conllevan varias desventajas como baja eficiencia, espacio, ruido, etc, pero con el avance de la electrónica de la potencia se ha logrado desarrollar interruptores de estado sólido que trabajan a altas frecuencias y con la combinación de elementos reactivos como inductores o capacitores, estos sistemas pueden transferir la energía de manera altamente eficiente [9, 10].

De acuerdo con los parámetros de transformación, los conversores estáticos de energía o simplemente llamados conversores son de varios tipos, tal como consta en la Figura 1.4.



**Figura 1.4.** Conversores estáticos de energía

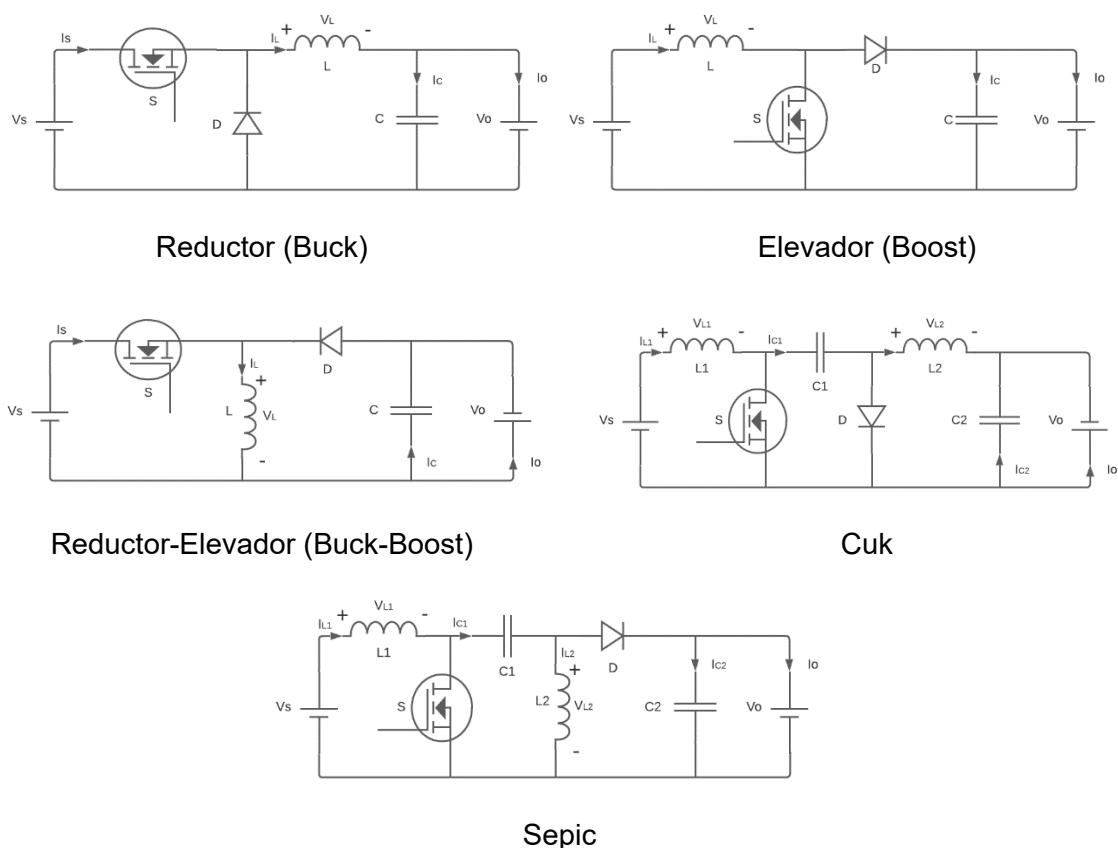
En sistemas fotovoltaicos se usan generalmente inversores y conversores DC/DC, donde son esenciales para la regulación de la energía de los paneles, las baterías y la carga.

En sistemas conectados a la red, los inversores son los encargados de acoplar la energía DC que generan los paneles solares a AC al nivel y frecuencia de la red, en este apartado se ha llegado hasta tecnologías relativamente nuevas como son los micro-inversores en donde se han propuesto un gran número de topologías [11]. Por otro lado, en sistemas aislados el uso de inversores depende de los requerimientos de la carga. Sin embargo, en ambos tipos de sistemas es necesario una etapa de regulación previa al inversor, siendo conversores DC-DC los encargados de controlar la energía generada.

### 1.3.4.1 Conversores DC-DC

Son circuitos de conversión de energía enfocados en la regulación de voltaje, corriente o potencia DC de un nivel a otro, en sistemas fotovoltaicos se conectan directamente a los paneles solares y son encargados de regular la potencia generada por estos, siendo también se usan para regular el voltaje a la entrada de inversores.

Para mantener un voltaje constante a la salida de estos se han investigado varias topologías de conversores DC-DC aplicados en sistemas fotovoltaicos [12] como se muestra en la Figura 1.5, cada una contando con ventajas y desventajas.



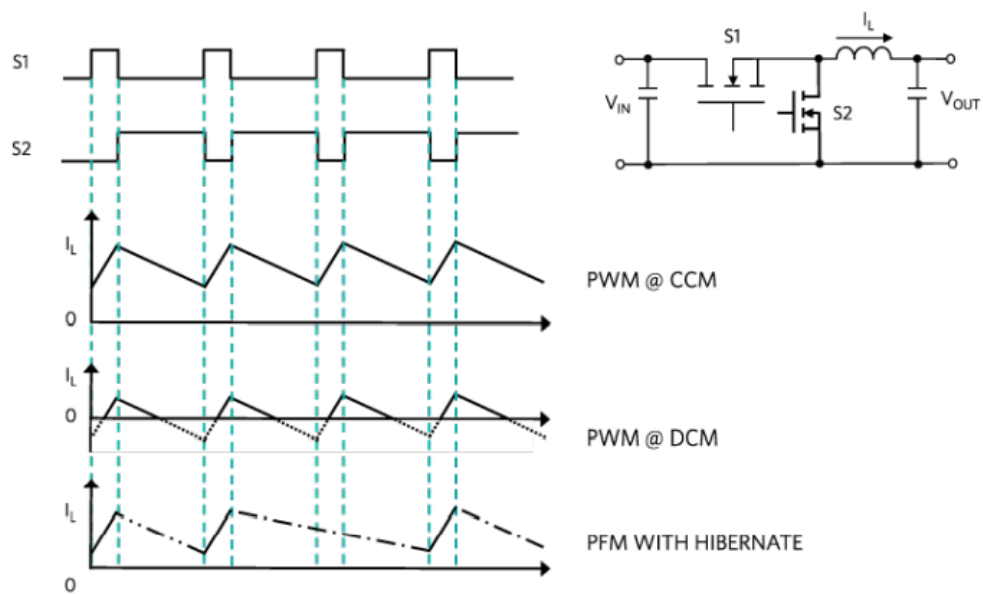
**Figura 1.5.** Topologías de conversores DC-DC usados en sistemas fotovoltaicos

Como se puede observar antes, generalmente se usan los conversores convencionales Buck, Boost y Buck-Boost pero adicionalmente topologías más complejas como Cuk y Sepic, en la Tabla 1.2, se muestra un resumen comparativo entre las topologías [13].

**Tabla 1.2.** Ventajas y desventajas de convertidores DC-DC no aislados para aplicaciones de energía renovable

Convertidor	Ventajas	Limitaciones
<b>Buck-Boost</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apropriado para aplicaciones de baja potencia</li> <li>• Compatible para trabajar con altas frecuencias de conmutación</li> <li>• Relación no lineal entre el ciclo de trabajo y el voltaje de salida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje no balanceado para aplicaciones MIMO</li> <li>• Alto rizado de voltaje</li> <li>• Se necesita un ciclo de trabajo extremadamente alto para altos niveles de voltaje</li> <li>• Corriente de salida discontinua</li> </ul>
<b>Cuk</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apropriado para aplicaciones de baja potencia</li> <li>• Usa un capacitor para transferir y almacenar energía</li> <li>• Relación no lineal entre el ciclo de trabajo y el voltaje de salida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polaridad negativa con respecto a la entrada</li> <li>• Eficiencia reducida en redes con múltiples salidas</li> <li>• Se necesita de un circuito complejo de compensación para operar adecuadamente</li> <li>• Salida de corriente discontinua que no es controlable debido a pares de resonancia LC que lleva a un voltaje excesivo y puede dañar el circuito.</li> </ul>
<b>Sepic</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salida no invertible</li> <li>• Utilizado para la corrección de factor de potencia en líneas AC</li> <li>• Relación no lineal entre el ciclo de trabajo y el voltaje de salida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control del ciclo trabajo complejo para sistemas MIMO</li> <li>• Ganancia de voltaje bajo</li> <li>• Ciclo de trabajo no balanceado para operación efectiva, el periodo de encendido debe ser más alto que el de apagado para voltajes de salida altos</li> </ul>

Las topologías anteriormente descritas son conocidas también como convertidores conmutados por diodo o no síncronos, por lo que se puede implementar otro transistor en lugar de diodo para transformar el convertidor en uno bidireccional, el cual permite que el flujo de potencia sea posible en ambas direcciones, además de ser más eficientes [14], este tipo de convertidores son llamados síncronos ya que los transistores se activan alternadamente, tal como se muestra en la Figura 1.6, en donde se detallan los modos de operación en los que pueden trabajar.



**Figura 1.6.** Conmutación de transistores y modos de operación de convertidores síncronos

Los convertidores DC-DC de acuerdo con cada tipo de convertidor es mejor adaptado para ciertas topologías.

Los convertidores reductores tipo chopper son enfocados en sistemas de alta eficiencia, como por ejemplo tracción eléctrica, vehículos eléctricos y herramientas electromecánicas; debido a que estos utilizan motores cuyas inductancias actúan como filtros.

Los convertidores elevadores tipo chopper son usados principalmente en sistemas de radar y de ignición.

Los convertidores de dos cuadrantes pueden ser parte sistemas de fuentes de energía autónomas que contienen bancos de baterías y por lo tanto para energía renovable como sistemas fotovoltaicos, celdas de combustible o turbinas eólicas.

Los convertidores de cuatro cuadrantes son aplicados en sistemas en donde se necesita freno regenerativo para motores DC, por ejemplo, en sistemas de transporte con frenado frecuente.

En general los convertidores tipo chopper con inductancias a la salida son utilizados también como entrada de inversores.

Por otro lado, es necesario recalcar los niveles estándar de voltaje utilizados. Los niveles estándar de voltaje son, 3.3V para sistemas embebidos; 5V y 12V para circuitos lógicos; 48V y 125V para equipos de telecomunicaciones y 270V para el bus DC principal de aviones.

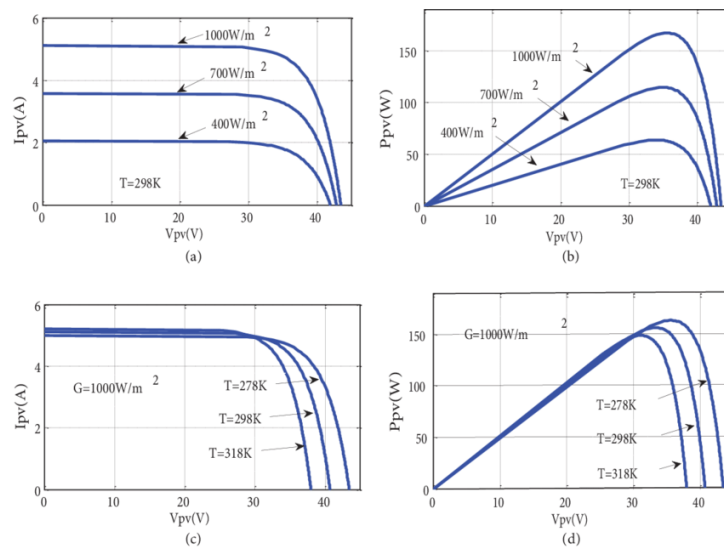
Los niveles de entrada típicos incluyen 48V, 170V (el valor pico de 120Vrms para inversores) y 270V.

### 1.3.5 MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Cualquier sistema dinámico puede ser modelado matemáticamente en base a ecuaciones diferenciales.

#### 1.3.5.1 Modelamiento de paneles fotovoltaicos

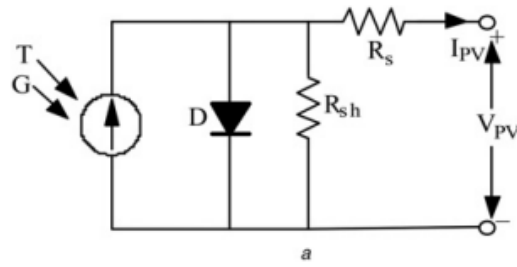
Como resultado de la combinación de las celdas en un módulo o panel, este puede ser caracterizado por un nivel cambiante del voltaje y la corriente. La curva características I-V de una celda solar y por lo tanto de un panel es no lineal y altamente dependiente de la radiación solar, donde existe un punto máximo de potencia, adicionalmente siendo dependiente de la temperatura como se muestra en la Figura 1.7.



**Figura 1.7.** Curvas características de paneles fotovoltaicos: (a) Corriente vs Voltaje en función de la irradiancia, (b) Potencia vs Voltaje en función de la irradiancia, (c) Corriente vs Voltaje en función de la temperatura, (d) Potencia vs Voltaje en función de la temperatura.

Observando las curvas características [15], es notable como no es apropiado el representar el modelo dinámico de paneles solares con una fuente lineal de voltaje DC convencional. Por otro lado, a la celda solar es posible representarla mediante un circuito equivalente, tal como se muestra en la Figura 1.8 [16].





**Figura 1.8.** Circuito equivalente de un panel fotovoltaico

Donde:

$G = \text{Radiación solar}$

$T = \text{Temperatura}$

$R_s = \text{Resistencia serie equivalente}$

$R_{sh} = \text{Resistencia shunt equivalente}$

En el campo de las simulaciones computacionales, softwares de simulación como MATLAB/SIMULINK, SPICE, SABER, etc. suelen utilizar una tabla que calcula la corriente generada en base a las curvas características I-V de modelos comerciales, ecuaciones de corriente modeladas en una fuente de corriente dependiente o fuentes de voltaje DC lineales equivalentes.

Basado en el circuito equivalente de una celda fotovoltaica, en [17] se propone un modelo matemático completo, pero para aplicaciones de simulación el modelo que utiliza en Matlab/Simulink [18] es simplificado y en [19] es validado con un panel fotovoltaico real. El modelo utiliza el circuito equivalente de la Figura 8 y describe la corriente de salida en la Ecuación 1.1. Generalmente no se toma en cuenta la resistencia shunt equivalente al no afectar significativamente la eficiencia del panel, siendo idealmente esta  $R_{sh} = \infty$ .

$$I = N_p \cdot I_{pv,cell} - N_p \cdot I_{0,cell} \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p} \right)}{KTcA} \right) - 1 \right] \quad (1.1)$$

$$I_{pv,cell} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{Lref} + \alpha_{isc}(T - T_{ref})]$$

Donde:

$I =$  Corriente de salida

$I_{0,cell} =$  Corriente de saturación

$q =$  Carga del electrón =  $1.6022e^{-19}$  C

$V =$  Voltaje de salida

$R_s =$  Resistencia serie equivalente

$K =$  Constante de Boltzman =  $1.3806e^{-23} \frac{J}{K}$

$T =$  Temperatura del panel

$mA =$  Factor de idealidad del diodo (valor cercano a 1)

$N_p =$  Número de celdas conectadas en paralelo

$N_s =$  Número de celdas conectadas en serie

$G =$  Radiación solar presente

$G_{ref} =$  Radiación solar en condiciones estándar  $\left(1000 \frac{W}{m^2}\right)$

$I_{Lref} = I_{sc} =$  Corriente de cortocircuito

$\alpha_{isc} =$  Coeficiente de temperatura para corriente de cortocircuito

$T_{ref} =$  Temperatura del panel en condiciones estándar (298°K)

### 1.3.5.2 Algoritmos de control en paneles fotovoltaicos

Como se observa en la Figura 1.7, los sistemas fotovoltaicos son caracterizados por curvas no lineales de I-V Y P-V, donde se ve que existe un punto de máxima potencia el cual puede cambiar dependiendo de las condiciones medioambientales, por lo que es un reto el asegurar que el sistema opere en este punto bajo condiciones variables. Se han propuesto varios algoritmos conocidos como MPPT (Maximum Power Point Tracking), los cuales, mediante la medición del voltaje y corriente en los terminales de un arreglo de paneles solares, son capaces de encontrar este punto [20].

Entre los más utilizados están:

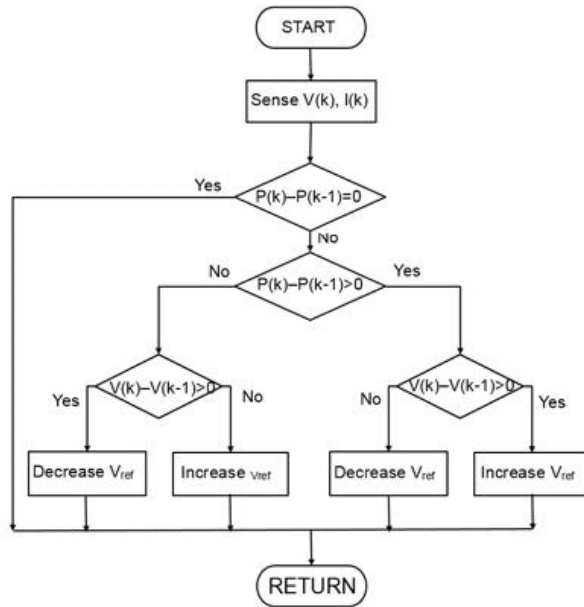


Figura 1.9. Algoritmo Perturbación y Observación

**Perturbación y observación (P&O):** Este algoritmo perturba el voltaje de operación para asegurar que se genere la máxima potencia. Existen varias variantes de este algoritmo, pero el más simple es el que se muestra en la Figura 1.9.

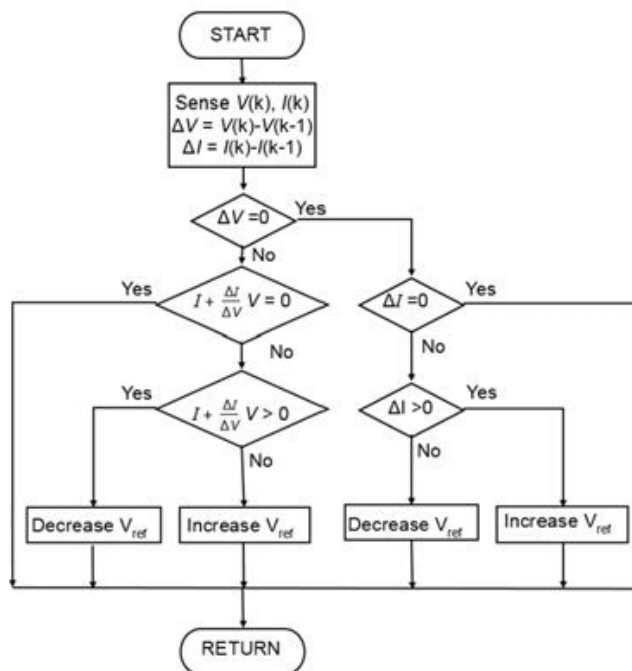
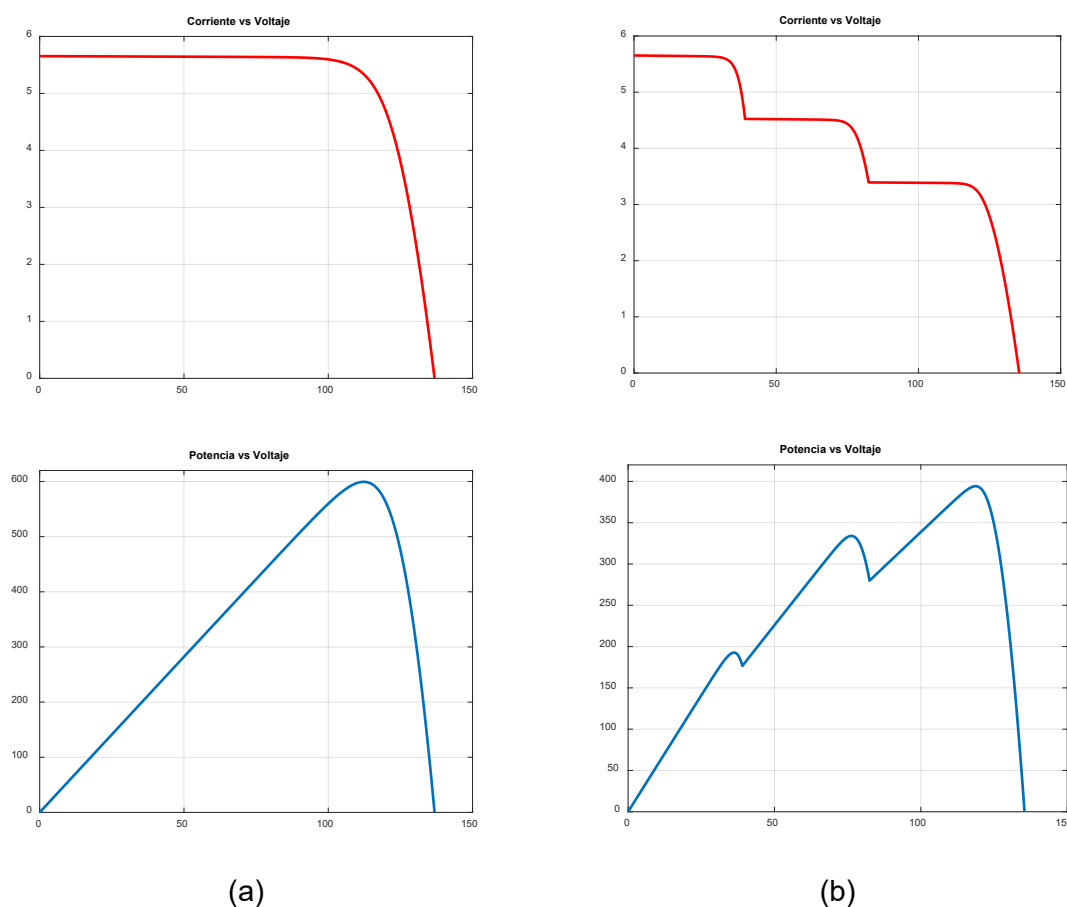


Figura 1.10. Algoritmo Conductancia Incremental

**Conductancia incremental (IC):** Este algoritmo compara la conductancia incremental. Dependiendo del resultado, aumenta o disminuye el voltaje hasta que se alcance el punto de máxima potencia. A diferencia del algoritmo P&O, el voltaje se mantiene constante una vez el punto de máxima potencia es alcanzado. El algoritmo se muestra en la Figura 1.10.

**Voltaje de circuito abierto funcional:** Este algoritmo es basado en el principio que el punto de máxima potencia está siempre localizado en una fracción constante del voltaje de circuito abierto. El voltaje de las celdas en un arreglo fotovoltaico es medido y usado como un parámetro de medición para el controlador.

Por otro lado, alcanzar la estabilidad de estas curvas bajo condiciones ambientales variables es una tarea muy difícil, por lo que las sombras parciales lo dificultan aún más, un fenómeno conocido como efecto sombra como se muestra en la Figura 1.11 reduce la potencia producida por los paneles, ya que puede provocar un mal sondeo del punto de máxima eficiencia, donde se presentan varios puntos de máxima potencia lo que hace que algoritmos de control sean menos efectivos [21].

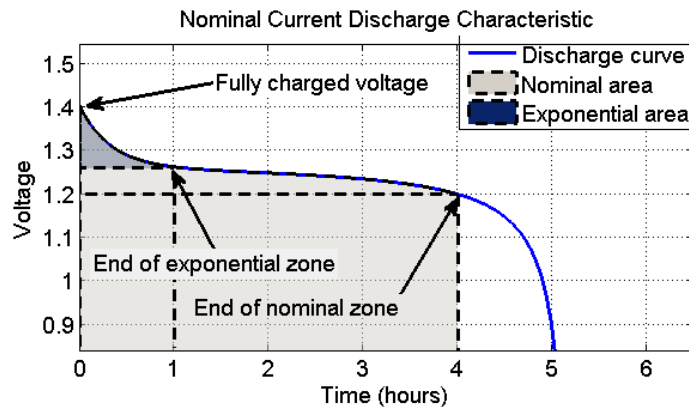


**Figura 1.11.** Curvas I-V / P-V de sistemas fotovoltaicos bajo (a) condiciones normales de operación (b) efecto sombra

Las características anteriormente descritas, es necesario el tomar en cuenta este fenómeno en sistemas reales, ya que existen varios picos que hacen que el calcular el punto de máxima potencia con algoritmos MPPT convencionales no sea conveniente, ya que esto puede afectar su desempeño. Por lo que se han hecho varias propuestas de algoritmos de control [22, 23, 24] para contrarrestar el efecto de las sombras.

### 1.3.5.3 Modelamiento de baterías

A partir de la curva de descarga general de una batería presentada en la Figura 1.12, se puede parametrizar las características de estas mediante el análisis de las zonas de la curva.



**Figura 1.12.** Curva de descarga general de una batería

En [25] se propone un modelo general de las baterías en base a los parámetros obtenidos de la curva de descarga, descrito en la Ecuación 1.2 correspondientes a baterías de Plomo Ácido, Níquel Cadmio y Litio, las cuales son las que regularmente se usan para aplicaciones fotovoltaica.

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - f i t} + A \exp(-B \cdot i t) \quad (1.2)$$

Donde:

$$E = \text{Voltaje sin carga (V)}$$

$$E_0 = \text{Voltaje de batería constante (V)}$$

$$K = \text{Voltaje de polarización (V)}$$

$$Q = \text{Capacidad de la batería (Ah)}$$

$$\int idt = \text{Capacidad actual de la batería (Ah)}$$

$$A = \text{Amplitud de la zona exponencial (V)}$$

$$B = \text{Constante de tiempo inversa de la zona exponencial (Ah)}^{-1}$$

$$V_{batt} = \text{Voltaje de la batería}$$

$$R = \text{Resistencia interna } (\Omega)$$

$$i = \text{Corriente de la batería (A)}$$

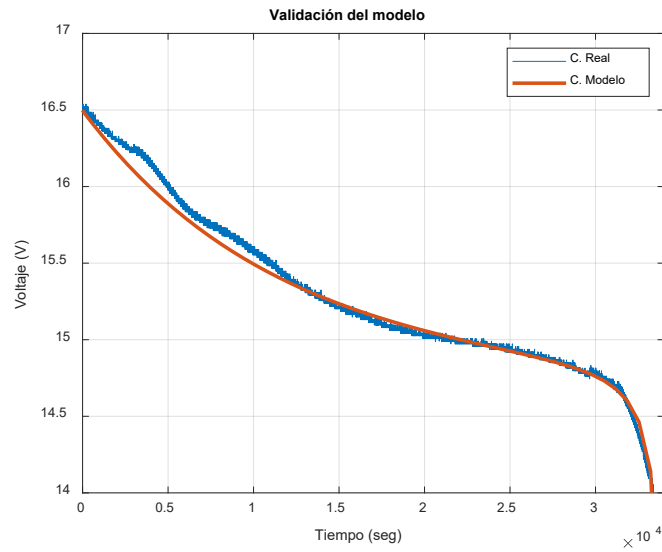
Este modelo es el que generalmente se utiliza en simulaciones, aproximándose bastante a la curva real y presentan un par de limitaciones.

- El voltaje mínimo sin carga es de 0V y el voltaje máximo es de  $2 \times E_0$
- La capacidad mínima de la batería es 0Ah y la capacidad máxima es  $Q_{max}$

Por otro lado, se realizan algunas suposiciones para aplicar el modelo:

- La Resistencia interna es asumida como constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la corriente.
- Los parámetros del modelo son obtenidos a partir de la curva de descarga. Las curvas de carga y la descarga son asumidas como la misma.
- La capacidad de la batería no cambia con la amplitud de la corriente (no existe efecto Peukert).
- La autodescarga de la batería no se representa. Puede ser representada al añadir una resistencia grande en paralelo con los terminales de la batería.
- La batería no tiene efecto memoria.

A pesar de estas limitaciones y suposiciones el modelo muestra un buen rendimiento y ser bastante aproximado a curvas reales, como se muestra en la Figura 1.13.



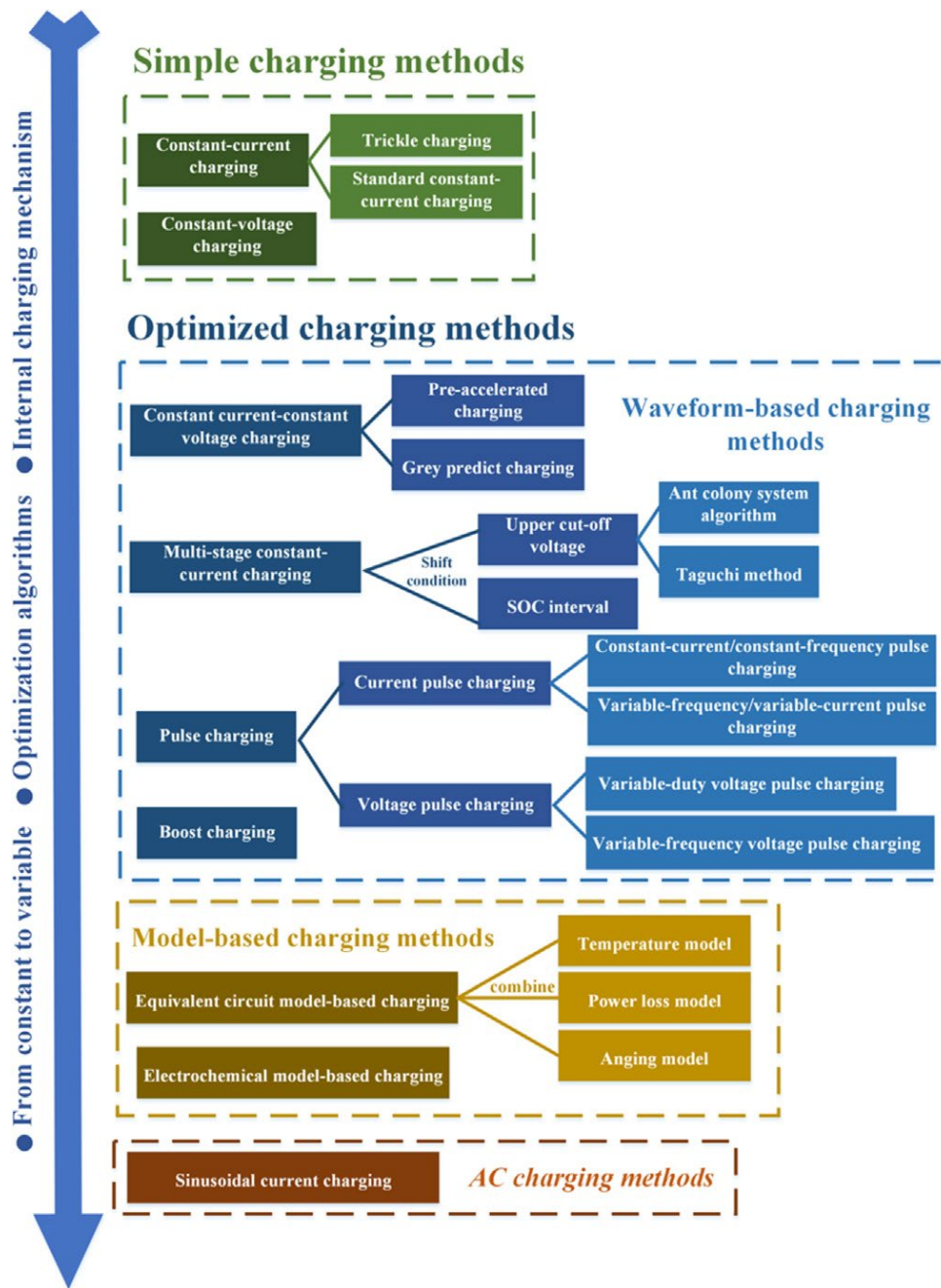
**Figura 1.13.** Validación del modelo matemático con la curva de descarga de una batería tipo LiPo de 8Ah @800mA

#### 1.3.5.4 Técnicas de carga de baterías

Gracias al desarrollo de tecnologías como vehículos eléctricos, las baterías de ion-litio han ganado bastante popularidad debido a su alta densidad energética, larga vida útil y baja autodescarga. Sin embargo, una limitante con la que se han encontrado son los métodos de carga, ya que es necesario técnicas que no solamente carguen las baterías en un tiempo razonable, sino también el que mantengan la vida útil o State of Health (SOH) de cada celda.

Por tales motivos, se han desarrollado métodos de carga de baterías como las más simples como Corriente constante (CC) o Voltaje constante (CV), siendo estas ineficientes e incapaces de cumplir con estándares de sistemas actuales. Otras son las llamadas técnicas optimizadas siendo básicas para el desarrollo de sistemas de manejo de baterías (BMS) más inteligentes como Corriente constante – Voltaje constante (CC-CV), carga en fases, carga por pulsos, entre otras. Llegando hasta técnicas más complejas basadas en modelos de las baterías o técnicas desarrolladas para carga en AC [26].

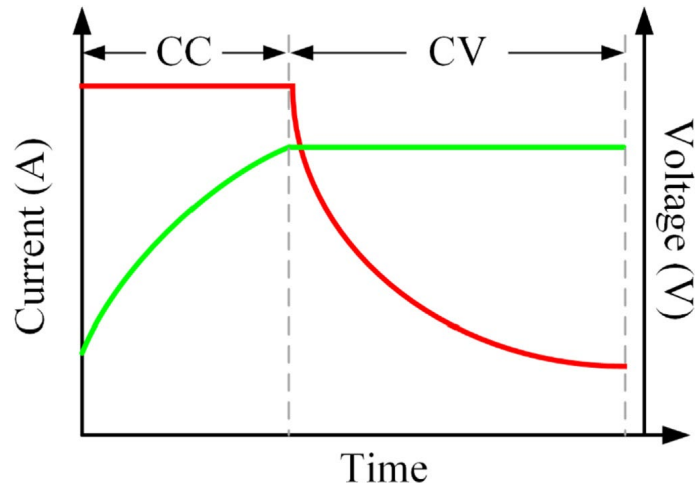
En la Figura 1.14, se muestra un resumen del estado del arte de los métodos de carga desarrollados para baterías de ion-litio.



**Figura 1.14.** Resumen de los métodos de carga de baterías

En el presente trabajo se utilizará un método optimizado Corriente constante – Voltaje constante (CC-CV) el cual toma las ventajas de las técnicas CC y CV evitando sus desventajas, es el método más utilizado en la actualidad y otros métodos de carga han sido basados en esta. Consiste en aplicar una fase de corriente constante, al incrementarse el voltaje a un nivel preestablecido se aplica un nivel de voltaje constante, en esta etapa la corriente disminuye continuamente hasta cero, donde se acaba el proceso de carga. Este proceso se describe en la Figura 1.15.





**Figura 1.15.** Carga de baterías CC-CV

Es necesario recalcar que la fase CC ocupa aproximadamente el 85% del proceso de carga. Su principal ventaja es que es una técnica robusta que no necesita el modelo de las baterías; por otro lado, tiene algunas desventajas [27, 28]:

- Aumento del voltaje de polarización debido a la reducción de la capacidad de la batería debido al tiempo.
- La etapa CV consume un gran tiempo aumentando el tiempo de carga general.
- El manejar niveles altos de corriente en la etapa CC tiende a reducir los ciclos de vida de la batería.
- No puede distinguir la carga entre celdas individuales.
- Esta técnica ignora la resistencia interna de la batería y un proceso predeterminado de carga puede aumentar la temperatura de la batería.

Para evitar la mayoría de estas desventajas se han propuesto varias técnicas de carga basadas en CC-CV, todas teniendo sus pros y contras. Métodos como: Carga lenta – Corriente constante – Voltaje constante (TC-CC-CV) [29], método de precarga acelerada [30], método de carga de predicción gris [31] o el método de Temperatura constante – Voltaje constante (CT-CV) [32].

## 1.3.6 SISTEMAS DE CONTROL

### 1.3.6.1 Sistemas de tiempo continuo

Como su nombre lo indica son sistemas dinámicos que se representan en función a tiempo continuo. Existen dos formas de representar este tipo de sistemas, la primera es en base a ODEs (Ecuaciones Diferenciales Ordinarias) representando la variable de salida en función a la variable de entrada y la segunda forma es representarla en base a espacios de estado:

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), u(t))\end{aligned}\tag{1.6}$$

En donde  $\frac{dx(t)}{dt}$  representa la derivada del vector  $n$   $x(t)$ ,  $u(t)$  representa el vector  $m$  de señales de entrada y  $y(t)$  es el vector  $p$  de señales de salida; siendo  $n$ ,  $m$  y  $p$  enteros.  $f(\cdot)$  y  $g(\cdot)$  representan funciones lineales o no lineales. Las funciones pueden o no depender del tiempo, pero para encontrar una única respuesta es necesario que estas no dependan explícitamente del tiempo, llamándose sistemas lineales invariantes en el tiempo o por sus siglas en inglés LTI. [33] A este tipo de sistemas se lo representa en base a matrices de estado:

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{1.7}$$

En donde  $x(t)$ ,  $y(t)$  y  $u(t)$  son vectores de dimensión  $n$ ,  $m$  y  $p$  respectivamente y  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son matrices con las dimensiones correspondientes. Su solución existe y es única para cualquier condición inicial  $x(0) = x_0$  y cualquier señal de entrada  $u(t)$  para todo instante de tiempo entre  $0 \leq t < t_f$ .

### 1.3.6.2 Sistemas de tiempo discreto

Existen analogías exactas para sistemas de tiempo discreto partiendo de los conceptos de sistemas de tiempo continuo. La notación estándar no toma en cuenta todo el periodo de tiempo, sino que utiliza periodos discretizados mapeando señales de entrada  $u[k]$ ,  $k_0 \leq k \leq k_f$  a señales de salida  $y[k]$ ,  $k_0 \leq k \leq k_f$ , donde  $k$  es un número entero. Por lo tanto, el modelo en espacios de estado en tiempo discreto se representa como:

$$\begin{aligned}x[k + 1] &= f(x[k], u[k]) \\y[k] &= g(x[k], u[k])\end{aligned}\tag{1.8}$$

Extendiéndose a su modelo de matrices de estado para sistemas LTI.

$$\begin{aligned}x[k + 1] &= Ax[k] + Bu[k] \\y[k] &= Cx[k] + Du[k]\end{aligned}\tag{1.9}$$

### 1.3.7 CONTROL DE CONVERTORES ESTÁTICOS

En secciones anteriores se observó como los sistemas pueden modificar la variable de salida al modificar otra variable. En sistemas fotovoltaicos se puede modificar la potencia entregada al cambiar el voltaje en sus terminales y para hacerlo se utilizan convertidores de energía. En el caso de los convertidores DC-DC transforman el voltaje al modificar el ciclo de trabajo, además que el voltaje se ve afectado a cambios en la fuente y en la carga por lo que es necesario realimentar el sistema y mediante un controlador modificar el ciclo de trabajo para que siga la referencia o set point.

Existe una extensa teoría en cuanto al control por realimentación en sistemas LTI y sus ventajas, pero lo para el diseño de controladores en sistemas reales es necesario recalcar las desventajas que tiene el controlar este tipo de sistemas:

- Se requiere de sensores lo suficientemente confiables para la realimentación.
- Su rendimiento disminuye para sistemas con perturbaciones.
- Se presenta no linealidades al saturar el actuador.
- La saturación disminuirá el rango de ganancias que se pueden utilizar.

Se debe considerar esto en sistemas reales; diseñando controladores con un límite de rango de señales de entrada, utilizando saturadores a la salida del controlador o sistemas en cascada para contrarrestar las perturbaciones. Además, se debe tomar en cuenta 3 escenarios, para elegir el método de diseño:

1. La planta está disponible para experimentación, pero no se puede obtener un modelo matemático del sistema.
2. Se cuenta con un rango de respuestas de frecuencia, pero no se tiene otra información de la planta.

3. Se cuenta con el modelo matemático de la planta.

Los 3 escenarios son aplicables para convertidores estáticos, pero el presente trabajo se enfocará en el tercero.

### 1.3.7.1 Controladores usados en convertidores de potencia

En aplicaciones de control clásico de sistemas lineales en convertidores de potencia, diagramas de Bode y localización de las raíces son los más usados para obtener sistemas con buen rendimiento y estabilidad.

Para garantizar los márgenes de ganancia y fase, las siguientes funciones de transferencia son usualmente utilizados [34]:

#### Compensadores de adelanto y retraso

Los compensadores de atraso deben ser usados en convertidores con buen margen de estabilidad, pero con baja exactitud en estado estable. En contraste, si se observa la ecuación (10) si se cumple  $\frac{1}{T_p} < \frac{1}{T_z}$  y las frecuencias son lo suficientemente bajas la ganancia de frecuencia unitaria, los compensadores de adelanto-retraso bajan la ganancia de bucle a altas frecuencias, pero mantiene la fase sin cambios para frecuencias  $f \gg \frac{1}{T_z}$ . Así, la ganancia DC puede incrementar para reducir el error en estado estable sin disminuir el margen de fase.

$$C_{AR}(s) = k_{AR} \frac{1 + sT_z}{1 + sT_p} = k_{AR} \frac{T_z s + \frac{1}{T_z}}{T_p s + \frac{1}{T_p}} \quad (1.10)$$

Los compensadores de adelanto pueden ser utilizados en convertidores con buena exactitud en estado estable pero pobre margen de estabilidad. En contraste, observando la ecuación (10) si se cumple  $\frac{1}{T_p} > \frac{1}{T_z}$  y las frecuencias son escogidas por debajo de la ganancia de frecuencia unitaria, los compensadores de adelanto-retraso incrementa el margen de fase son incrementar en gran medida el error en estado estable. En este tipo de controladores los valores  $T_p$  y  $T_z$  son escogidos para incrementar el margen de fase, incrementar la velocidad de la respuesta transitoria o incrementar el ancho de banda.

## Controlador Proporcional-Integral

También son llamados controladore PI y son usados para garantizar una respuesta en estado estable sin error con tiempos de establecimiento aceptables dependiendo de la aplicación. Es un caso particular de los compensadores de adelanto-atraso, por lo tanto, son útiles en convertidores con buen margen de estabilidad, pero baja exactitud en estado estable.

$$C_{PI}(s) = \frac{1 + sT_z}{sT_p} = \frac{T_z}{T_p} + \frac{1}{sT_p} = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{K_p s} \right) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_z} \right) = \frac{1 + sT_z}{\frac{sT_z}{K_p}} \quad (1.11)$$

## Controlador Proporcional-Integral + Polo compensador de alta frecuencia

Combina las ventajas de un controlador PI con compensadores de adelante o retraso. Puede ser usado en convertidores con buen margen de estabilidad, pero baja exactitud en estado estable. Si se cumple  $\frac{1}{T_z} < \frac{1}{T_M}$  baja la ganancia de bucle a altas frecuencias bajando ligeramente la fase para conseguir el margen de fase deseado.

$$C_{PI,P}(s) = \frac{1 + sT_z}{sT_p(1 + sT_M)} = \frac{T_z}{T_p T_M} \frac{s + \frac{1}{T_z}}{s \left( s + \frac{1}{T_M} \right)} = W_{cp} \frac{s + \omega_z}{s(s + \omega_M)} \quad (1.12)$$

## Controlador Proporcional-Integral-Derivativo + polos de alta frecuencia

Los controladores PID son los más utilizados en todo tipo de aplicaciones industriales, en cuanto a electrónica de potencia el esquema PID de filtro tipo notch con dos polos complejos ligeramente amortiguados, para incrementar la velocidad de la respuesta transitoria, eliminando el error en estado estable. El polo de alta frecuencia es escogido para mantener el margen de fase.

$$\begin{aligned} C_{PIDnf}(s) &= T_{cp} \frac{s^2 + 2T_{cp}\xi_{cp}\omega_{0cp}s + \omega_{0cp}^2}{s \left( 1 + \frac{s}{\omega_{p1}} \right)} = \frac{T_{cp}s}{1 + \frac{s}{\omega_{p1}}} + \frac{2T_{cp}\xi_{cp}\omega_{0cp}}{1 + \frac{s}{\omega_{p1}}} + \frac{T_{cp}\omega_{0cp}^2}{s \left( 1 + \frac{s}{\omega_{p1}} \right)} \\ &= \frac{T_{cp}s}{1 + \frac{s}{\omega_{p1}}} \frac{T_{cp}\omega_{0cp}^2 \left( 1 + \frac{2s\xi_{cp}}{\omega_{0cp}} \right)}{s(s + \omega_M)} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Para sistemas con ceros de alta frecuencia, se suele posicionar 2 polos de alta frecuencia, pero su rendimiento es menor al filtro tipo notch.

$$C_{PID}(s) = W_{cp} \frac{\left(s + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(s + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)^2} \quad (1.14)$$

### Controlador por modos deslizantes

Los convertidores de potencia o cualquier sistema discreto no lineal variante en el tiempo, son regulados para cambiar de un estado dinámico a otro cuando sea necesario. Si la conmutación ocurre a altas frecuencias, las dinámicas descritas en espacios de estado pueden ser forzadas a deslizarse a través de una trayectoria. Entonces es dicho que el convertidor está en modo deslizante, las desviaciones o rizado permitido es determinado por la frecuencia de conmutación.

El control por modo deslizante de sistemas de estructura variable, como convertidores de potencia, es particularmente interesante por la robustez implícita, capacidad de reducir el orden del sistema y por la conmutación de apagado y encendido.

Existen algunos conceptos relacionados con este tipo de controladores, que se describen con detalle en [34], donde dado un modelo de espacios de estado como función del vector error  $e$  y a partir de una superficie deslizante  $s(e_{x1}, t) = 0$ , la señal de control que debe ser aplicado a la planta para que esta se deslice por la superficie está dado por:

$$U_{eq} = \frac{k_n \frac{de_{xb}}{dt} + k_{n+1} \frac{de_{xb+1}}{dt} + \dots + k_{j-1} + \frac{de_{xf-1}}{dt} + k_j(-f_e(e) + p_e(t))}{k_j b_e(e)} \quad (1.15)$$

#### 1.3.7.2 Controlador basado en álgebra lineal (LABC)

Scaglia et al. [35] proponen una técnica de control denominado Control Basado en Álgebra Lineal o como se referirá en adelante LABC por sus siglas en inglés (Linear Algebra Based Control), está basado en el modelo de espacios de estado de las ecuaciones (1.6) y (1.7). Su diseño consiste en encontrar la solución exacta alrededor de un punto estable de operación

mediante las ecuaciones lineales de la planta, haciéndolo altamente eficiente para seguimiento de referencia y con consideraciones adicionales puede rechazar perturbaciones.

Se debe tomar en cuenta algunas consideraciones del modelo:

1. El modelo es afín en el control
2. El modelo es de fase mínima
3. El modelo es invariante en el tiempo
4. El estado es medible
5. El modelo es exacto, y no tiene perturbaciones
6. La referencia, así como sus derivadas son conocidas

En sistemas reales estas condiciones no se cumplen en su totalidad por lo que es necesario realizar varias suposiciones para aplicar este tipo de control.

La suposición 1 no es restrictiva al presentarse en la mayoría de los procesos de control.

La suposición 2 es necesaria debido a algunas cancelaciones del modelo en la solución, pero se lo puede contrarrestar al limitar la ganancia del controlador para así mantener la estabilidad.

La suposición 3 se puede eliminar si la ley de variación de parámetros es conocida.

La suposición 5 se elimina al considerar perturbaciones adaptativas en el estado:

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t)) + g(x(t))u(t) + d(t) \quad (1.16)$$

Donde  $d(t)$  puede considerar una perturbación externa  $w(t)$ , así como errores de modelado:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f_p(x(t)) + g_p(x(t))u(t) + w(t) \\ d(t) &= [f_p(x(t)) - f(x(t))] + [g_p(x(t))u(t) - g(x(t))]u(t) + w(t) \end{aligned} \quad (1.17)$$

La suposición 6 es opcional, ya que en muchas ocasiones la trayectoria deseada solamente es definida por algunos estados, permitiendo así cierta libertad al diseñar el controlador.

De esta forma, LABC propone el formular el problema de control de una manera algebraica, lo que trae ventajas como:

- Fácil aplicación en plantas no-lineales con restricciones menores en el modelo, mencionadas anteriormente.
- La carga computacional es baja
- Puede ser aplicado en sistemas continuos o discretos
- La selección de la estructura es relativamente simple
- El proceso de sintonización de los parámetros es explícito, donde una selección simple de estos garantiza la estabilidad de la planta controlada.
- Incertidumbres y perturbaciones en el modelo pueden ser fácilmente manejados, asumiendo que se tiene cierto conocimiento acerca de estas.

Este tipo de controlador ha sido aplicado en diferentes campos y proyectos como: en procesos químicos obtenido mediante un modelo reducido con tiempo de retardo [36], en seguimiento de referencia en dos dimensiones para vehículos marítimos [37], en el control de formación y trayectoria para robots móviles [38], en el control de procesos de fermentación de alcohol [39], en el seguimiento de trayectoria de un cuadricóptero modelado en ecuaciones Euler-Lagrange [40].

Por el otro lado, no ha habido un trabajo de investigación de la aplicabilidad del LABC sobre convertidores estáticos de potencia hasta la publicación de [41] donde un controlador LABC es diseñado y comparado con un controlador clásico PI sobre un convertidor Buck bidireccional usado para carga de baterías, y se ha demostrado su mejor desempeño en el apartado de seguimiento de referencia. Sirviendo este trabajo como referencia para el diseño de los controladores en la siguiente sección.

### **1.3.8 PLECS®**

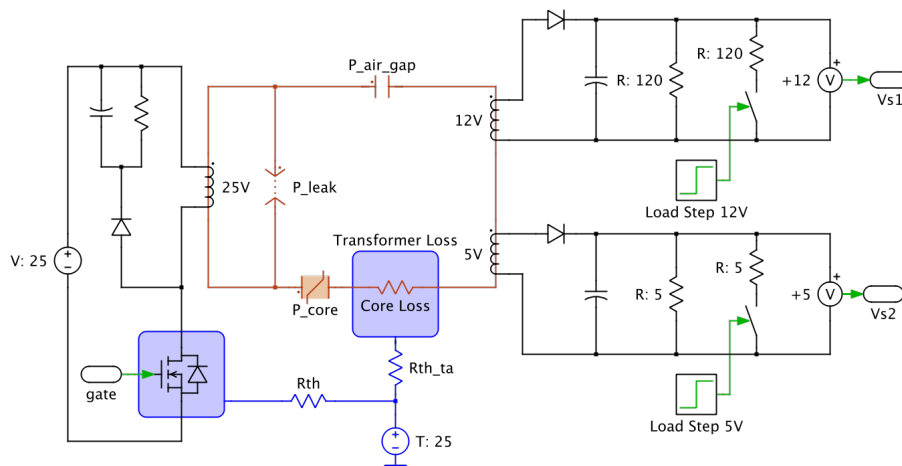
Software creado por la empresa Plexim, PLECS® es una herramienta dedicada a la modelación y simulación de electrónica de potencia PLECS® es una herramienta dedicada a la modelación y simulación de sistemas aplicados a varias disciplinas dentro de la ingeniería de electrónica de potencia; incluyendo fuentes, convertidores de potencia, cargas variables, etc [42].





**Figura 1.16.** Logos de plexim y PLECS®

PLECS® no solamente abarca el análisis eléctrico, sino también permite modelar aspectos magnéticos, térmicos y mecánicos; así como el control necesario. Permite implementar y configurar sistemas mediante elementos esquemáticos, haciendo del diseño intuitivo y familiar. A continuación, se presenta una aplicación típica (Convertor Flyback) implementada en PLECS®, donde se observa el entorno de trabajo y la integración de varios modelos.



**Figura 1.17.** Implementación de convertor Flyback en el dominio eléctrico, magnético y térmico en PLECS®

Cuenta con algunas herramientas que facilita el análisis de sistemas de electrónica de potencia como:

- Durante y después de las simulaciones, la información de las señales es visualizada mediante osciloscopios; bloques dedicados a la medición y análisis de datos.
- Cuenta con herramientas de análisis integradas que permiten obtener puntos de operación en estado estable y funciones de transferencia de lazo abierto y cerrado. Adicionalmente, se puede obtener el modelo en espacios de estado para análisis avanzados.

- Mediante Scripts el usuario puede configurar los parámetros, ejecutar simulaciones y procesar señales de acuerdo con los requerimientos del usuario.
- Es capaz de generar código en C para su uso en microprocesadores.

Estas funcionalidades también están presentes en softwares como Simulink de MATLAB que cuenta con un interfaz similar y ofrece poder modelar y simular sistemas de una gran gama de ramas de la ciencia ajenas de la electrónica de potencia. Esto trae consigo desventajas como una mayor carga computacional, mayores tiempos de simulación y mayor complejidad de implementación. Por otro lado, PLECS® al ser un software enfocado en su totalidad en electrónica de potencia hace que el software sea más sencillo lo que representa mayor facilidad y velocidad en el proceso de diseño y simulación.

Cabe mencionar que PLECS® también cuenta con una herramienta llamada PLECS® Blockset que permite integrar

Cabe mencionar que se cuenta con dos versiones del software la primera es la llamada PLECS® Standalone que cuenta con las funcionalidades mencionadas anteriormente y otra llamada PLECS® Blockset que permite integrarlo con las herramientas ofrecidas de MATLAB. En el caso del presente trabajo, al tener un gran número de componentes en operación simultánea se prioriza el reducir el tiempo de simulación y optimizar recursos; por lo que se utilizó PLECS® Standalone.

### **1.3.9 INTERFAZ GRÁFICA (GUI)**

La GUI es una interfaz entre la persona y la máquina, cuyo objetivo es representar un proceso de un sistema de la forma más clara posible al usuario para facilitar el trabajo o para como en este caso presentar de una manera más didáctica resultados de dicho proceso [43]. Este permite la comunicación del usuario con el ordenador, PLECS® en sí como cualquier programa es una GUI que permite realizar simulaciones, configurar parámetros y mostrar resultados en tiempo real.

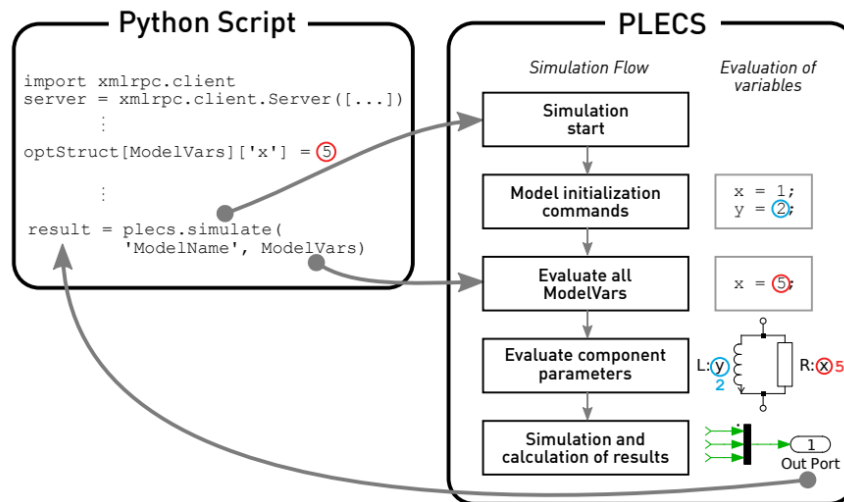
Se planteó el implementar un GUI externo a PLECS®, ya que así se optimiza el proceso de simulación debido a varios factores:

- Se eliminarán los osciloscopios (bloques que permiten visualizar las formas de onda en varios puntos del circuito) lo que reduce el tiempo de simulación.

- Se tiene un interfaz más ordenado y amigable lo cual permite a usuarios externos el visualizar los resultados.
- Se puede implementar una base de datos y presentar resultados de simulaciones ejecutadas con anterioridad de manera instantánea.
- Mediante programación, es posible enfocar los recursos del computador y ejecutar simulaciones con tiempos más cortos.

PLECS® Blockset ofrece todas las herramientas incluidas en MATLAB por lo que una opción fue utilizar el App Designer incluida en esta, lo cual facilitaría el diseño del GUI. Pero como se mencionó en el apartado anterior la opción ideal para esta aplicación es PLECS® Standalone en términos de optimización y tiempos de simulación; por lo que el desarrollar un GUI se vuelve más complejo. Afortunadamente PLECS® Standalone ofrece un interfaz de automatización denominada XML-RPC.

XML-RPC es un interfaz que permite enviar y recibir información de PLECS® Standalone usando un programa externo, algunos lenguajes de programación como C++, Ruby o Python® ofrecen librerías de cliente XML-RPC [44]. En la Figura 1.18, se muestra un ejemplo del flujo de simulación utilizando esta interfaz.



**Figura 1.18.** Típica aplicación del interfaz XML-RPC de PLECS® Standalone

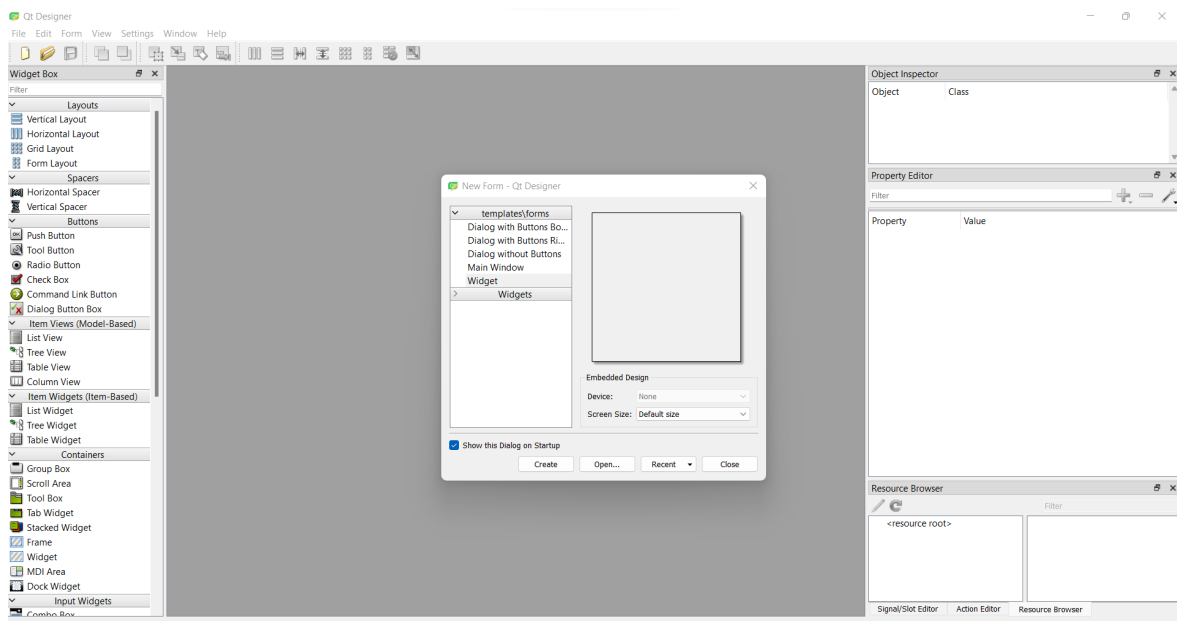
Se utilizará Python® en su versión 3.8, este es un lenguaje de programación desarrollado para una gran gama de aplicaciones, entre ellas: desarrollo web, computación científica, desarrollo de software, aplicaciones para empresas, educación, aplicaciones GUI, etc. Es un lenguaje de programación práctico y con una rápida curva de aprendizaje; adicionalmente en

la red existe una documentación bastante extensa acerca del uso de cada una de sus funciones y librerías, así como una comunidad activa que hace que la programación sea más rápida y fácil [45].

En el ámbito del desarrollo de aplicaciones GUI, Python® cuenta con varias herramientas, entre ellas se encuentra PyQt, el cual es un set de funcionalidades creados por The Qt Company que cuenta con soporte para todos los framework multiplataforma basados en Qt, incluyendo Windows, macOS, Linux, iOS y Android [46].

A pesar de que su licencia limita su aplicación comercial, en el sector de investigación o educación es una excelente opción para crear interfaces gráficas para múltiples aplicaciones, como en el presente caso.

Otra razón para utilizar PyQt, es que se puede utilizar la herramienta Qt Designer que facilita el diseño de las ventanas mediante Qt Widgets, bloques interactivos que permiten insertar archivos multimedia, botones, gráficas, etc. De este modo se puede exportar el código que puede ser modificado en un editor así adaptar las funciones a ejecutarse [47]. En la Figura 1.19 se muestra la interfaz de usuario de Qt Designer.



**Figura 1.19.** Interfaz de usuario de Qt Designer

## 2 METODOLOGÍA

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid, considerando la información detallada en la sección anterior, diseñar controladores LABC y comparar su rendimiento con controladores clásicos PI en convertidores DC-DC, simular el sistema en un software especializado bajo diferentes parámetros y diseñar una interfaz gráfica o GUI para mostrar de manera óptima los resultados obtenidos.

### 2.1 CONSIDERACIONES INICIALES

En primer lugar, es necesario determinar los parámetros de la carga a alimentar, así como otras características que debe cumplir el sistema, parámetros que se detallan a continuación:

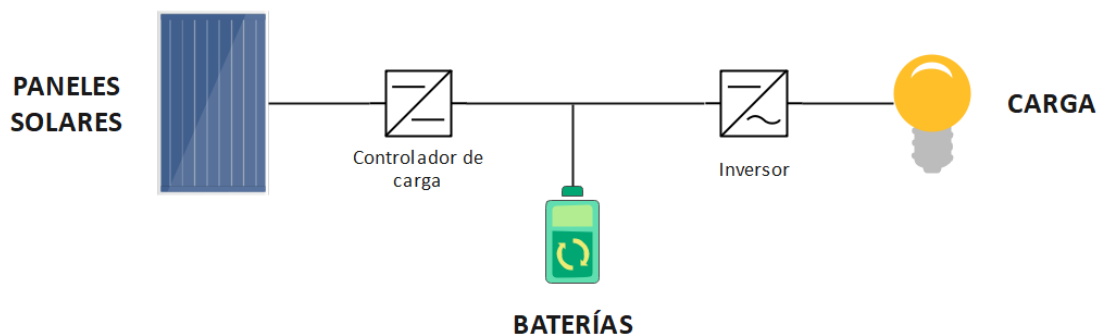
- Se asume una carga variable que consume hasta 1KW de potencia en operación continua, con sobrecargas de hasta 1.5KW en periodos intermitentes.
- El sistema consistirá en un arreglo de paneles solares y baterías para asegurar la operación continua del sistema, incluso en ausencia de radiación solar. Por lo que tanto las baterías deben ser dimensionadas para alimentar toda la carga.
- El arreglo de paneles solares debe proveer toda la energía cuando exista suficiente irradiancia, por otro lado, las baterías deben compensar la energía faltante.
- Se tendrá un bus DC que conectará las fuentes (paneles y baterías) con la carga.
- Se controlará el voltaje del bus DC a un valor fijo y estable; se puede configurar por el usuario en un rango de 48V a 400V.
- El sistema contará con una rampa de voltaje en el bus DC para evitar sobre impulsos al arrancar la operación.
- Después de 2 segundos la carga se conectará al sistema automáticamente.
- Para los paneles solares, habrá dos modos de operación:
  - Cuando el punto de máxima potencia en los paneles solares sea igual o mayor a la potencia requerida por la carga; los paneles usarán el control PPT y proveerán la energía necesaria a la carga y a las baterías.
  - Cuando el punto de máxima potencia en los paneles solares sea menor a la potencia requerida de la carga; los paneles solares usarán un algoritmo MPPT y la energía faltante será generada por las baterías.

- Para las baterías, habrá tres modos de operación:
  - Cuando la diferencia de potencia generada en los paneles y la requerida por la carga sea positiva e igual o mayor a la potencia necesaria para cargar las baterías a un valor constante, las baterías se cargarán siguiendo la técnica CC-CV (Corriente constante - Voltaje constante).
  - Cuando la diferencia de potencia generada en los paneles y la requerida por la carga sea positiva y menor a la potencia necesaria para cargar las baterías a un valor constante, las baterías se cargarán dependiendo de la energía proveniente de los paneles.
  - Cuando la diferencia de potencia generada en los paneles y la requerida por la carga sea negativa, las baterías suplirán la energía faltante a la carga.
- El cambio entre los diferentes modos de operación en los paneles y baterías se realizará de manera automática.

## 2.2 DISEÑO DEL SISTEMA

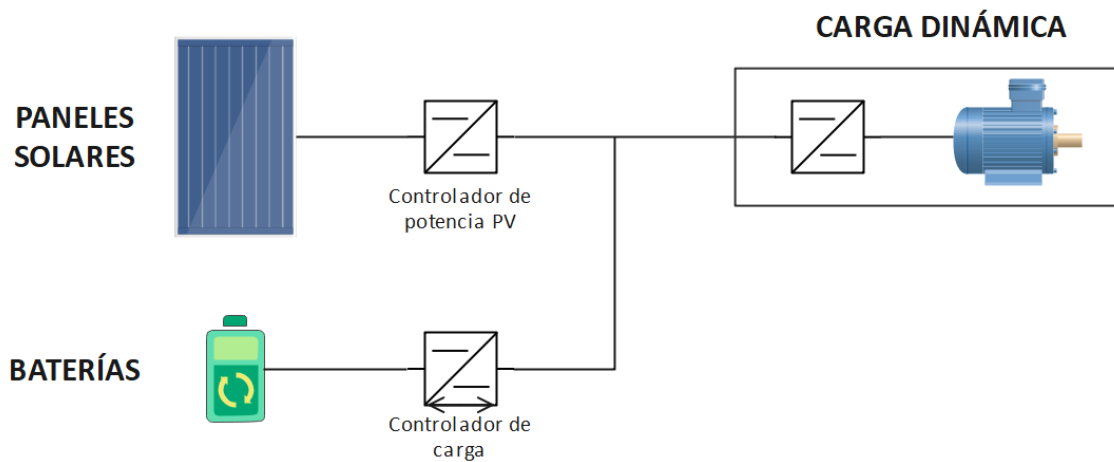
### 2.2.1 ESQUEMA GENERAL

Generalmente los sistemas fotovoltaicos off-grid presentan el esquema mostrado en la Figura 2.1, en la cual se ve como las baterías se conecta directamente a las cargas. Esta topología no permite controlar la energía de las baterías o mantener constante el voltaje en el bus DC.



**Figura 2.1.** Esquema de un sistema fotovoltaico off-grid convencional

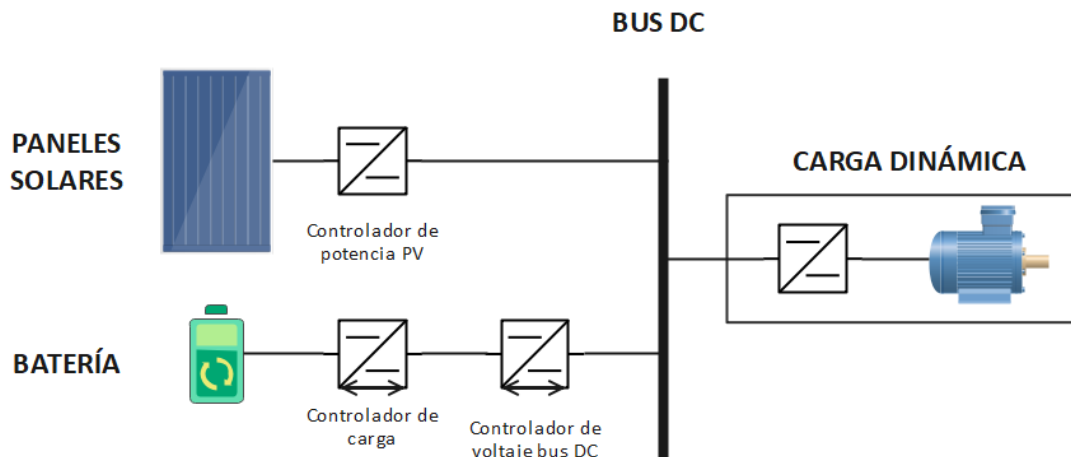
Para cumplir con los requerimientos propuestos en la sección anterior es necesario contar con un controlador conectado a las baterías para así poder controlar la carga y un controlador de potencia que regule la energía generada por el arreglo de paneles solares como se muestra en la Figura 2.2. Cabe aclarar que el presente trabajo no tiene contemplado el diseño de un inversor por lo que este será reemplazado por una carga dinámica DC.



**Figura 2.2.** Primer esquema propuesto

El esquema propuesto tiene un par de inconvenientes, el primero es que el controlar la entrada y salida de los convertidores simultáneamente no es una tarea sencilla y puede comprometer a la estabilidad de los mismos, además que como se establece en [48] el conectar dos fuentes de voltaje en paralelo con diferentes niveles de voltaje puede llevar a transitorios que produzcan flujos de potencia no deseados hacia las fuentes que puede afectar el control de los convertidores y dañar los componentes.

Para evitar estos transitorios se inserta un convertidor en cascada a los controladores de carga de baterías, encargado de controlar el bus DC, esta topología propuesta se presenta en la Figura 2.3. Se consideró el también implementar un controlador en cascada en los paneles para controlar el bus DC cuando las baterías no estén disponibles, pero en este escenario no se necesitaría el controlar la potencia generada por los paneles, ya que este dependería únicamente de la carga. En esta situación el controlador de potencia PV se utilizaría para controlar el voltaje en el bus DC, así se cumplen los requerimientos y se mantiene la estabilidad del sistema.



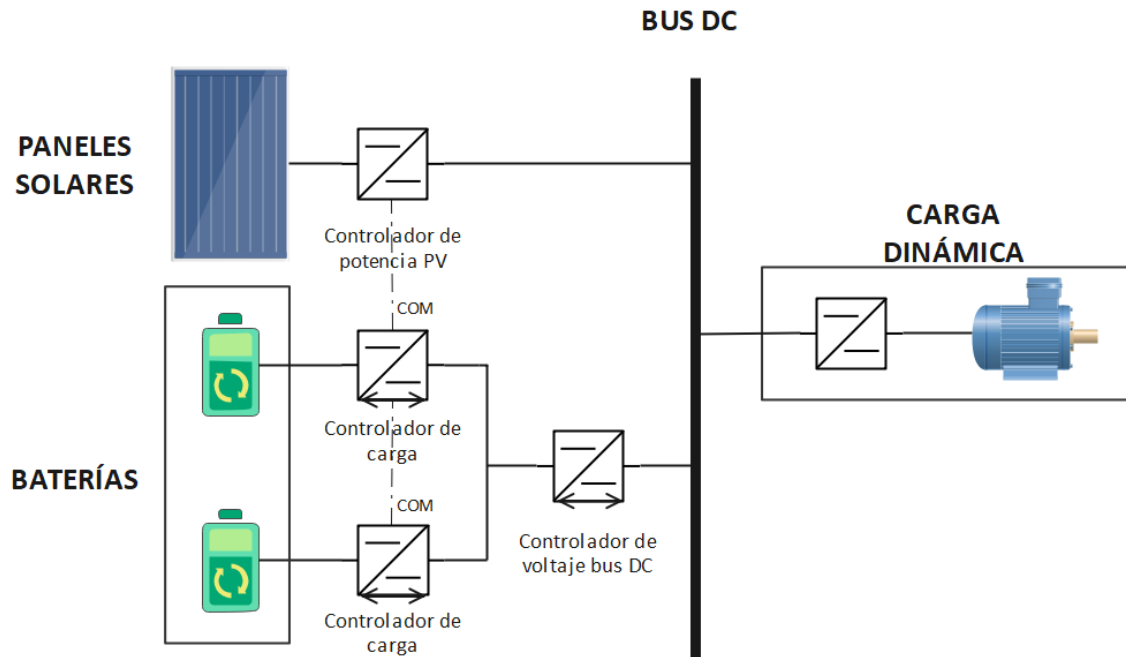
**Figura 2.3.** Segundo esquema propuesto

Finalmente, cabe tomar en cuenta que para llegar a la potencia nominal propuesta deben existir más de un banco de baterías, por lo que se puede conectar otras baterías en serie o en paralelo a la existente, pero al tratarse de baterías de litio no es recomendable hacerlo si no se cuenta con un sistema de manejo de baterías o BMS por sus siglas en inglés (Battery Management System) que mantenga el voltaje en las celdas niveladas y evitar sobre cargas o sobre descargas de estas, además no es recomendable que las baterías trabajen con altas corrientes.

Para el caso propuesto se conectará un controlador de carga de baterías por cada una, lo cual regulará la carga y descarga de ellas y hará que las baterías compartan carga, permitiendo la implementación de un modo denominado Forced Load Sharing [49] o Compartición de Carga Forzada que permite mediante la comunicación entre los controladores distribuir la carga equitativamente, manteniendo buena escalabilidad y ofreciendo la mejor regulación de voltaje ( $\pm 1\%$ ) entre todas las técnicas de este estilo.

Tomando todas las consideraciones antes descritas se propone un esquema general en la Figura 2.4, que cumpla con todos los requerimientos y que mediante la comunicación de los controladores permita implementar lógicas de control más sofisticadas.





**Figura 2.4.** Esquema final propuesto

Este esquema tiene varias ventajas:

- La comunicación entre controladores para regular los modos de operación.
- Permite controlar la potencia generada en los paneles solares.
- Permite controlar la carga y descarga de las baterías (ideal para baterías de Litio).
- Permite mantener fijo el voltaje del bus DC a pesar de las perturbaciones producidas por parte de las fuentes o la carga o llegado el caso si una de las fuentes no esté disponible.
- Gracias a que el bus DC tiene un voltaje fijo, es factible el conectar más fuentes como paneles solares, baterías, rectificadores, super capacitores, etc; o más cargas como inversores sin mayor modificar el diseño inicial.

## 2.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA

### 2.2.2.1 Paneles fotovoltaicos

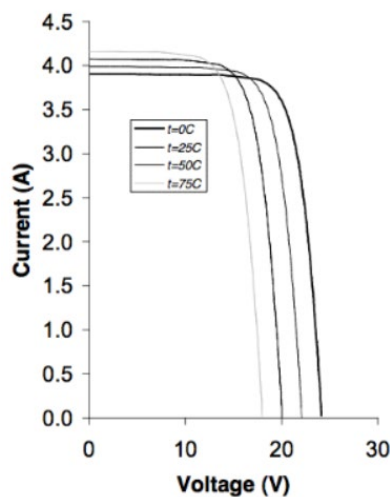
Una vez escogida la topología del sistema, es necesario el escoger los componentes que lo componen.

En primer lugar, tanto el arreglo de paneles solares como las baterías deben suplir por lo menos la potencia nominal propuesta de 1KW; se escogerán productos comerciales disponibles.

Los paneles solares se modelarán a partir de [50], en donde a partir de los parámetros del panel solar BP 365 (Figura 2.5) de la marca bp solar, se obtienen las curvas características I-V del panel solar a partir de los datos ofrecidos por el fabricante [51] como se muestra en la Figura 2.6.

Electrical Characteristics <sup>2</sup>	BP 365
Maximum power ( $P_{max}$ ) <sup>3</sup>	65W
Voltage at Pmax ( $V_{mp}$ )	17.6V
Current at Pmax ( $I_{mp}$ )	3.69A
Warranted minimum $P_{max}$	60W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.99A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	22.1V
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ C$
Temperature coefficient of $V_{oc}$	$-(80 \pm 10)mV / ^\circ C$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ C$
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m <sup>2</sup> ; wind 1m/s)	47±2°C
Maximum series fuse rating	20A
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC & IEC 61215 rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)

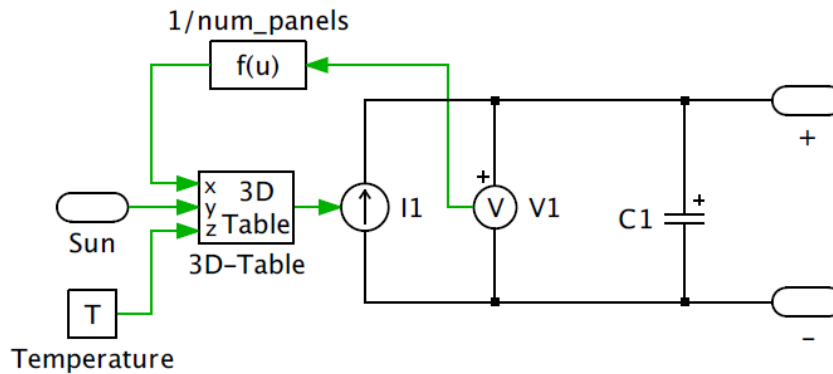
**Figura 2.5.** Parámetros del panel solar BP 365



**Figura 2.6.** Curva característica I-V de la celda solar BP 365

Mediante los datos obtenidos, se implementa una tabla de 3 dimensiones que, mediante los valores de voltaje, irradiancia y temperatura leídos, comanda una fuente de corriente dependiente y entrega los valores de voltaje en la salida como se muestra en la Figura 2.7.

De esta manera, no se debe implementar la Ecuación 1.1 en simulación, lo cual reduce la carga computacional y acelera el tiempo de simulación.



**Figura 2.7.** Implementación de un arreglo fotovoltaico en PLECS®

Para cumplir con los requerimientos de la carga (1KW) se escogió el usar un arreglo de 20 celdas, posicionadas en 10 filas y 2 columnas; esto generará un máximo de 1.3KW de potencia si se garantiza la irradiancia necesaria; manejando un voltaje a circuito abierto de 221V y corriente de cortocircuito de aproximadamente 8A.

### 2.2.2.2 Baterías

En cuanto a las baterías se utilizarán dos tipos para cada banco. El primer banco será de Litio-ferrofosfato (LiFePO<sub>4</sub>) que funcionan en condiciones críticas de temperatura. Se utilizará como referencia el modelo EP24100 de la marca EXPERT POWER [52], sus datos de placa se muestran en la Figura 2.8. El segundo banco estará formado por baterías de ácido-plomo reguladas por válvula (VRLA), mayormente usadas para este tipo de aplicaciones debido a su bajo costo en comparación con baterías de litio y bajo mantenimiento. Se utilizará como referencia el modelo 12V100FC de la marca EnerSys [53] cuyos datos de fábrica se muestran en la Figura 2.9.

Nominal Characteristics	
Nominal Voltage /V	25.6V
Nominal Capacity /Ah (25°C , 0.2C)	≥ 100Ah
Mechanical Characteristics	
Weight	48.5 lbs
Dimensions LxWxH	20.6 x 9.5 x 8.6 in
BCI	Group 4D
Terminal	F12/ M8
Electrical Characteristics	
Voltage Window	28.4 – 29.2V
Charge Voltage	28.8V
Standby Voltage	27.7V
Max. Continue Discharge Current	95A
Max. Permanent Discharge Current	150A 3Sec.
Max. Continue Charge Current	30A
Operation Conditions	
Cycle Life (+20°C 0.2C 100%DOD)	>2500 Cycles
Operating Temperature	Discharge: - 4 – 140°F Charge: 32 – 140°F
Storage Temperature	32 – 86°F
Storage Duration	12 Months at 77°F
Safety Standard	UI1642 at cell level

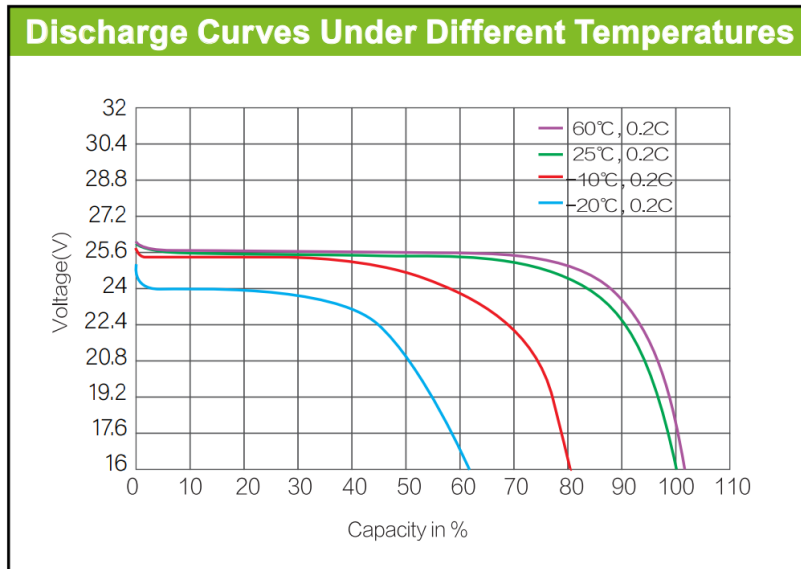
Figura 2.8. Especificaciones técnicas de la batería EP24100

Battery Type	Nominal Voltage (V)	Nominal Capacity (Ah)		Nominal Dimensions (mm)			Typical Weight (Kg)	Short Circuit Current (A) <sup>(2)</sup>	Internal Resistance (mΩ) <sup>(2)</sup>	Terminals
		10 hr rate to 1.80Vpc @ 20°C	8 hr rate to 1.75Vpc @ 77°F	Length	Width	Overall Height				
12V30F <sup>(3)</sup>	12	31	31	280	97	159	10.8	1327	9.87	M8 F
12V38F <sup>(3)</sup>	12	38	38	280	97	184	11.8	1415	8.88	M8 F
12V62F <sup>(3)</sup>	12	62	62	280	97	264	19.2	2080	5.98	M8 F
12V92F <sup>(1)(3)</sup>	12	92	92	395	105	264	27.6	2410	5.19	M8 F
12V100FC <sup>(1)(3)</sup>	12	100	100	395	108	288	31.0	1930	6.46	M8 F
12V101F <sup>(1)(4)</sup>	12	100	101	510	110	235	32.2	2351	5.35	M8 F
12V125F <sup>(1)(4)</sup>	12	125	126	561	105	316	44.5	2355	5.30	M6 M
12V155FS <sup>(1)(4)</sup>	12	150	155	561	125	283	48.5	3325	3.80	M6 M
12V170FS <sup>(1)(4)</sup>	12	170	170	561	125	283	50.8	3360	3.75	M6 M
12V190F <sup>(1)(4)</sup>	12	190	190	561	125	316	57.3	3625	3.50	M6 M

Notes: <sup>(1)</sup> With built-in or rope handles <sup>(2)</sup> Figures obtained via IEC method <sup>(3)</sup> With built-in manifold <sup>(4)</sup> Manifold available as an option (increases product height by 12mm)

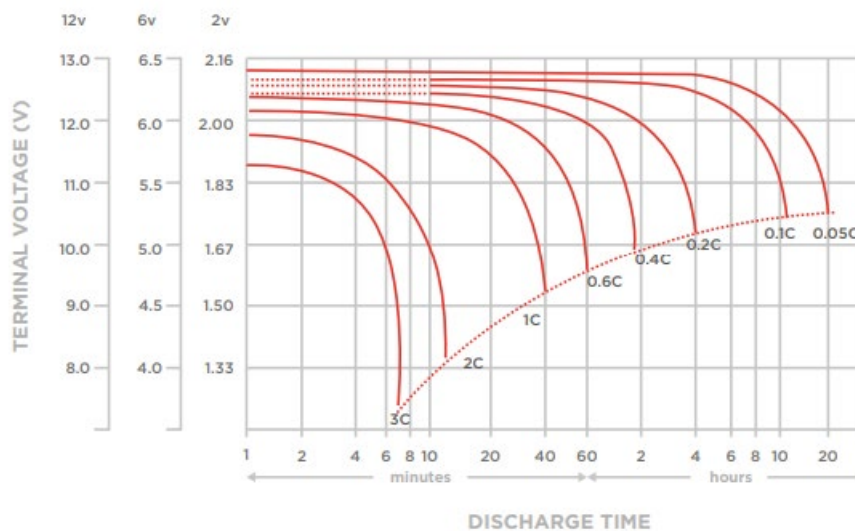
Figura 2.9. Especificaciones técnicas de la batería 12V100FC

El fabricante también ofrece la curva de descarga de las baterías (Figura 2.10 y Figura 2.11) la cual se utiliza para obtener los parámetros necesarios para modelar la batería. En [54] se detalla el procedimiento necesario para obtener dichos parámetros a partir de la hoja de datos de los fabricantes.



**Figura 2.10.** Curva de descarga de la batería EP24100

Cabe recalcar que las baterías tipo VRLA están formadas por celdas con voltaje nominal de 2V.



**Figura 2.11.** Curva de descarga de la batería 12V100FC

Así analizando las curvas de descarga para corriente de descarga de 0.2C, se presentan los parámetros de las baterías en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Parámetros obtenidos para las baterías a implementar

Parámetro	EP24100	12V100FC
Capacidad nominal	100Ah	100Ah
Resistencia interna (asumida)	2mΩ	4mΩ
Voltaje nominal	25.6V	12V
Capacidad máxima	100Ah	100Ah
Voltaje a máxima carga	26V	12.5V
Corriente de descarga	20A	20A
Capacidad a voltaje nominal	70Ah	60Ah
Voltaje en zona exponencial	25.6V	2Vx6 = 12V
Capacidad en zona exponencial	3Ah	1Ah

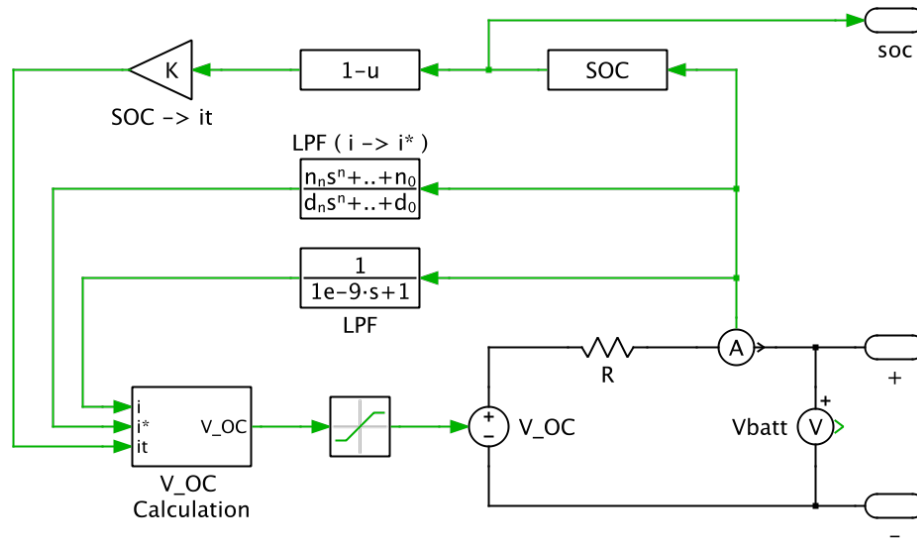
Con estos parámetros es posible calcular los valores utilizados en la Ecuación 1.2 y así obtener un modelo aproximado a la curva dada por el fabricante, dichos valores se encuentran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Valores característicos calculados a partir de los valores dados por el fabricante

Parámetro	EP24100	12V100FC
Voltaje sin carga ( $E$ )	26V	14.4V
Voltaje de batería constante ( $E_0$ )	25.6V	12V
Voltaje de polarización ( $K$ )	25.6V	12V
Capacidad de la batería ( $Q$ )	100Ah	100Ah
Amplitud de la zona exponencial ( $A$ )	0.4V	0V
Constante de tiempo inversa de la zona exponencial ( $B$ )	0.33Ah <sup>-1</sup>	0.33Ah <sup>-1</sup>
Resistencia interna ( $R$ )	2mΩ	4mΩ

Una vez parametrizadas y de acuerdo con los datos del fabricante, para el primer banco se utilizará 1 batería EP24100 a 25A de corriente nominal de descarga produciendo aproximadamente 600W. El segundo banco está compuesto por 4 baterías 12V100FC en serie así obteniendo un voltaje de 48V con 12A de corriente nominal, así generando de igual manera 600W. En total se puede obtener 1200W entre ambos bancos de baterías lo que permitiría alcanzar una autonomía de por lo menos 8 horas en operación continua a valores nominales.

En [55] se presenta el modelo de una batería genérica implementado en PLECS®, siguiendo las ecuaciones presentadas, así se implementa dicho modelo para la simulación.

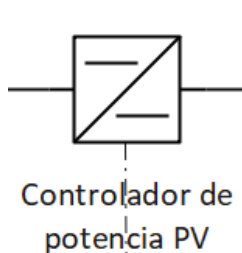


**Figura 2.12.** Modelo de una batería de iones de litio en PLECS®

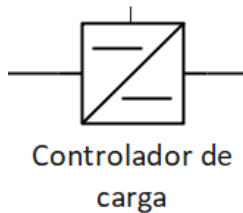
### 2.2.2.3 Conversores DC-DC

En primer lugar, se escoge la topología de cada uno de los convertidores que conforman el sistema. Cada topología será escogida en base a los valores de voltaje manejados en cada parte de la estructura propuesta en la Figura 18 y las ventajas y desventajas que ofrecen cada una como las descritas en la Tabla 1.2.

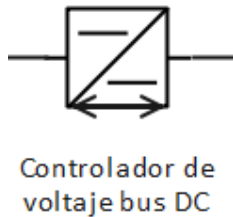
Hay 4 tipos de convertidores DC-DC importantes en el sistema; el controlador de potencia del panel fotovoltaico, los controladores de carga de batería, los controladores de voltaje del bus DC y el controlador de la carga. A continuación, se describe la función de cada uno y se definirá la topología que tendrá cada uno.



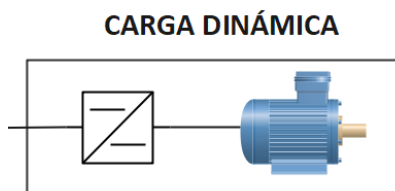
Este controlador será el encargado de regular el flujo de energía generada por el arreglo fotovoltaico mediante algoritmos de control de potencia como PPT o MPPT. Se escogió la topología Buck-Boost ya que se trabajará con voltaje variable en los paneles solares que puede ser mayor o menor al voltaje en el bus DC.



Este conversor será el encargado de controlar la carga y descarga de la batería por lo que es necesario el uso de un conversor bidireccional. Para el caso de las baterías se utilizará un **Buck bidireccional síncrono**, el cual ofrece una mayor eficiencia, facilidad de control y que permite elevar el voltaje de las baterías.



Estos conversores regularán en un valor fijo el voltaje del bus DC, en este caso se necesitan conversores tipo **Buck-Boost bidireccional síncrono**, ya que en la entrada de estos existirá un voltaje variable que será mayor o menor al voltaje de referencia en el bus DC.



Finalmente, se utilizará un conversor tipo **Buck** con una carga RL que simule la carga dinámica en un motor, con el fin de simplificar el modelo general del sistema en la simulación.

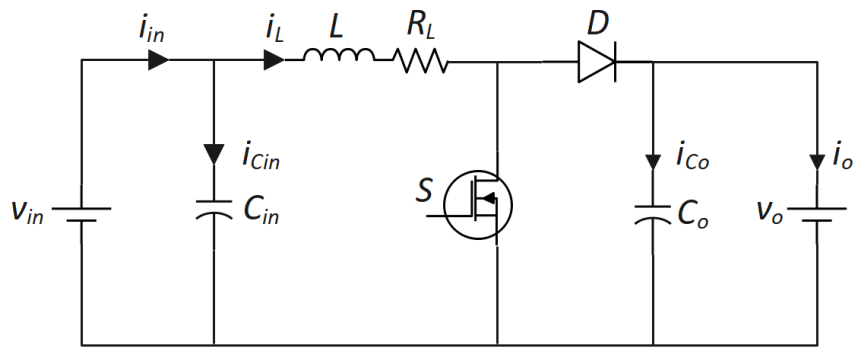
**Nota:** El analizar el desempeño de las topologías de conversores para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos no es alcance de este trabajo, por lo que a pesar de que otras topologías ofrezcan mejores características, se escogieron estos con el fin de simplificar el proceso de diseño y la modelación para su simulación.

## Dimensionamiento de componentes

Una vez escogidas las topologías de cada conversor, se tiene que dimensionar los componentes que lo conforman, en conversores estáticos se debe diseñar los componentes pasivos (inductores y capacitores) con cuidado, ya que de estos depende el modo de operación, rizados de voltaje y corriente, funciones de transferencia, etc.

Primero se tiene un conversor Buck-Boost correspondiente al controlador de potencia de los paneles fotovoltaicos, por lo que a partir del circuito de la Figura 2.13 y los requerimientos de diseño, se dimensionan los valores nominales y capacidades de los inductores y capacitores.





**Figura 2.13.** Conversor tipo Boost

Se escogió una frecuencia de conmutación del transistor de 40KHz debido a que es el límite que se alcanza para obtener una buena eficiencia y tiempos de simulación aceptables. Adicionalmente, se debe analizar los datos de placa (Figura 2.8) y la curva I-V (Figura 2.10) de los paneles solares en el punto de máxima potencia para determinar los valores de entrada que manejará el conversor. Así, se presentan a continuación los valores necesarios para el diseño.

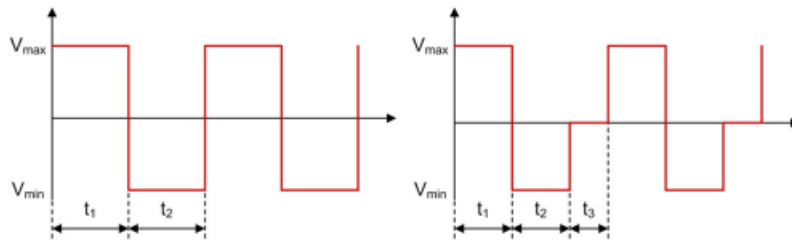
$$\begin{aligned}
 f_s &= 40\text{KHz} \\
 v_{in@P_{max}} &= 17.6 * 10 = 176\text{V} \\
 i_{in@P_{max}} &= 3.69 * 2 = 7.38\text{A} \\
 V_{outmax} &\approx 250\text{V}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Así junto con los datos obtenidos de los fabricantes y a partir de [56], se toman las ecuaciones y formas de onda necesarias para el diseño de los componentes. Donde es necesario aclarar que este conversor se diseñará en el régimen continuo.

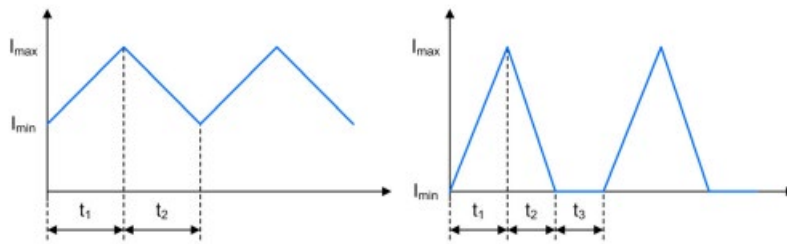
### Inductor $L$

Para calcular la inductancia se parte de la Ecuación 2.2 que describe la corriente en la misma.

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt
 \tag{2.2}$$



**Figura 2.14.** Formas de onda del voltaje en el inductor  $L$  en modo continuo y modo discontinuo



**Figura 2.15.** Formas de onda de la corriente en el inductor  $L$  en modo continuo y modo discontinuo

A partir de las formas de onda de la Figura 2.15, se puede derivar la corriente del inductor en la siguiente expresión, en base al tiempo de encendido o  $t_1$ :

$$I_{\text{rizado}} = \Delta I_L = \frac{1}{L} \Delta V_L \Delta T = \frac{1}{L} V_{in} t_1 \quad (2.3)$$

$$L = \frac{V_{in} t_1}{\Delta I_L}$$

Donde:

$$t_1 = DT = \frac{D}{f_s}$$

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{in}} = \frac{250}{250 + 176} = 0.59 \quad (2.4)$$

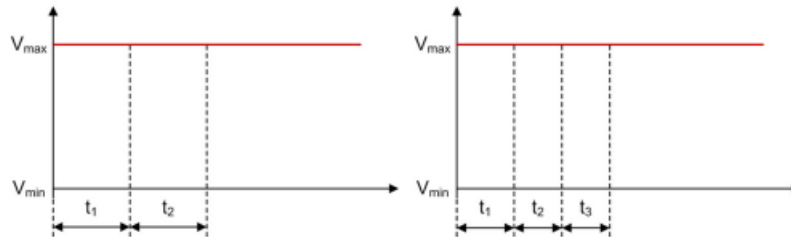
$$I_L = \frac{I_{in}}{D}$$

Así, se tiene una ecuación de la inductancia. Tomando en cuenta los parámetros establecidos en la Ecuación 2.1 y un rizado de corriente del 10% del valor de entrada  $I_{in}$ .

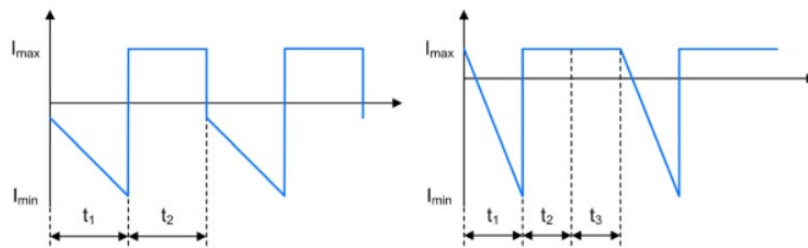
$$L = \frac{V_{in}D}{0.1 \frac{I_{in}}{D} f_s} = \frac{176(0.59)}{(0.1) \left(\frac{7.38}{0.59}\right) (40 \times 10^3)} = 1.027mH \quad (2.5)$$

$$L \approx 2mH @ R_L = 5.2m\Omega$$

### Capacitor de entrada $C_{in}$



**Figura 2.16.** Formas de onda del voltaje en el capacitor de entrada  $C_{in}$  en modo continuo y modo discontinuo



**Figura 2.17.** Formas de onda de la corriente en el capacitor de entrada  $C_{in}$  en modo continuo y modo discontinuo

Se realiza un análisis similar al caso del inductor, pero en este caso se analiza la ecuación del voltaje del capacitor:

$$V_{C_{in}} = \frac{1}{C_{in}} \int i_{C_{in}} dt \quad (2.6)$$

A partir de las formas de onda de la Figura 2.17, se puede derivar la corriente del inductor en la siguiente expresión, en base al tiempo de encendido o  $t_1$ :

$$\Delta V_{C_{in}} = \frac{1}{C_{in}} \Delta I_{C_{in}} \Delta T = \frac{1}{C_{in}} |I_{C_{in},min} + I_{C_{in},max}| t_1 \quad (2.7)$$

$$C_{in} = \frac{|I_{C_{in},min} + I_{C_{in},max}| t_1}{\Delta V_{C_{in}}}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 I_{Cin,min} &= -\frac{I_{in}}{D} - \frac{I_{rizado}}{2} + I_{in} \\
 I_{Cin,max} &= -\frac{I_{in}}{D} + \frac{I_{rizado}}{2} + I_{in} \\
 t_1 &= DT = \frac{D}{f_s} \\
 D &= \frac{V_o}{V_o + V_{in}}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

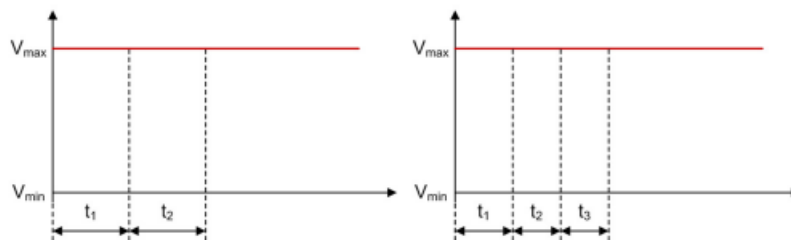
Así, se tiene una ecuación de la capacitancia. Tomando en cuenta los parámetros establecidos en la Ecuación 2.1 y un rizado de voltaje de  $\pm 200\text{mV}$ .

$$\begin{aligned}
 I_{Cin,max} &= -\frac{7.38}{0.59} - \frac{0.738}{2} + 7.38 = -5.497 \\
 I_{Cin,min} &= -\frac{7.38}{0.59} + \frac{0.738}{2} + 7.38 = -4.759
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

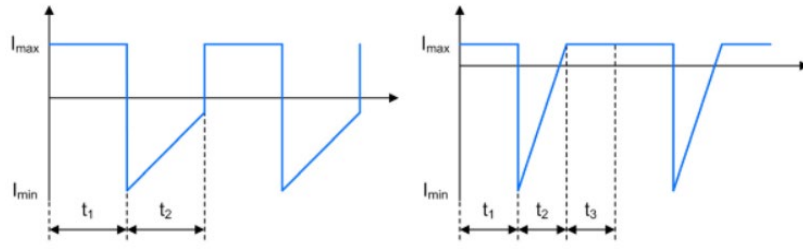
$$C_{in} = \frac{|I_{Cin,min} + I_{Cin,max}|D}{\Delta V_{Cin} f_s} = \frac{|-5.497 - 4.759|(0.59)}{(200 \times 10^{-3})(40 \times 10^3)} = 756.38 \mu F$$

$$C_{in} \geq 820 \mu F$$

### Capacitor de salida $C_o$



**Figura 2.18.** Formas de onda del voltaje en el capacitor de salida  $C_o$  en modo continuo y modo discontinuo



**Figura 2.19.** Formas de onda de la corriente en el capacitor de salida  $C_o$  en modo continuo y modo discontinuo

Se realiza un análisis similar al caso del capacitor de entrada:

$$V_{C_o} = \frac{1}{C_o} \int i_{C_o} dt \quad (2.10)$$

A partir de las formas de onda de la Figura 2.19, se puede derivar la corriente del inductor en la siguiente expresión, en base al tiempo de encendido o  $t_1$ :

$$\begin{aligned} \Delta V_{C_o} &= \frac{1}{C_o} \Delta I_{C_o} \Delta T = \frac{1}{C_o} I_o t_1 \\ C_o &= \frac{I_o t_1}{\Delta V_{C_o}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} t_1 &= DT = \frac{D}{f_s} \\ I_o &= I_{in} \frac{1-D}{D} \\ D &= \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Así, se tiene una ecuación de la capacitancia. Tomando en cuenta los parámetros establecidos en la Ecuación 2.1 y un rizado de voltaje de  $\pm 200\text{mV}$ .

$$\begin{aligned} C_o &= \frac{I_{in}(1-D)}{\Delta V_{C_o} f_s} = \frac{(7.38)(1-0.59)}{(200 \times 10^{-3})(40 \times 10^3)} = 378.225 \mu F \\ C_o &\geq 390 \mu F \end{aligned} \quad (2.13)$$

Para los convertidores restantes se deben considerar otros factores. En primer lugar, las baterías deben ser capaces de abastecer la potencia nominal del sistema de 1KW por lo que tomando los valores de datos de placa de las baterías de la Tabla 3, para ambas baterías, se determina la corriente de carga mediante el punto de máxima potencia de los paneles fotovoltaicos, valor que se tomará como punto de diseño del convertidor.

$$\begin{aligned}
 P_{pv} &= P_{bat} \\
 V_{mppt}I_{mppt} &= n_{bat}V_{bat}I_{bat} \\
 I_{bat} &= \frac{V_{mppt}I_{mppt}}{n_{bat}V_{bat}} = \frac{(176V)(7.38A)}{(2)(25.6V)} = 25.37A \\
 I_{bat} &= 30A
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Los convertidores encargados de controlar el bus DC, fueron diseñados con una corriente de rizado del 50%, ya que no es necesario un valor menor y eso ayuda a reducir el valor de inductancia. No hubo la necesidad de dimensionar capacitores de entrada debido a que están conectados en serie con capacitores ya dimensionados. Como fue establecido se tomó como voltaje máximo de bus DC.

$$V_{bus} = 120\sqrt{2} V \tag{2.10}$$

Realizando un proceso similar, se obtuvieron los valores de los diferentes componentes de todos los convertidores del sistema. A continuación, se resumen los valores obtenidos en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Valores de componentes a implementar

Convertidor	Elemento	Valor
Buck-Boost conmutado por diodo (Control de potencia de paneles fotovoltaicos)	$L$	2mH @ 5.2mΩ
	$C_{in}$	820μF
	$C_o$	620μF
Buck síncrono (Control de potencia baterías)	$L$	2mH @ 2mΩ
	$C_{in}$	620μF
	$C_o$	1μF
Buck-Boost síncrono (Control de voltaje bus DC)	$L$	2mH @ 5.2mΩ
	$C_{in}$	N/A

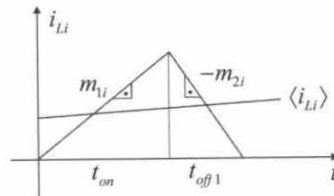
	$C_o$	620 $\mu$ F
Buck conmutado por diodo (Control de potencia en la carga)	$L$	1mH @ 5.2m $\Omega$
	$C_{in}$	N/A
	$C_o$	330 $\mu$ F

**Nota:** Los valores fueron modificados conforme a las pruebas realizadas en la simulación.

## 2.3 DISEÑO DE CONTROLADORES BASADO EN ÁLGEBRA LINEAL (LABC)

### 2.3.1 MODELAMIENTO DE CONVERTORES DC-DC

Los convertidores de energía son sistemas no-lineales donde diferentes estructuras son periódicamente conmutadas entre encendido y apagado. La no-linealidad se puede eliminar al obtener un modelo promedio de la operación del convertor en un ciclo. La corriente del inductor determina las mayores dinámicas dentro del convertor, en donde se presentará una forma de onda con una pendiente positiva ( $m_{1i}$ ) y una negativa ( $m_{2i}$ ) como se muestra en la Figura 2.20.



**Figura 2.20.** Forma de onda de la corriente en el inductor en un ciclo arbitrario

Para desarrollar el modelo matemático promediado es necesario determinar las derivadas de las variables de estado. En caso de la corriente en el inductor se lo puede aproximar de acuerdo con la corriente instantánea obtenida en base a las pendientes  $m_{1i}$  y  $m_{2i}$  que se describe en la Ecuación 2.2.

$$\frac{di_{Li}}{dt} = \frac{t_{on}}{t_s} m_{1i} - \frac{t_{off1}}{t_s} m_{2i} \quad (2.2)$$

Donde:

$$t_s = t_{on} + t_{off1}$$

Conducción continua

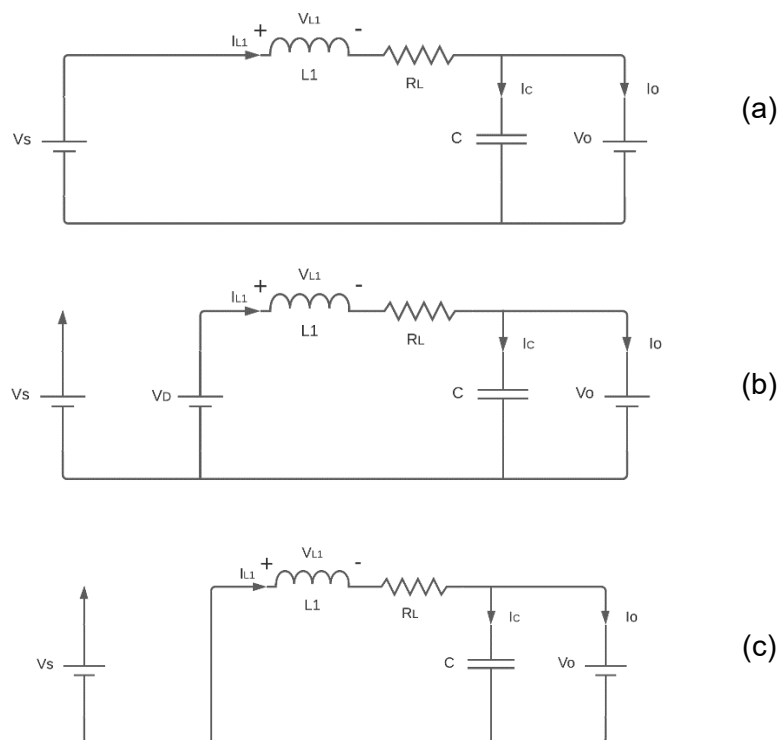
$$t_s = t_{on} + t_{off1} + t_{off2}$$

Conducción discontinua

Por otro lado, para el voltaje en el capacitor, la derivada se la puede obtener en base a las corrientes de carga y descarga del capacitor como se muestra en la Ecuación 2.3.

$$\frac{dv_{Ci}}{dt} = \frac{i_{Ci+}}{Ci} - \frac{i_{Ci-}}{Ci} \quad (2.3)$$

Para obtener los parámetros de las anteriores ecuaciones se analizan los circuitos equivalentes, tal como se muestra en la Figura 2.21 sobre un convertor Buck, el cual considera la resistencia serie equivalente del inductor y el voltaje de polarización del diodo, pero despreciando las resistencias  $R_{on}$  de los Mosfets al ser considerablemente bajas.



**Figura 2.21.** Estructuras del circuito equivalente (a) Interruptor 1 ON Interruptor 2 OFF (b) Conmutación por diodo (c) Conmutación síncrona

A partir de los circuitos equivalentes obtenidos de la conmutación del semiconductor de potencia en [57] se desarrollan las ecuaciones que describen las variables de estado, mediante el modelo promediado.



$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= \frac{t_{on}}{t_s} m_1 - \frac{t_{off1}}{t_s} m_2 \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{i_o}{C}\end{aligned}\quad (2.4)$$

Pendiente positiva

$$m_1 = \frac{v_{in} - R_L i_L - v_C}{L}$$

Pendiente negativa para convertidor conmutado por diodo

$$m_2 = \frac{R_L i_L + v_C + V_D}{L}$$

Pendiente negativa para convertidor síncrono

$$m_2 = \frac{R_L i_L + v_C}{L}$$

A partir de las ecuaciones anteriormente descritas, se pueden parametrizar las ecuaciones en función al ciclo de trabajo  $d$ , considerando que se operará en conducción continua. A continuación, se representa las ecuaciones para las topologías de los convertidores DC-DC a utilizar.

**Tabla 2.4.** Modelos matemáticos para topologías básicas de convertidores DC-DC

Convertidor	Ecuaciones
<b>Buck conmutado por diodo</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} i_L - \frac{1}{L} v_o + \frac{d}{L} v_{in} - \frac{1-d}{L} V_D$ $\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C_o} - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_{mosfet}}{C_{in}} \rightarrow \frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_L}{C_{in}}$ <p>Asumiendo que:</p> $i_L \approx i_{mosfet}$
<b>Buck síncrono</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} i_L - \frac{1}{L} v_o + \frac{d}{L} v_{in}$

	$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C_o} - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_{mosfet}}{C_{in}} \rightarrow \frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_L}{C_{in}}$ <p>Asumiendo que:</p> $i_L \approx i_{mosfet}$
<b>Boost conmutado por diodo</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1-d}{L}v_o + \frac{1}{L}v_{in} + \frac{1-d}{L}V_D$ $\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C_o} - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_L}{C_{in}}$
<b>Boost síncrono</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1-d}{L}v_o + \frac{1}{L}v_{in}$ $\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C_o} - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{i_L}{C_{in}}$
<b>Buck-Boost conmutado por diodo</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1-d}{L}v_o + \frac{d}{L}v_{in} + \frac{1-d}{L}V_D$ $\frac{dv_o}{dt} = \frac{1-d}{C_o}i_L - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{1-d}{C_{in}}i_L$
<b>Buck-Boost síncrono</b>	$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L - \frac{1-d}{L}v_o + \frac{d}{L}v_{in}$ $\frac{dv_o}{dt} = \frac{1-d}{C_o}i_L - \frac{i_o}{C_o}$ $\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{i_{in}}{C_{in}} - \frac{1-d}{C_{in}}i_L$

Como se puede observar en la Tabla 2.4, las ecuaciones que rigen las dinámicas de los convertidores son no lineales, ya que existen productos de variables por lo que se requiere linealizarlas, utilizando derivadas parciales se obtienen ecuaciones lineales de los convertidores, como se muestra a continuación.

**Tabla 2.5.** Linealización de ecuaciones de topologías básicas de convertidores DC-DC

Convertidor	Ecuaciones
<b>Buck conmutado por diodo</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1}{L}\hat{v}_o + \frac{D}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_{in} + V_D}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{\hat{i}_L}{C_o} - \frac{\hat{i}_o}{C_o}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}} - \frac{\hat{i}_L}{C_{in}}$
<b>Buck síncrono</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1}{L}\hat{v}_o + \frac{D}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_{in}}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_o} - \frac{\hat{i}_L}{C_o}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_L}{C_{in}} - \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}}$
<b>Boost conmutado por diodo</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1-D}{L}\hat{v}_o + \frac{1}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_o + V_D}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{1-D}{C_o}\hat{i}_L - \frac{1}{C_o}\hat{i}_o - \frac{I_L}{C_o}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}} - \frac{\hat{i}_L}{C_{in}}$
<b>Boost síncrono</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1-D}{L}\hat{v}_o + \frac{1}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_o}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{1-D}{C_o}\hat{i}_L - \frac{1}{C_o}\hat{i}_o - \frac{I_L}{C_o}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}} - \frac{\hat{i}_L}{C_{in}}$
<b>Buck-Boost conmutado por diodo</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1-D}{L}\hat{v}_o + \frac{D}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_{in} + V_o + V_D}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{1-D}{C_o}\hat{i}_L - \frac{1}{C_o}\hat{i}_o - \frac{I_L}{C_o}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}} - \frac{1-D}{C_{in}}\hat{i}_L + \frac{I_L}{C_{in}}\hat{d}$
<b>Buck-Boost síncrono</b>	$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}\hat{i}_L - \frac{1-D}{L}\hat{v}_o + \frac{D}{L}\hat{v}_{in} + \frac{V_{in} + V_o}{L}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_o}{dt} = \frac{1-D}{C_o}\hat{i}_L - \frac{1}{C_o}\hat{i}_o - \frac{I_L}{C_o}\hat{d}$ $\frac{d\hat{v}_{in}}{dt} = \frac{\hat{i}_{in}}{C_{in}} - \frac{1-D}{C_{in}}\hat{i}_L + \frac{I_L}{C_{in}}\hat{d}$

### 2.3.2 DISEÑO DE CONTROLADORES LABC

El control basado en álgebra lineal se basa en el modelo en espacios de estados de los convertidores, por lo que partiendo de las ecuaciones lineales de la Tabla 2.5 se obtiene la representación del sistema. Como ejemplo se considera el modelo del convertidor tipo Buck conmutado por diodo.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\widehat{v}_o}{dt} \\ \frac{d\widehat{v}_{in}}{dt} \\ \frac{d\widehat{i}_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C_o} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_{in}} \\ -\frac{1}{L} & \frac{D_o}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_o \\ \widehat{v}_{in} \\ \widehat{i}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_o} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{in}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{V_{in} + V_D}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_o \\ \widehat{i}_{in} \\ \widehat{d} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Tomando en cuenta la estructura del sistema y las topologías de los convertidores DC-DC escogidas, en el caso del convertidor tipo Buck, este tendrá un voltaje constante en la entrada ya que este valor representa el voltaje en el bus DC, por lo que se puede eliminar la expresión  $\frac{d\widehat{v}_{in}}{dt}$ , quedando la siguiente representación en espacios de estado que servirá como punto de partida para el diseño del controlador

$$\begin{bmatrix} \frac{d\widehat{v}_o}{dt} \\ \frac{d\widehat{i}_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_o} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_o \\ \widehat{i}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_o} & 0 \\ \frac{D}{L} & 0 & \frac{V_{in} + V_D}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_{in} \\ \widehat{i}_o \\ \widehat{d} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Una de las grandes ventajas del LABC es que puede ser diseñado en base a tiempo continuo o discreto directamente, siendo necesario discretizar el modelo de la planta mediante aproximación de Euler con un periodo de muestreo  $T$ .

$$\begin{bmatrix} v_{o,n+1} \\ i_{L,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{o,n} \\ i_{L,n} \end{bmatrix} + T \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_o} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{o,n} \\ i_{L,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_o} & 0 \\ \frac{D}{L} & 0 & \frac{V_{in} + V_D}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in,n} \\ i_{o,n} \\ d_n \end{bmatrix} \right\} \quad (2.7)$$

El objetivo es solucionar el problema del seguimiento de la trayectoria aplicando álgebra lineal, por lo que se obtiene la ley de control  $d_n$  resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales.

$$Ad_n = b \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{in} + V_D}{L} \end{bmatrix} d_n = \begin{bmatrix} \frac{v_{o,n+1} - v_{o,n}}{T} - \frac{1}{C_o} i_{L,n} + \frac{1}{C_o} i_{o,n} \\ \underbrace{\frac{i_{L,n+1} - i_{L,n}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n}}_b \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida el sistema de ecuaciones requerido para resolver el seguimiento de trayectoria, lo primero conseguir una expresión que determine la variable secundaria o mejor llamada variable sacrificada. Adicionalmente, al no poder medir  $i_{o,n}$  directamente, se debe representarlo en función a la impedancia de salida  $Z_o$ .

$$i_{L,n} = - \left( \frac{v_{o,n+1} - v_{o,n}}{T} \right) C_o + \underbrace{\frac{v_{o,n}}{Z_o}}_{i_{o,n}} \quad (2.9)$$

Como se ve, así es posible representar matemáticamente el valor de una variable en función de otra, pero no cuenta con una expresión que describa el error en la misma, lo cual es la base en sistemas realimentados.

En este caso, el valor del voltaje de entrada  $v_{in,n+1}$  es expresado en el periodo  $n + 1$  como la diferencia entre el valor de referencia y el error, en donde es deseable que el error tienda a 0 por lo cual se inserta una constante que represente de sintonización  $k_1$ , la cual está entre 0 y 1 si es más cercana a 1 la respuesta temporal es más rápida, por otro lado, cuando sea más cercana a 0 la respuesta es más lenta pero más estable.

$$\begin{aligned} v_{o,n+1} &= v_{o,Ref,n+1} - e_{1,n+1} \\ e_{1,n+1} &= k_1 e_{1,n} \\ e_{1,n} &= v_{oRef,n} - v_{o,n} \\ 0 &> k_1 > 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Para obtener una solución exacta del sistema de la Ecuación 2.8, se debe satisfacer la siguiente condición.

$$rango(A) = rango([A \quad b]) \quad (2.11)$$

Con las consideraciones de la Ecuación 2.10, se tiene una expresión que mediante la variable sacrificada satisface la condición anterior, llamándose esta  $i_{Lez,n}$ .

$$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n}}{T} \right) C_o + \frac{v_{o,n}}{Z_o} \quad (2.12)$$

A continuación, se determina la ley de control al resolver el sistema de la Ecuación 2.8.

$$d_n = \frac{L}{V_{in} + V_D} \left[ \frac{i_{L,n+1} - i_{L,n}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right] \quad (2.13)$$

Se realiza el mismo análisis de la Ecuación 2.10, en donde se requiere una expresión matemática que esté en función del error en la medida de la variable a controlar en el periodo  $n + 1$ , en este caso la corriente en el inductor  $i_{L,n+1}$ , siendo la diferencia entre el valor de la corriente que satisface la condición de la Ecuación 2.11 y el error, así obteniendo otro parámetro de sintonización  $k_2$ .

$$\begin{aligned} i_{L,n+1} &= i_{Lez,n+1} - e_{2,n+1} \\ e_{2,n+1} &= k_2 e_{2,n} \\ e_{2,n} &= i_{Lez,n} - i_{L,n} \\ 0 &> k_2 > 1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Como se observa, para determinar la ley de control es necesario obtener el valor de la corriente en el inductor en el periodo  $n + 1$  mediante el término  $i_{Lez,n+1}$ . Sin embargo, se puede calcular este término en base a series de Taylor.

$$i_{Lez,n+1} = i_{Lez,n} + \frac{di_{Lez,n}}{dt} T + \frac{d^2 i_{Lez,n}}{dt^2} \frac{T^2}{2} + \dots + c \quad (2.15)$$

Donde  $c$  es un término complementario y si el periodo de muestreo  $T$  es pequeño como en este caso que está en el rango de los microsegundos,  $i_{Lez,n+1}$  puede ser aproximado de la siguiente manera.

$$i_{Lez,n+1} \approx i_{Lez,n} \quad (2.16)$$

Así se obtiene la ley de control que elimina el problema del seguimiento de trayectoria mediante las mediciones del voltaje de entrada y corriente en el inductor. También se requiere la realimentación del voltaje de entrada, que en este caso es el voltaje en el bus DC midiéndose directamente así que no se requiere consideraciones adicionales.

$$d_n = \frac{L}{V_{in} + V_D} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right] \quad (2.17)$$

Para demostrar que las condiciones se cumplen se reemplaza la Ecuación 2.17 en la Ecuación 2.7.

$$\begin{bmatrix} v_{o,n+1} \\ i_{L,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{T}{C_o Z_o}\right) v_{o,n} + \frac{T}{C_o} i_{L,n} \\ i_{Lez,n} - k_2 (i_{Lez,n} - i_{L,n}) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Al expresar la Ecuación 2.18 considerando  $\frac{T}{C_o Z_o} \approx 0$ , en función de los errores del voltaje y corriente de las Ecuaciones 2.10 y 2.14 se determina como el LABC mediante parámetros de sintonización  $k$  produce que a medida que los muestreos  $nT$  aumenten, el error tienda a 0.

$$\begin{bmatrix} e_{1,n+1} \\ e_{2,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & \frac{T}{C_o} \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1,n} \\ e_{2,n} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\text{Si } 0 < k_1, k_2 < 1 \Rightarrow e_{1,n}, e_{2,n} \rightarrow 0$$

Como se mencionó en la primera sección una de las desventajas del LABC es el hecho de que considera un sistema sin perturbaciones, además que siendo un sistema modelado matemáticamente existen errores o incertidumbres de modelado. Estas se pueden eliminar si se toma en cuenta una perturbación externa adaptativa  $E_n$ , tal como se describe en la Ecuación 1.17. Así el sistema de la Ecuación 2.7 se representa de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} v_{o,n+1} \\ i_{L,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{o,n} \\ i_{L,n} \end{bmatrix} + T \left\{ \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_o} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{o,n} \\ i_{L,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_o} & 0 \\ \frac{D}{L} & 0 & \frac{V_{in} + V_D}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in,n} \\ i_{o,n} \\ d_n \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} E_n \quad (2.20)$$

Donde  $E_n$  no es conocida y lleva a una expresión análoga a la Ecuación 2.19, donde se evidencia claramente la influencia de la incertidumbre  $E_n$  sobre el seguimiento de trayectoria.

$$\begin{bmatrix} e_{1,n+1} \\ e_{2,n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & \frac{T}{C_o} \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1,n} \\ e_{2,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} E_n \quad (2.21)$$

Se debe considerar dos conceptos relacionados a la diferencial de la incertidumbre.

- La diferencial de primer orden de  $E_n$  es definida como  $\delta E_n = E_{n+1} - E_n$ , la diferencial de segundo orden es definida como  $\delta^2 E_n = \delta(\delta E_n) = \delta(E_{n+1} - E_n) = E_{n+2} - 2E_{n+1} + E_n$  así sucesivamente definiendo a la diferencial de q-énésima orden es definida como  $\delta^q E_n = \delta(\delta^{q-1} E_n)$ .
- La q-énésima diferencial de un polinomio de orden  $q - 1$  es 0.

Así se puede demostrar que si se considera a  $E_n$  como constante, la diferencial es 0.

$$\delta E_n = E_{n+1} - E_n = 0 \quad (2.22)$$

Entonces para reducir la influencia  $E_n$ , se utiliza un término integral, calculada a partir de  $e_2$ . La importancia de este término es balanceada mediante un parámetro de sintonización  $K_2$ . Así obteniendo una ley de control capaz de reducir el error de modelado.

$$d_n = \frac{L}{V_{in} + V_D} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_2 U_{2,n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right] \quad (2.23)$$

Donde:

$$U_{2,n+1} = U_n + \int_{nT}^{(n+1)T} e_2(t) dt \cong U_{2,n} + e_{2,n} T \quad (2.24)$$

Reemplazando la Ecuación 2.21 en la Ecuación 2.19.

$$\begin{aligned} i_{L,n+1} &= i_{L,n} + \left[ \left( i_{Lez,n+1} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1} - \frac{R_L T}{L} i_{L,n} - \frac{T}{L} v_{o,n} + \frac{D_o T}{L} v_{in,n} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_L T}{L} i_{L,n} + \frac{T}{L} v_{o,n} - \frac{D_o T}{L} v_{in,n} \right] + E_n \\ i_{L,n+1} &= i_{Lez,n+1} - k_2 e_{2,n} + K_i U_{n+1} + E_n \\ i_{Lez,n+1} - i_{L,n+1} &= k_2 e_{2,n} - K_i U_{n+1} - E_n \end{aligned} \quad (2.25)$$

Después de realizar otras operaciones se tiene:

$$e_{2,n+2} - (k_2 - K_i T + 1) e_{2,n+1} + k_2 e_{2,n} = \frac{E_{n+1} - E_n}{\delta E_n} \quad (2.26)$$

Entonces, se puede observar que:



$$e_{2,n+1} \rightarrow 0 \text{ y } e_{1,n+1} = k_1 e_{1,n} + T e_{2,n} \rightarrow 0 \text{ cuando } n \rightarrow \infty \quad (2.27)$$

Adicionalmente, es notable que las expresiones del LABC, son una analogía del control en cascada, donde una expresión controla la corriente y la otra el voltaje. Así se puede insertar un término integral  $K_1$  en la Ecuación 2.12 resultando en la siguiente expresión:

$$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) C_o + \frac{v_{o,n}}{Z_o} \quad (2.12)$$

Una vez obtenida la ley de control (Ecuación 2.23) para un convertor tipo Buck conmutado por diodo, se aplica el mismo proceso para el resto de los convertidores del sistema, tomando en cuenta que en el caso del tipo Boost conmutados por diodo y Boost síncrono se debe controlar el voltaje de entrada, ya que están conectados a las fuentes (paneles fotovoltaicos y baterías).

De esta manera, con el mismo procedimiento se calcula la ley de control LABC para cada convertor, las cuales son mostradas en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Ley de control LABC diseñados para convertidores DC-DC

Convertor	Ley de control
Buck conmutado por diodo	$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) C_o + \frac{v_{o,n}}{Z_o}$ $d_n = \frac{L}{V_{in} + V_D} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$
Buck síncrono	$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) C_o + \frac{v_{o,n}}{Z_o}$ $d_n = \frac{L}{V_{in}} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$
Boost conmutado por diodo	$i_{Lez,n} = - \left( \frac{v_{inRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{in,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) C_{in} + \frac{v_{in,n}}{Z_o}$ $d_n = \frac{L}{V_o + V_D} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1-D}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$
Boost síncrono	$i_{Lez,n} = - \left( \frac{v_{inRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{in,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) C_{in} + \frac{v_{in,n}}{Z_o}$ $d_n = \frac{L}{V_o} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1-D}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$

Buck-Boost conmutado por diodo	$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) \frac{C_o}{1-D} + \frac{v_{o,n}}{Z_o(1-D)}$ $d_n = \frac{L}{V_{in} + V_o + V_D} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1-D}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$
Buck-Boost síncrono	$i_{Lez,n} = \left( \frac{v_{oRef,n+1} - k_1 e_{1,n} - v_{o,n} + K_1 U_{1,n+1}}{T} \right) \frac{C_o}{1-D} + \frac{v_{o,n}}{Z_o(1-D)}$ $d_n = \frac{L}{V_{in} + V_o} \left[ \frac{i_{Lez,n} - k_2 e_{2,n} - i_{L,n} + K_i U_{n+1}}{T} + \frac{R_L}{L} i_{L,n} + \frac{1-D}{L} v_{o,n} - \frac{D}{L} v_{in,n} \right]$

Como se observa, las ecuaciones tienen la misma estructura con pequeños cambios por lo que esto puede facilitar el proceso de diseño y obtener una ley de control generalizada para todas las topologías de convertidores DC-DC. Para el presente trabajo se utilizarán y analizarán cada una por separado.

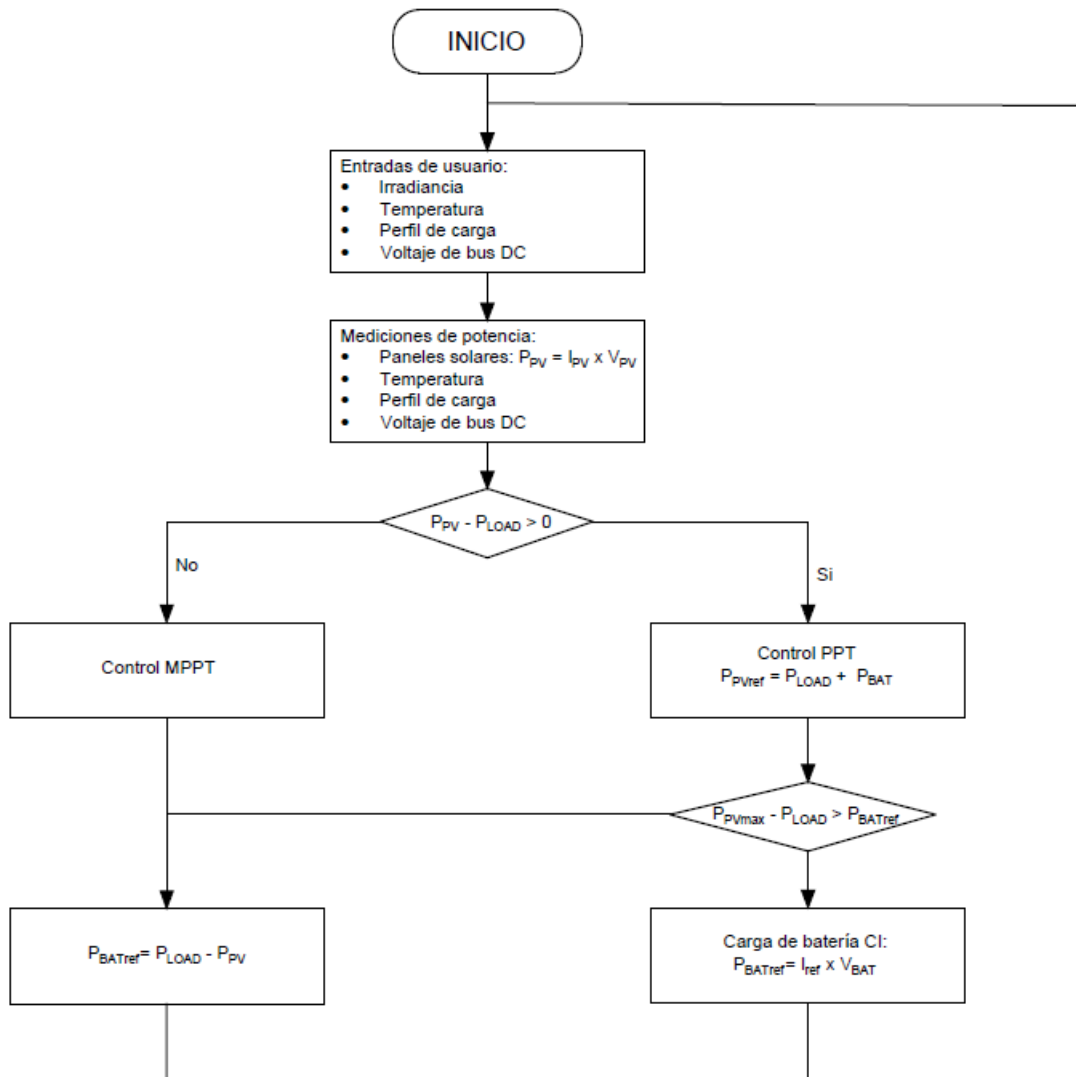
## 2.4 CONTROL DE FLUJO DE ENERGÍA

Una vez sintonizados los controladores, para cumplir con los requerimientos propuestos en la sección 2.1, se necesita de un algoritmo de control que regule el flujo de energía en todo el sistema sincronizadamente para operar en los diferentes modos mediante la medición de valores de voltaje y corriente en la carga, paneles fotovoltaicos, baterías y bus DC. A continuación, se presenta un diagrama de flujo que describe de manera general como se implementó dicho algoritmo de control.

Con la lógica de operación conceptualizada; a continuación, se presenta los lazos de control de cada convertidor, detallando las variables utilizadas por el controlador y las variables a controlar de cada una.

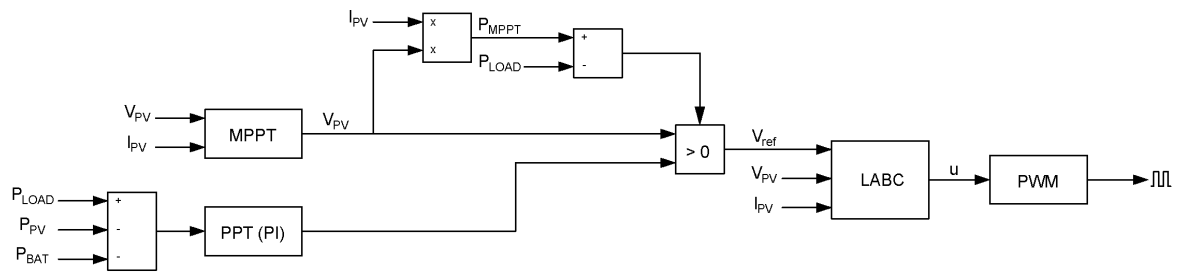
Para el control de potencia de los paneles fotovoltaicos se implementará el diagrama de control de la Figura 2.22 sobre el convertidor conectado a sus terminales (Boost), en el cual como se describió anteriormente; existen dos técnicas de control que son seleccionadas mediante la diferencia del punto de máxima potencia y la carga, así determinándose si se utiliza el algoritmo MPPT ya que al ser un sistema aislado no se requiere generar toda la potencia posible de los paneles sino solo la necesaria para la carga y las baterías, siendo este modo necesario únicamente cuando la potencia requerida en la carga sea igual o mayor al punto de máxima potencia de los paneles. Por otro lado, el algoritmo PPT que consiste en un controlador PID que permite generar potencia según los requerimientos de la carga. Así los

dos algoritmos se complementan y permiten la máxima eficiencia posible en cualquier escenario.



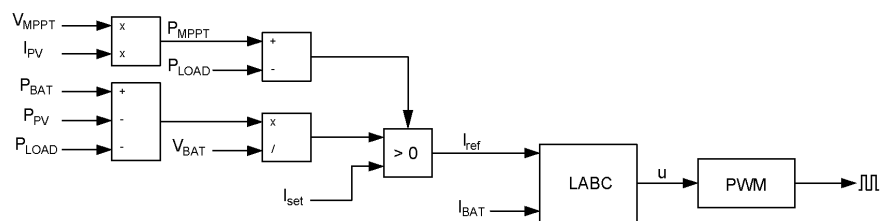
**Figura 2.22.** Diagrama de flujo del algoritmo de control de energía

En el caso de la carga y descarga de baterías el diagrama de control se presenta en la Figura 2.23, en donde de igual manera se seleccionará entre dos modos de operación mediante la diferencia entre la potencia máxima que pueden generar los paneles y la potencia requerida por la carga.



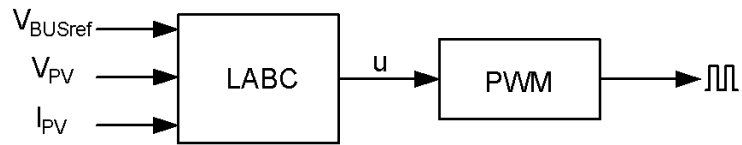
**Figura 2.23.** Diagrama de bloques del control de potencia de los paneles fotovoltaicos

En el primer modo se asignará una potencia de referencia dependiendo de la potencia que se necesite en la carga; en cambio, en el segundo modo cuando los paneles generen suficiente energía, la batería se cargará utilizando la técnica de corriente constante descrita en la sección anterior. Esto permitirá cumplir con los requerimientos de la carga, así como prolongar la vida útil de la batería, al mismo tiempo que se cumple con las lógicas de control.



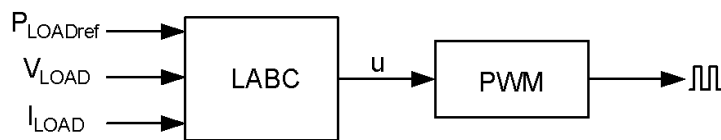
**Figura 2.24.** Diagrama de bloques del control de carga y descarga de las baterías

Para el control del voltaje del bus DC de la Figura 2.25, este consiste en un lazo de control que realimenta el voltaje y corriente en el bus que mediante el LABC se regula y mantiene constante y gracias a la estructura en cascada del controlador es capaz de rechazar perturbaciones producidas tanto en las fuentes como en la carga. Este algoritmo de control se repite en todos los convertidores que conectan las fuentes (paneles fotovoltaicos y baterías) con el bus DC.



**Figura 2.25.** Diagrama de bloques del control del voltaje del bus DC

Finalmente, para probar todo el sistema se utilizará una carga dinámica con control de potencia como se muestra en la Figura 2.26, que consiste en un lazo de control que realimenta el voltaje y corriente de la carga y se regula la potencia en la salida del conversor Buck mediante una referencia con una carga RL así simulando un el consumo de un motor.



**Figura 2.26.** Diagrama de bloques del control de potencia en la carga

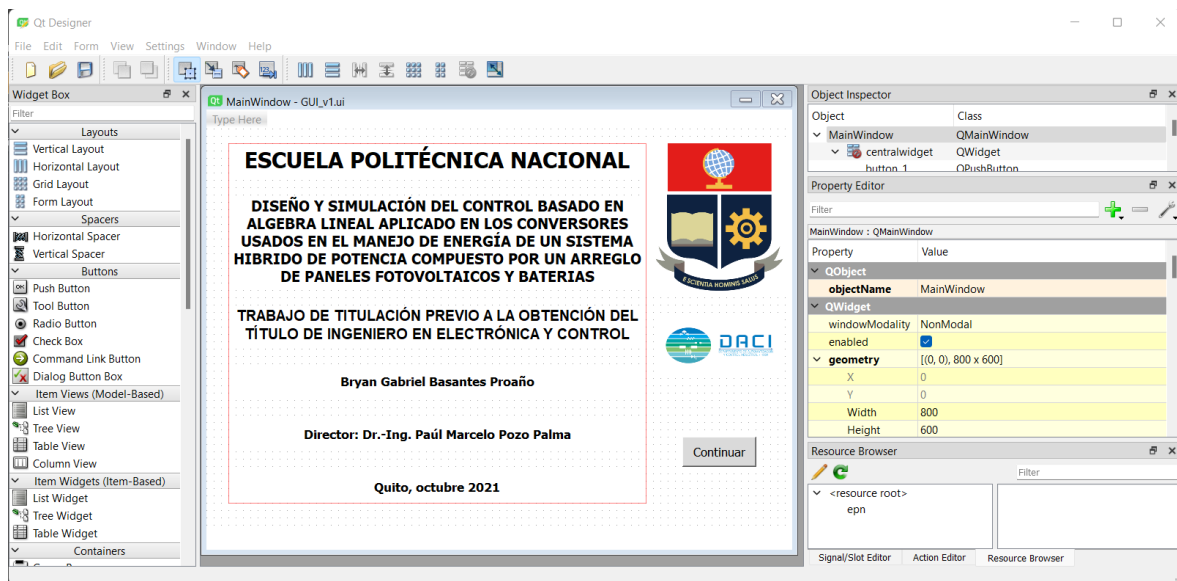
## 2.5 DISEÑO DE INTERFAZ GRÁFICA

Lo primero es conceptualizar el número de ventanas y funciones de estas. Así, se describen los parámetros de la interfaz gráfica a continuación.

- Se cuenta con una pantalla de inicio con el nombre del proyecto, autor, logos de la Escuela Politécnica Nacional, etc.
- Existe una segunda pantalla en donde se visualizará el esquema general del sistema con botones de navegación entre ventanas y adicionalmente se considera la idea de al hacer clic sobre cada componente para acceder a otras ventanas de menores dimensiones.
- Se implementarán ventanas flotantes con las siguientes funcionalidades:
  - Ventana de configuración de la radiación solar; donde se contará con 3 perfiles predefinidos y otra en la que se pueda establecer un valor fijo.

- Ventana de configuración de la temperatura; donde se contará con 2 perfiles predefinidos y otra en la que se pueda establecer un valor fijo.
  - Ventana de configuración de carga; donde se contará con 3 perfiles predefinidos y otra en la que se pueda establecer un valor fijo.
  - Ventanas de visualización de los circuitos de los convertidores, así como un esquema general que describe el control.
  - Ventana de monitoreo de paneles solares; consta de una descripción con los datos técnicos de los paneles solares y una sección para visualizar las curvas de corriente, voltaje y potencia generada. Adicionalmente, se cuenta con una gráfica que describe a la potencia vs voltaje para corroborar el funcionamiento del control PPT y MPPT.
  - Ventanas de monitoreo de baterías en donde se muestra una descripción de los datos técnicos de los mismos y las formas de onda del voltaje, corriente y potencia.
  - Ventana de monitoreo de la carga, donde se visualizará la potencia consumida por la carga y se comparará con respecto a la generada en los paneles fotovoltaicos y baterías.
  - Ventana de configuración y monitoreo del bus DC, donde se podrá establecer el setpoint y observar el voltaje, además de la corriente que fluye por el mismo.
- Se cuenta con una base de datos donde se encuentra los resultados de simulaciones realizadas con anterioridad con el fin de mostrar de manera inmediata las formas de onda obtenidas bajo diferentes perfiles de carga, irradiancia y temperatura.
  - Se podrá ejecutar simulaciones y mostrar los resultados en tiempo real.

Así tomando en cuenta los requerimientos de diseño se procedió a diseñar las ventanas en Qt Designer como se muestra en la Figura 2.27.



**Figura 2.27.** Desarrollo de ventanas del GUI en Qt Designer

Revisar los Anexos para visualizar las ventanas diseñadas. Por otro lado, es necesario recalcar que en el presente trabajo no se profundizará en la descripción detallada del código desarrollado, pero el diagrama de flujo de la Figura 2.28, describe de manera general cómo funciona el programa.

Así, como se detalla en el diagrama anterior se utilizarán diversas librerías encargadas de distintos trabajos. A continuación, se detallan las funciones de las librerías más importante:

PyQt5: Maneja la creación de widgets y funcionalidades relacionadas con el GUI.

Numpy: Maneja operaciones con matrices.

Matplotlib: Maneja las funciones relacionadas con implementación y animación de gráficas.

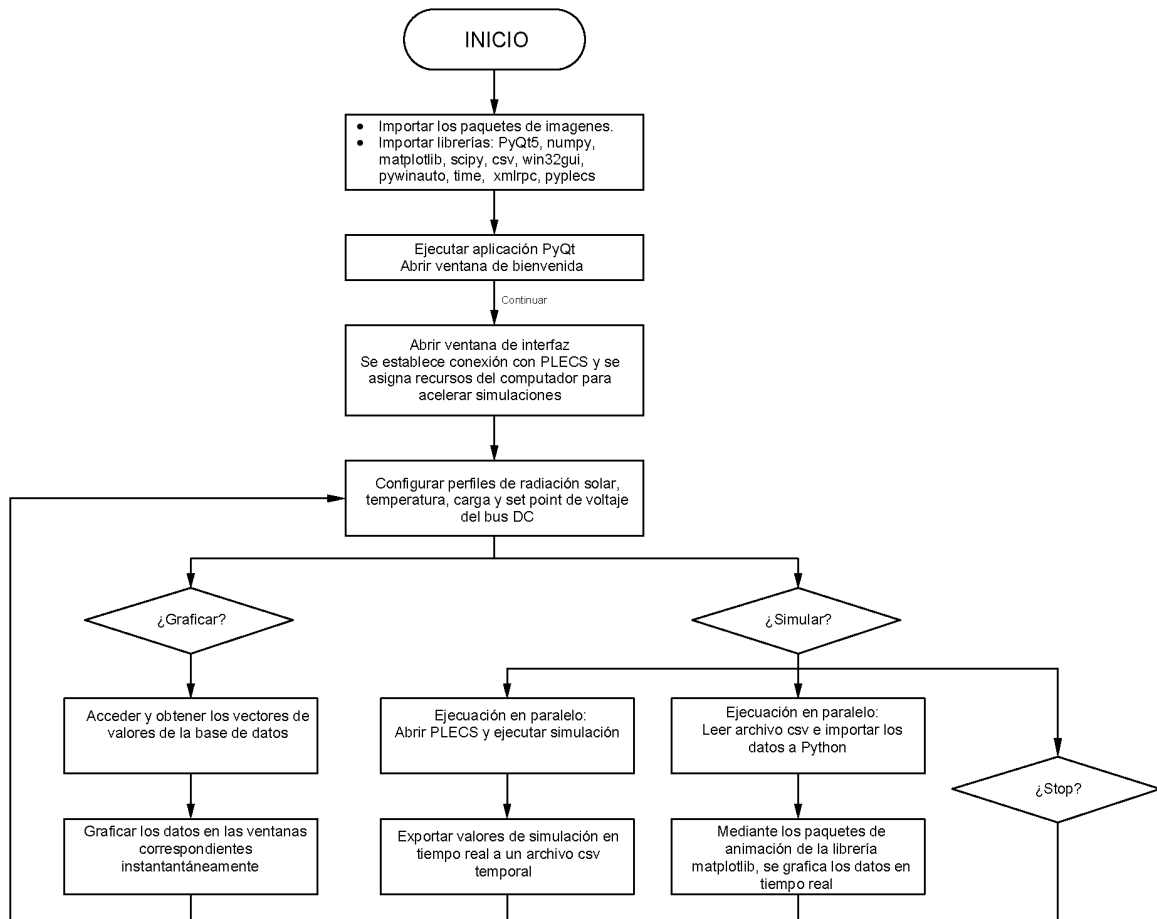
Scipy: Proporciona algoritmos para optimización, integración, interpolación de operaciones matemáticas.

Cvs: Permite importar, operar y exportar archivos .cvs.

Win32gui: Permite el operar la interfaz de Windows mediante código de Phytón.

Xmlrpc: Permite la conexión y ejecución de simulaciones en PLECS®.

Dos aspectos importantes del desarrollo del GUI, es que se utilizó como base del programa el código desarrollado en [58] denominado como PyPLECS®, en donde el autor desarrollo un Script con algunas funciones que permiten la comunicación con PLECS® desde Python®.



**Figura 2.28.** Diagrama de flujo del programa del GUI desarrollado

Por otro lado, es importante mencionar que, para ejecutar varias tareas en paralelo al GUI, como en este caso las simulaciones o la visualización de las gráficas en tiempo real, es necesario utilizar la función QThread [59] de PyQt5, que permite realizar esto, de caso contrario el GUI se congelaría y no permite el operar en ella hasta que se acaben las otras tareas.

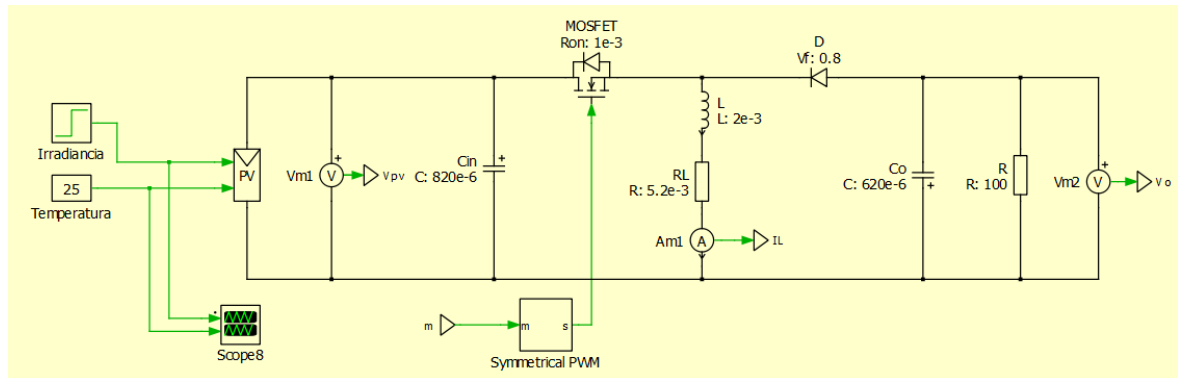
Así, se utilizaron estos parámetros y funciones en el desarrollo del GUI, donde se priorizó la interactividad con el GUI, pero al mismo tiempo el optimizar el tiempo de simulaciones y la visualización de resultados.



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES LABC

En la Figura 3.1 se presenta un esquema general en PLECS® del convertor de control de potencia de los paneles solares, en donde se utiliza como carga una resistencia de  $90\Omega$ , con una irradiancia variable y temperatura ambiente  $T = 25^\circ C$ . Este modelo servirá como ejemplo para demostrar el proceso de sintonización de los LABC que se utilizó.



**Figura 3.1.** Convertor tipo Boost para control de potencia de paneles solares implementado en PLECS®

##### 3.1.1 TIEMPO DE MUESTREO

En primer lugar, es necesario el determinar el periodo de muestreo  $T$  con el que operará el sistema, para un funcionamiento óptimo se recomienda que este sea lo más pequeño posible, pero en este caso se debe considerar que el reducir el tiempo de muestreo demasiado prolonga el tiempo de simulación por lo que hay que mantener un equilibrio entre estabilidad y rapidez de respuesta. De acuerdo con las recomendaciones realizadas en [39] este se puede calcular en base a la siguiente ecuación:

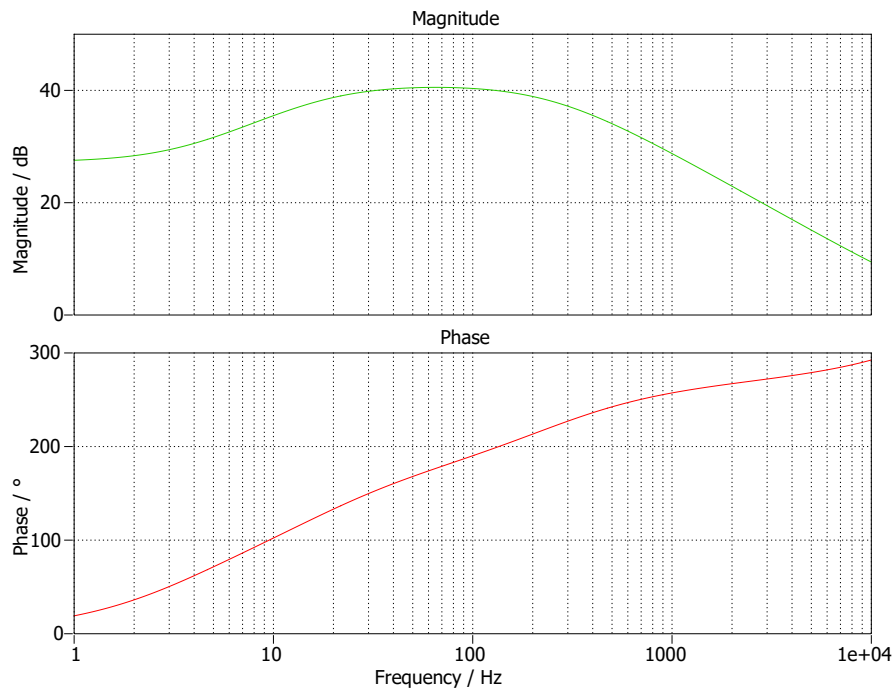
$$T = \frac{\min(\tau, t_0)}{10} \quad (2.28)$$

En electrónica de potencia se trabaja en el orden de los microsegundos, además que son sistemas de orden superior que no se pueden analizar apropiadamente en el dominio del tiempo. Los controladores en convertidores estáticos generalmente se diseñan en el dominio de la frecuencia, como se establece en [60] una regla de diseño establece que el tiempo de muestreo se establece como se describe en la Ecuación 2.29.

$$T = \frac{1}{f_T} \quad (2.29)$$

$$f_T = [20f_B \quad 40f_B]$$

Donde  $f_B$  es el ancho de banda del sistema. Este valor puede ser obtenido mediante el análisis del diagrama de Bode del del convertor. Con el convertor Buck-Boost y mediante las herramientas de análisis de PLECS® [61] se obtuvo la respuesta de ganancia y fase en frecuencia.



**Figura 3.2.** Diagrama de Bode del convertor Buck-Boost

El ancho de banda se define como el conjunto de frecuencias en donde la ganancia supera los -3dB. Se puede observar que este valor supera los 10kHz, pero alrededor de 250Hz la ganancia presenta una caída, por lo que se toma esta frecuencia como  $f_B$ , así se determina el periodo de muestreo como:

$$T = \frac{1}{f_T} = \frac{1}{20f_B} = \frac{1}{20(250)} \quad (2.30)$$

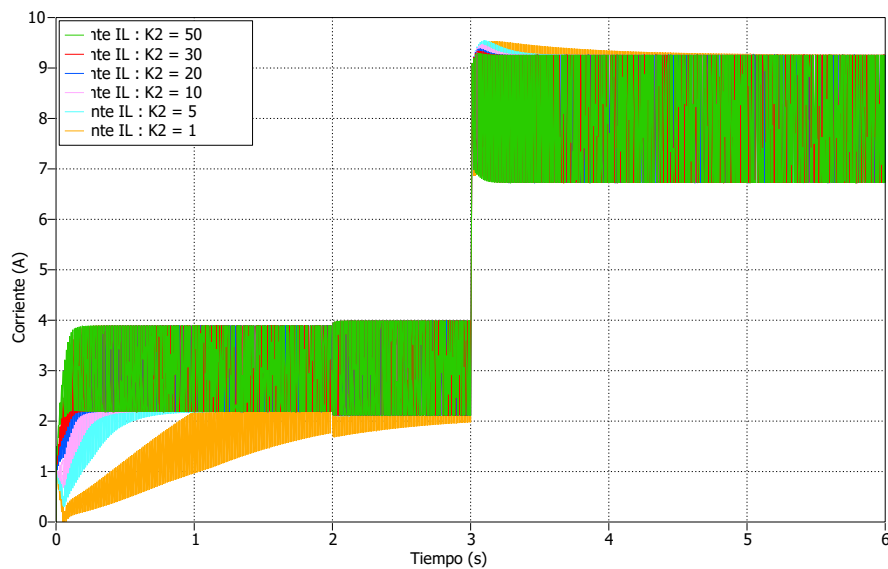
$$T = 200\mu s$$

A continuación, se presenta el caso de sintonización para el convertor Buck-Boost encargado de controlar la potencia generada en los paneles fotovoltaicos.

### 3.1.2 CONTROL DE CORRIENTE

Para los demás parámetros, no se han desarrollado técnicas específicas para sintonizar este tipo de controladores por lo que los autores en [35] proponen aproximaciones, por otro lado, una ventaja del LABC es que de acuerdo con las ecuaciones de la Tabla 2.6 el controlador trabaja con una estructura en cascada regulando la corriente y voltaje; por lo tanto, es posible sintonizarlos por separado.

De acuerdo con la Tabla 2.6, el LABC consta de dos ecuaciones; una está en función de la corriente mediante una señal de referencia  $i_{ez_n}$ , donde se implementó una señal de referencia tipo paso de 3A a 8A. Con  $k_2 = 0$  y mediante aproximaciones Monte Carlo se sintoniza  $K_2$  comparando los índices de desempeño ISE y TVU.



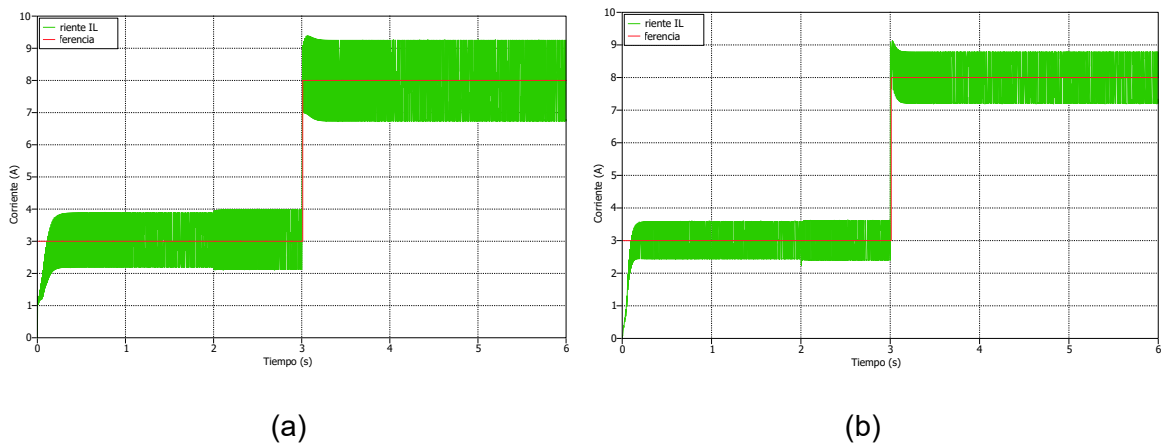
**Figura 3.3.** Corriente en el inductor en función a  $K_2$

**Tabla 3.1.** Índices de desempeño de acuerdo con diferentes valores de  $K_2$

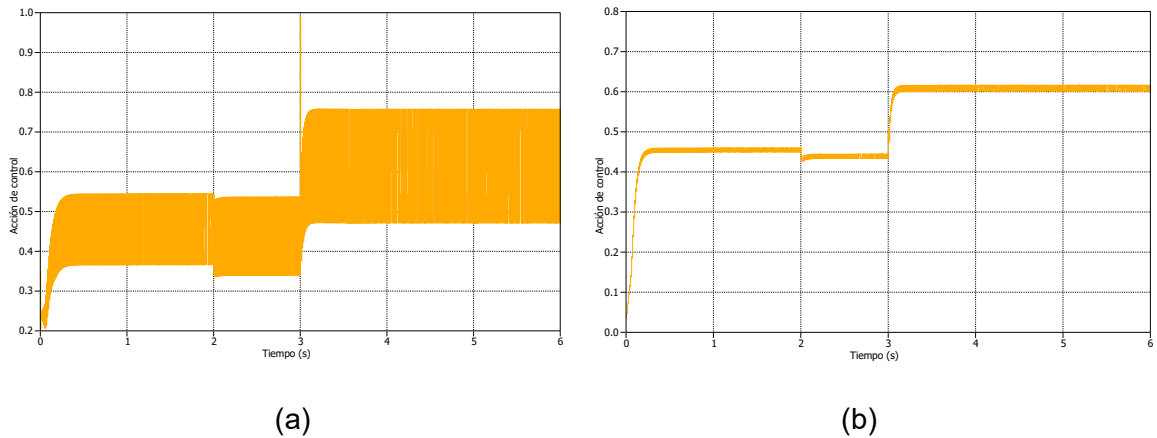
$K_2$	ISE	TVU
1	6.840	0.783
5	2.361	0.847
10	1.804	0.855
20	1.541	0.860
30	1.460	0.861
50	1.403	0.863

De acuerdo con la Tabla 3.1 al aumentar el parámetro integrador más allá de 20, no existen cambios significativos en el error o en la señal de control, además escoger valores demasiado altos puede desestabilizar la respuesta, por lo que se escogió un valor de  $K_2 = 18.5$ .

Por otro lado, durante las pruebas se comprobó que parámetro  $k_2$  mejora el desempeño de la respuesta en la corriente y reduce el esfuerzo de control a medida que este valor se acerca a 1. En la Figura 3.4 y Figura 3.5 se presenta una comparativa de la señal de corriente, así como la acción de control a diferentes valores de  $k_2$ .



**Figura 3.4.** Respuesta de la corriente en el inductor con (a)  $k_2 = 0$  y (b)  $k_2 = 0.95$



**Figura 3.5.** Señal de control con (a)  $k_2 = 0$  y (b)  $k_2 = 0.95$

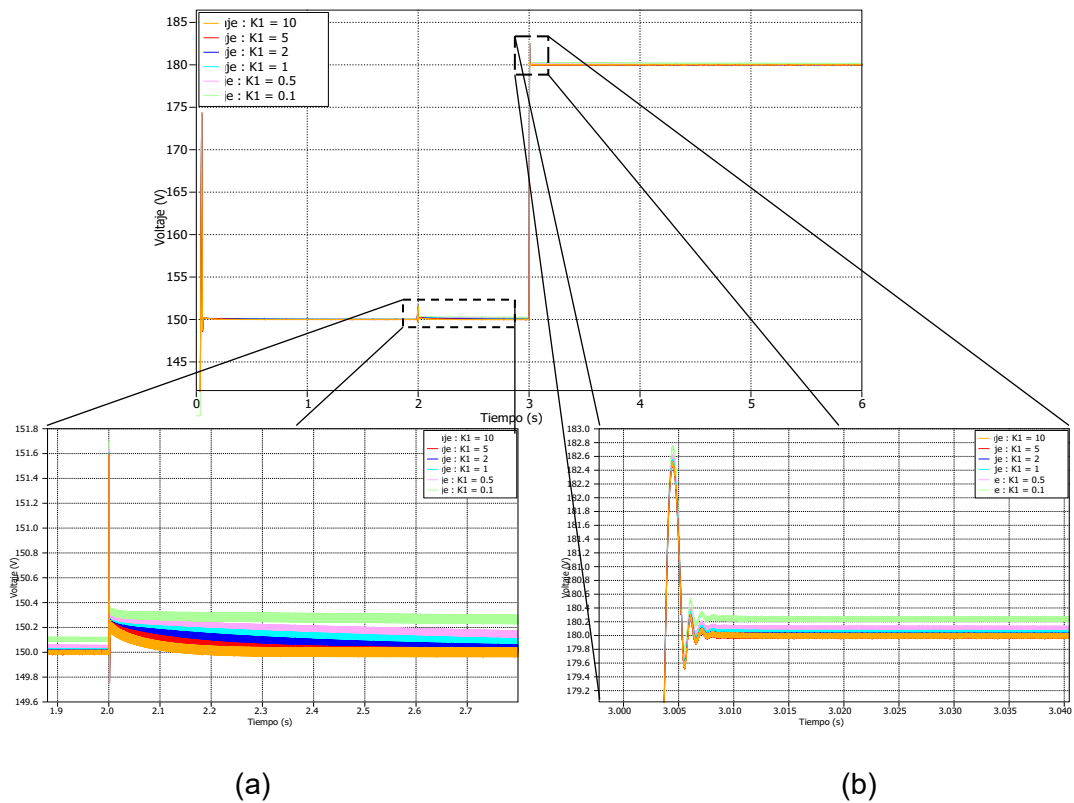
**Tabla 3.2.** Indices de desempeño con diferentes valores de  $k_2$

$k_2$	ISE	TVU
0	1.562	0.859
0.95	1.30	0.046

Como se observa en la Tabla 3.2, el ISE y TVU disminuye con el aumento de  $k_2$ . Se ve que este parámetro afecta significativamente a la acción de control, donde el esfuerzo de control es mucho menor y sin sobre picos, esto se comprueba al analizar las gráficas de la Figura 3.5, así escogiendo un valor de  $k_2 = 0.53$ .

### 3.1.3 CONTROL DE VOLTAJE

A continuación, se sintonizó el lazo de control de voltaje con un procedimiento similar al lazo de corriente, así mediante aproximaciones Monte Carlo (Figura 3.6) e índices de desempeño (Tabla 3.3), se pudo obtener un  $K_1 = 10.5$ .



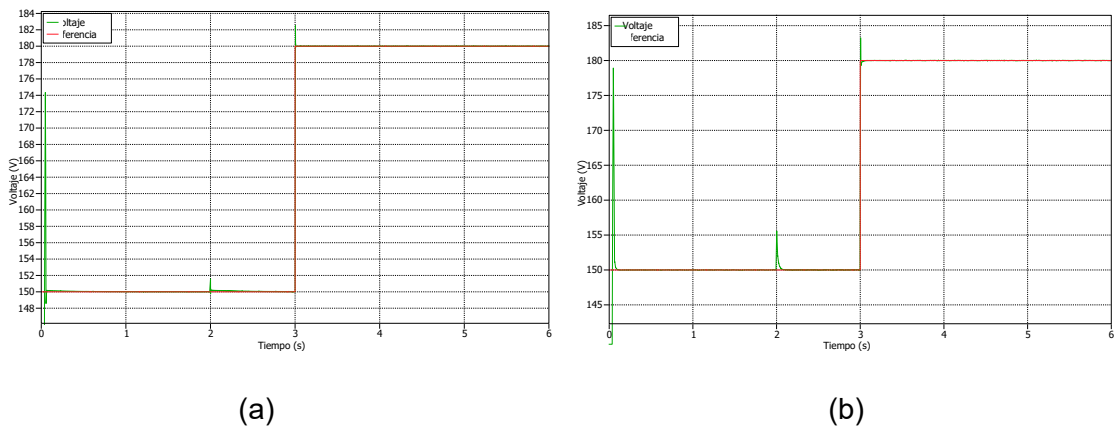
**Figura 3.6.** Voltaje en los paneles solares en función a  $K_1$  ante (a) perturbaciones y (b) cambios de referencia

**Tabla 3.3.** Índices de desempeño de acuerdo con diferentes valores de  $K_1$

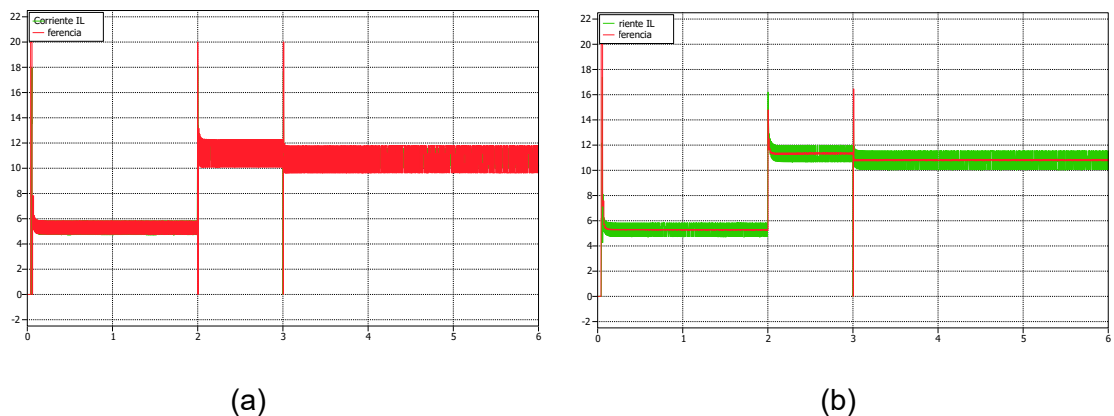
$K_1$	ISE Voltaje	ISE Corriente	TVU
0.1	2.777	4.296	0.059
0.5	2.618	4.298	0.059
1	2.597	4.298	0.059
2	2.592	4.298	0.059
5	2.593	4.298	0.059
10	2.600	4.299	0.059

En la Figura 3.7 se puede observar que a medida que  $K_1$  aumenta el error en estado estable disminuye, por otro lado, de acuerdo con los índices de desempeño de la Tabla 3.3, el valor óptimo es alrededor de  $K_2 = 2.5$ .

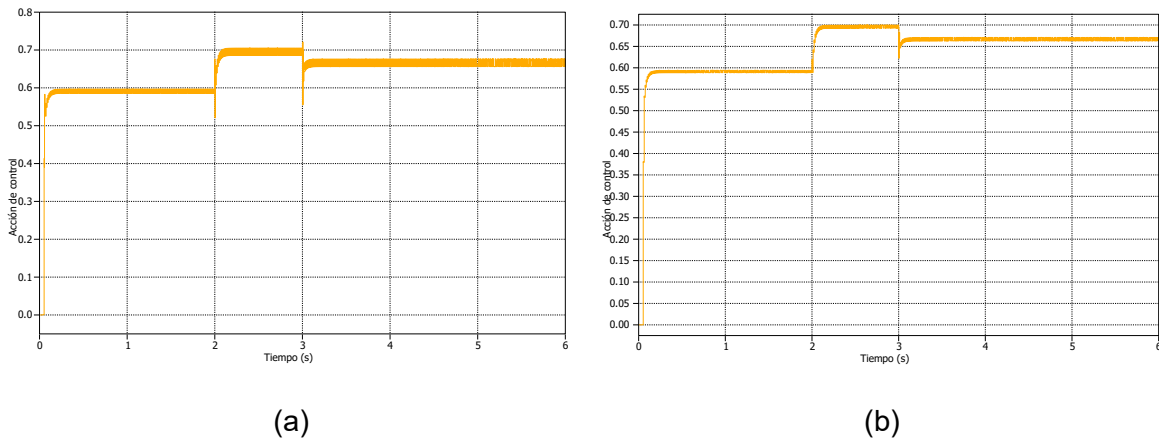
A continuación, se presentan los resultados obtenidos al variar el parámetro  $k_1$ , en donde se comparan las respuestas de voltaje en los paneles solares y corriente en el inductor, así como la señal de control.



**Figura 3.7.** Respuesta del voltaje de los paneles solares con (a)  $k_2 = 0$  y (b)  $k_2 = 0.95$



**Figura 3.8.** Respuesta de la corriente en el inductor con (a)  $k_2 = 0$  y (b)  $k_2 = 0.95$



**Figura 3.9.** Señal de control con (a)  $k_2 = 0$  y (b)  $k_2 = 0.95$

**Tabla 3.4.** Índices de desempeño con diferentes valores de  $k_1$

$k_1$	ISE Voltaje	ISE Corriente	TVU
0	2.592	4.298	0.059
0.95	4.662	1.342	0.025

Al comparar la respuesta del voltaje con  $k_1 = 0.95$  en la Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, se observa que a medida que  $k_1$  aumenta:

- El voltaje tiene un mayor sobre pico y tiempo de establecimiento ante perturbaciones, lo que aumenta el error en el voltaje.
- La referencia de la corriente es más estable; lo que representa un menor error en esta.
- La señal de control presenta menos oscilaciones y sobre picos ante cambios, lo que ofrece menos esfuerzo de control.

Estos aspectos se comprueban al analizar los índices de desempeño de la Tabla 3.4, en los cuales se observa como a medida que al aumentar  $k_1$ , se tiene una respuesta más estable a costo de más tiempo de establecimiento. En este caso se requiere un equilibrio entre desempeño y velocidad por lo que se toma un valor de  $k_1 = 0.75$ .

### 3.1.4 RESÚMEN DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS

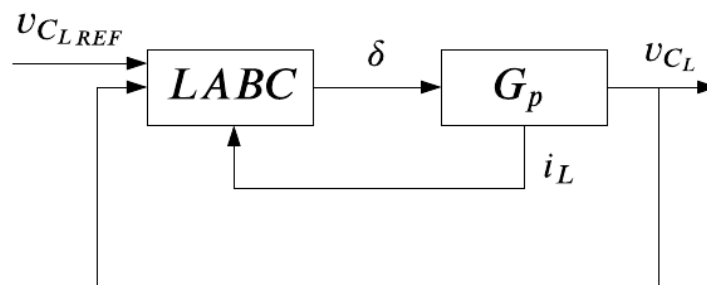
Tomando como referencia el caso anterior, siguiendo un procedimiento similar y utilizando diferentes criterios de diseño se procedió a sintonizar todos los convertidores, obteniendo los parámetros detallados en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Constates sintonizados para controladores LABC

Conversor	Control de voltaje		Control de corriente	
	$k_1$	$K_1$	$k_2$	$K_2$
Buck-Boost conmutado por diodo (Control de potencia en los paneles solares)	0.75	18.5	0.53	2.5
Buck síncrono (Control de carga y descarga de las baterías)	0.65	0.55	0.13	0.15
Buck conmutado por diodo (Control de potencia en la carga)	0.95	0.15	0.33	0.1
Buck-Boost síncrono (Control bus DC)	0.55	1.15	0.93	0.15

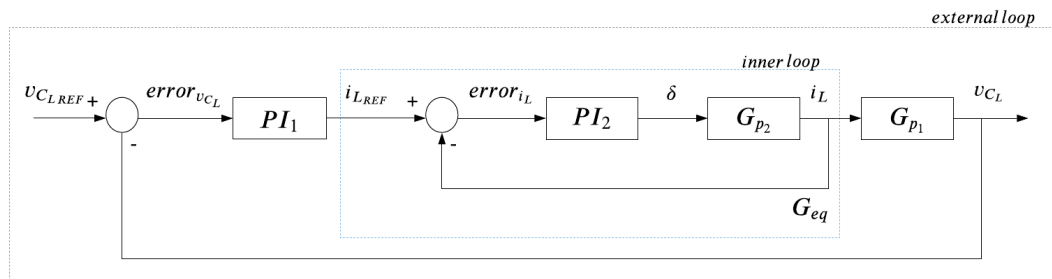
### 3.2 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO ENTRE EL CONTROLADOR LABC Y EL CONTROL EN CASCADA

Como se comprueba mediante el análisis de las ecuaciones del controlador LABC, este describe un control en cascada donde el lazo interno corresponde el control de corriente y el lazo externo, el control de voltaje, como se observa en la Figura 3.10 y Figura 3.11, en donde se presentan los diagramas de control del LABC con un control en cascada con reguladores PI.



**Figura 3.10.** Diagrama de bloques con LABC





**Figura 3.11.** Diagrama de bloques con control en cascada con controladores PI

Para comparar el desempeño de ambos controles, se utilizó el convertor DC-DC presentado en la Figura 3.11 y valores de parámetros sintonizados en la sección anterior para el LABC.

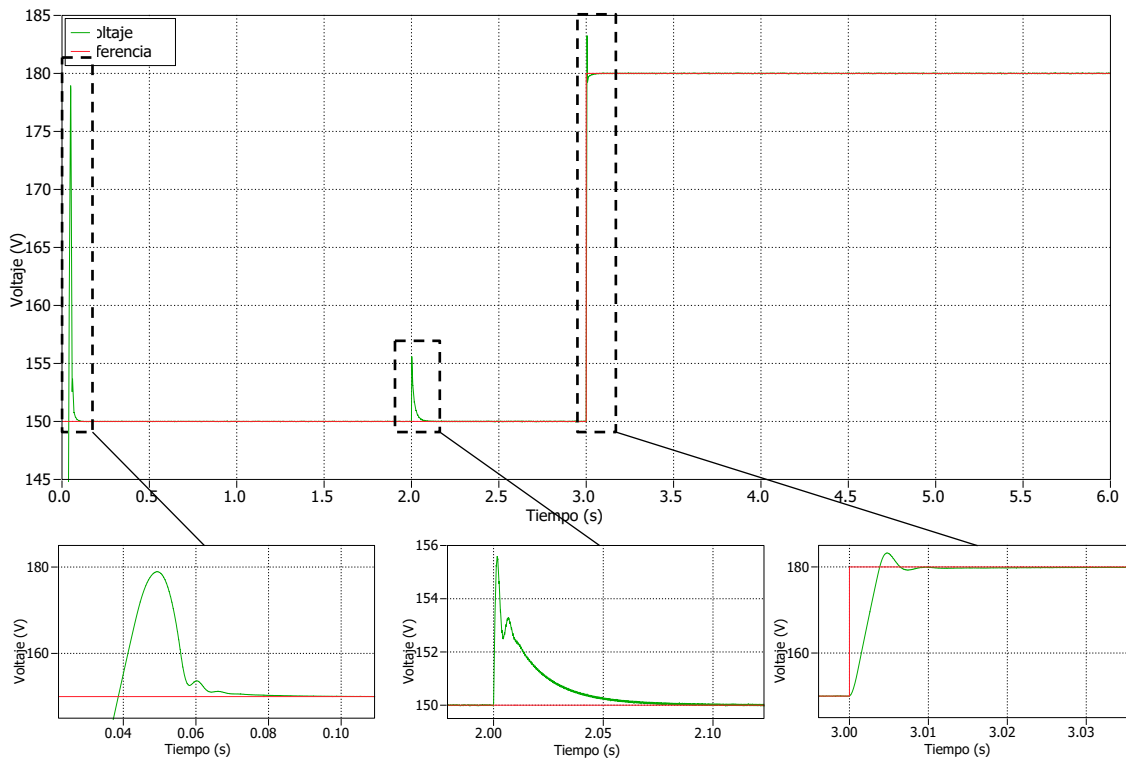
Por otro lado, para sintonizar los controladores PI, se analizó la respuesta en frecuencia y considerando una frecuencia de corte alrededor de los 100Hz, además, se realizaron pruebas tomando en cuenta el ISE del voltaje y corriente, escogiendo los parámetros que ofrecían menos error, de esta manera, se obtuvieron los valores descritos en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Valores sintonizados de los controladores PI

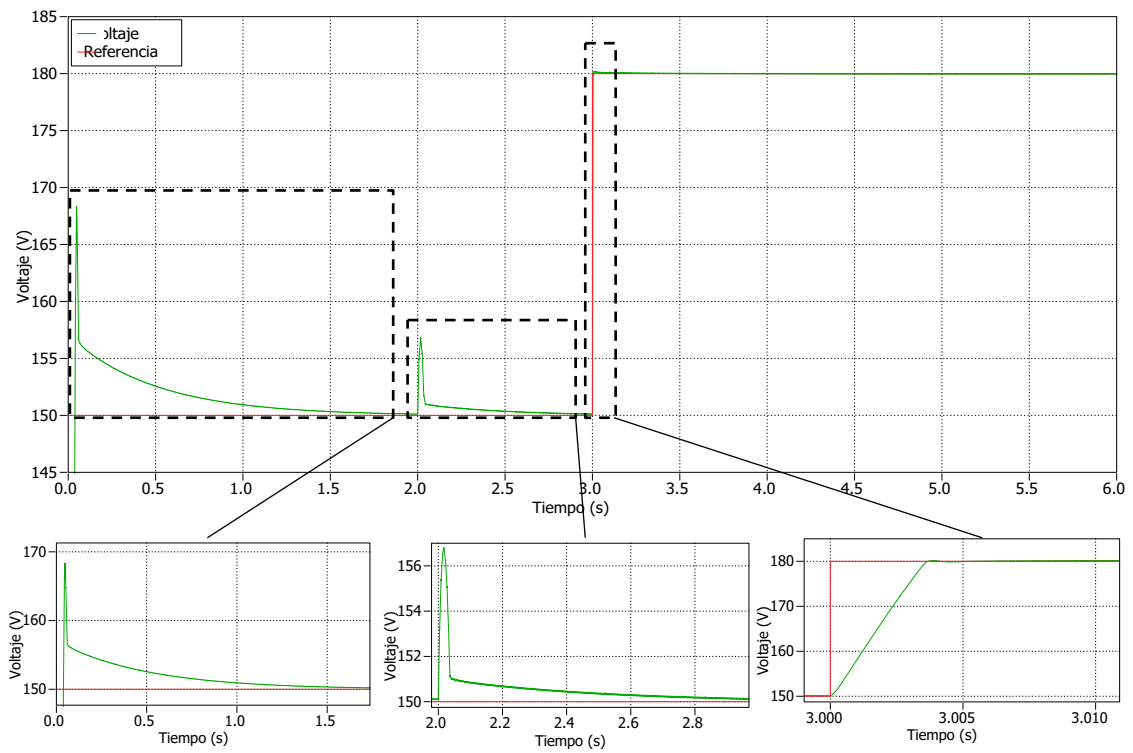
PI lazo de control de corriente		PI lazo de control de voltaje	
$k_p$	$k_i$	$k_p$	$k_i$
0.02	10	-5	-10

### 3.2.1 CASO IDEAL

Con los controladores PI diseñados, se procedió a comprobar los resultados realizando pruebas similares al utilizado en la sección anterior. Donde se ofrece una referencia fija y no se considera la presencia de varias perturbaciones debido al cambio de radiación solar o temperatura.



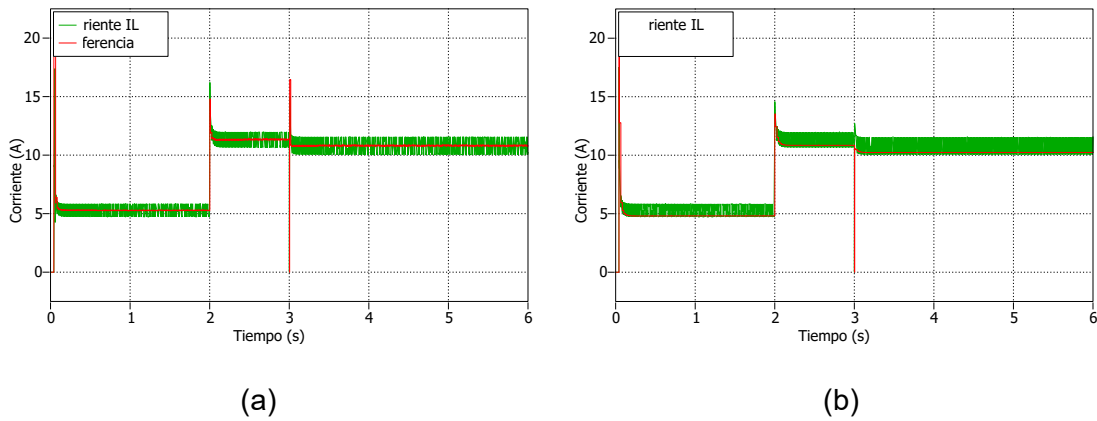
**Figura 3.12.** Respuesta de voltaje en los paneles solares ante perturbaciones y cambios de referencia con LABC



**Figura 3.13.** Respuesta de voltaje en los paneles solares ante perturbaciones y cambios de referencia con control en cascada

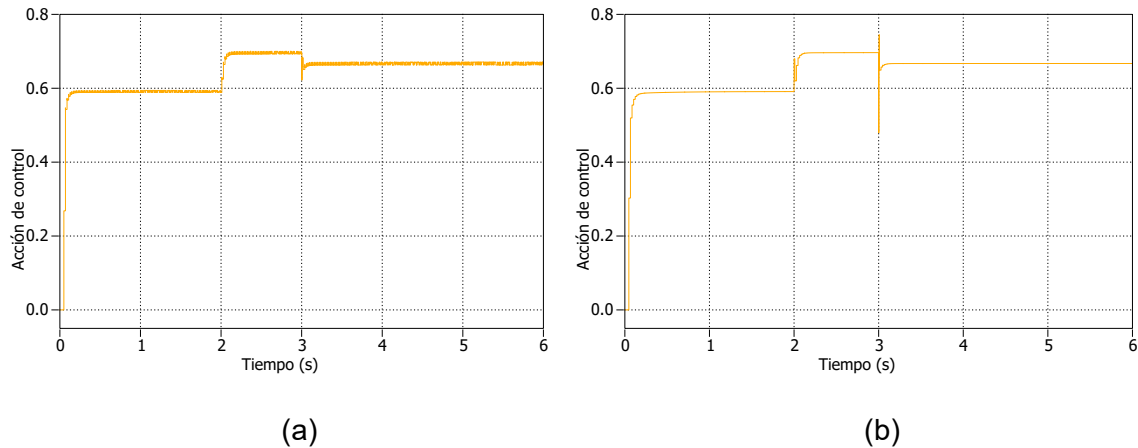
Al analizar la Figura 3.12 y Figura 3.13, existen tres puntos de interés.

- En el tiempo  $t = 0s$ ; el voltaje presenta un ascenso de 0 a 150V. Al ser un cambio de gran valor existe un alto sobre pico de voltaje, con LABC este es mayor, pero el tiempo de establecimiento se reduce en gran medida.
- En el tiempo  $t = 2s$ ; existe una perturbación debido al cambio de radiación solar, donde existe un pico de voltaje. Con LABC, el pico es menor y el tiempo de establecimiento es 5 veces menor que en el caso del control en cascada.
- En el tiempo  $t = 3s$ ; se aplicó un cambio de referencia de 30V, donde se puede observar que el control LABC ofrece una respuesta más lenta y con un pequeño sobre impulso



**Figura 3.14.** Comparación de la respuesta de la corriente en el inductor con (a) LABC y (b) control en cascada

En el seguimiento de corriente, las respuestas son similares, con la diferencia de que en el control en cascada la corriente presenta un pequeño offset con respecto a la referencia.



**Figura 3.15.** Comparación de la acción de control con (a) LABC y (b) control en cascada

En el caso de la acción de control, la señal del LABC presenta pequeñas oscilaciones alrededor del punto de operación, a diferencia del control en cascada. Por otro lado, en el control en cascada existen sobre picos en el cambio de referencia y perturbaciones.

Fue necesario el obtener los índices de desempeño de los dos casos para realizar un análisis más extenso, tanto en el seguimiento de trayectoria como en el esfuerzo de control, estos son presentados en la Tabla 3.7.

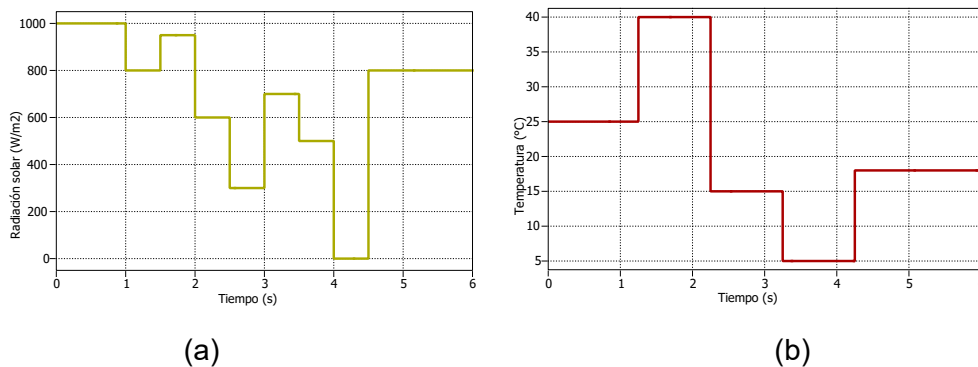
**Tabla 3.7.** Índices de desempeño para LABC y control en cascada en el caso ideal.

	ISE corriente	ISE voltaje	TVU
<b>LABC</b>	4.662	1.342	0.025
<b>Control en cascada</b>	12.298	2.525	0

Considerando las respuestas gráficas y los índices de desempeño, es válido afirmar que el LABC ofrece un mejor rendimiento tanto en el seguimiento de voltaje y corriente en cambios de referencia y perturbaciones reflejándose estos en los valores de ISE. Su desempeño es destacable sobre todo ante perturbaciones; donde además de reducir los picos es capaz de hacerlo en un tiempo minúsculo en comparación del control en cascada. Por otro lado, la acción de control aumenta, pero el cambio es mínimo.

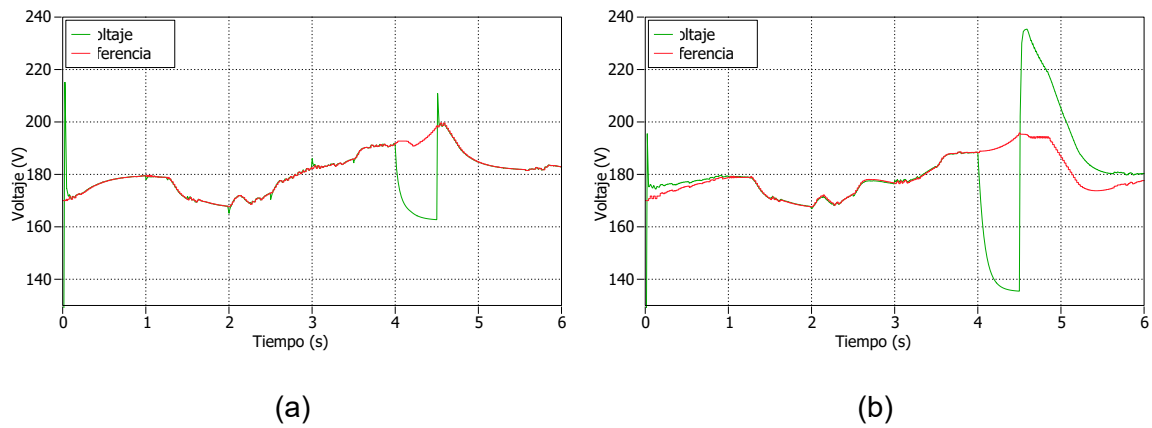
### 3.2.2 CASO REAL

Para este apartado, se insertará varios cambios de radiación solar y temperatura de las Figura 3.16, donde para obtener la máxima potencia, se utilizará un algoritmo MPPT (P&O) que enviará la referencia de voltaje a los controladores. Adicionalmente, se insertará ruido en la señal, con el fin de evaluar el desempeño de los controladores frente a casos que se pueden presentar en un sistema fotovoltaico real.



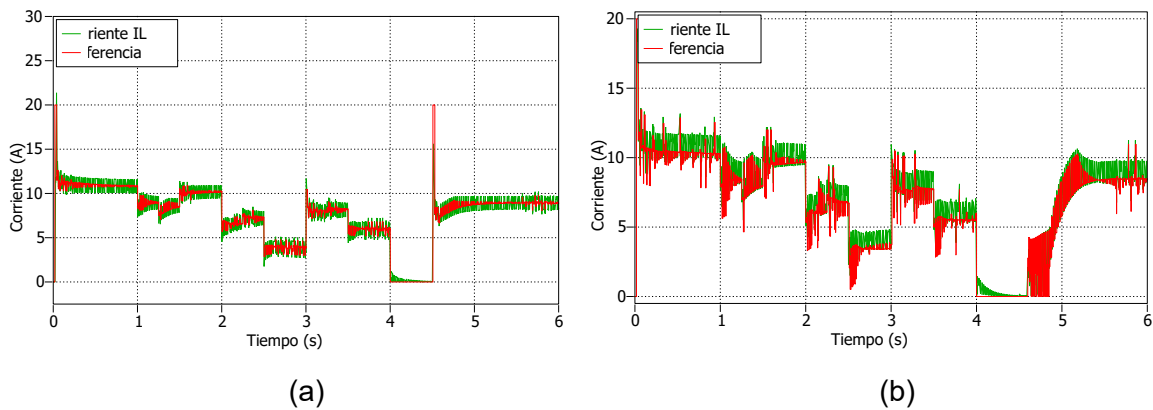
**Figura 3.16.** Perfiles de prueba de (a) Radiación solar y (b) Temperatura

En primer lugar, se analizó las respuestas sin ruido, al implementar el algoritmo MPPT junto a los controladores diseñados se obtienen los resultados descritos a continuación.



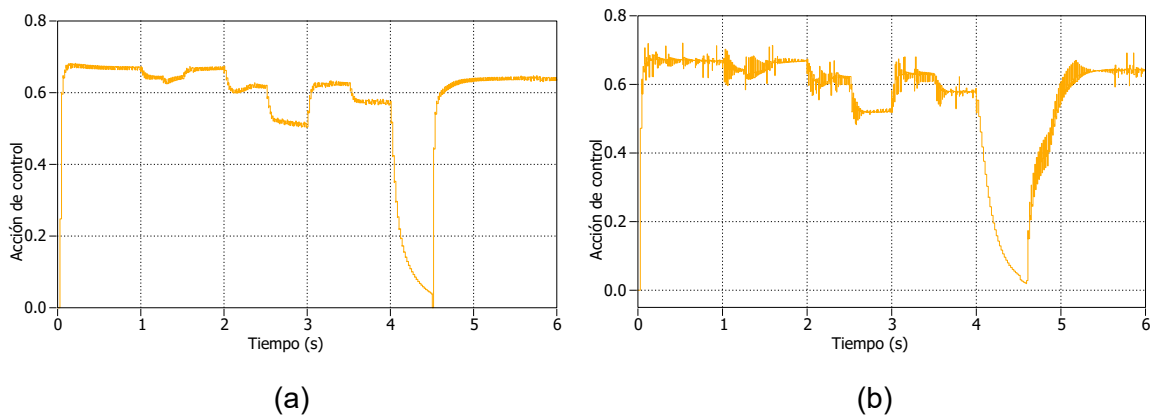
**Figura 3.17.** Comparación de la respuesta del voltaje en los paneles solares usando MPPT y (a) LABC y (b) control en cascada

En la Figura 3.17 se observa como ambos controladores son capaces de seguir a la referencia dada por el algoritmo MPPT. La señal de voltaje es más estable con el LABC, debido a que el tiempo de respuesta es más corto sobre todo observándose en  $t = 4s$ , donde a pesar del gran cambio de radiación solar, la respuesta es capaz de seguir a la referencia en un tiempo menor al control en cascada.



**Figura 3.18.** Comparación de la respuesta de la corriente en el inductor usando MPPT y (a) LABC y (b) control en cascada

Los beneficios del LABC sobre el seguimiento de trayectorias son más notables en la Figura 3.18, donde el tener una referencia más estable, hace que el rizado de corriente sea menor.



**Figura 3.19.** Comparación de la acción de control usando MPPT y (a) LABC y (b) control en cascada

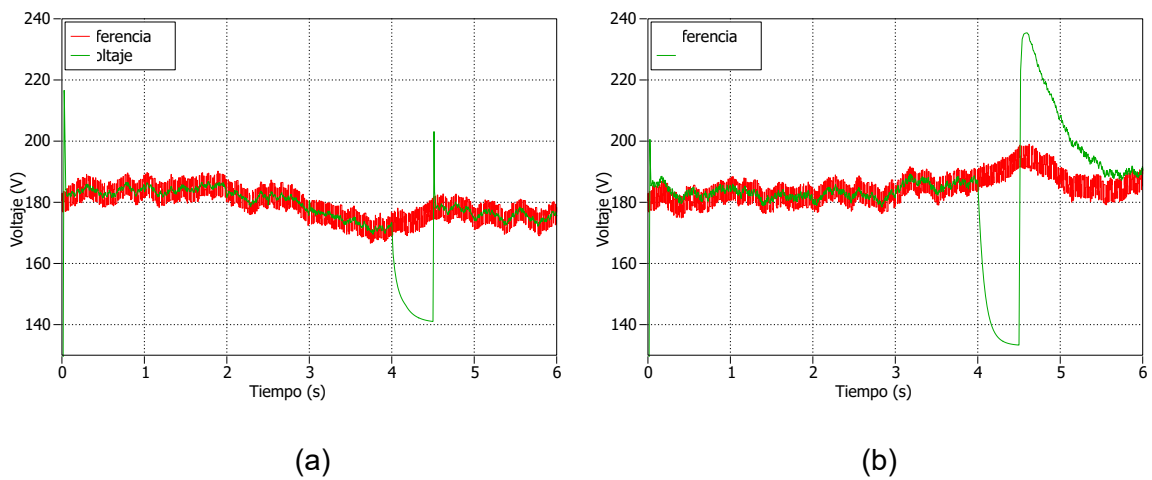
La acción de control de la Figura 3.19 muestra como a pesar de las constantes perturbaciones en el sistema, el LABC es capaz de mantener una acción de control con menos oscilaciones y con mayor velocidad de respuesta.

Los resultados obtenidos en las gráficas se presentan de manera numérica, mediante los índices de desempeño de la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8.** Índices de desempeño para LABC y control en cascada en el caso real sin ruido en la señal.

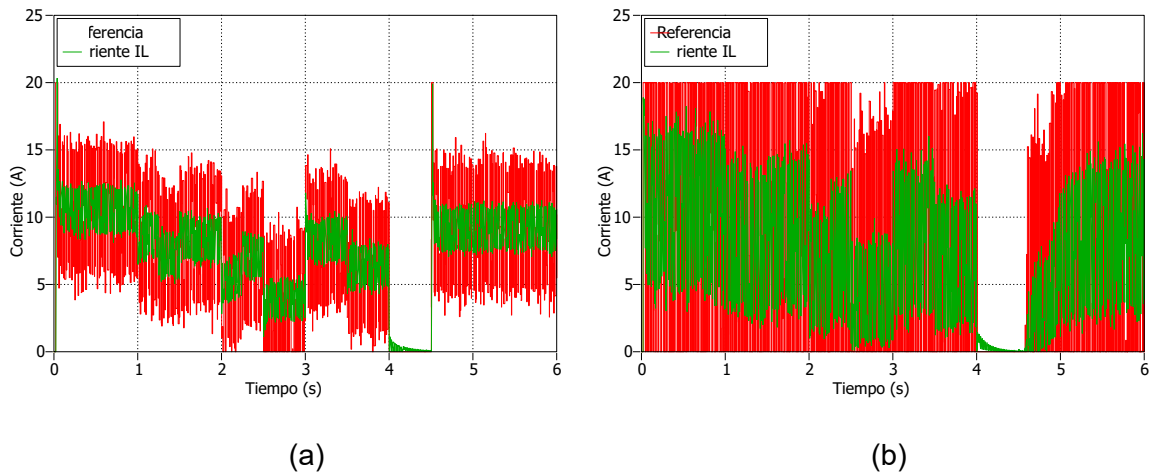
	<b>ISE voltaje</b>	<b>ISE corriente</b>	<b>TVU</b>
<b>LABC</b>	374.685	1.713	0.024
<b>Control en cascada</b>	1751.521	2.641	0.002

Por otro lado, un parámetro adicional a considerar es como el sistema reacciona ante el ingreso de ruido en la referencia de voltaje del controlador. Así, se evalúa el desempeño del controlador analizando las gráficas obtenidas.



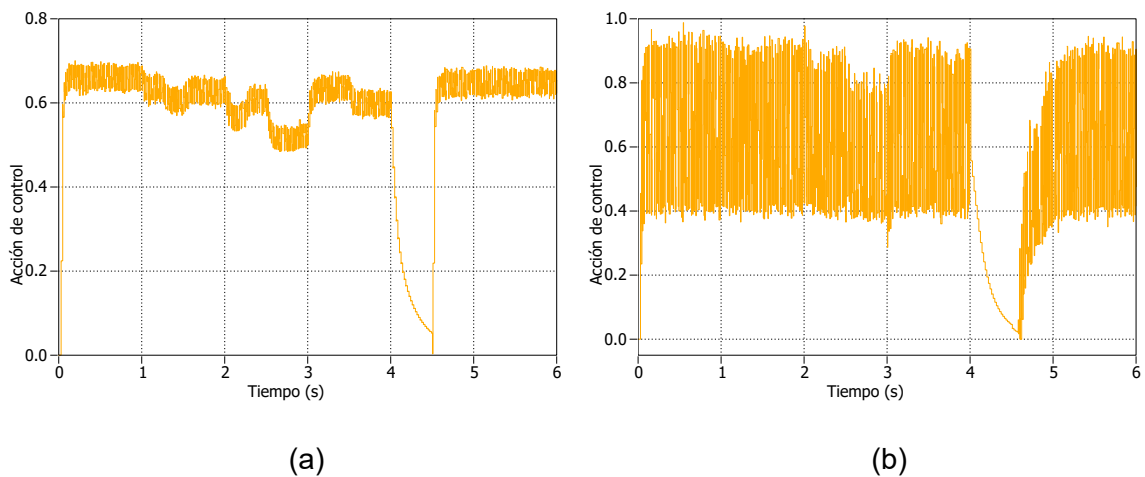
**Figura 3.20.** Comparación de la respuesta del voltaje en los paneles solares usando MPPT con ruido en la señal y (a) LABC y (b) control en cascada

Como se observa en la Figura 3.20, el seguimiento de referencia de voltaje del algoritmo MPPT se mantiene, y los controladores tienen resultados similares al caso anterior.



**Figura 3.21.** Comparación de la respuesta de la corriente en el inductor usando MPPT con ruido en la señal y (a) LABC y (b) control en cascada

La Figura 3.21 se puede observar como el ruido en la señal, la referencia de corriente se ve afectada en gran escala sobre todo en el control en cascada, donde esta se vuelve inestable y produce que el rizado de corriente sea mayor que en el caso del LABC.



**Figura 3.22.** Comparación de la acción de control usando MPPT con ruido en la señal y (a) LABC y (b) control en cascada

Las acciones de control de la Figura 3.22 muestran como el LABC ofrece una respuesta más rápida y estable a comparación del control en cascada, lo que se refleja en el esfuerzo de control.

A continuación, se muestran los índices de desempeño relacionados con el caso de estudio en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Índices de desempeño para LABC y control en cascada en el caso real con ruido en la señal.

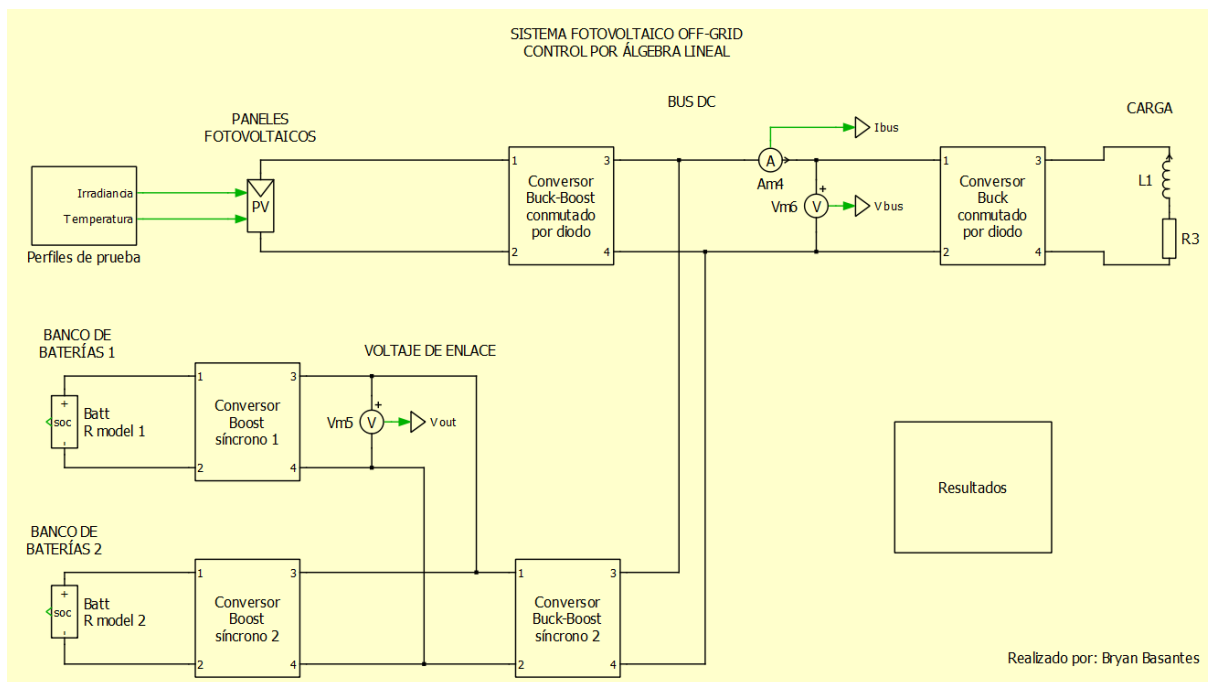
	<b>ISE voltaje</b>	<b>ISE corriente</b>	<b>TVU</b>
<b>LABC</b>	440.896	16.502	0.064
<b>Control en cascada</b>	1865.672	112.422	0.581

De acuerdo con los índices de desempeño el LABC proporciona menor error tanto en seguimiento de voltaje como de corriente y a diferencia del caso anterior el esfuerzo de control es menor. De esta manera, es posible determinar como el LABC muestra un mejor rendimiento que controladores convencionales ante cambios de referencia, perturbaciones y ruido en la señal de referencia, debido a sus propiedades que mejoran el seguimiento de trayectoria.



### 3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

Una vez realizada la comparación entre el LABC y controladores clásicos, se procede a implementar el modelo completo en PLECS® con todas las etapas diseñadas en la sección 2 y tomando en cuentas los requerimientos establecidos.



**Figura 3.23.** Modelo implementado en PLECS®

Para realizar las pruebas se utilizará un perfil de carga que cumpla pruebe todos los parámetros requeridos en los requerimientos. Se configuraron varios perfiles de configuración: 3 perfiles de radiación solar, 2 perfiles de temperatura, 3 perfiles de carga y 3 niveles de voltaje.

A continuación, se analizarán los resultados correspondientes para los perfiles más exigentes, en este se simula una carga tipo paso con picos de potencia periódicos, un perfil de radiación solar variable con un periodo de tiempo sin fuente de luz solar, que representa el escenario más exigente al cual el sistema se enfrentaría. Además, se configuró un valor de voltaje en el bus DC de 125V, sistemas usualmente utilizados para alimentar servidores de comunicaciones o el control de celdas de subestaciones de media y alta tensión. En los anexos se presentan los resultados para otros perfiles.

### 3.3.1 POTENCIA EN LA CARGA

Utilizando los perfiles de radiación solar y temperatura de la Figura 3.24. Con el perfil de carga establecido, se compara el perfil de carga con la potencia consumida por la carga en la Figura 3.25.

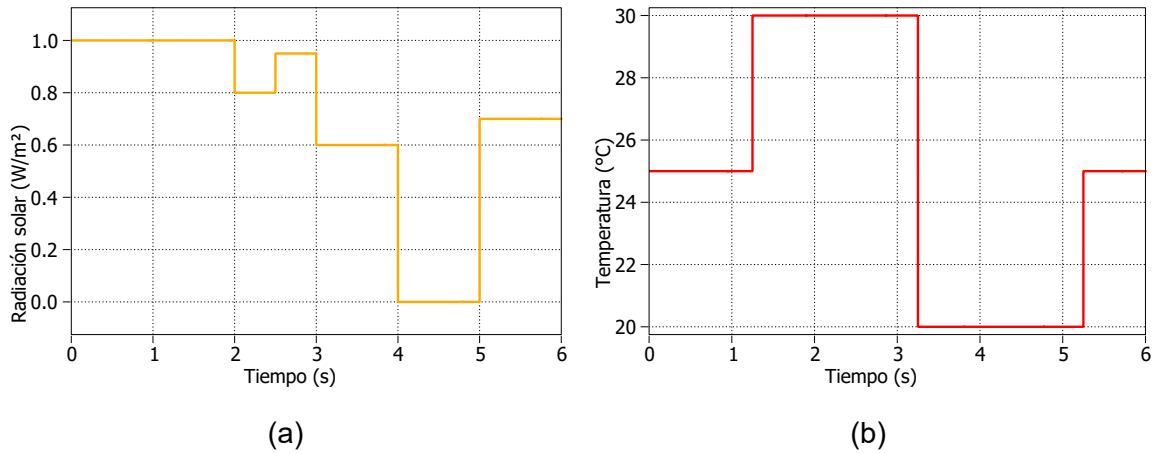


Figura 3.24. Perfiles de prueba de (a) Radiación solar y (b) Temperatura

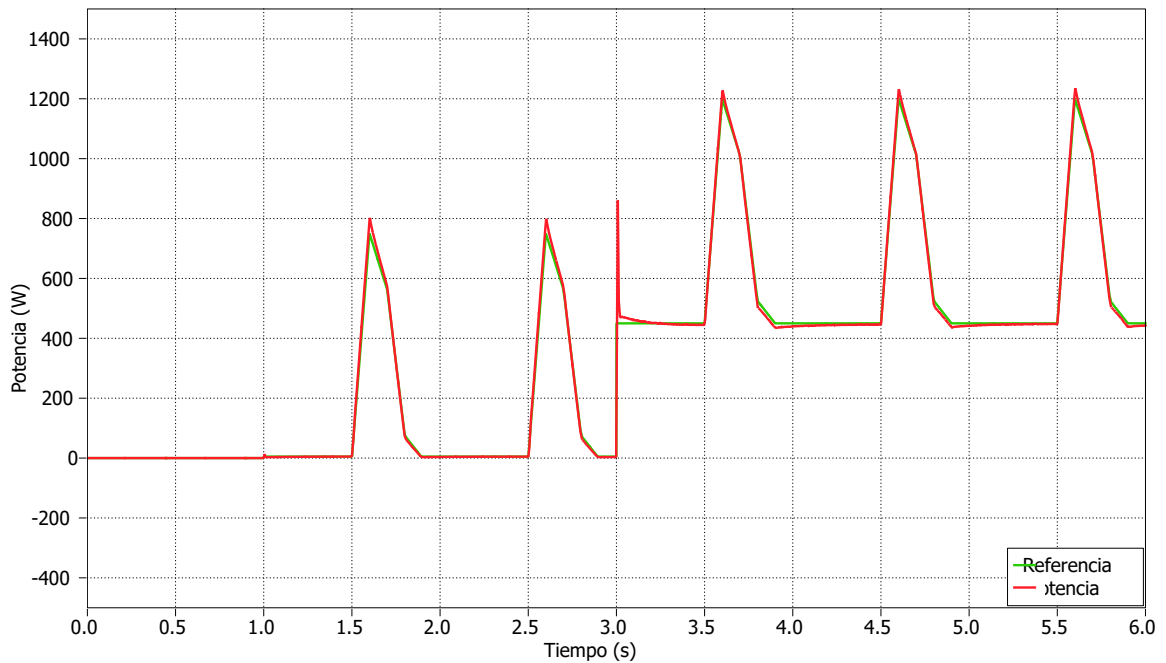


Figura 3.25. Potencia en la carga

Se escogieron el perfil de irradiancia, temperatura, ya que permite comprobar el desempeño del sistema tanto en seguimiento de referencia como en el manejo de algoritmos de control

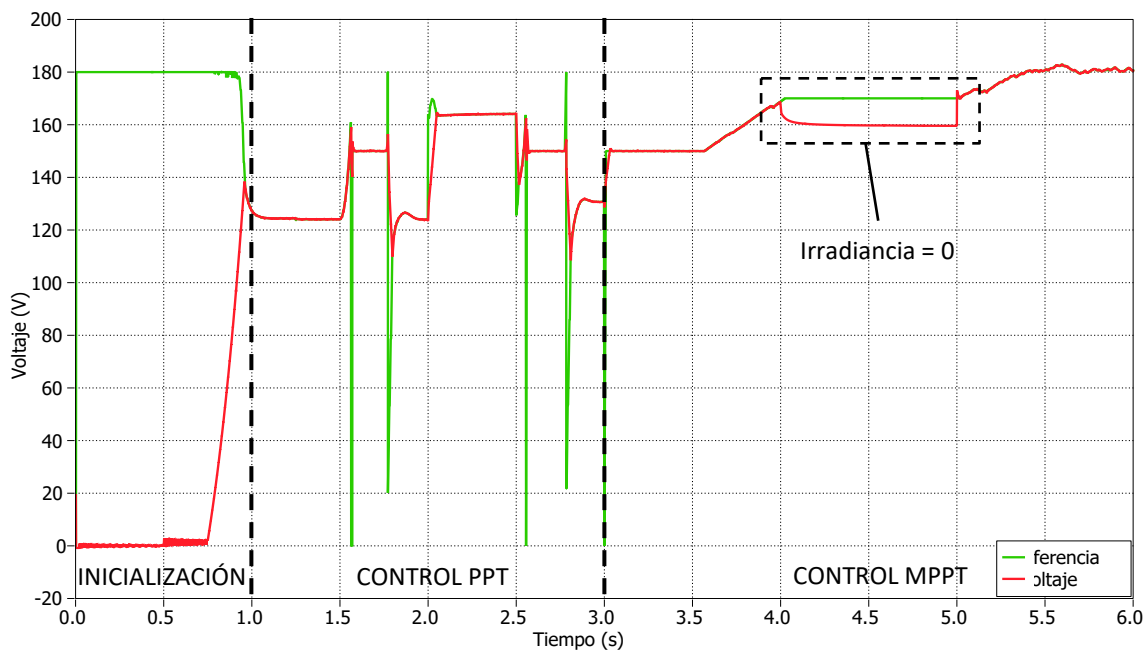
de potencia (PPT y MPPT) bajo un perfil de carga con una trayectoria variable. Es necesario aclarar que se inyectará potencia a la carga a partir de  $t > 1s$ , ya que este periodo servirá como punto para que todos los controladores lleguen a sus valores de voltaje nominal.

En primer lugar, como se observa en la Figura 64, el seguimiento de potencia con LABC muestra un buen desempeño para seguimiento de trayectorias para diferentes escenarios, en el caso de cambio de referencia tipo paso el LABC describe un bajo tiempo de establecimiento pero cuenta con un importante sobre impulso que representa una desventaja de este tipo de control, por el otro lado, en cuanto a seguimiento de trayectorias tipo rampa proporciona menor error de posición que otros controladores.

### 3.3.2 POTENCIA GENERADA EN LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

De acuerdo con los requerimientos propuestos, la potencia generada por los paneles fotovoltaico debe ser la mayor posible en todo momento. Esto se logra en el intercambiar el algoritmo de control de potencia en los paneles fotovoltaicos.

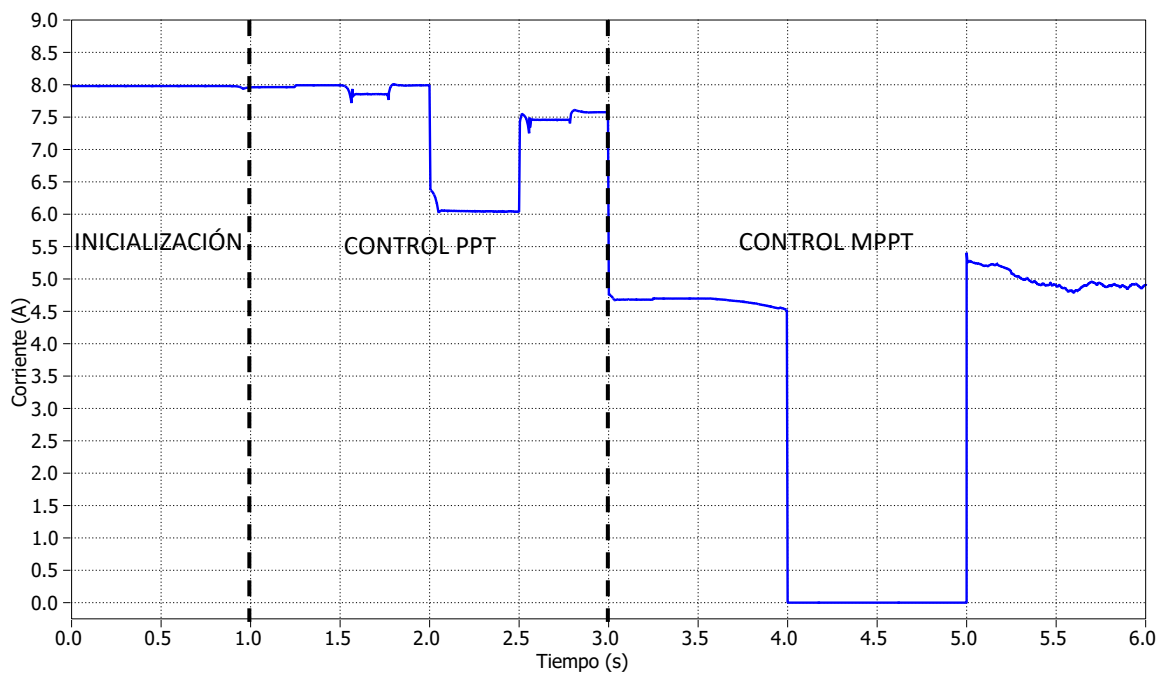
Como se demuestra en la Figura 3.26, en donde en  $1s < t < 3s$  la potencia requerida por la carga y la necesaria para cargar las baterías con corriente constante es menor a la potencia máxima, la referencia del voltaje es controlada mediante el algoritmo PPT. Mientras que en  $t > 3s$  como la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos es menor a la requerida, la referencia es controlada por el algoritmo MPPT (P&O).



**Figura 3.26.** Voltaje de los paneles fotovoltaicos

En la Figura 3.27 se muestra que la corriente cambia de acuerdo con la radiación solar y temperatura correspondiente a la Figura 3.24. En el primer periodo denominado como inicialización, el voltaje empieza a seguir a la referencia, a partir de  $t = 1s$  el sigue a la referencia usando el algoritmo PPT. Donde se presenta una gran cantidad de perturbaciones en la referencia debido al contante cambio en la carga pero es capaz de mantener un voltaje en niveles estables. Por otro lado, a partir de  $t = 3s$  la referencia cambia de acuerdo al controlador MPPT P&O, donde se establecio un voltaje inicial de 150V, pundo en el cual empieza a buscar el punto de máxima potencia que se encuentra alrededor de los 180V. Cabe destacar que el control de potencia es capaz de volver a operar automáticamente después de ausencia de irradiancia como se observa durante el periodo  $4s < t < 5s$ .

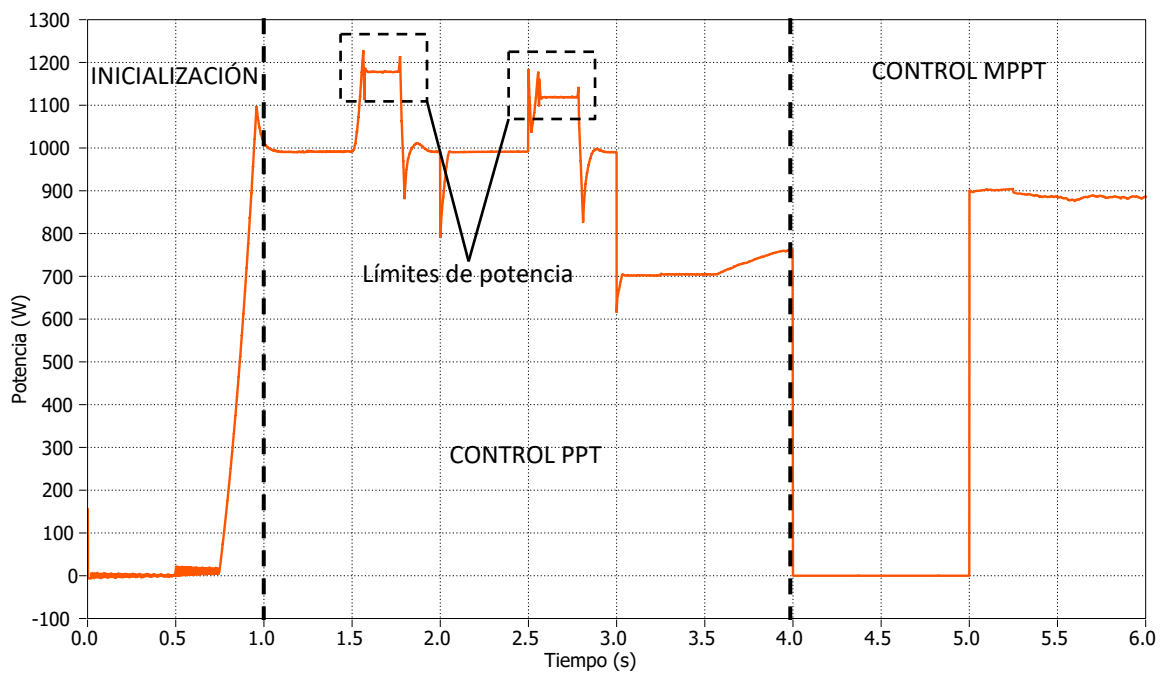
Otro punto a considerar es que la conmutación entre los algoritmos PPT y MPPT en  $t = 3s$  se ejecuta fluidamente sin que se presenten oscilaciones en la señal de voltaje.



**Figura 3.27.** Corriente en los paneles fotovoltaicos

Analizando la corriente de los paneles fotovoltaicos en la Figura 66, se puede ver como esta responde de acuerdo con la irradiancia y cómo se comporta en cada algoritmo de control. En el control PPT, la corriente responde a los cambios de referencia de voltaje de la Figura 65, observándose como existen ligeros sobre impulsos. En cambio, en el control MPPT la corriente cambia progresivamente hasta alcanzar el punto de máxima potencia.

En la Figura 3.28 se puede comprobar como la potencia generada en los paneles fotovoltaicos corresponde al algoritmo utilizado en cada zona. En los picos de potencia en la carga es notable que los paneles alcanzan los límites de potencia y no son capaces de generar la potencia suficiente para abastecer a la carga y cargar las baterías al mismo tiempo. Por lo que en estos periodos durante el control PPT las baterías suplen la potencia faltante a la carga, este aspecto se analizará más adelante. Así, en todo momento se obtiene la máxima potencia posible de los paneles solares.



**Figura 3.28.** Potencia generada en los paneles fotovoltaicos.

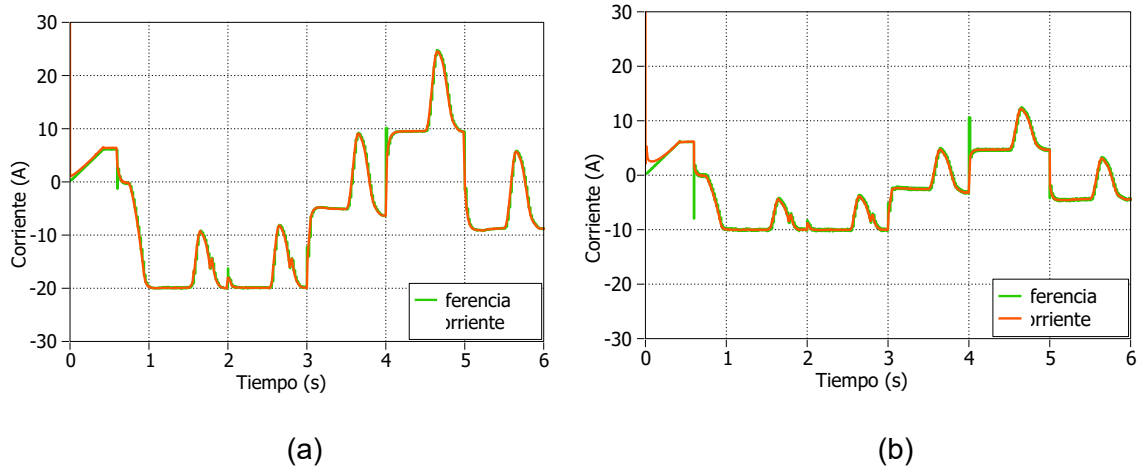
### 3.3.3 POTENCIA GENERADA EN LAS BATERÍAS

En las baterías es necesario considerar dos aspectos, el primero es que las baterías se cargarán con corriente constante, en este caso a 20A para el primer banco y 10A para el segundo cuando la potencia generada en los paneles fotovoltaicos sea suficiente para abastecer a la carga y cargar las baterías.

En segundo lugar, es que cada batería cuenta con su controlador que permite realizar la compartición de carga o Load Sharing entre ambas, es decir, que, durante la descarga de baterías, la potencia total se repartirá en la mitad para cada banco de baterías.

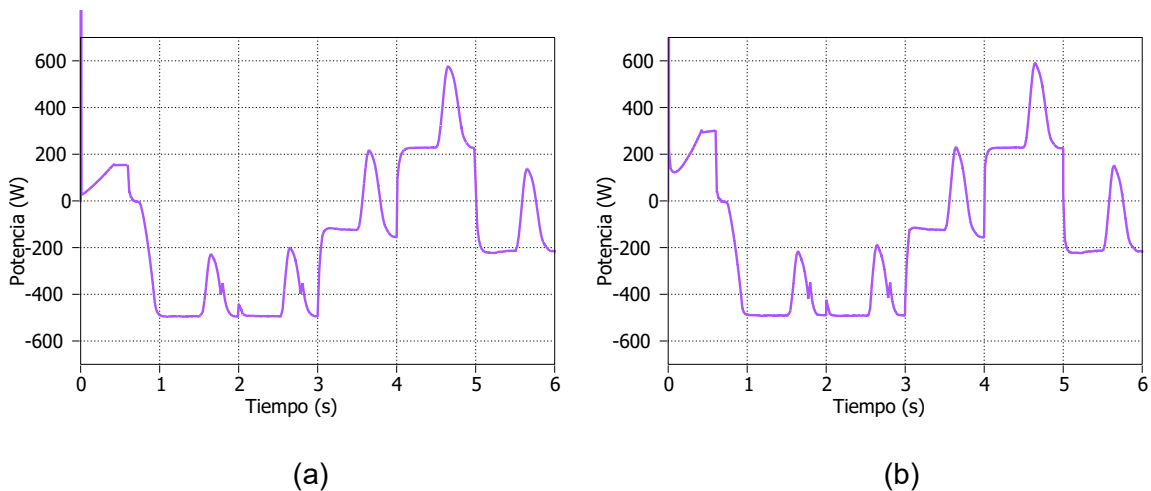
En la Figura 3.29 se observa como durante  $1s < t < 3s$  las baterías se cargan a corriente constante cuando los paneles fotovoltaicos generan la energía necesaria, mientras que en el

tiempo restante las baterías complementan a los paneles entregando la potencia faltante a la carga. También se observa como el LABC permite seguir a la referencia con precisión, demostrando que en control de corriente este cuenta con un desempeño superior en perfiles de carga con alta variación.



**Figura 3.29.** Corriente en (a) el primer banco y (b) el segundo banco

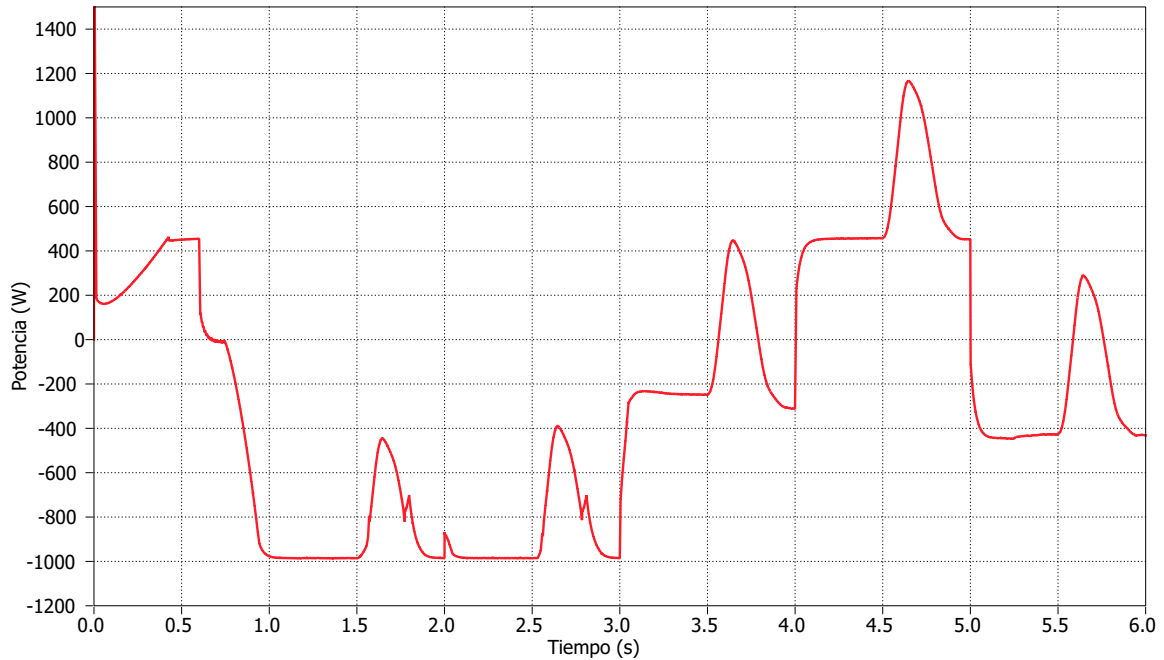
De acuerdo con la Figura 3.30 se muestra la potencia en los bancos de baterías, se observa como la potencia generada en ambos es la igual, cumpliendo con los requerimientos de compartición de carga.



**Figura 3.30.** Potencia en (a) el primer banco y (b) el segundo banco

Por otro lado, al analizar la potencia combinada de ambos bancos de baterías en la Figura 3.31, se observa que las baterías tienen un límite de potencia de carga, lo cual refleja que se cargan a una corriente constante. Por otro lado, cuando los paneles fotovoltaicos no pueden

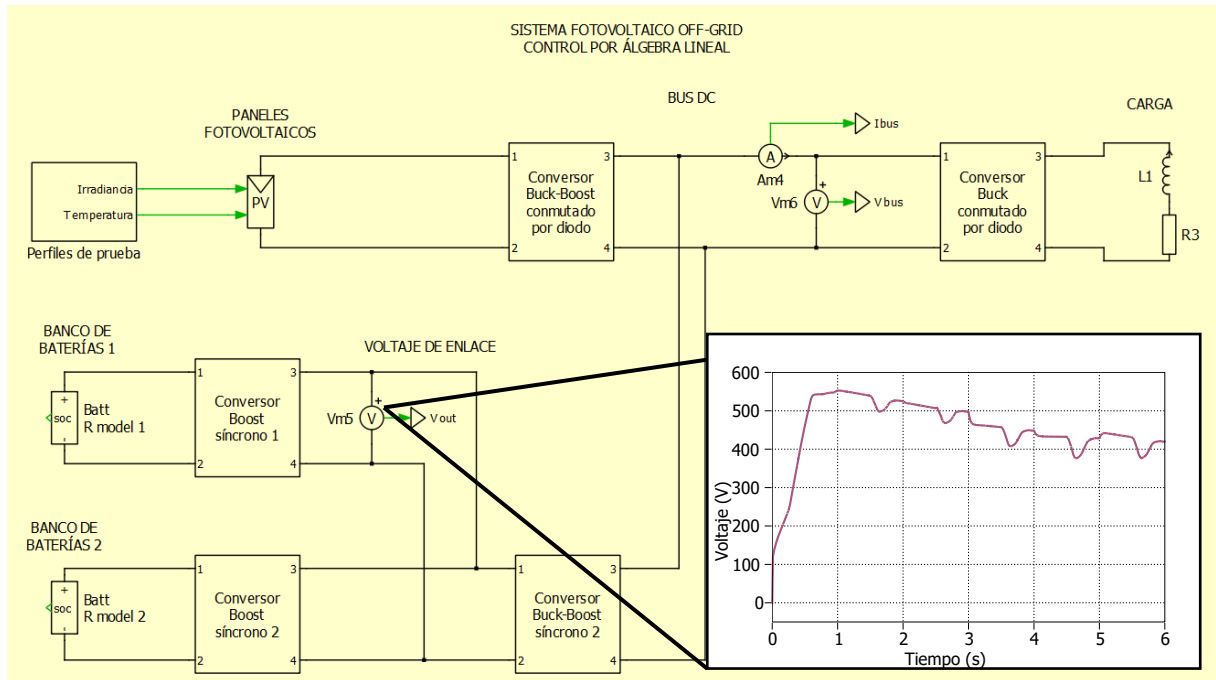
alimentar a la carga, las baterías las complementan dando la potencia necesaria a la carga, cumpliendo con los valores nominales propuestos del sistema.



**Figura 3.31.** Potencia total en las baterías

### 3.3.4 VOLTAJE DE ENLACE

Uno de los mayores desafíos en la implementación del sistema es el lograr controlar tanto el flujo de potencia en las baterías como en mantener el regular el voltaje del bus DC de manera simultánea, ya que el flujo de potencia no puede mantenerse constante entre ambos convertidores. Esto provoca que el sistema llegando a cierto punto de operación, el punto de enlace entre ambas etapas de control sufra una caída de voltaje lo que hace que todo el sistema se vuelva inestable. En la Figura 3.32 se presenta la forma de onda de voltaje en este punto denominado voltaje de enlace.



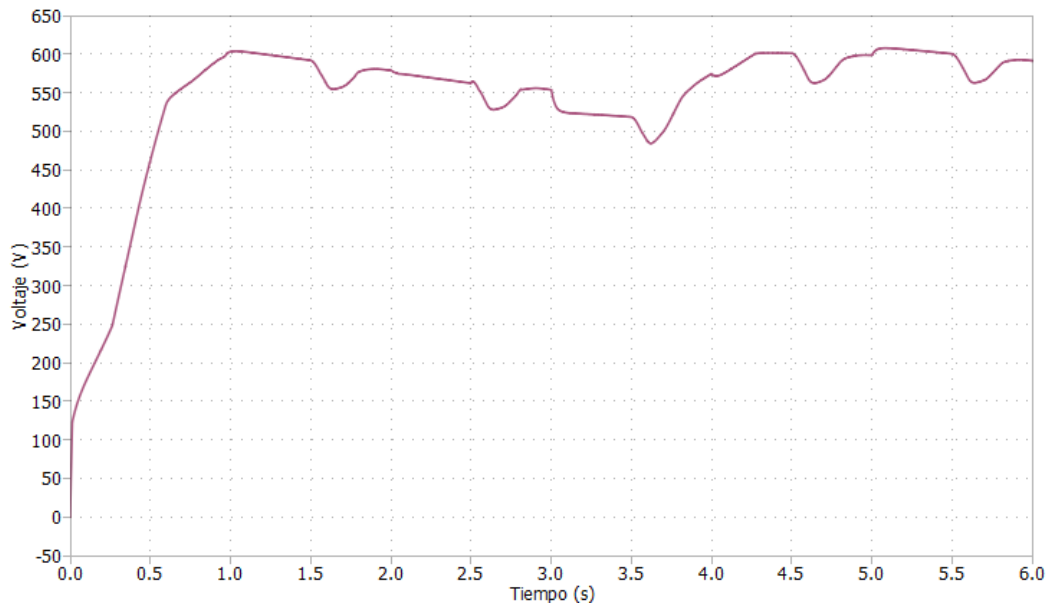
**Figura 3.32.** Voltaje de enlace

Después de la inicialización el voltaje de enlace supera los 500V, pero a medida que existe un flujo de potencia en el sistema, ya sea por carga de baterías o por abastecer la carga, este voltaje va disminuyendo paulatinamente. Esto es un problema ya que llegado a un punto el voltaje será menor a los voltajes de las baterías lo que provoca que los convertidores no sean capaces de controlar la potencia en las mismas.

Para que el sistema opere de manera estable en todo momento, es necesario mantener el voltaje de enlace en un rango por encima del máximo voltaje de los bancos de baterías. Durante las pruebas se observó que, al inyectar más potencia de la necesaria para alimentar la carga, el voltaje de enlace aumenta. Por lo que, para cumplir con este requerimiento se implementó un algoritmo de histéresis en el control de potencia tanto de los paneles fotovoltaicos como en el de las baterías.

Se consideró que un rango entre los 500V y 600V es aceptable para satisfacer este requerimiento. Así, cuando el voltaje baje del límite inferior, si el modo PPT está en operación, los paneles fotovoltaicos generan una potencia excedente hasta que el voltaje de enlace alcance el límite superior, mientras que en el modo MPPT las baterías serán las encargadas de generar este excedente. En la Figura 3.33 se presenta el resultado de este algoritmo de control.





**Figura 3.33.** Voltaje de enlace con la inyección de potencia por histéresis

Como se observa, el algoritmo de control por histéresis es capaz de mantener el voltaje dentro de un rango que asegura el correcto funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. En el ejemplo presentado existen dos puntos de interés; el primero es después de la inicialización donde se inyecta potencia adicional hasta alcanzar los 600V, al alcanzar este nivel de voltaje los controladores de los paneles fotovoltaicos y de las baterías reciben el comando de dejar de inyectar potencia. El segundo ocurre en  $t = 3s$  donde al contrario el voltaje disminuye por debajo de los 500V, donde se envía el comando de inyectar potencia adicional para aumentar el voltaje.

Cabe mencionar que la duración de la inyección de potencia depende de la cantidad que se desee configurar, en este caso se configuró una potencia de  $p = 100W$  que dura aproximadamente  $t = 600ms$  con un periodo de  $T = 3s$ . Así en la Ecuación 3.1 se calcula la potencia media durante la inyección.

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{3} \int_0^{0.6} 100 dt = \frac{1}{3} (100 \cdot 0.6) = 20W \quad (3.1)$$

Considerando una potencia media consumida de 800 se determina que las pérdidas debido a la inyección de potencia en el punto de enlace representan el 2.5%. Es importante destacar que este valor considerado como pérdidas puede disminuir, ya que como se puede observar en la forma de onda del voltaje de la Figura 3.33 la caída de voltaje se produce con mayor incidencia durante la carga de baterías, mientras que durante la descarga el voltaje cae más

lentamente. Por lo que el tiempo entre pulsos de potencia aumenta, representando menos potencia inyectada.

Otro punto con el que se puede reducir la potencia inyectada es aumentando el rango de voltaje en la histéresis, así los pulsos de potencia estarán más separados en el tiempo, por lo que este valor se volvería despreciable.

El efecto de la potencia inyectada en el punto de enlace sobre la potencia global entregada a la carga se analizará en el apartado 3.3.6.

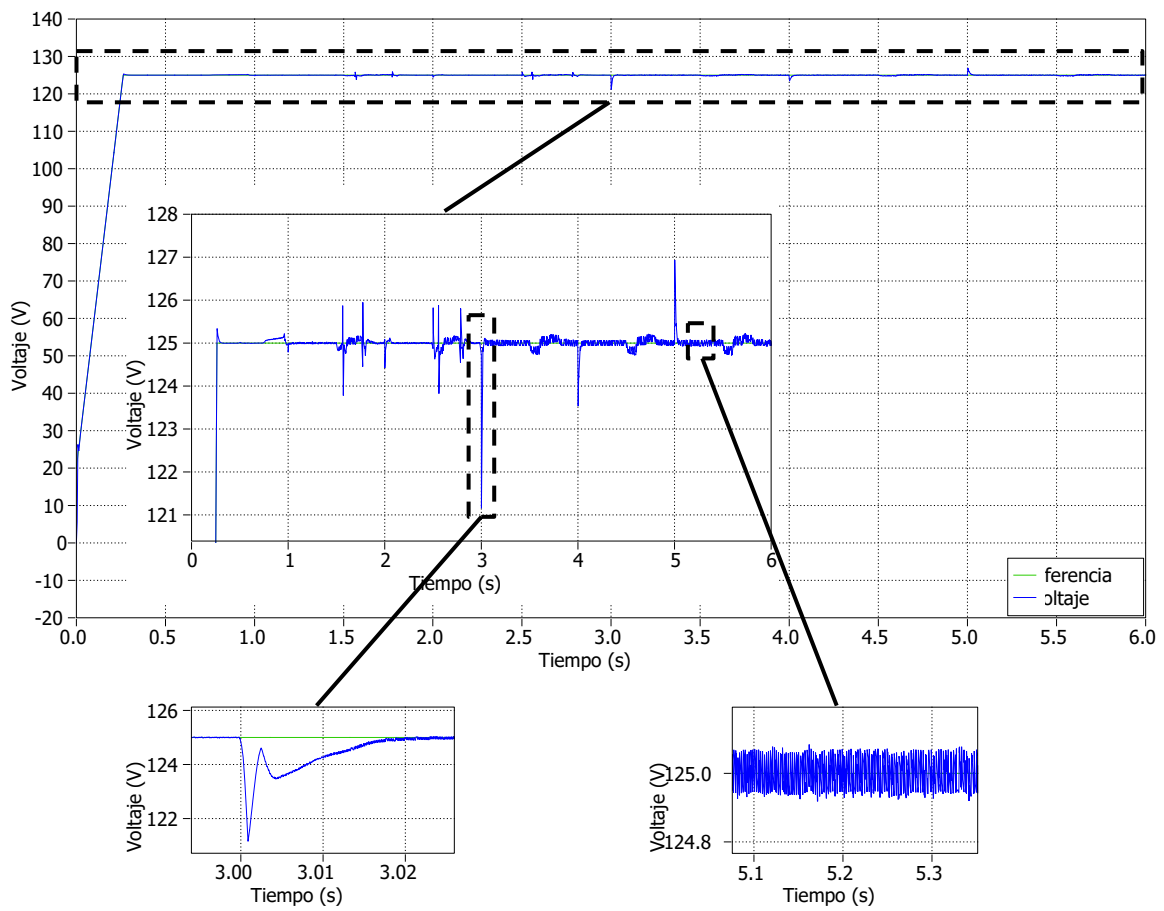
### **3.3.5 BUS DC**

Se comprobará el control de voltaje en el bus DC. A continuación, se muestra el voltaje en la Figura 3.34. Se implementó una rampa hasta alcanzar el voltaje configurado, (en este caso 125V) la rampa reduce los sobre picos de voltaje debido al cambio de referencia. Se observa que el sistema responde correctamente y es capaz de seguir la referencia a pesar de los constantes cambios de referencia tanto en las fuentes (paneles fotovoltaicos y baterías) como en la carga.

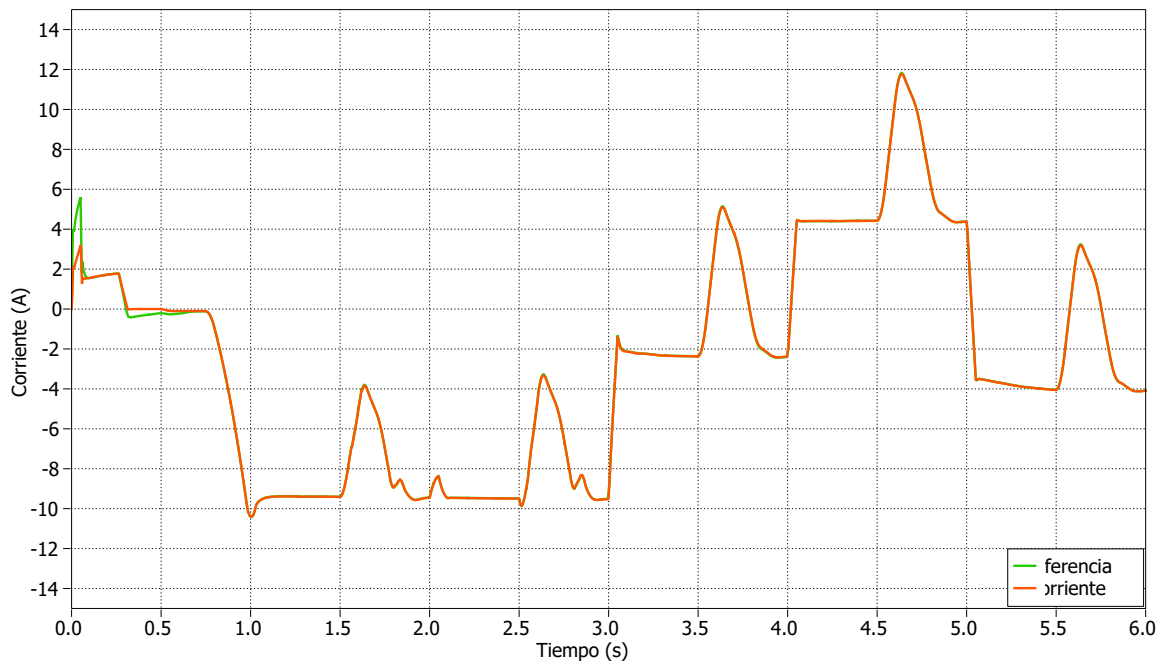
La mayor perturbación presente en la señal de voltaje se encuentra en  $t = 3s$ , donde se presenta el cambio de referencia tipo paso en la carga. Su magnitud es de 3.84V con un tiempo de establecimiento de 15ms, estos valores son aceptables y aseguran que se el bus se mantendrá estable bajo cualquier escenario. Otro punto a considerar en sistemas de distribución DC es el rizado de voltaje, que de acuerdo con estándares debe ser menor al 2% del voltaje nominal, y como se puede observar este no supera los 0.8V con un voltaje de bus de 125V.

Gracias a la estructura del LABC que refleja un control en cascada que no solamente controla el voltaje sino la corriente. En la Figura 3.35 se muestra el desempeño del control de corriente en el convertidor encargado de regular el voltaje del bus DC.

Una vez más, se representa gráficamente el excelente desempeño que tiene el LABC en seguimiento de corriente a pesar de los constantes cambios de referencia y perturbaciones. Como aclaración esta corriente es la vista en el convertidor que conecta el bus DC con las baterías por lo que representa el flujo de corriente de carga y descarga de las mismas.

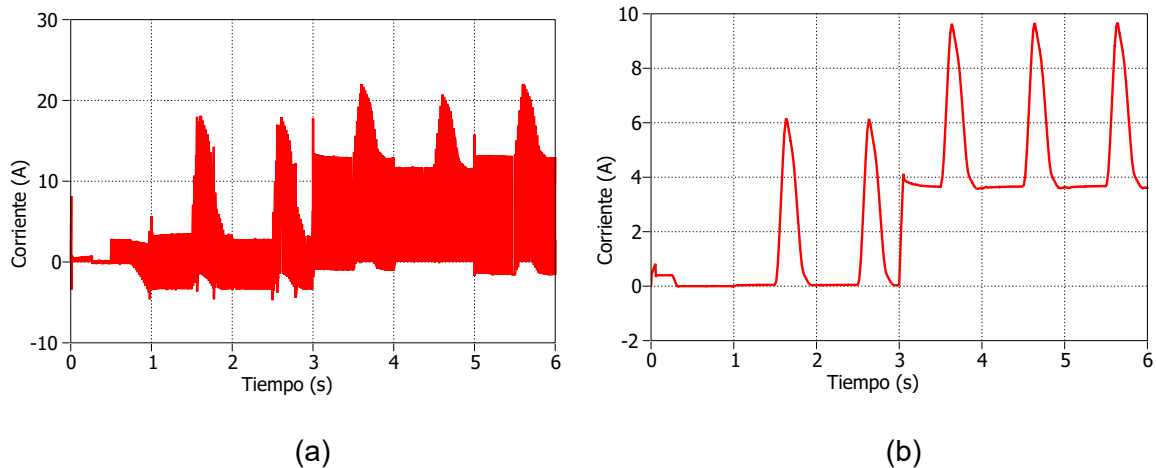


**Figura 3.34.** Voltaje en el bus DC



**Figura 3.35.** Control de corriente en el bus DC

Por otro lado, en la Figura 3.36 se muestra cómo se comporta la corriente en el bus consumida por la carga. Tal como se mencionó en la etapa de diseño en esta etapa la corriente es discontinua, por lo que se implementó un filtro que permite visualizar más claramente la corriente promedio y ver cómo esta corresponde con el perfil de carga propuesto.

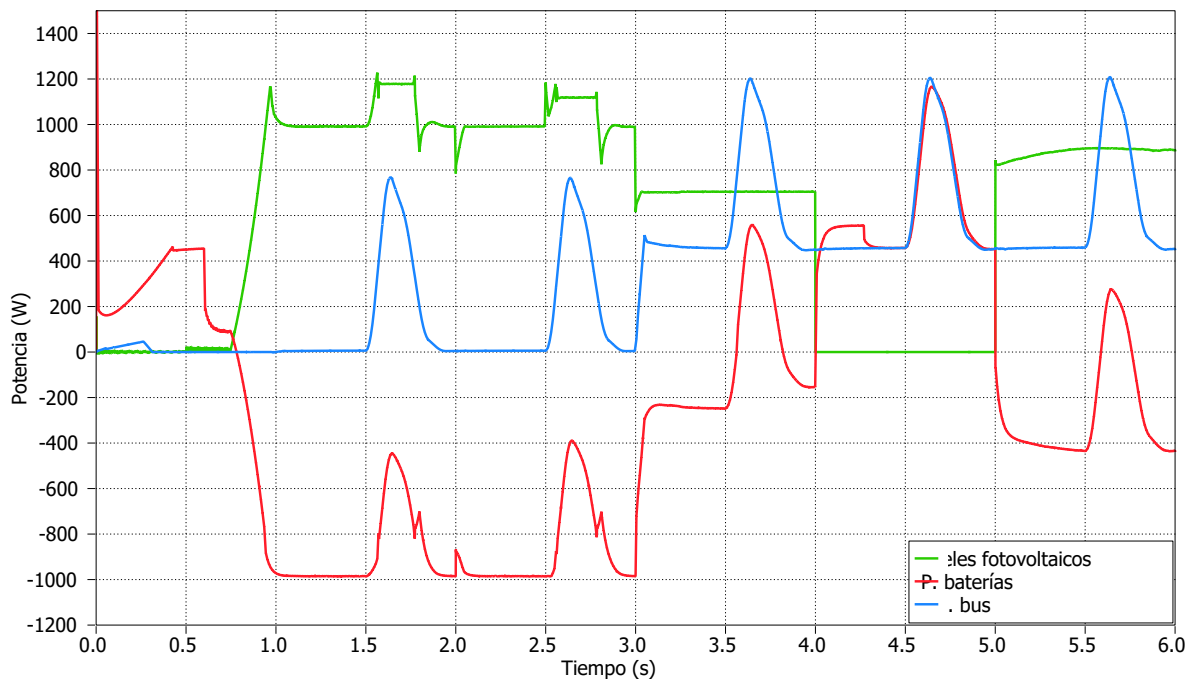


**Figura 3.36.** Corriente en el bus DC (a) real (b) promedio

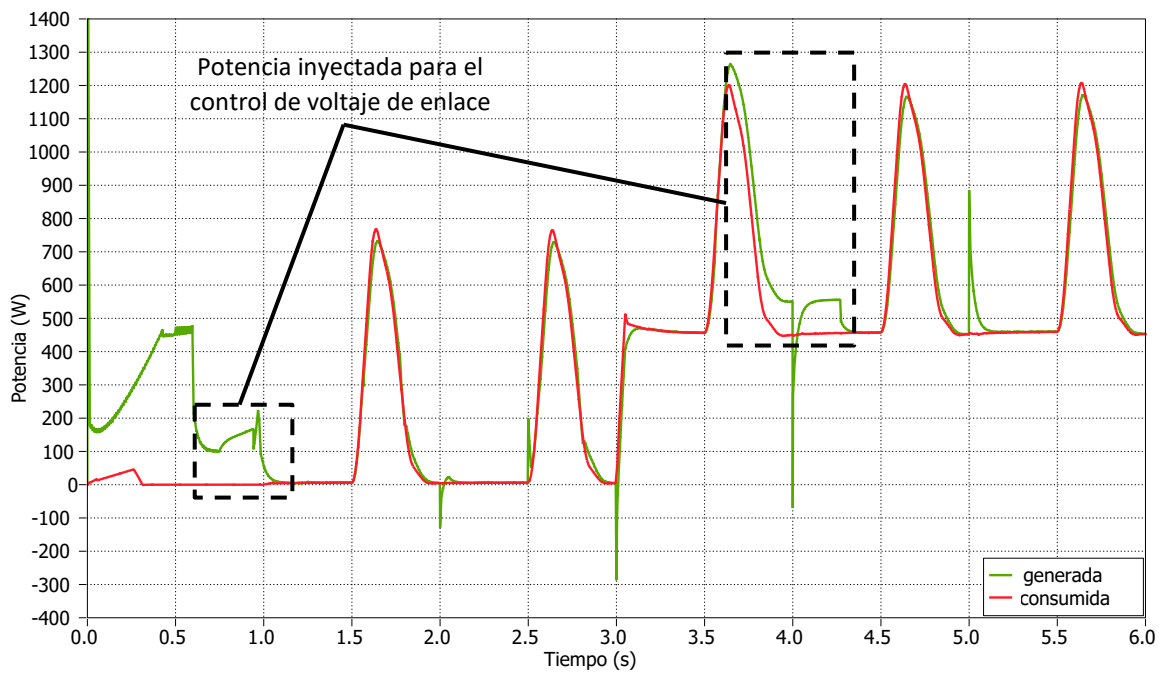
### 3.3.6 POTENCIA GENERADA VS POTENCIA CONSUMIDA

Finalmente, para comprobar el correcto funcionamiento del sistema se comparó la potencia total generada por los paneles fotovoltaicos y las baterías con la potencia consumida por la carga. Primero se presenta las potencias en los paneles fotovoltaicos, baterías y en la carga en la Figura 3.37, en donde se tiene una idea más clara del control de energía en el sistema. Se observa como la potencia generada en las baterías complementa a la generada en los paneles fotovoltaicos cuando estos no son capaces de abastecer a la carga. Otro punto a que se puede observar de mejor manera es como en los paneles fotovoltaicos.

De esta manera al sumar las potencias de las fuentes (paneles solares y baterías) y compararlo con la consumida por la carga se obtiene el resultado de la Figura 3.38. De acuerdo con la gráfica se observa que el sistema teóricamente genera la potencia necesaria para alimentar a las cargas con alta eficiencia, exceptuando en el periodo de inicialización en donde es necesario inyectar potencia a los componentes del sistema para llegar a sus valores nominales y alcanzar el voltaje establecido en el bus DC. Así demostrando que este cumple con todos los requerimientos de control de energía propuestos en la sección 2.



**Figura 3.37.** Comparación de la potencia en los paneles fotovoltaicos, baterías y carga



**Figura 3.38.** Comparación entre la potencia generada y la consumida por la carga

En la Figura 3.38, se aprecia como la potencia combinada entregada por las fuentes (paneles fotovoltaicos y baterías) en general describe una curva similar a la curva de potencia

consumida por la carga. Lo que da a entender el correcto funcionamiento de los controladores implementados, pero también se observa como existen picos durante cambios de irradiancia y de referencia en la carga. Esto es debido a que los paneles fotovoltaicos y las baterías cuentan con diferentes constantes de tiempo que hace que durante los cambios abruptos de potencia exista una diferencia entre estos valores, convirtiéndose en dichos picos. Es importante detallar que estos picos no se reflejan en la carga como se observa en la Figura 76, solamente son representación gráfica de la potencia combinada en las fuentes.

Otro aspecto a considera, como se detalló en la sección anterior es la potencia inyectada para mantener el voltaje de enlace en un rango aceptable de operación. Como se indica en la Figura 3.38 existen dos puntos de importancia que se relacionan directamente con la Figura 3.37, en donde la histéresis provoca que los controladores de las fuentes entreguen potencia adicional.

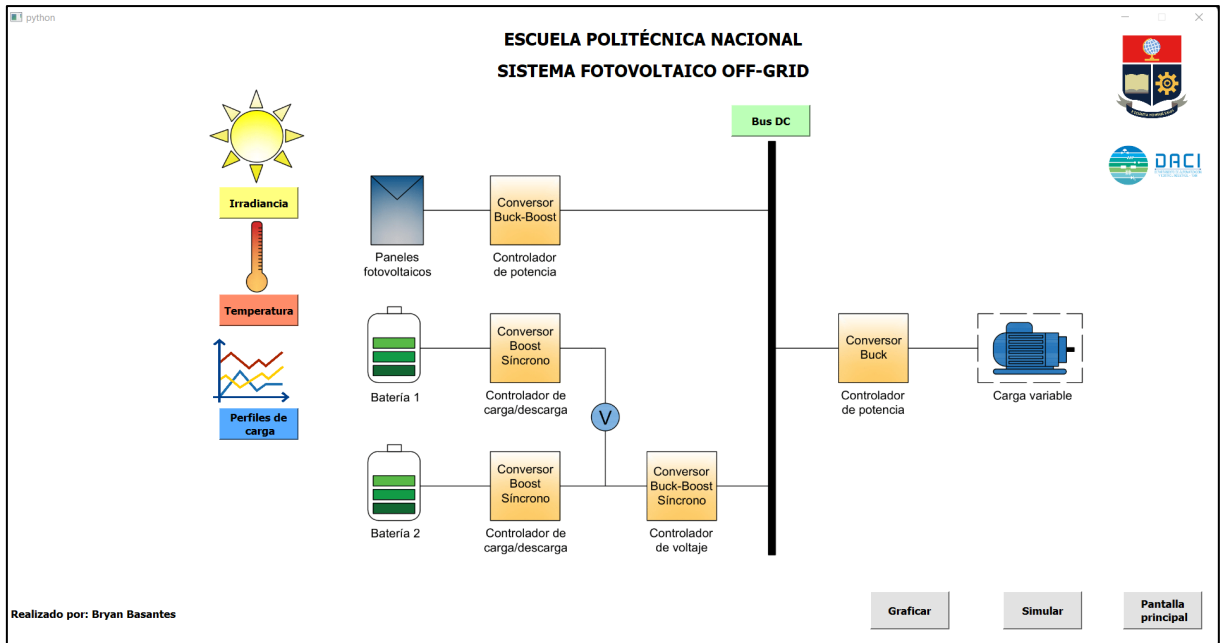
### 3.4 INTERFAZ GRÁFICA

Como se detalló en la sección de diseño, se planteó como base aparte de la ventana de bienvenida de la Figura 3.39, donde además de visualizar la información del proyecto, existe un espacio que permite importar el directorio de la ubicación del ejecutable de PLECS® instalado en el computador. Esto es necesario ya que la aplicación se enlaza con la aplicación para ejecutar la simulación. Revisar ANEXO B y C para más detalles de manejo y funcionamiento de la aplicación.



Figura 3.39. Ventana de bienvenida

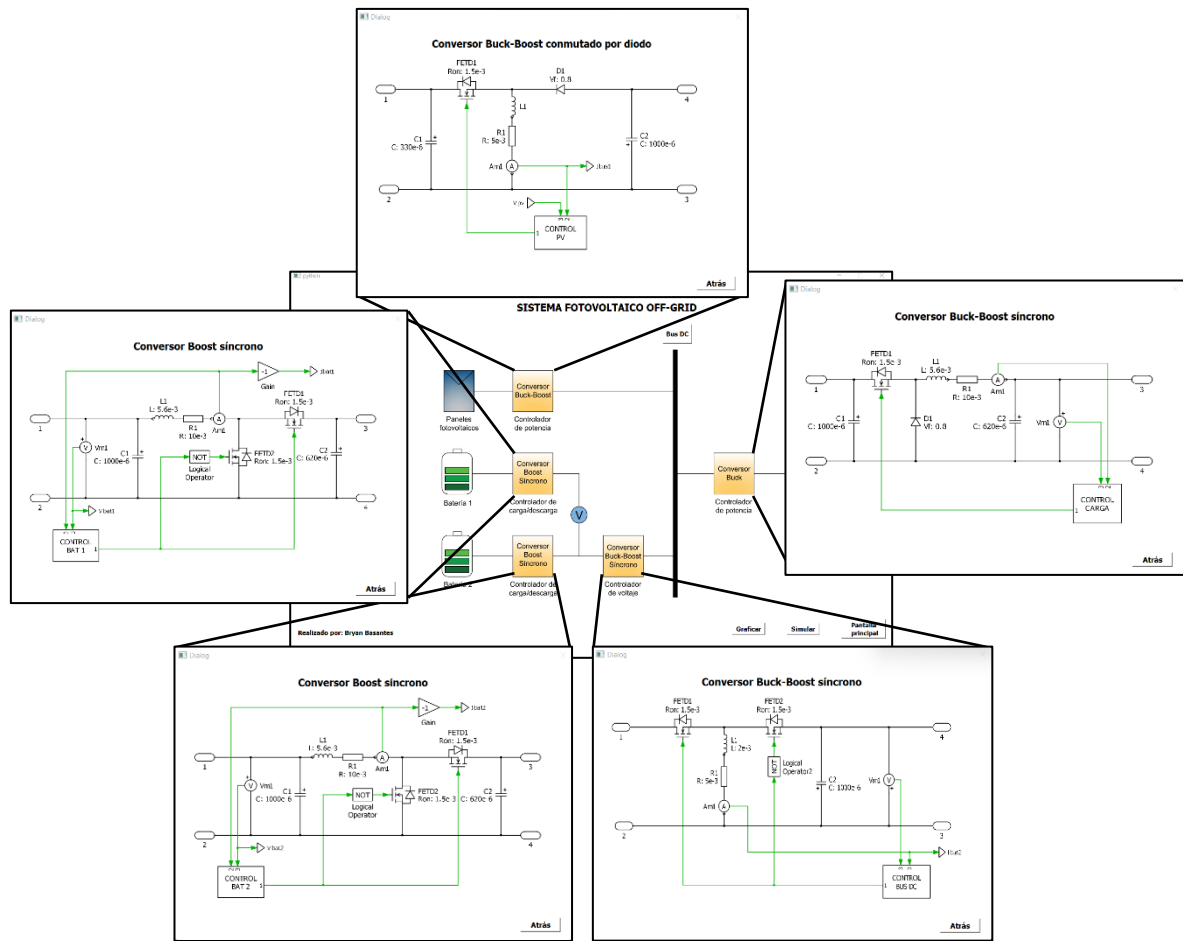
Cuando el programa identifique una dirección válida PLECS®.exe, se podrá acceder a la ventana de principal de interfaz (Figura 3.40) que permite la configuración e interacción con el usuario.



**Figura 3.40.** Ventana de interfaz principal

Como se observa en la Figura 3.41, la ventana de interfaz principal detalla un esquema general del sistema donde hay la posibilidad de interactuar con ventanas adicionales que muestran el detalle de los convertidores, paneles fotovoltaicos, baterías, carga y bus DC.

Del mismo modo, se cuenta con botones que muestran ventanas para configurar los perfiles de simulación (Irradiancia, Temperatura, Perfil de carga y Voltaje de bus DC) y otros botones (Graficar y Simular), en donde el primero permite graficar instantáneamente simulaciones almacenadas y el segundo conecta con PLECS®, ejecuta las simulaciones y muestra los resultados en gráficas en tiempo real. Referirse a la Figura 2.28 para más información acerca del funcionamiento del programa del GUI.



**Figura 3.41.** Ventanas de visualización de los convertidores

La primera funcionalidad del GUI permite el entrar a ventanas en donde se visualizan los elementos de los convertidores con los valores implementados como se muestra en la Figura 88. Por otro lado, a su vez en estas ventanas se puede acceder a otras ventanas de diálogo en donde se visualiza el algoritmo de control y como fue implementado en PLECS®, de esta manera, se puede entender de mejor manera el algoritmo de control de potencia propuesto para este sistema.

La siguiente funcionalidad, como se establece en la Figura 3.42, en el sistema existen cuatro puntos a configurar: la irradiancia, la temperatura, el perfil de carga y el voltaje del bus DC, estos parámetros se pueden configurar en cuatro ventanas en donde se muestra una previsualización de las opciones disponibles. Para cada ventana se planteó varias opciones preestablecidas, estas formas de onda se obtuvieron a partir de Simulink y se exportaron en archivos .mat que en el código de Python® se importan, grafican y se envían al archivo de simulación de PLECS®.



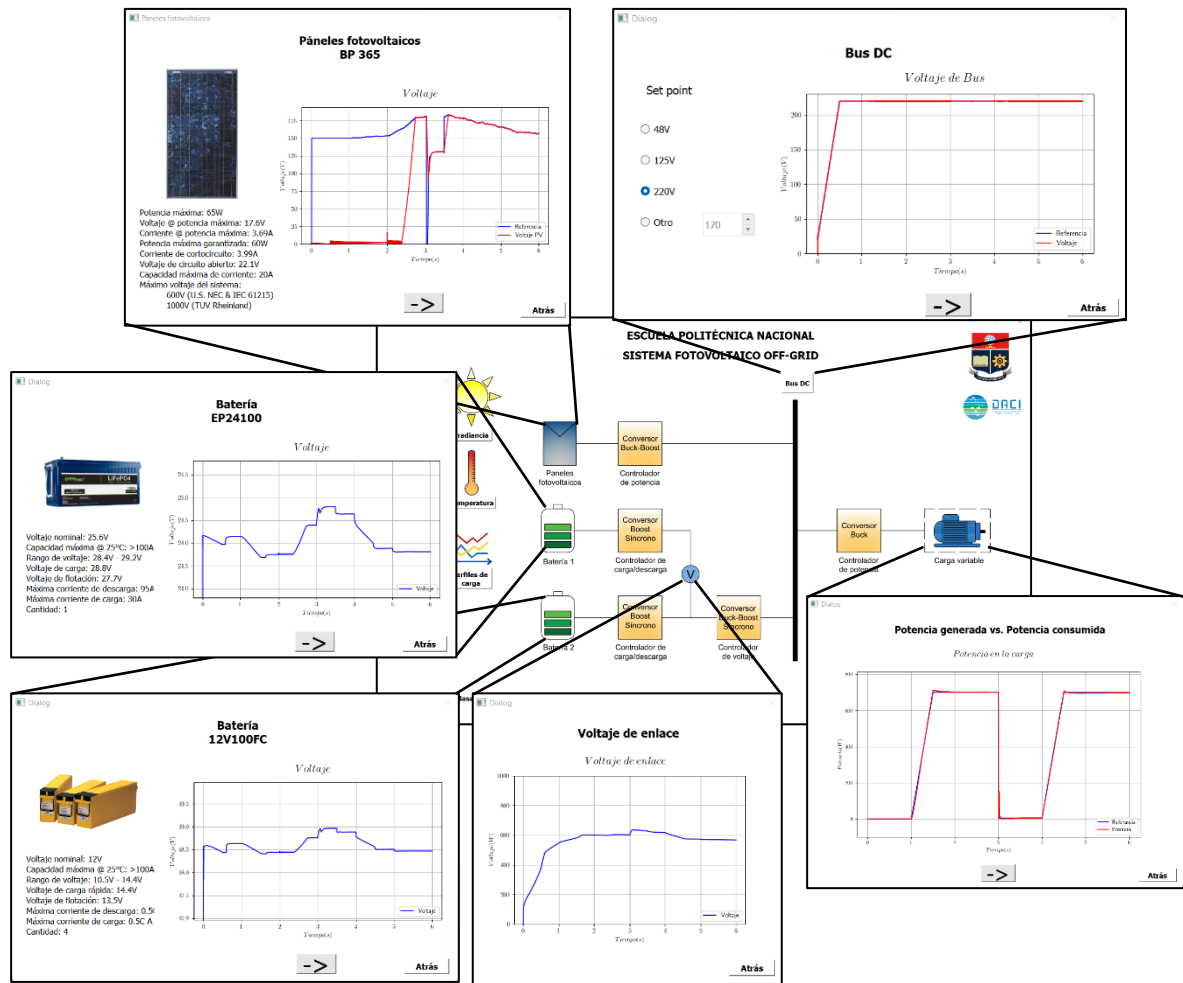


**Figura 3.42.** Ventanas de configuración de parámetros

Un detalle importante es que solamente se puede abrir una ventana a la vez ya que así se puede guardar la configuración al cerrar la ventana correspondiente y el no tener problemas con el manejo de múltiples ventanas lo que resulta especialmente útil en la animación de las gráficas en tiempo real. Otro aspecto a considerar es que en la ventana de configuración del voltaje del bus DC también se puede visualizar los resultados (voltaje y corriente) en este punto.

Adicionalmente, la última opción de las ventanas de configuración permite que directamente desde el GUI se establezca un valor fijo para cada variable, esta opción solamente estará disponible para la Simulación en tiempo real.

Finalmente, se visualizarán los resultados de la simulación, es decir, formas de onda relacionadas con cada parte del sistema; enfocándose en seis puntos: paneles fotovoltaicos, bancos de baterías (2), carga, bus DC y voltaje de enlace. En el caso de las fuentes de energía (paneles fotovoltaicos y baterías) adicionalmente de mostrar las gráficas, se detallan la información técnica de los elementos seleccionados.



**Figura 3.43.** Ventanas de visualización de resultados

En la Figura 3.43, se muestran todas las ventanas que permiten visualizar las formas de onda de cada componente del sistema, estas se acceden al hacer clic sobre los íconos correspondientes. Adicionalmente, estas ventanas cuentan con un botón que permite navegar a través de todas las gráficas disponibles para cada componente. Todas estas funcionalidades están disponibles tanto para graficar mediante la base de datos, o bien, para ejecutar simulaciones en tiempo real.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Como fue presentado, en términos de diseño el implementar un sistema fotovoltaico off-grid conlleva ciertos desafíos. El primero es que usar algoritmos MPPT y controlar eficientemente el flujo de energía que va a la carga y a las baterías al mismo tiempo no es posible todo el tiempo ya que habrá potencia excedente que se acumulará en los capacitores haciendo que el voltaje de estos aumente a niveles peligrosos. A esto se suma la implementación de un convertor bidireccional con un algoritmo de control que sea capaz de cargar las baterías mediante una técnica que prolongue su vida útil y que a su vez permita compensar la potencia enviada a la carga cuando los paneles fotovoltaicos no puedan suplir toda la potencia. Finalmente, si se requiere un bus DC con voltaje constante, se necesita diseñar un circuito capaz de controlar parámetros tanto en la entrada (paneles fotovoltaicos y baterías) como en la salida (carga) de manera simultánea, lo que hace necesario un algoritmo de control pensado en manejar el flujo de potencia sin comprometer la estabilidad del sistema.
- En base a los elementos propuestos, se diseñó y se implementó en simulación el circuito completo de los convertidores DC-DC; incluyendo los modelos de los paneles fotovoltaicos, baterías y carga, de un sistema que de acuerdo con los resultados cumple con todos los requerimientos propuestos en la sección 2.1. Incluyendo dos funcionalidades importantes que los sistemas comerciales no cuentan, siendo el primero la capacidad de conectar bancos de baterías con diferentes niveles de voltaje y el segundo el regular el voltaje del bus DC a un valor configurable, gracias a la implementación de un convertor dedicado.
- El tener un controlador para el voltaje del bus DC trae algunos beneficios como; permitir la conexión de diferentes cargas y de bancos de baterías con diferente nivel de voltaje mediante un convertor que controle la carga y descarga de las mismas.
- El contar con un convertor que controle el bus DC en cascada con otro que controle la carga y descarga de las baterías hace que exista flujos de potencia variable que pasa en el punto de unión entre estos. Como fue llamado, el voltaje de enlace se reduce con el tiempo si se presenta un perfil de carga exigente o altamente variable, ya que la potencia en este punto no es la necesaria y produce inestabilidades en el resto del sistema o por el contrario en el caso de que se tenga un exceso de potencia el voltaje de enlace aumenta indefinidamente. Por lo que se propuso una técnica de control por histéresis que permite mantener este voltaje dentro de un rango estable al

inyectar potencia desde las fuentes (paneles fotovoltaicos y baterías) en periodos esporádicos de tiempo. Esta técnica a pesar de que reduce la eficiencia del sistema permite el implementar el control del bus DC sin mayores complicaciones, manteniendo un flujo de potencia estable en todos los puntos del sistema.

- Conforme al análisis de resultados, el control basado en álgebra lineal probó ser eficiente en control de voltaje, corriente y potencia de convertidores DC-DC. En cambios de referencia tipo paso el control en cascada con controladores PI muestra un menor sobre impulso, pero el LABC tiene un mejor desempeño tanto en rechazo de perturbaciones como en seguimiento de trayectorias sobre todo en el control de corriente, manteniendo un esfuerzo de control menor, lo que hace que su aplicación sobre control de potencia con perfiles extremadamente variables como sistemas fotovoltaicos, UAVs, automóviles eléctricos, etc sea viable.
- El LABC permite una mayor facilidad de implementación ya que el proceso de sintonización de parámetros es explícito, siendo el rango del parámetro  $k_i$  (eliminación del error) limitado entre 0 y 1, lo cual hace que este proceso sea intuitivo; con métodos estocásticos y relativamente bajos ciclos de prueba y error se obtenga buenos resultados a diferencia de la sintonización de controladores clásicos.
- La mayor limitación que tiene el LABC es que no considera perturbaciones, pero al tomar en cuenta la matriz de perturbaciones  $\omega(t)$  en el desarrollo matemático del controlador, se puede rechazar perturbaciones. Esto mediante la sintonización del parámetro  $K_i$  que se presenta como un término integral que elimina el error en estado estable. Su sintonización resulta de igual manera relativamente sencilla que según los resultados en control de corriente este valor debe ser por lo menos 5 veces mayor al valor en el control de voltaje.
- Al ser un modelo basado en Euler se obtiene una ley de control discretizada que puede ser implementada directamente en sistemas digitales, a diferencia de controladores clásicos, en donde la sintonización de parámetros se la realiza en el modelo de tiempo continuo para luego ser discretizado lo que afecta su desempeño, teniendo que realizar ajustes a la sintonización.
- Como se muestra en los resultados, el LABC a pesar de ser modelado a partir de una linealización del sistema, es capaz de trabajar con sistemas no lineales apropiadamente, manteniendo la estabilidad en un rango considerable de puntos de trabajo.

- Otro aspecto en el que se destaca el LABC es que, con una sintonización sencilla, es capaz de superar el desempeño de controladores en cascada clásicos en rechazo de perturbaciones y seguimiento de trayectoria, manteniendo un error y esfuerzo de control bajo. Esto en convertidores reales permite obtener señales PWM más estables; lo que a su vez se ve reflejado en las formas de onda de corriente, en donde se presenta un menor rizado.
- El software PLECS® Standalone probó ser una potente y a la vez sencilla herramienta para realizar simulaciones de circuitos de conversión de energía, ofreciendo una interfaz amigable como la que cuenta MATLAB/SIMULINK pero sin conllevar a la alta carga computacional que tiene este. Cuenta con múltiples herramientas de análisis y control con un tiempo extremadamente bajo de ejecución lo que ayuda a su automatización mediante código. Adicionalmente, cuenta con un solver dedicado a electrónica de potencia capaz de ejecutar simulaciones de manera más rápida, evidenciándose en el tiempo de simulación del presente trabajo siendo menor a 10 min.
- La automatización de PLECS® Standalone mediante Python, permite el ejecutar múltiples simulaciones y procesar los datos para su posterior análisis de manera sencilla, acelerando el tiempo de pruebas y contando con más herramientas.
- La interfaz gráfica implementada cuenta con varias funcionalidades como muestra de resultados en tiempo real, configuración de parámetros, conexión directa con PLECS® Standalone; realizada mediante código de Python que gracias a sus múltiples funcionalidades y librerías permitieron establecer una interfaz funcional y amigable, sumado al hecho de que es un recurso de código abierto Python demuestra su versatilidad y su aplicabilidad en un sinnúmero de aplicaciones.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- El proyecto realizado muestra factores importantes a tomar en cuenta para el futuro, siendo el primero la viabilidad de la aplicación del LABC sobre convertidores DC-DC lo que abre paso a su investigación futura en otros sistemas como inversores, control de motores o en general sistemas que requieren un mejor control sobre trayectorias variables en el tiempo.
- Durante la sintonización de los controladores LABC es recomendable priorizar la robustez sobre la rapidez de la respuesta, ya que, durante el desarrollo del presente

proyecto, así como en anteriores se comprobó que de esta manera se obtienen mejores resultados.

- Se pudo comprobar el destacable desempeño del LABC sobre controladores convencionales PI sobre todo en el control del lazo interno (corriente), mientras que en el control del lazo externo (voltaje/potencia) esta diferencia se reduce, por lo que para proyectos en el futuro sería viable el profundizar acerca del funcionamiento combinado del LABC con otros controladores en circuitos de conversión de energía.
- Cada vez existen más proyectos enfocados en la generación y distribución DC y la importancia del control sobre el bus va incrementando conforme el voltaje en el mismo aumente también; siendo necesario la investigación de estos algoritmos de control para el desarrollo de proyectos dedicados a medio o alto voltaje DC.
- El uso de PLECS® Standalone, así como PLECS® Blockset es extremadamente recomendable durante las etapas de diseño y prototipado de circuitos de electrónica de potencia, gracias a sus herramientas de simulación y análisis es posible el desarrollar proyectos en un menor tiempo.
- Cuando se trabaja en la integración con Python, si se desea exportar y manejar grandes cantidades de datos desde PLECS® como en este proyecto, se recomienda el hacerlo en archivos cvs o mat para su posterior procesamiento y análisis, no utilizar la funcionalidad disponible en xmlrpc.
- Durante el desarrollo de interfaces gráficas en cualquier entorno, es importante familiarizarse con las funciones disponibles en Python para implementar multitareas, de caso contrario la navegación y funcionalidad de estas se verán afectadas en gran medida.
- Python al ser de código abierto y contar con una gran cantidad de herramientas disponibles, así como la correspondiente documentación y una comunidad activa, la hace recomendable para desarrollar una infinidad de proyectos en diferentes ramas de a ciencia. Específicamente el poder desarrollar interfaces gráficas o GUIs la hace aplicable no solo para análisis de datos sino para aplicaciones industriales como la elaboración de HMIs ideal para proyectos de control industrial de bajo presupuesto.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. R. E. A. IRENA, "Electricity Generation Country Rankings," 2019. [Online]. Available: <https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. [Accessed 22 11 2021].
- [2] A. Barriga, A. Montero, A. Barragán, E. Aguilera, E. Albornoz y F. D. Mayer, Energías renovables en el Ecuador, 1st ed., M. Peláez, J. Espinoza y M. García, Edits., Cuenca, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2015, pp. 360-362.
- [3] G. W. Crabtree y N. S. Lewis, «Solar energy conversion,» *Physics Today*, pp. 37-42, 2007.
- [4] L. Frass y L. Partain, Solar Cells and their Applications, 2nd ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [5] H.-E. Hayati y M. Shahab, «Solar Edition,» Solar Edition, 2020. [En línea]. Available: <https://solaredition.com>. [Último acceso: 10 December 2021].
- [6] P. Mohanty, T. Muneer y M. Kolhe, Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification, New York: Springer, 2016.
- [7] A. Jossen, J. Garche y D. Uwe Sauer, «Operation conditions of batteries in PV applications,» *Solar energy*, vol. 76, pp. 759-769, 2004.
- [8] P. Manimekalai, R. Harikumar y S. Raghavan, «An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems,» *International Journal of Computer Application*, vol. 82, n° 12, pp. 28-32, 2013.
- [9] D. Hart, Electrónica de potencia, Prentice-Hall, 2001.
- [10] M. Rashid, Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones, Prentice-Hall, 1995.
- [11] H. Sher y K. Addoweesh, «Micro-inverters -- Promising solutions in solar photovoltaics,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, pp. 389-400, 2012.
- [12] A. K. Donadi y W. V. Jahnvi, «Review of DC-DC Converters in Photovoltaic System for MPPT Systems,» *International Reserarch Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 6, n° 6, pp. 1914-1918, 2019.
- [13] F. Mumtaz, N. Z. Yahaya, S. T. Meraj, B. Singh, R. Kannan y O. Ibrahim, «Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 3, n° 22, pp. 1-17, 2021.
- [14] M. He, «Maxim Integrated,» Analog Devices, 22 January 2016. [En línea]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/6/6129.html>. [Último acceso: 20 December 2021].
- [15] L. Wang, X. Wei, Y. Shao, T. Zhu y J. Zhang, «MPPT of PV array using stepped-up chaos optimization algorithm,» *MPPT of PV array using stepped-up chaos optimization algorithm*, vol. 23, pp. 1748-1760, 2015.

- [16] S. A. Rahman, R. K. Varma y T. Vanderheide, «Generalised model of a photovoltaic panel,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, nº 3, pp. 217-229, 2013.
- [17] M. Villalva, J. Gazoli y E. Filho, «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 5, pp. 1190-1208, 2009.
- [18] Mathworks, «PV Array,» Mathworks, 2015. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>. [Último acceso: 21 Diciembre 2021].
- [19] A. Vera, J. Delgado y S. Sepúlveda, «Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab,» *Rev.investig.desarro.innov*, vol. 8, nº 3, pp. 343-356, 2018.
- [20] Mathworks, «MPPT Algorithm,» Mathworks, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/mppt-algorithm.html>. [Último acceso: 21 December 2021].
- [21] H. A. Kazem, M. Chaichan, A. Al-Waeli y K. Mani, «Effect of Shadow on the Performance of Solar Photovoltaic.,» de *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy*, 2016, pp. 379-385.
- [22] H. Taheri, Z. Salam, K. Ishaque y Syafaruddin, «A Novel Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System Under Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Using Differential Evolution,» *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, pp. 82-87, 2010.
- [23] W. Min, Z. Xiaoli, L. Xiaoquin, D. Zhengang y Y. Jun, «Design of MPPT Algorithm under Partial Shadows,» *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011.
- [24] T. Zhou y W. Sun, «Study on maximum power point tracking of photovoltaic array in irregular shadow,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 66, pp. 227-234, 2015.
- [25] O. Tremblay, L.-A. Dessaint y A.-I. Dekkiche, «A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,» *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 284-289, 2007.
- [26] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen y H. He, «Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries,» *Energy*, vol. 183, pp. 220-234, 2019.
- [27] Q. Dong, H. Kang y Y. Yan, «Effect of charge cutoff voltage on electrochemical performance of lithium ion battery,» *Chem Ind Eng Prog*, vol. 27, nº 5, pp. 770-772, 2008.
- [28] M. Hoque, M. Hannan y A. Mohamed, «Optimal CC-CV charging of the lithium ion battery for charge equalization controller,» de *Electronics Systems Engineering Internal Conference*, 2016.



- [29] E. Ayoub y N. Karami, «Review on the charging techniques of a Li-ion battery,» de *Third international conference on technological advances in electrical, electronics and computer engineering (TAECE)*, 2015.
- [30] G. Sikha, P. Ramadass, B. Haran, R. White y B. Popov, «Comparison of the capacity fade of Sony US 18650 cells charged with different methods,» *Power Sources*, vol. 122, nº 1, pp. 67-76, 2003.
- [31] L. Chen, C. Roy y C. Liu, «A design of a grey-predicted Li-ion battery charge system,» *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 55, nº 10, pp. 3692-3701, 2008.
- [32] L. Patnaik, P. Jaya Sai y S. S. Williamson, «A Closed-loop Constant-temperature Constant-voltage Charging Technique to Reduce Charge Time of Lithium-ion Batteries,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, nº 1, 2018.
- [33] D. Hristu-Varsakelis y W. Levine, *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, Boston: Birkhäuser, 2005.
- [34] J. Silva y S. Pinto, «Linear and Nonlinear Control of Switching Power Converters.,» de *Power Electronics Handbook*, 2018, pp. 1141-1220.
- [35] G. Scaglia, M. Serrano y P. Albertos, *Linear Algebra Based Controllers Design and Applications*, San Juan: Springer, 2020.
- [36] M. Sardella, M. Serrano, O. Camacho y G. Scaglia, «Design and Application of a Linear Algebra Based Controller from a Reduced-Order Model for Regulation and Tracking of Chemical Processes under Uncertainties,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, pp. 15222-15231, 2019.
- [37] M. Serrano, G. Scaglia, S. Godoy, V. Mut y O. Ortiz, «Trajectory Tracking of Underactuated Surface Vessels: A Linear Algebra Approach,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, pp. 1103-1111, 2014.
- [38] A. Rosales, G. Scaglia, V. Mut y F. di Sciascio, «Formation control and trajectory tracking of mobile robotic systems - a Linear Algebra approach,» *Robotica*, vol. 29, pp. 335-349, 2010.
- [39] G. Scaglia, P. Aballay, M. Serrano, O. Ortiz, M. Jordan y M. Vallejo, «Linear algebra based controller design applied to a bench-scale oenological alcoholic fermentation,» *Control Engineering Practice*, vol. 25, pp. 66-74, 2014.
- [40] C. Rosales, D. Gandolfo, G. Scaglia, M. Jordan y R. Carelli, «Trajectory tracking on a mini four-rotor helicopter in dynamic environments - a linear algebra approach,» *Robotica*, vol. 25, pp. 1628-1652, 2015.
- [41] N. Barreiros, B. Basantes, F. Ulloa, M. Pozo y O. Camacho, «A Linear Algebra Based Controller Approach for Bidirectional Synchronous Converter,» *Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE)*, 2021.
- [42] Plexim, «PLECS,» Plexim, 2022. [En línea]. Available: <https://www.plexim.com/products/plecs>. [Último acceso: 10 Abril 2022].

- [43] IONOS, «¿Qué es una interfaz gráfica de usuario (GUI)?», IONOS Inc., 10 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.ionos.mx/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/que-es-una-gui/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [44] Plexim, «PLECS XML-RPC Interface and Controller Design in Python», Plexim, 2022. [En línea]. Available: [https://www.plexim.com/sites/default/files/tutorials\\_categorized/plecs/xmlrpc\\_controller\\_design.pdf](https://www.plexim.com/sites/default/files/tutorials_categorized/plecs/xmlrpc_controller_design.pdf). [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [45] Python, «Applications for Python», Python, 2022. [En línea]. Available: <https://www.python.org/about/apps/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [46] Riverbank Computing, «What is PyQt?», Riverbank Computing, 2022. [En línea]. Available: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [47] The Qt Company Ltd., «Qt Designer Manual», The Qt Company Ltd., 2022. [En línea]. Available: <https://doc.qt.io/qt-6/qt designer-manual.html>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [48] CUI INC, «CURRENT SHARING WITH POWER SUPPLIES», CUI, [En línea]. Available: <https://www.cui.com/catalog/resource/current-sharing-with-power-supplies>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [49] Super Power Electronics, «What is Current Sharing?», Super Power Electronics, 2019. [En línea]. Available: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-current-sharing/>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [50] J. Schönberger, «Modeling a Photovoltaic String using PLECS® - Application Example», Plexim, [En línea]. Available: [https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs\\_pvstring.pdf](https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs_pvstring.pdf). [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [51] bp solar, «BP 365 Datasheet», bp solar, 2004. [En línea]. Available: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/922/BP365-pdf.php>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [52] EXPERT POWER, «12V 100Ah LiFePO4 - EP12100», [En línea]. Available: <https://www.expertpower.us/products/ep12100-100ah>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [53] EnerSys, «BATERÍAS POWERSAFE V-FT», EnerSys, 10 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.enersys.com/es/products/batteries/powersafe/powersafe-v-ft/>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [54] Mathworks, «Battery», Mathworks, [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [55] A. Munadir, «Modeling Lithium-ion Battery Chargers in Plecs - Application Example», Plexim, [En línea]. Available:

[https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs\\_lithium\\_ion\\_adv.pdf](https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs_lithium_ion_adv.pdf). [Último acceso: 21 Enero 2022].

- [56] M. Zehendner y M. Ulmann, *Power Topologies Handbook*, Dallas: Texas Instruments, 2016.
- [57] T. Suntio, *Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control*, WILEY-VCH.
- [58] tinix84, «Pyplecs,» 6 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://github.com/tinix84/pyplecs>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [59] Real Python, «Use PyQt's QThread to Prevent Freezing GUIs - Real Python,» Real Python, 2022. [En línea]. Available: <https://realpython.com/python-pyqt-qthread/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [60] M. Gopal, *Digital Control and State Variable Methods*, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2003.
- [61] Plexim, «Frequency Analysis of Buck Converter,» Plexim, 2018. [En línea]. Available: <https://www.plexim.com/support/application-examples/187>. [Último acceso: 13 02 2022].
- [62] L. Carvajal, *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [63] N. H. Baharudin, T. Mansur, H. F, A. R y M. M, «Topologies of DC-DC Converter in Solar PV Applications,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, nº 2, pp. 368-374, 2017.

# **ANEXOS**

ANEXO A. RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA DIFERENTES PERFILES

ANEXO B. DESCRIPCIÓN DE ARCHIVO DE SIMULACIÓN EN PLECS®

ANEXO C. GUÍA DE USO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

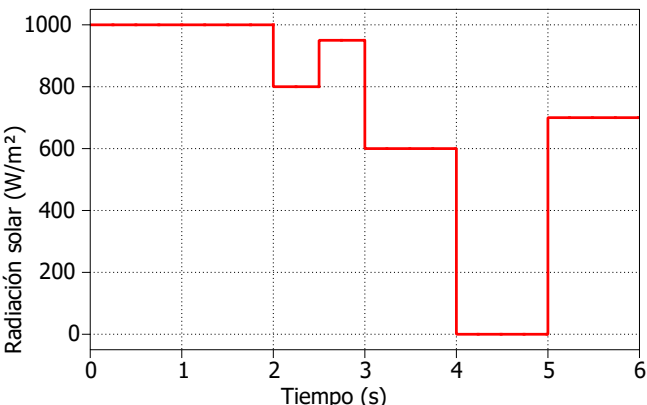
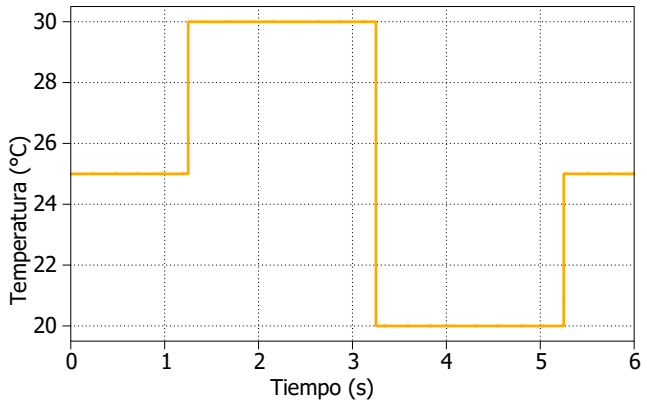
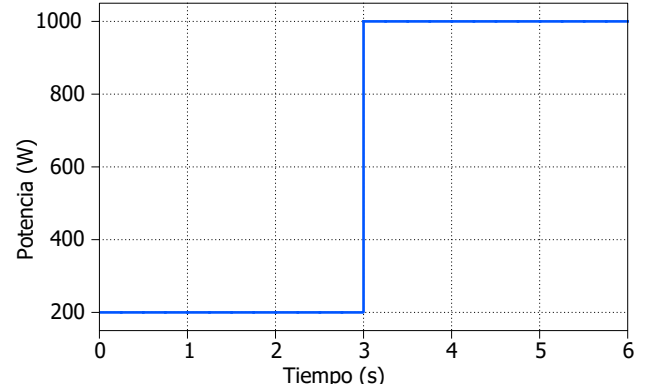
# ANEXO A

## RESULTADOS DE SIMULACIONES PARA DIFERENTES PERFILES

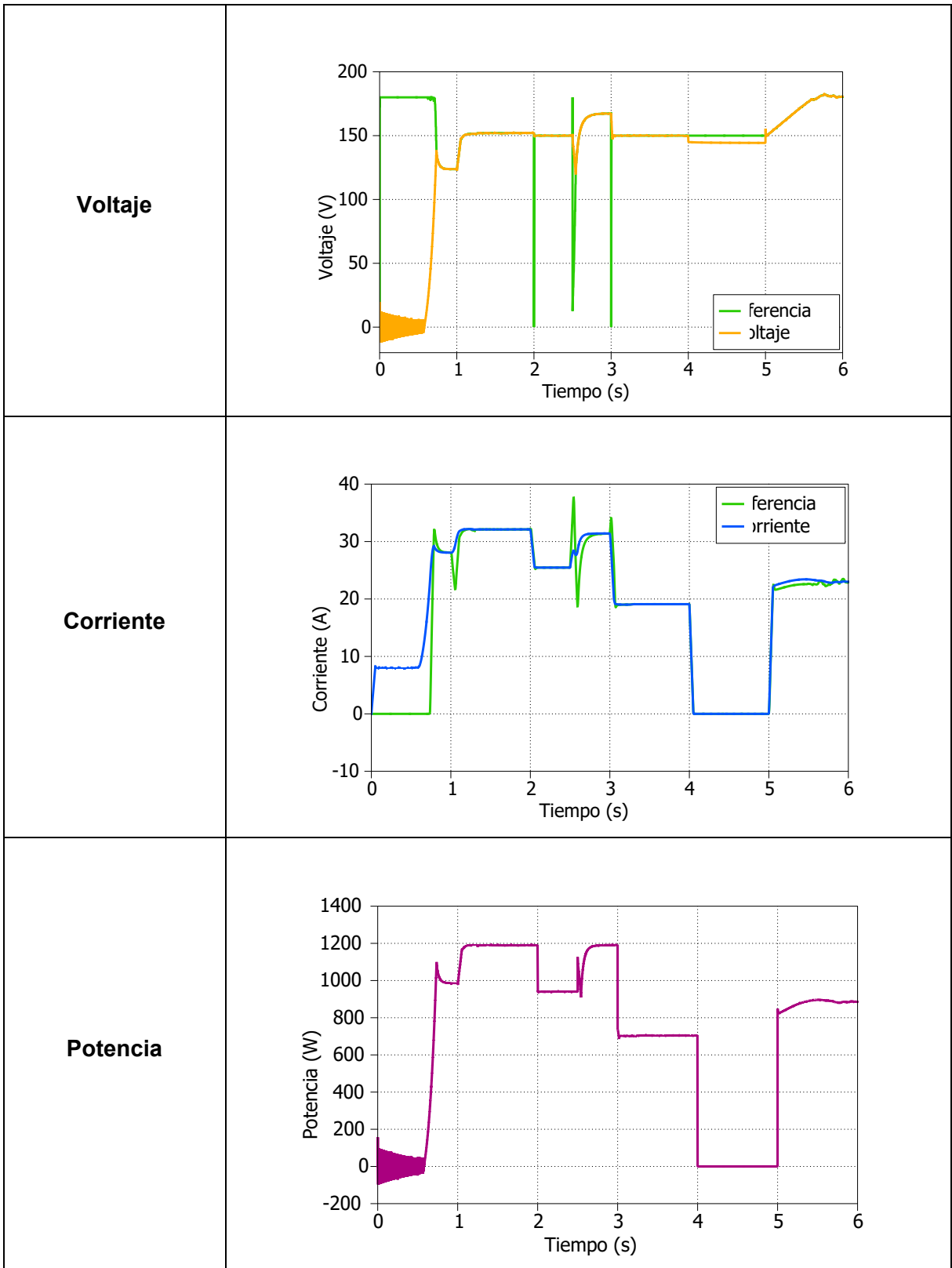
A continuación, se presentan algunas de los resultados disponibles para la simulación, donde primero se detallan los perfiles de radiación solar, temperatura y carga utilizados, se realizaron simulaciones con varios niveles de voltaje en el bus DC.

### SIMULACIÓN 1

#### Perfiles

<b>Radiación solar</b>	 <table border="1"><thead><tr><th>Tiempo (s)</th><th>Radiación solar (W/m²)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>1000</td></tr><tr><td>1</td><td>1000</td></tr><tr><td>2</td><td>800</td></tr><tr><td>2.5</td><td>950</td></tr><tr><td>3</td><td>600</td></tr><tr><td>4</td><td>0</td></tr><tr><td>5</td><td>700</td></tr><tr><td>6</td><td>700</td></tr></tbody></table>	Tiempo (s)	Radiación solar (W/m²)	0	1000	1	1000	2	800	2.5	950	3	600	4	0	5	700	6	700
Tiempo (s)	Radiación solar (W/m²)																		
0	1000																		
1	1000																		
2	800																		
2.5	950																		
3	600																		
4	0																		
5	700																		
6	700																		
<b>Temperatura</b>	 <table border="1"><thead><tr><th>Tiempo (s)</th><th>Temperatura (°C)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>25</td></tr><tr><td>1.5</td><td>30</td></tr><tr><td>3.5</td><td>20</td></tr><tr><td>5.5</td><td>25</td></tr><tr><td>6</td><td>25</td></tr></tbody></table>	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	0	25	1.5	30	3.5	20	5.5	25	6	25						
Tiempo (s)	Temperatura (°C)																		
0	25																		
1.5	30																		
3.5	20																		
5.5	25																		
6	25																		
<b>Potencia</b>	 <table border="1"><thead><tr><th>Tiempo (s)</th><th>Potencia (W)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>200</td></tr><tr><td>3</td><td>1000</td></tr><tr><td>6</td><td>1000</td></tr></tbody></table>	Tiempo (s)	Potencia (W)	0	200	3	1000	6	1000										
Tiempo (s)	Potencia (W)																		
0	200																		
3	1000																		
6	1000																		

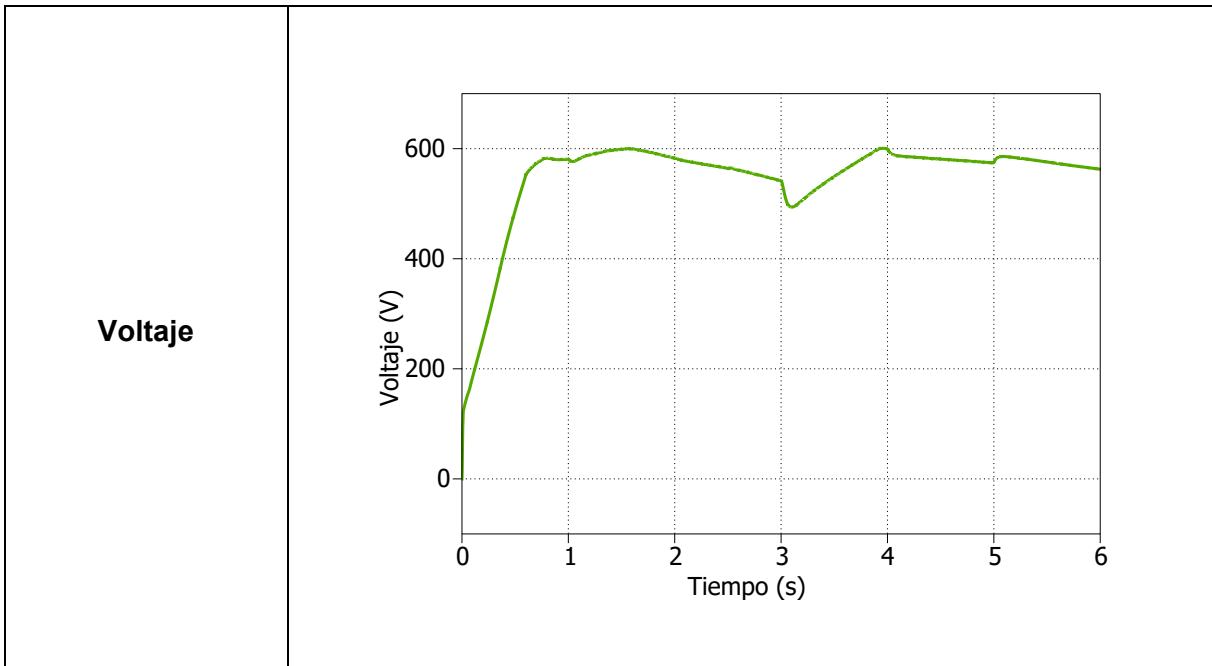
## Paneles fotovoltaicos



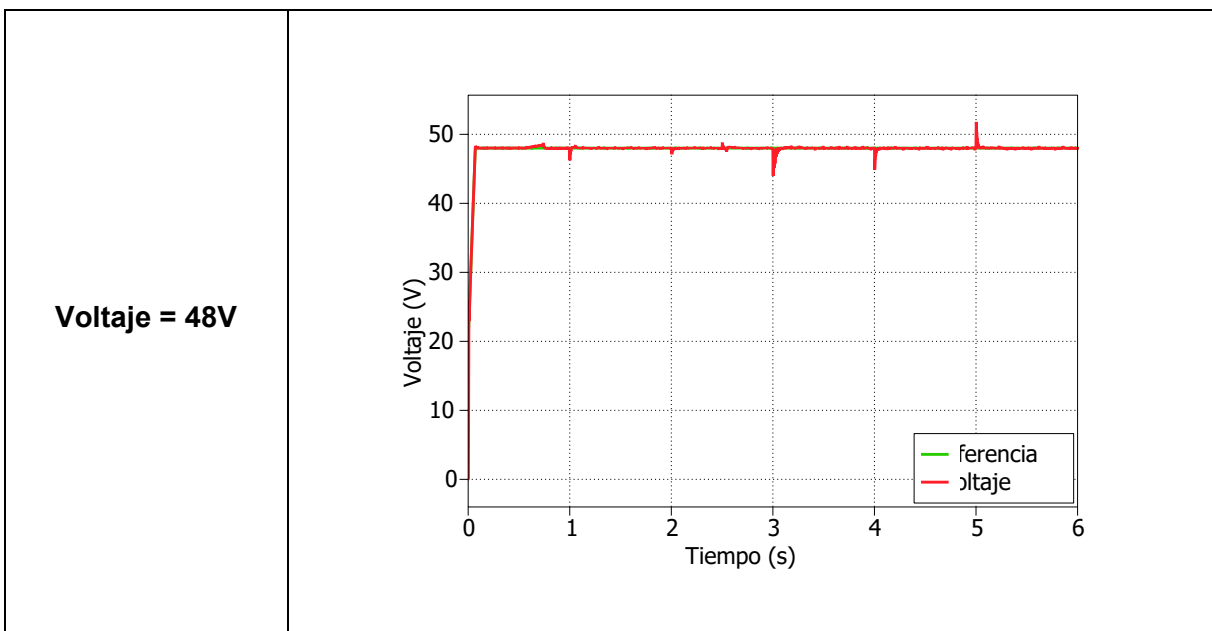
# Baterías

	Banco de baterías 1 – EP24100	Banco de baterías 2 - 12V100FC
Voltaje	<p>Graph showing Voltage (V) vs Time (s) for Banco de baterías 1. The voltage starts at 24.0V, rises to 24.8V at 1s, drops to 23.9V at 3s, and returns to 24.1V at 5s.</p>	<p>Graph showing Voltage (V) vs Time (s) for Banco de baterías 2. The voltage starts at 48.6V, rises to 49.0V at 1s, drops to 48.5V at 3s, and returns to 48.6V at 5s.</p>
Corriente	<p>Graph showing Current (A) vs Time (s) for Banco de baterías 1. The current is 0A until 1s, then drops to -20A, rises to 10A at 3s, and 20A at 4s.</p>	<p>Graph showing Current (A) vs Time (s) for Banco de baterías 2. The current is 0A until 1s, then drops to -10A, rises to 5A at 3s, and 10A at 4s.</p>
Potencia	<p>Graph showing Power (W) vs Time (s) for Banco de baterías 1. The power is 0W until 1s, then drops to -500W, rises to 200W at 3s, and 500W at 4s.</p>	<p>Graph showing Power (W) vs Time (s) for Banco de baterías 2. The power is 0W until 1s, then drops to -500W, rises to 200W at 3s, and 500W at 4s.</p>

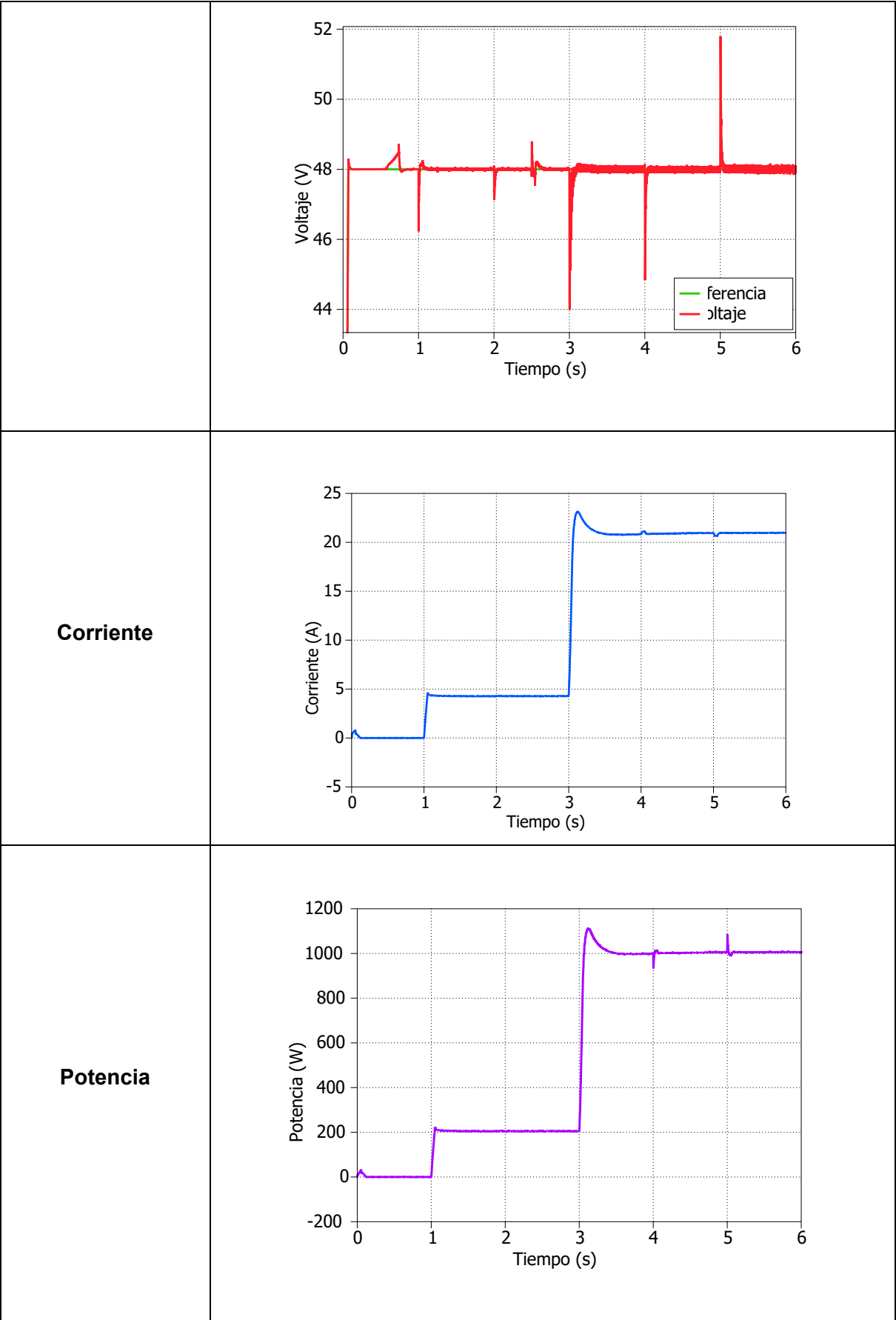
### Voltaje de enlace



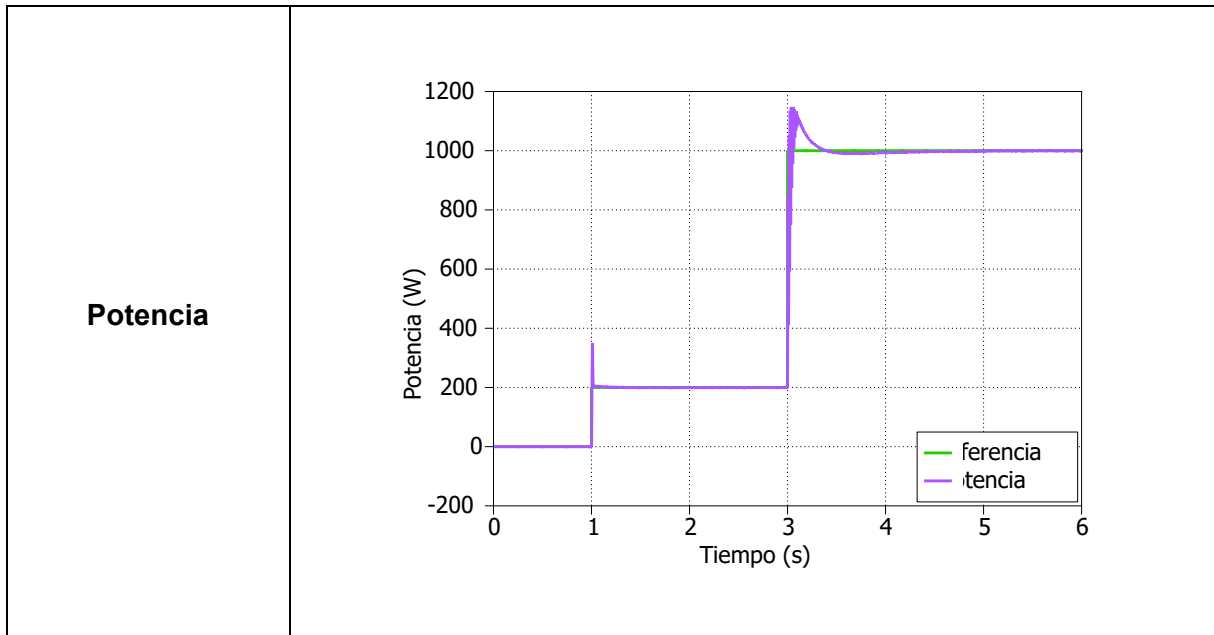
### Bus DC



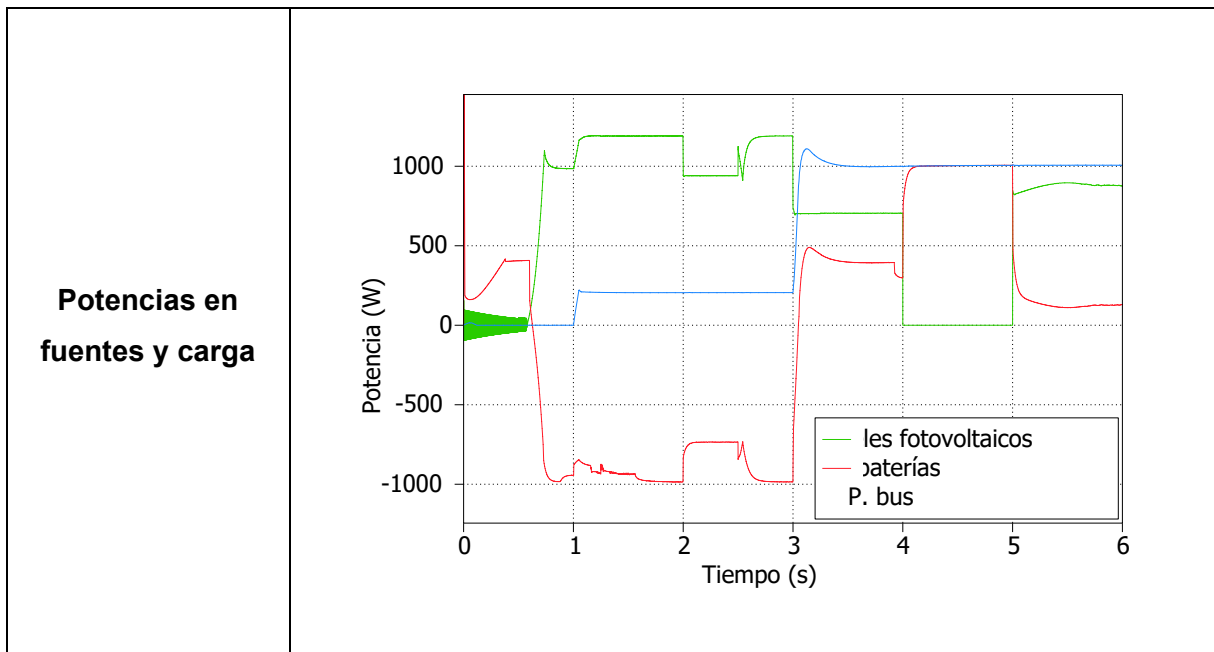


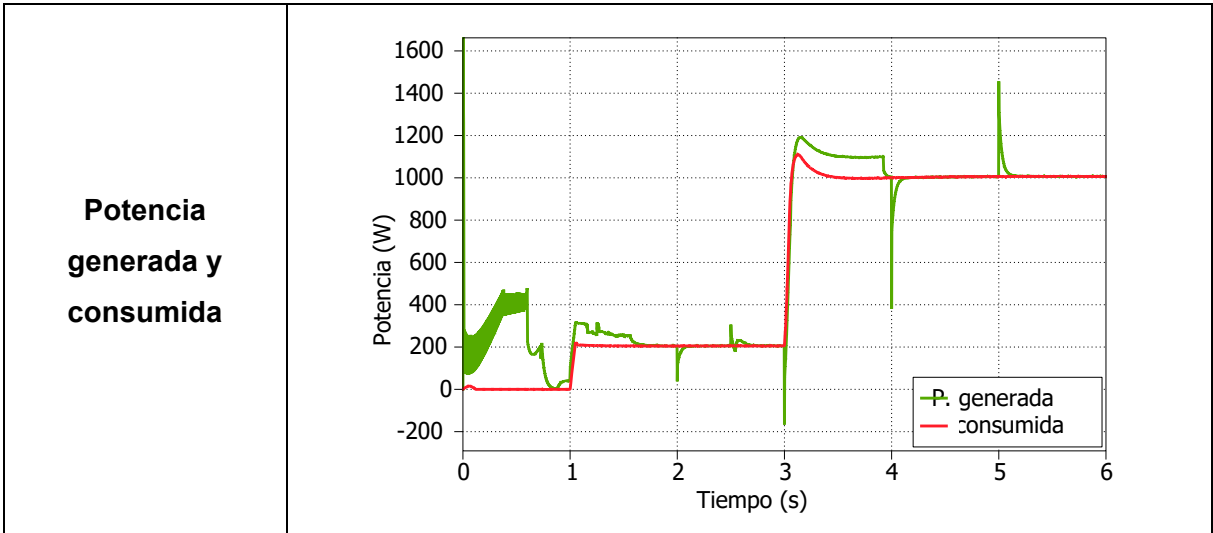


## Carga



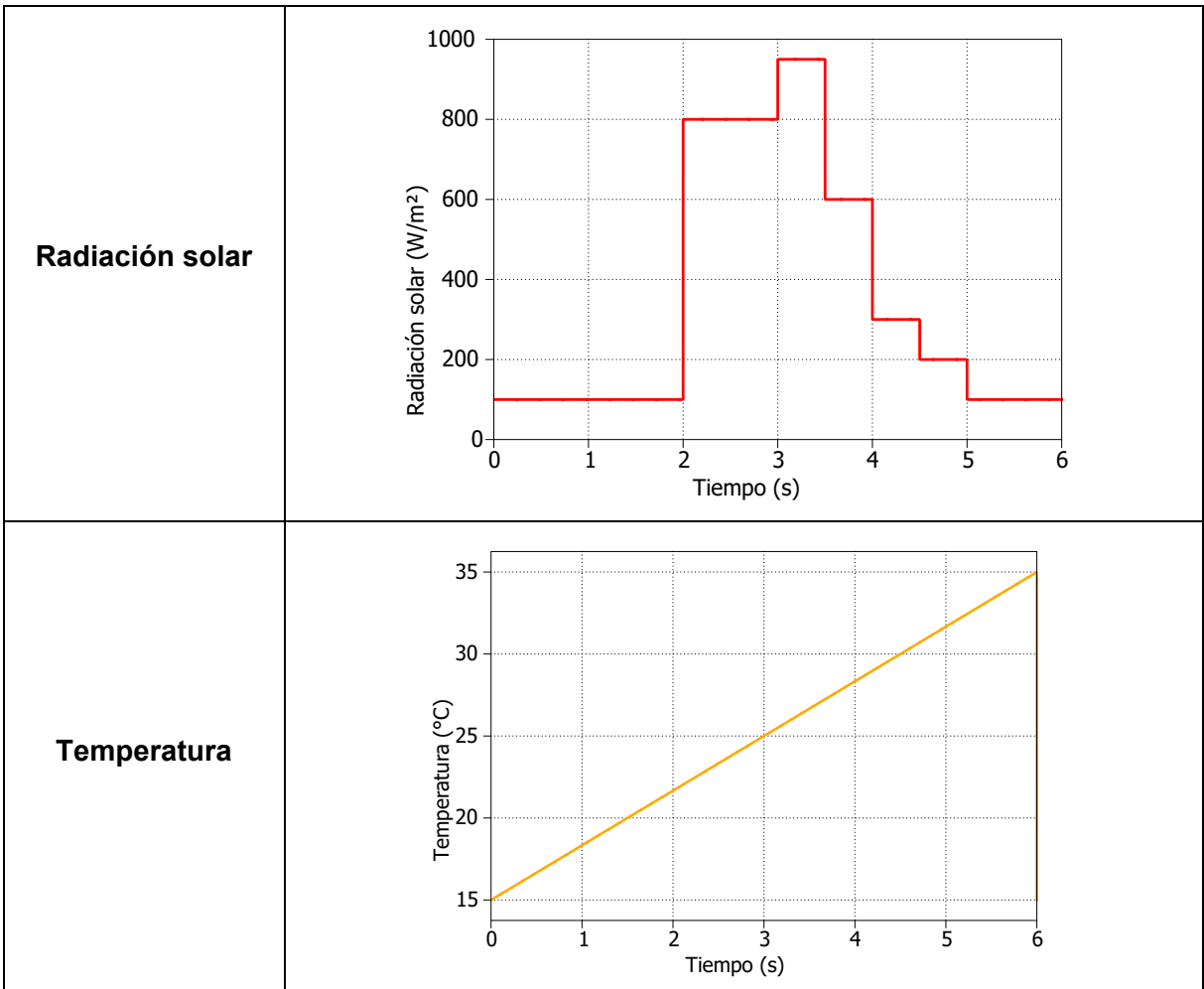
## Comparación de potencia

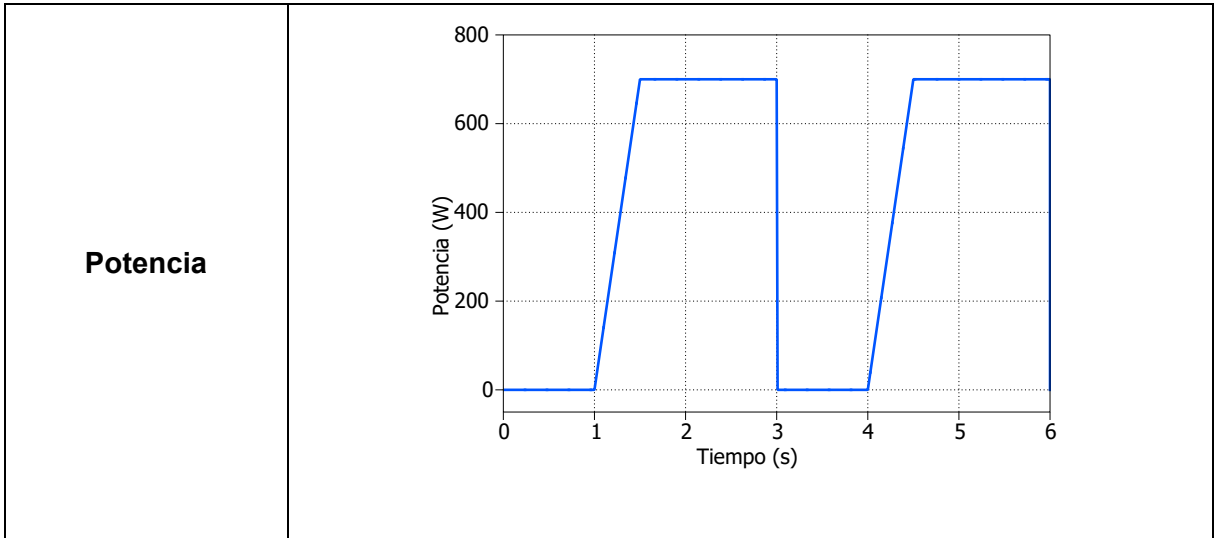




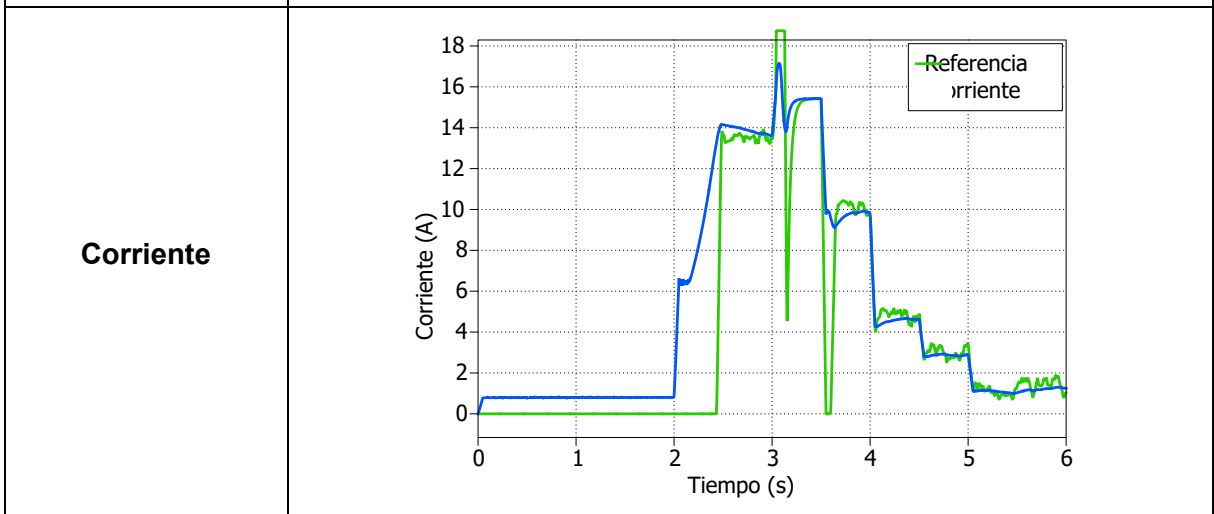
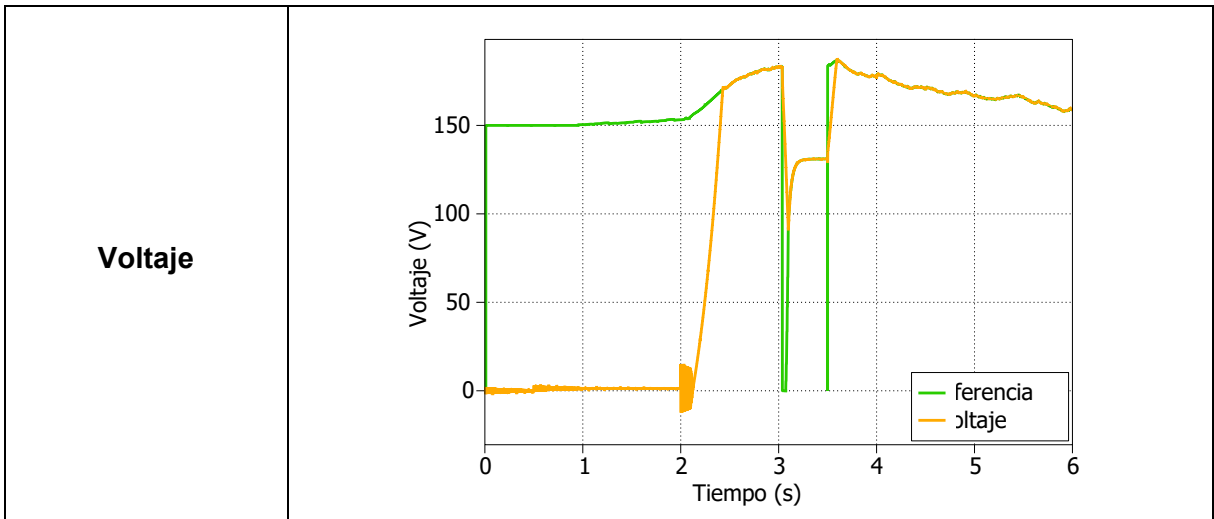
## SIMULACIÓN 2

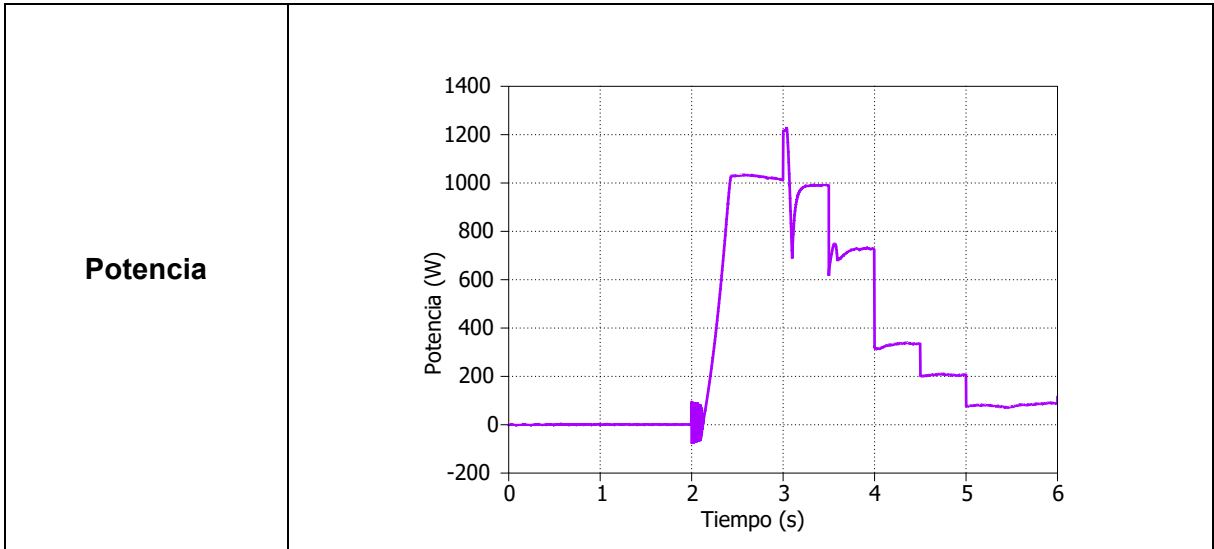
### Perfiles



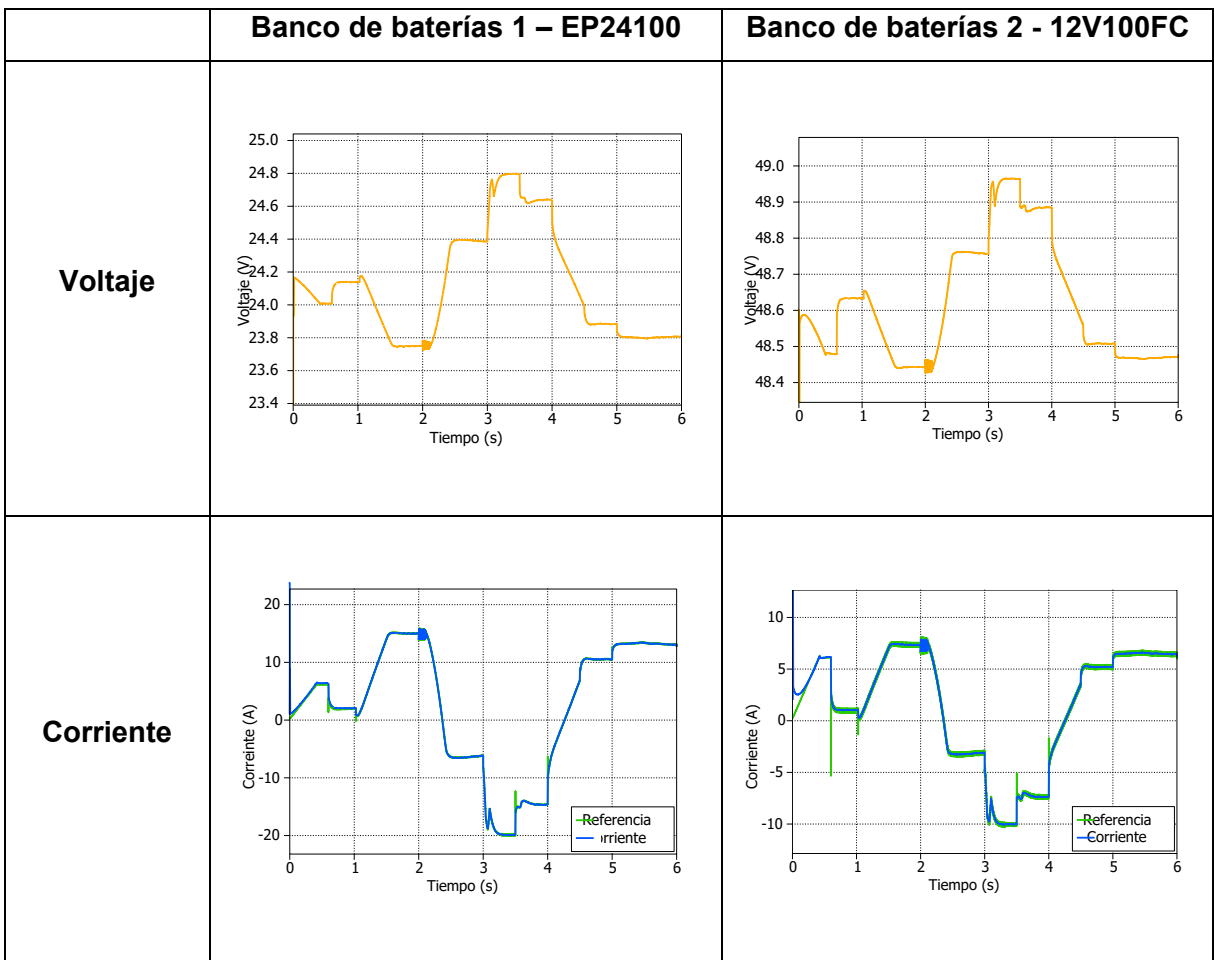


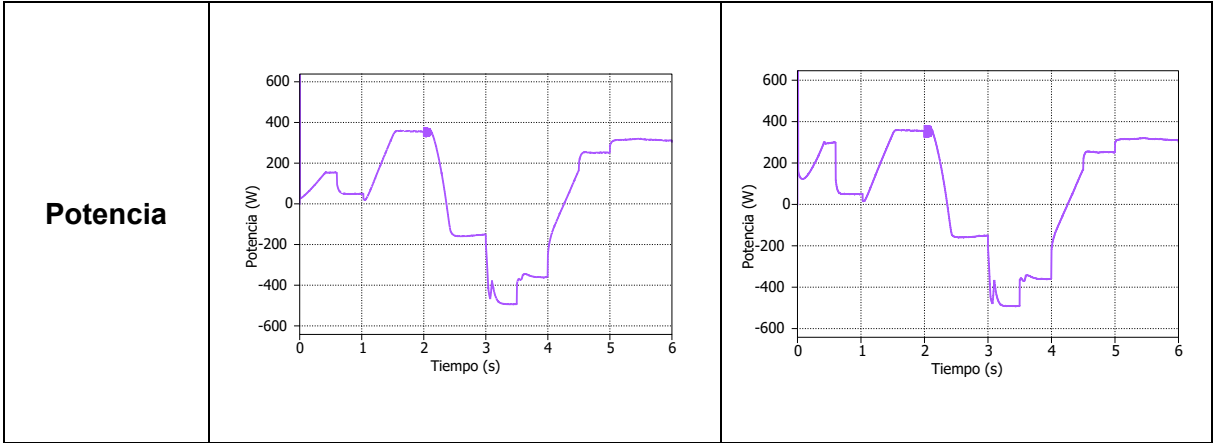
**Paneles fotovoltaicos**



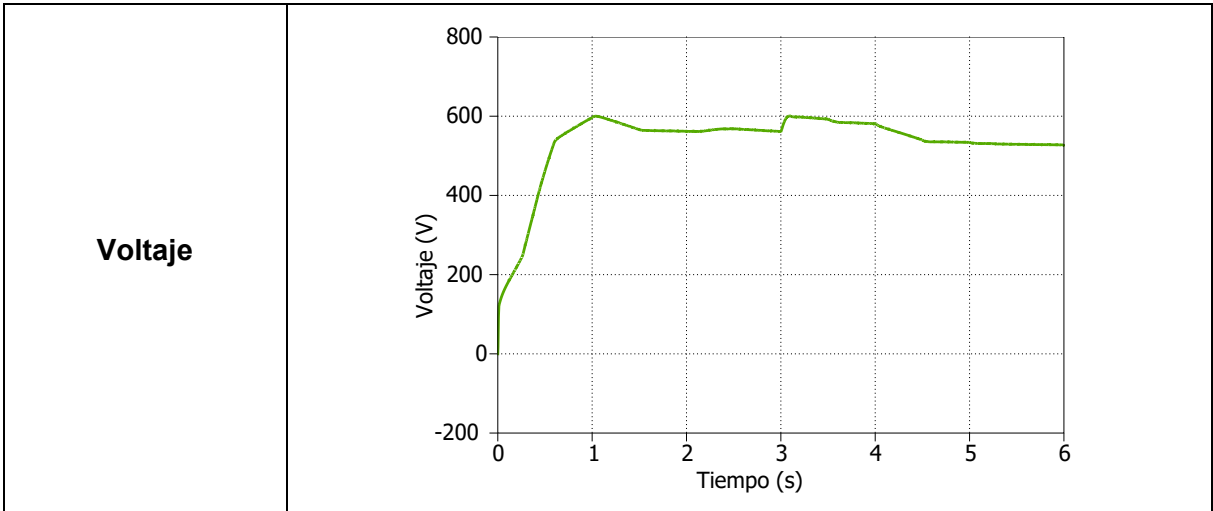


**Baterías**

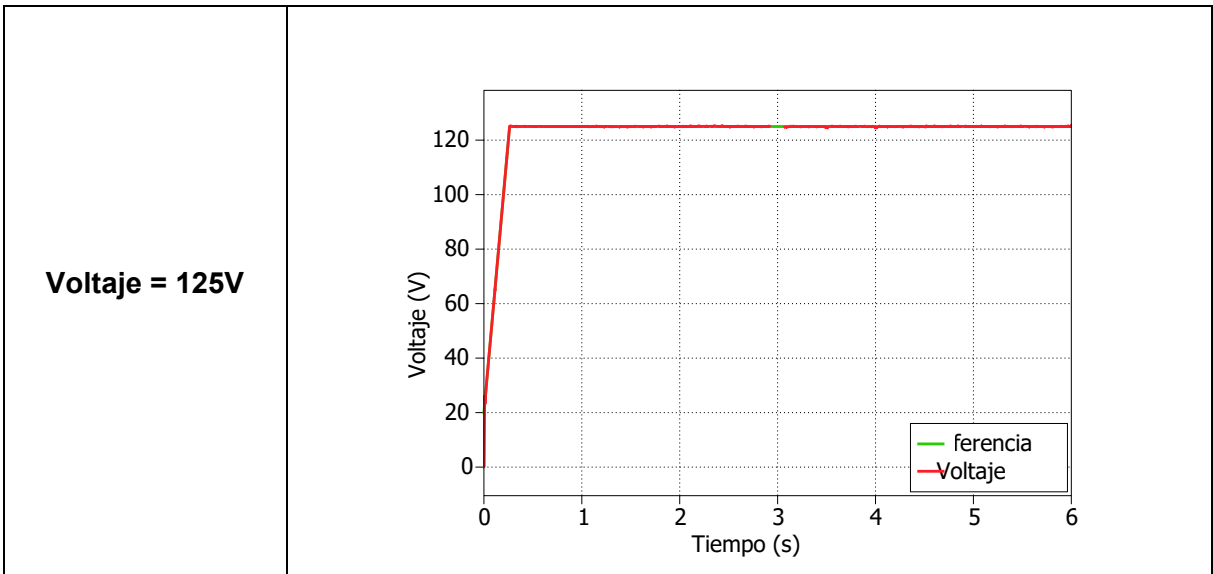


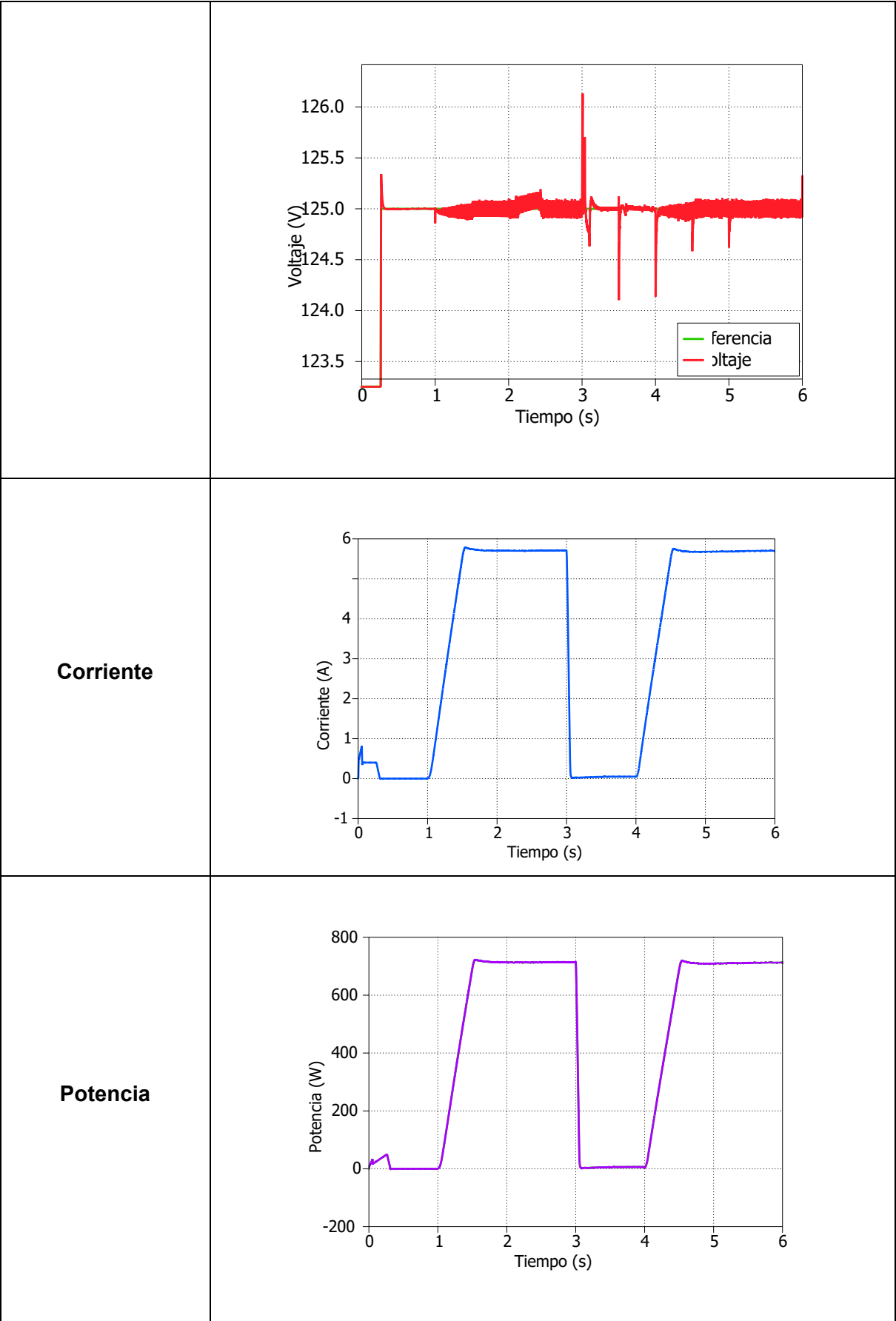


**Voltaje de enlace**

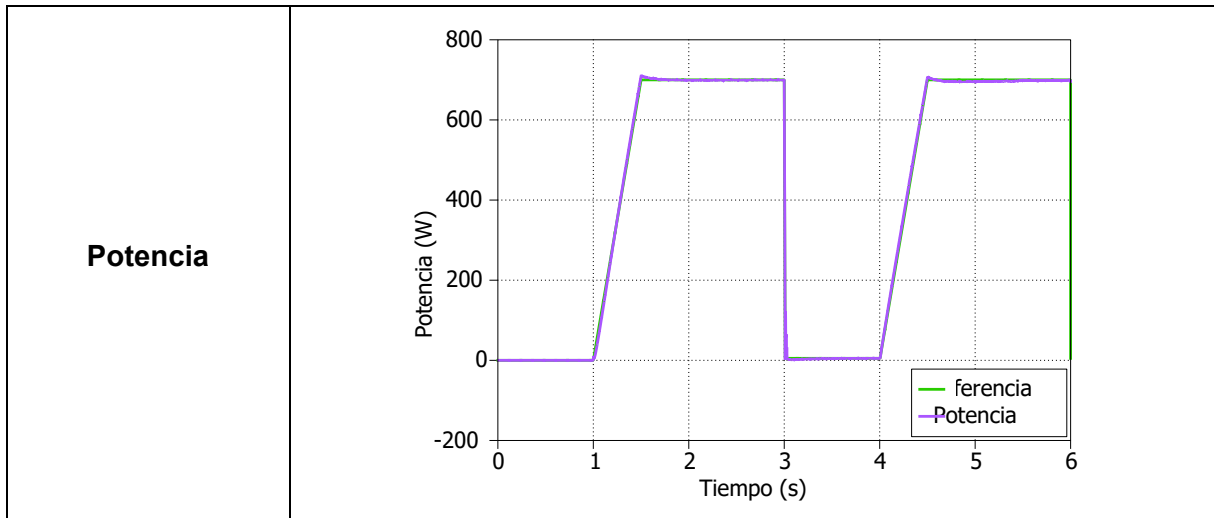


**Bus DC**

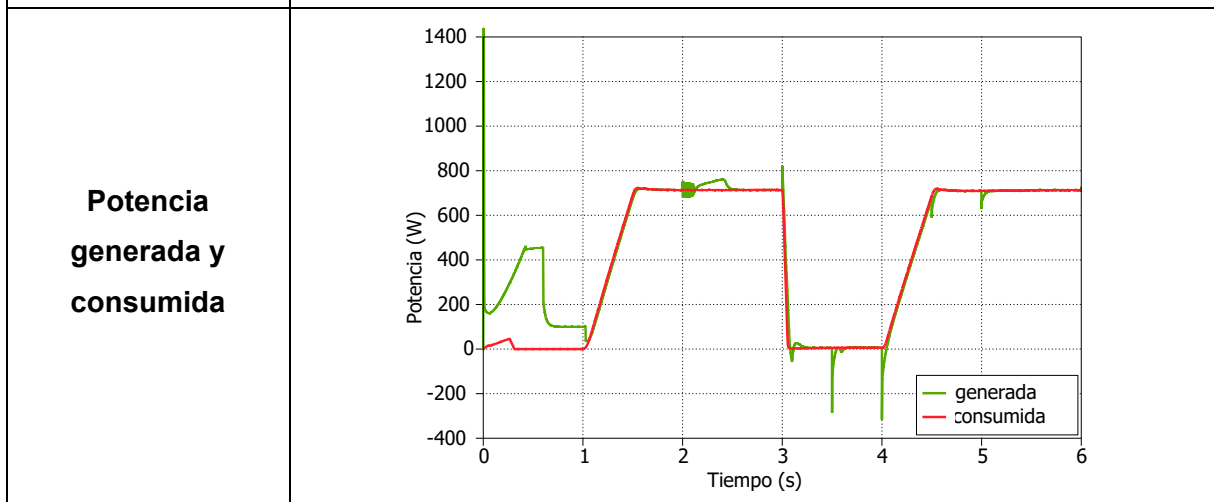
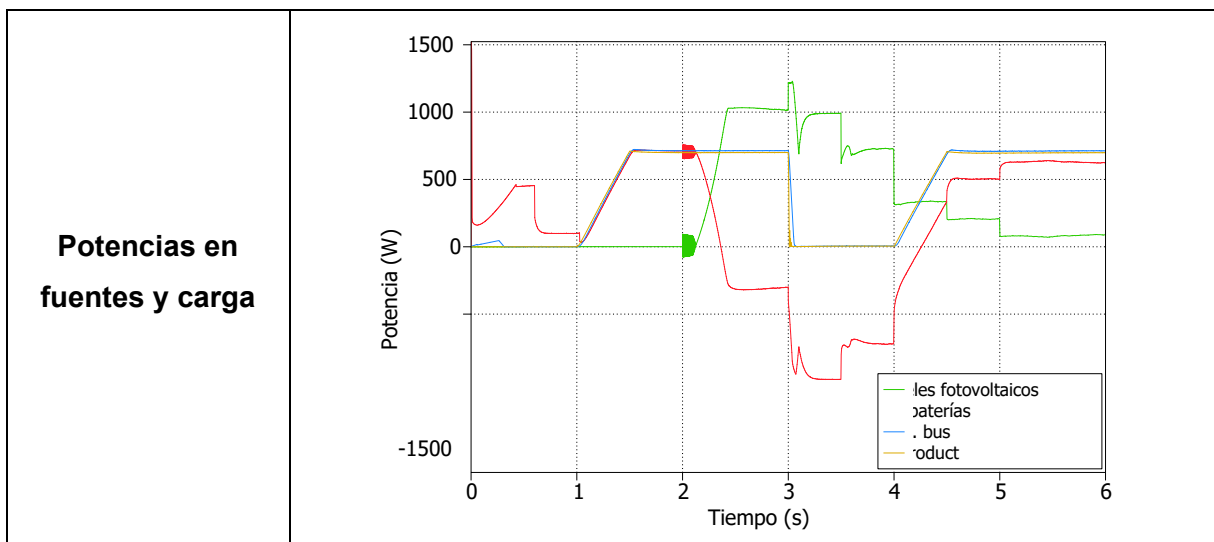




## Carga



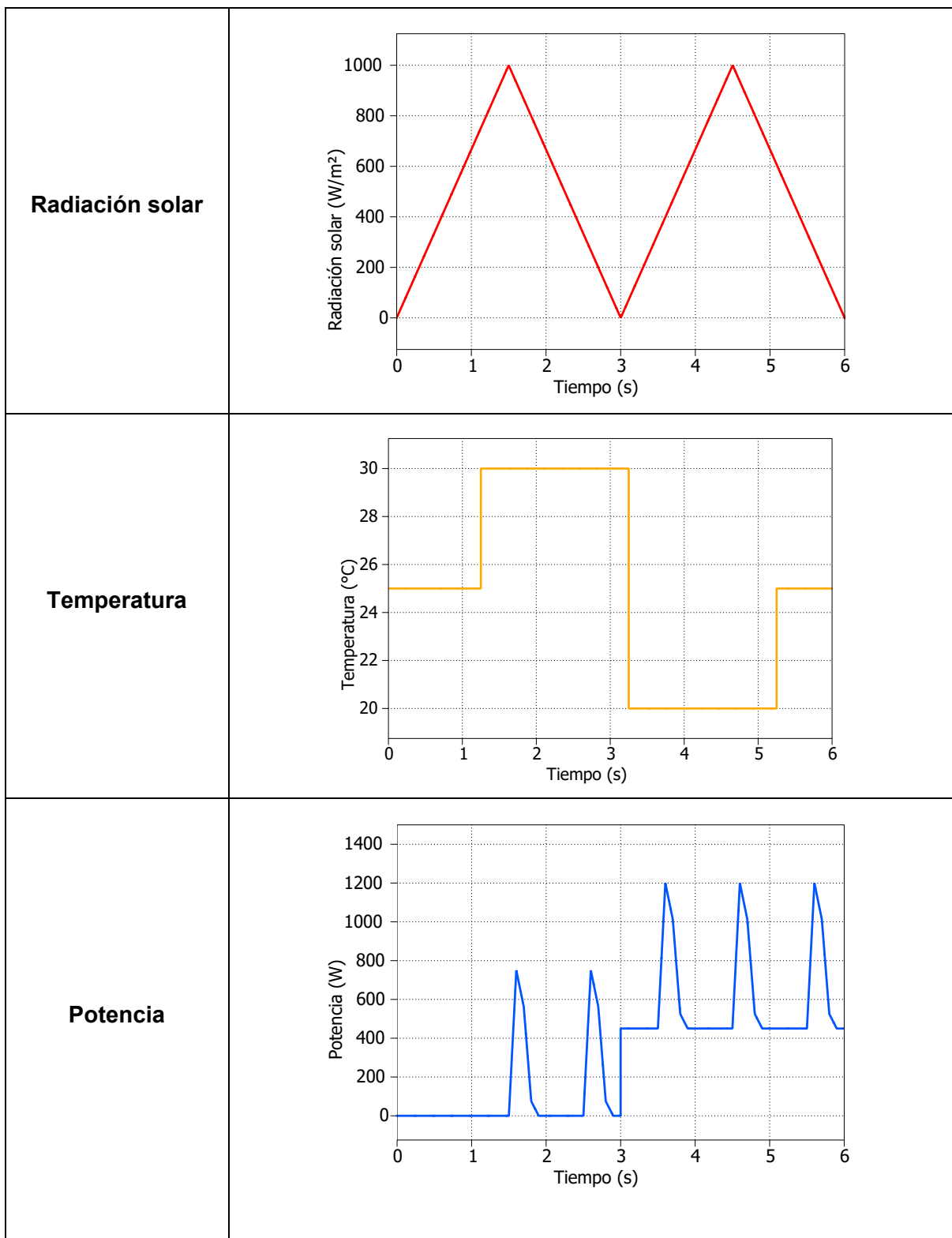
## Comparación de potencia



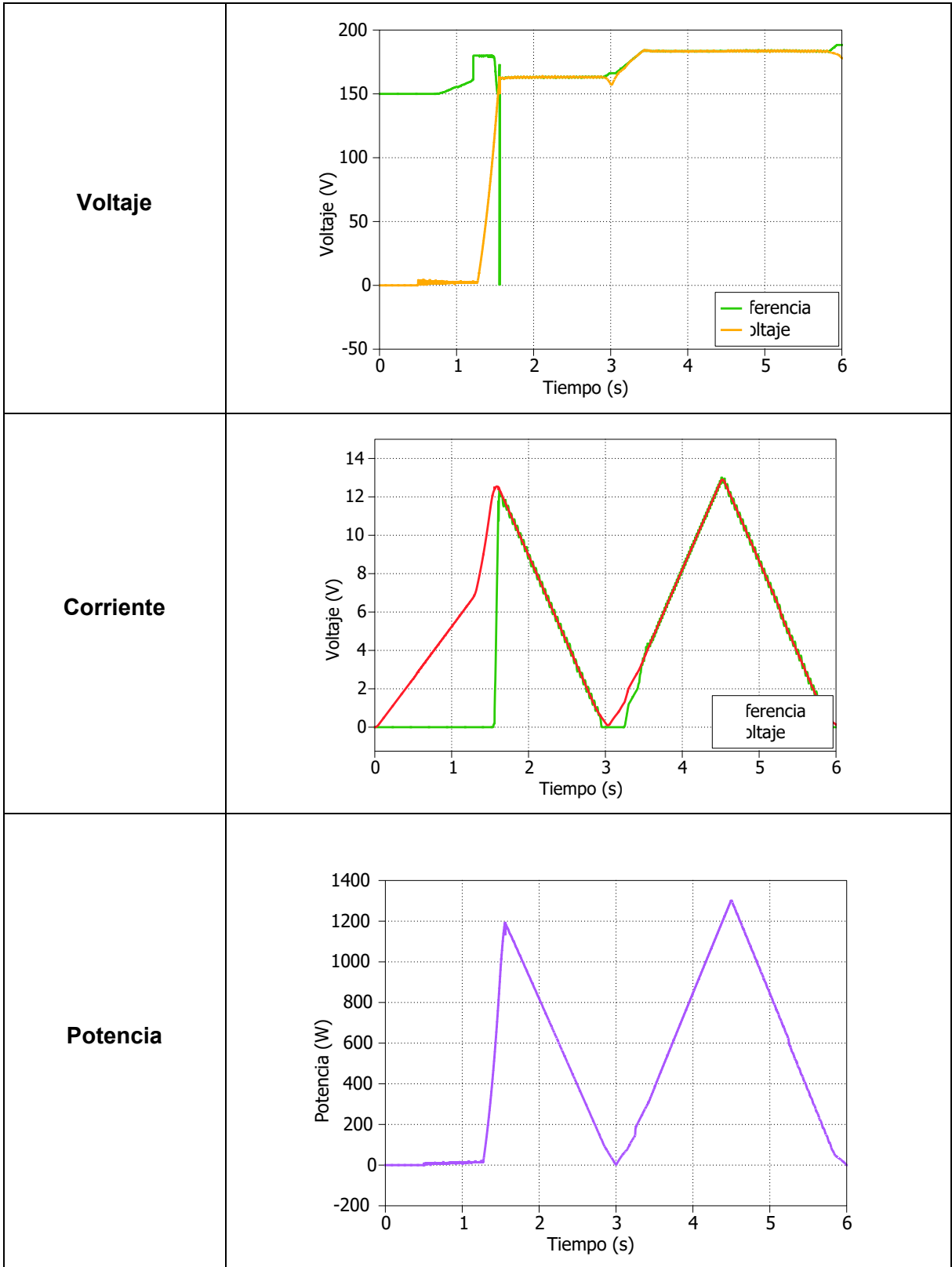


### SIMULACIÓN 3

#### Perfiles



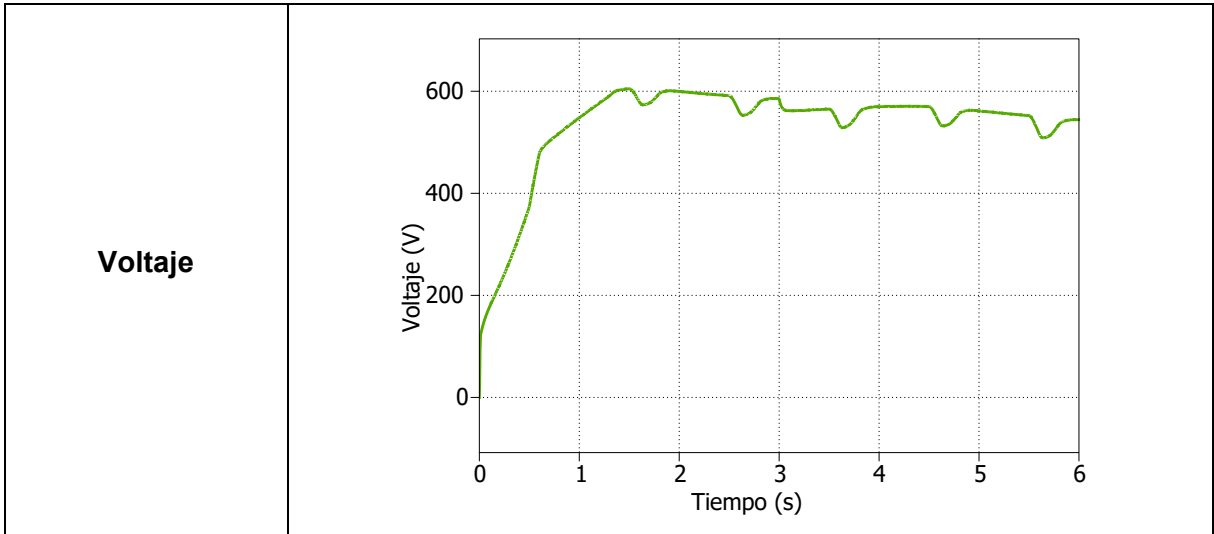
## Paneles fotovoltaicos



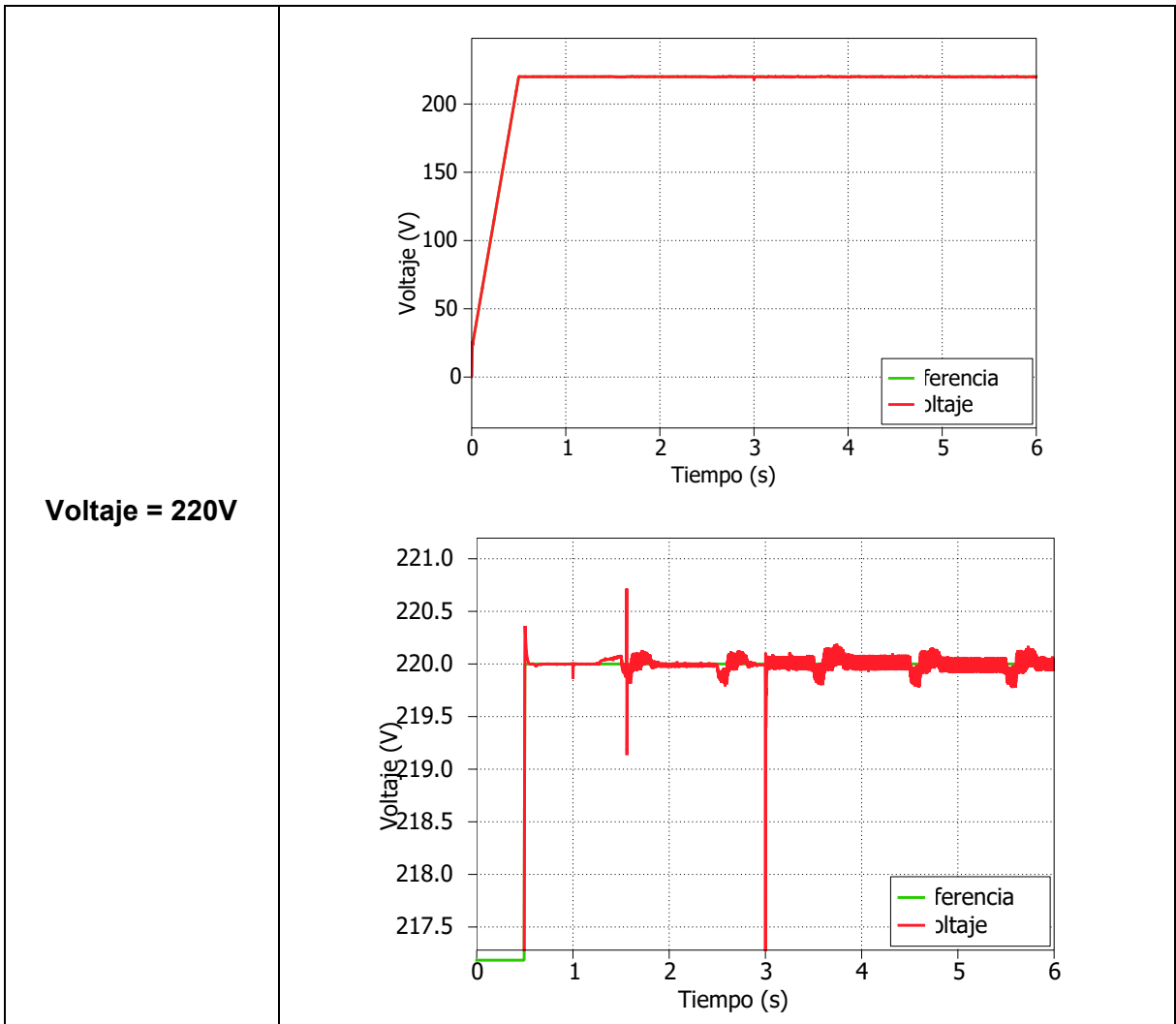
# Baterías

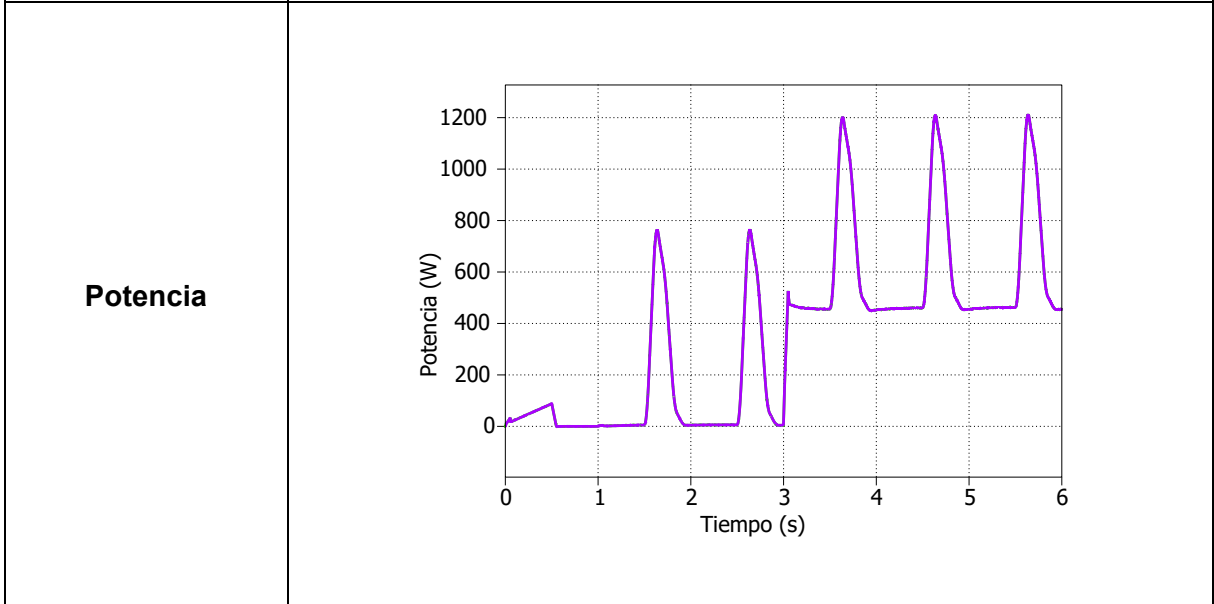
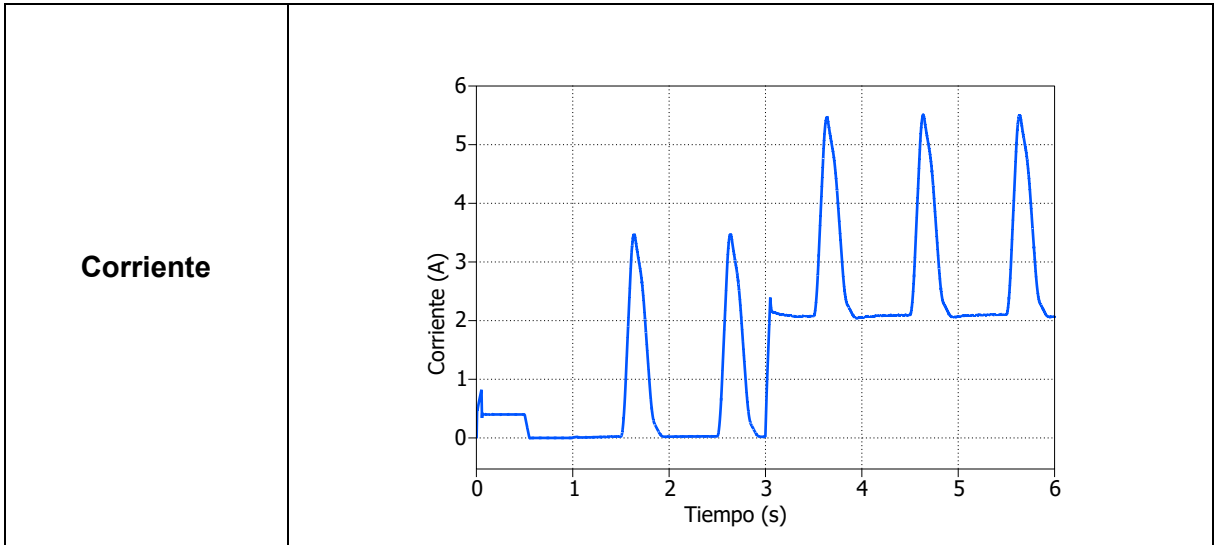
	Banco de baterías 1 – EP24100	Banco de baterías 2 - 12V100FC
<b>Voltaje</b>		
<b>Corriente</b>		
<b>Potencia</b>		

### Voltaje de enlace

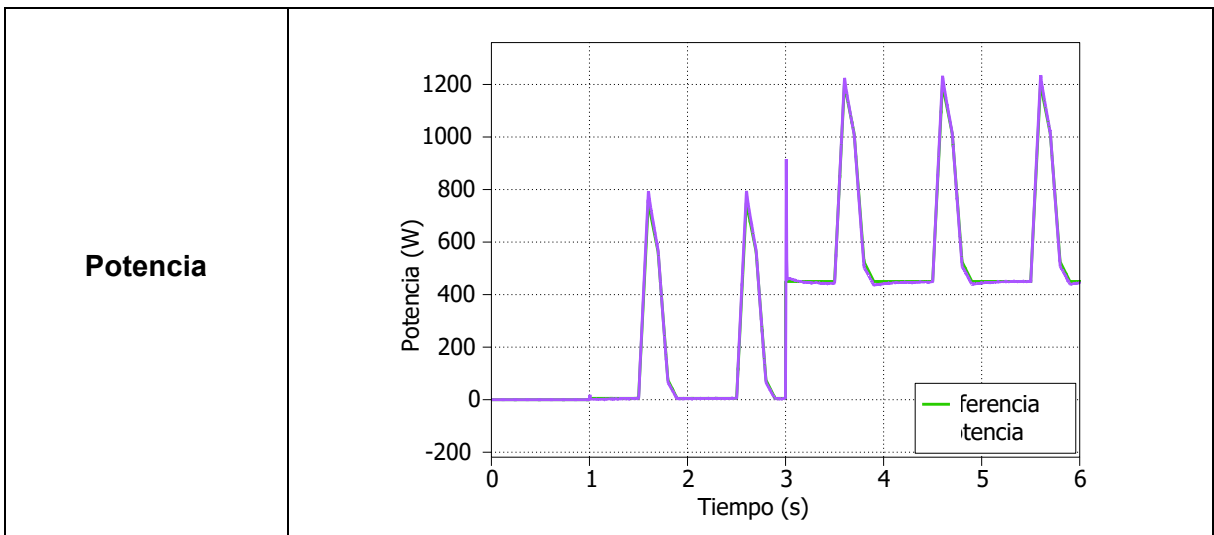


### Bus DC

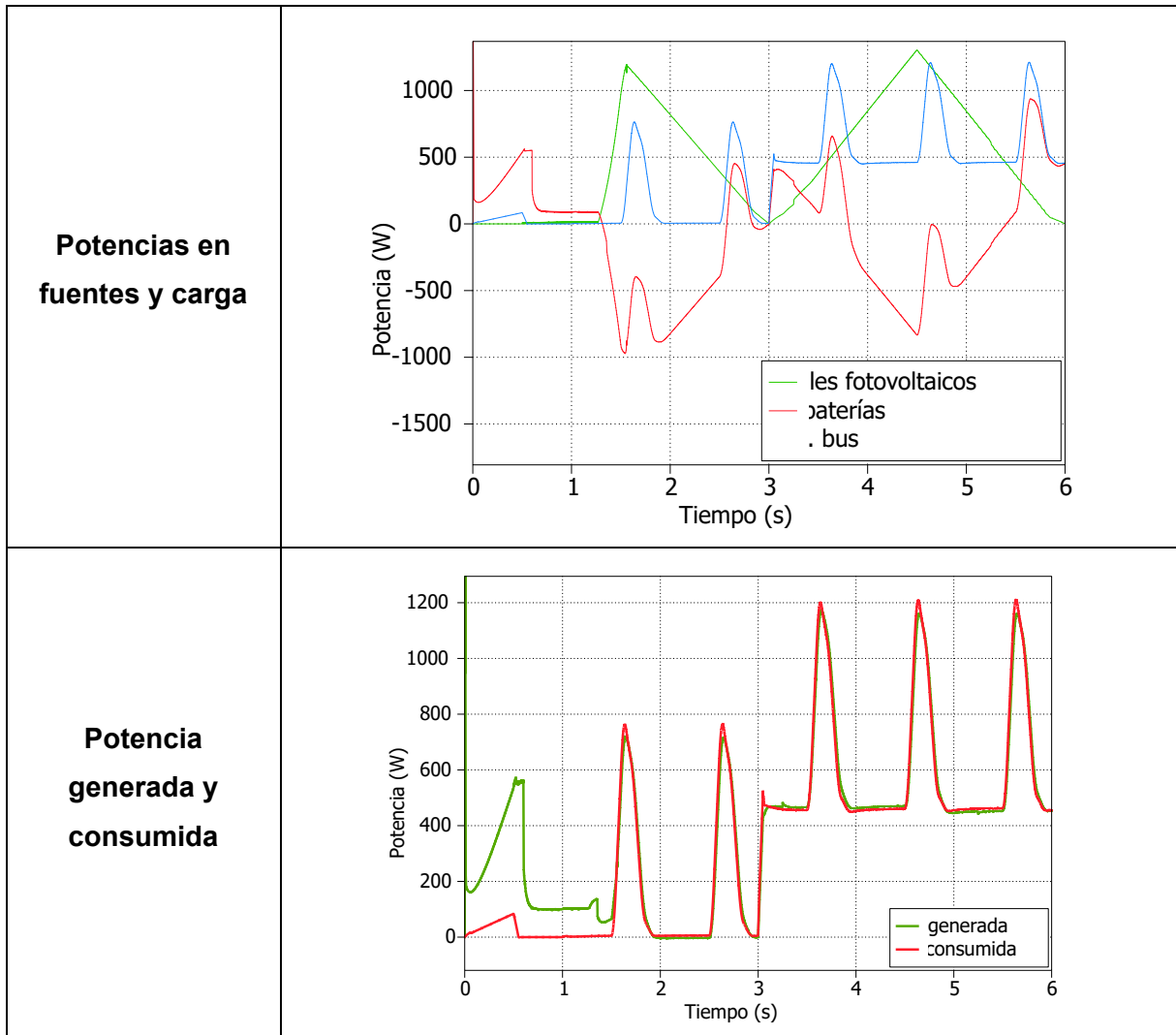




**Carga**

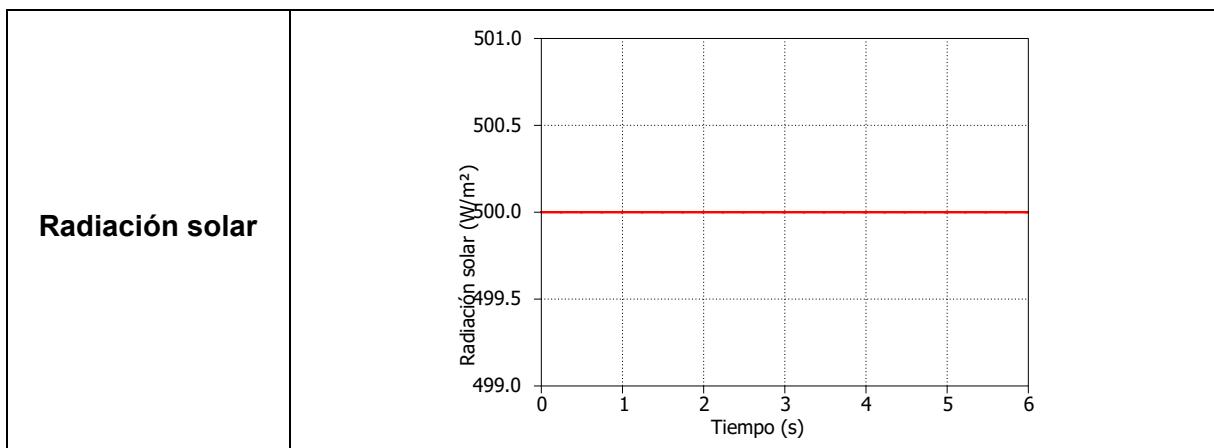


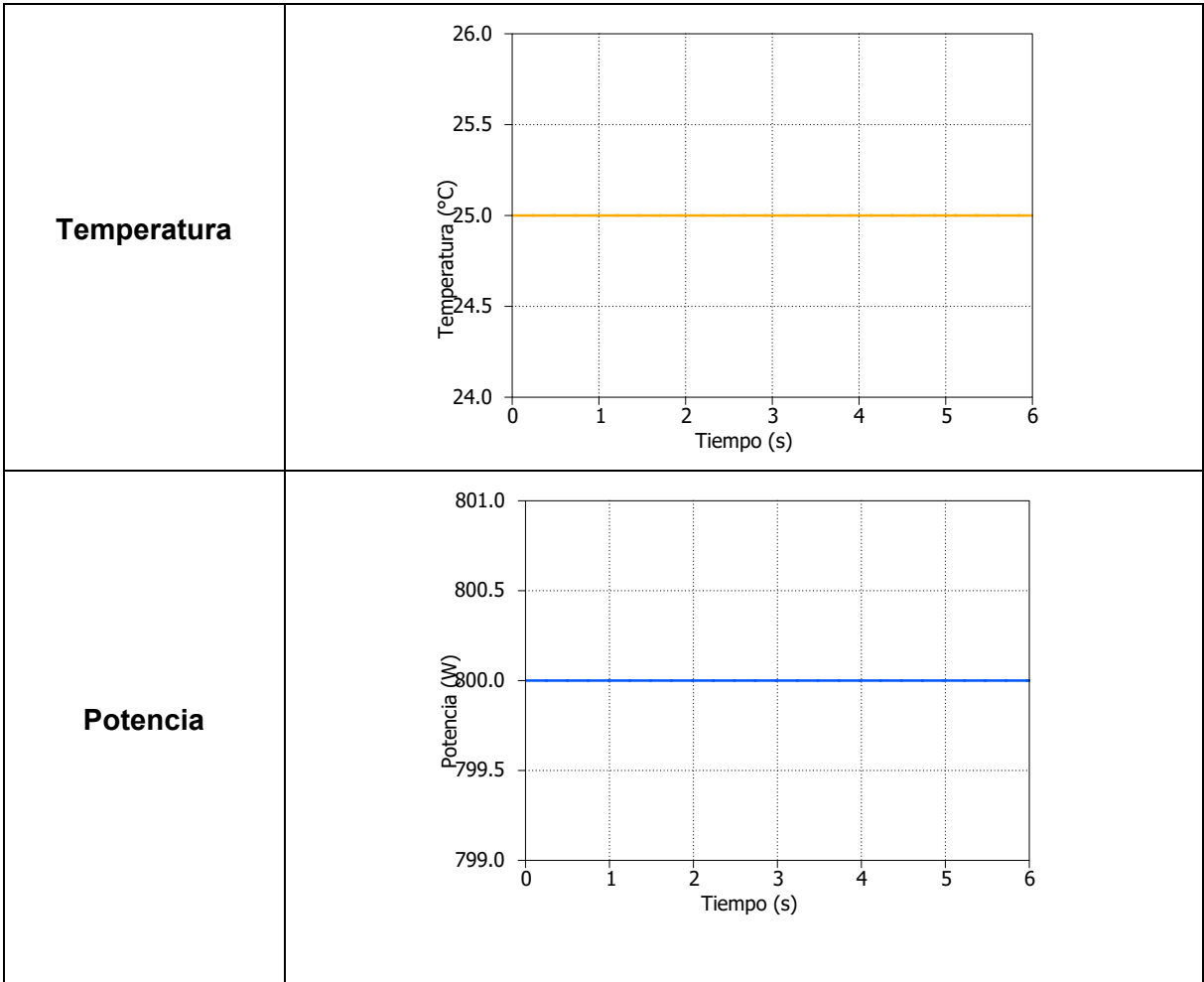
## Comparación de potencia



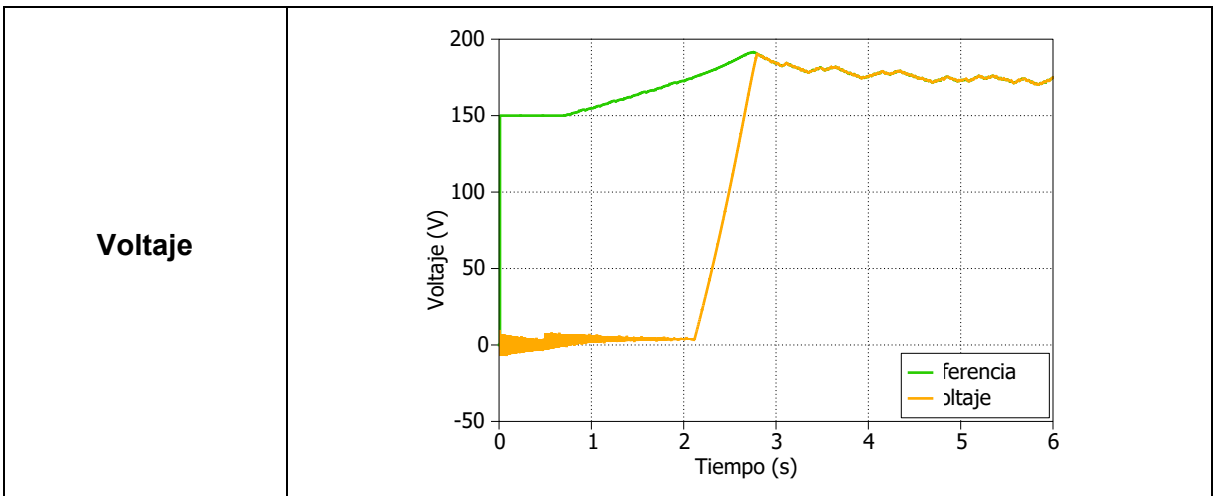
## SIMULACIÓN 4

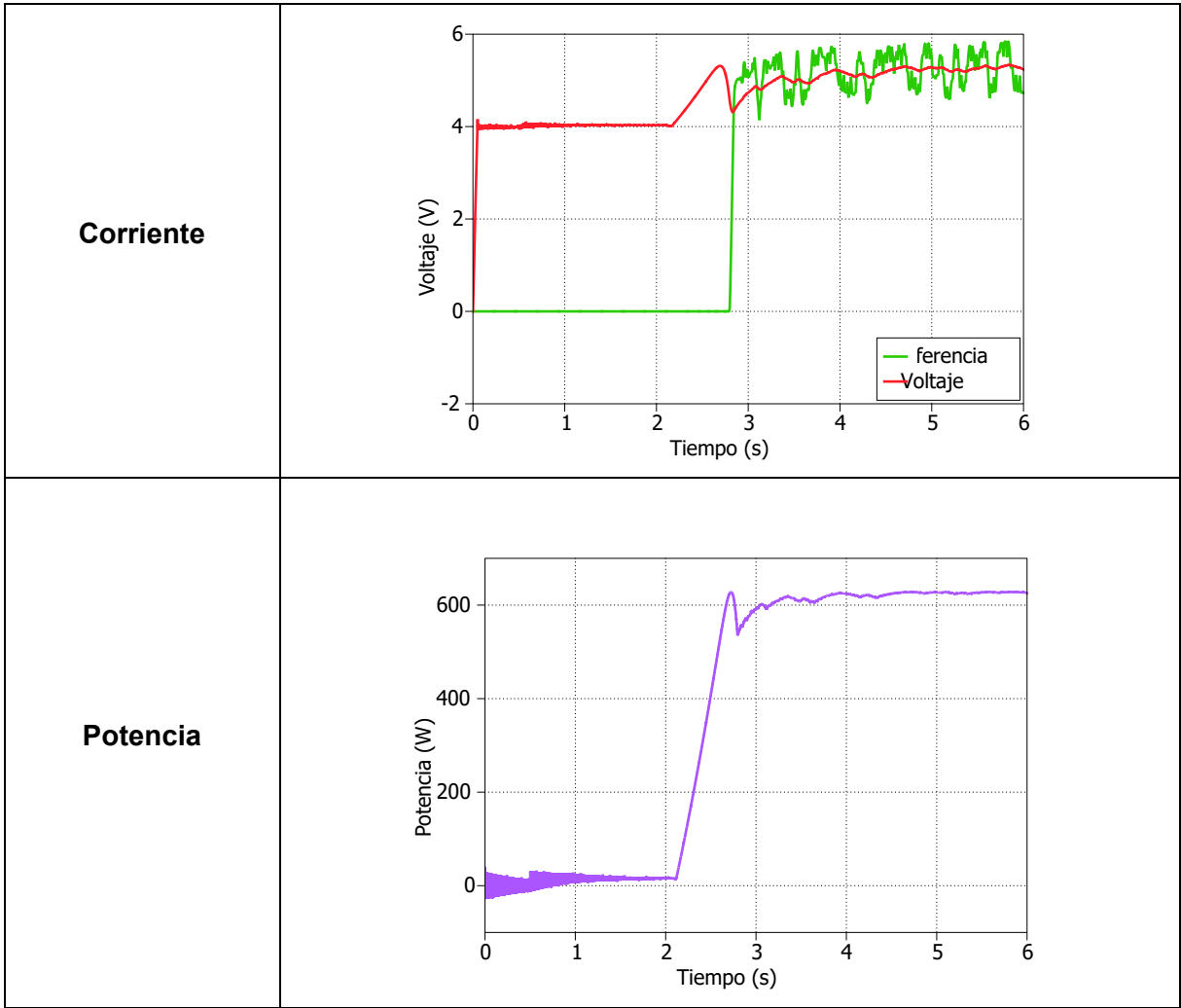
### Perfiles



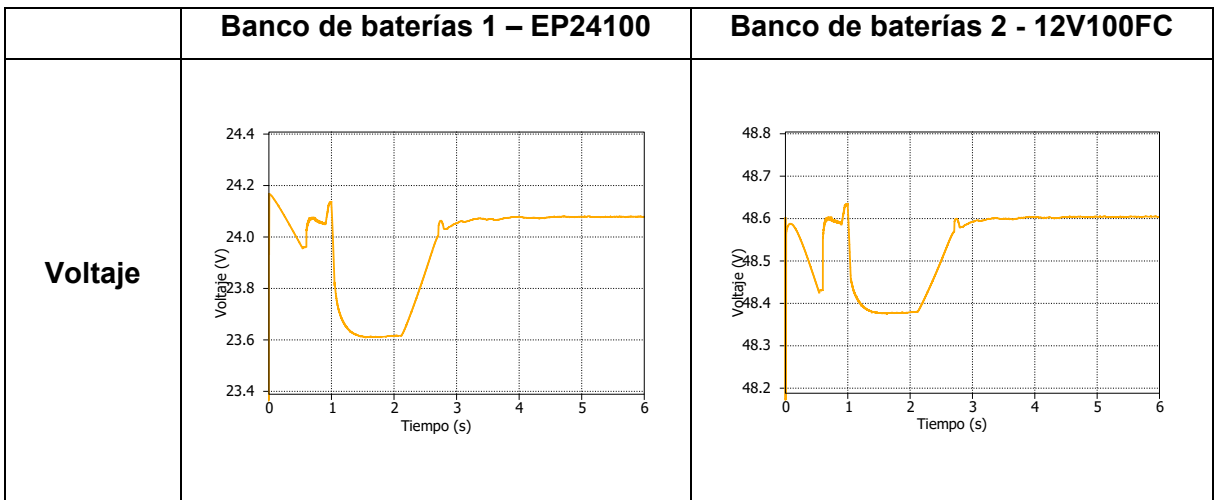


**Paneles fotovoltaicos**

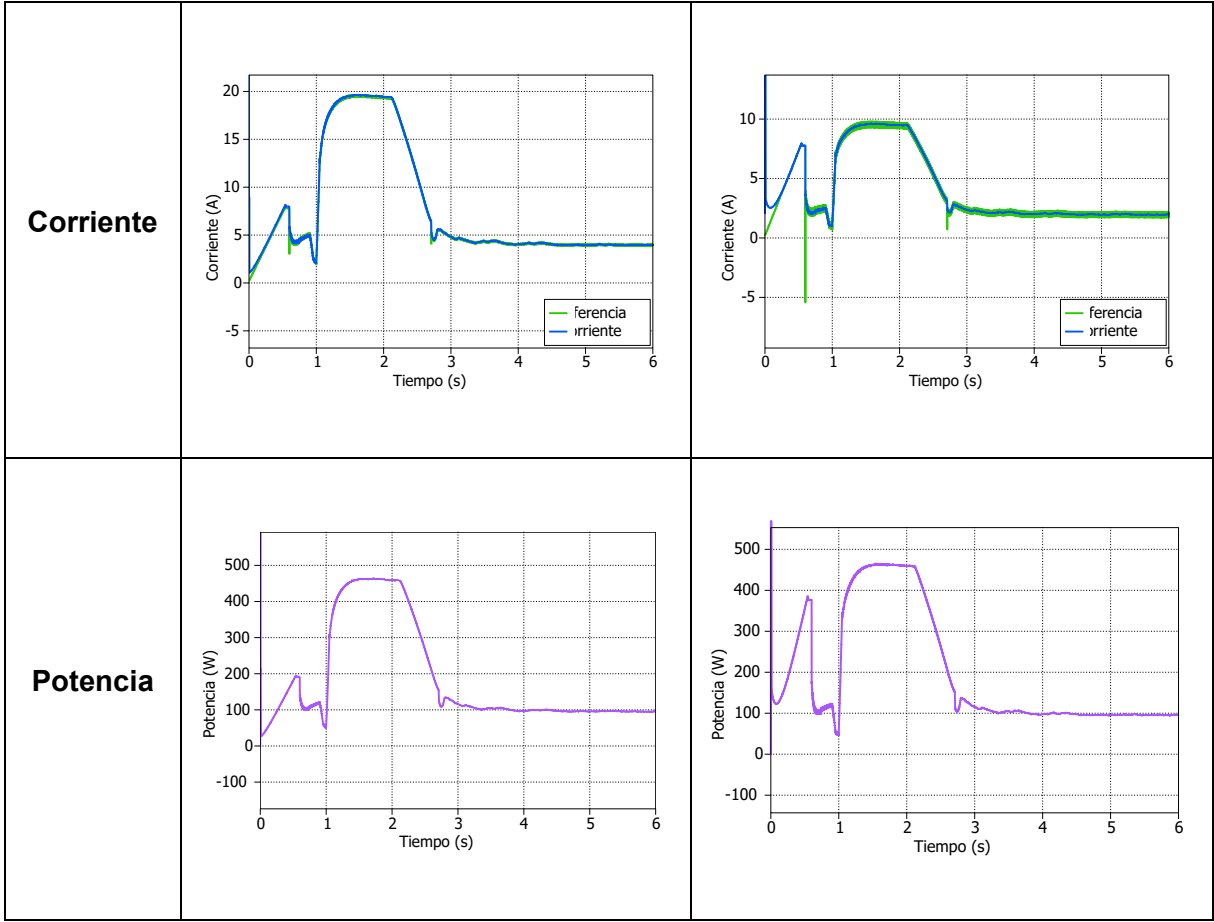




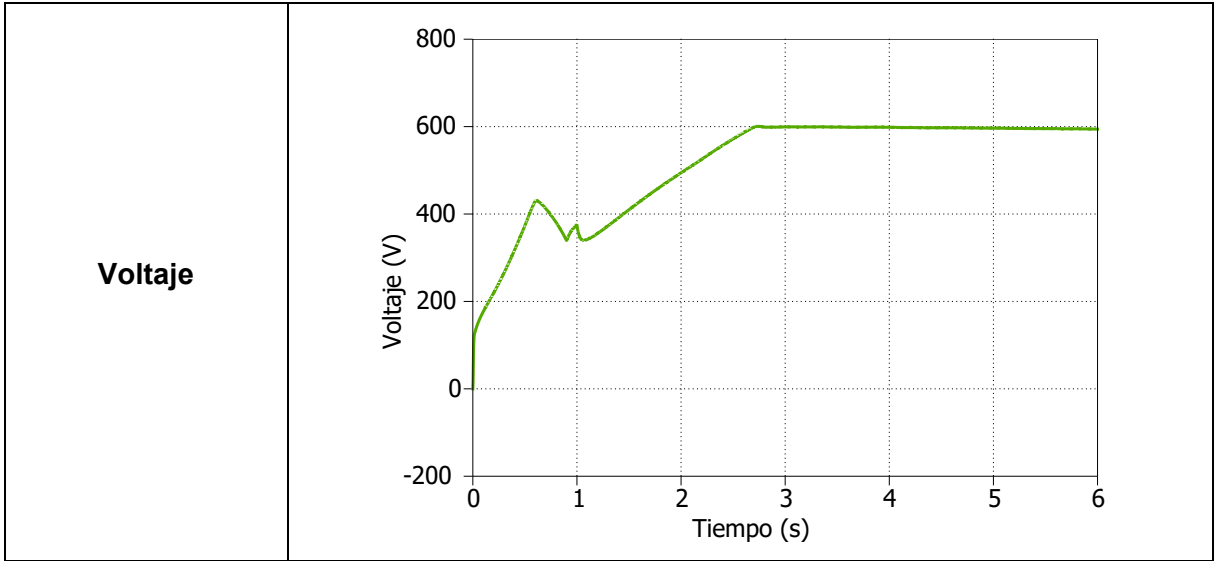
**Baterías**





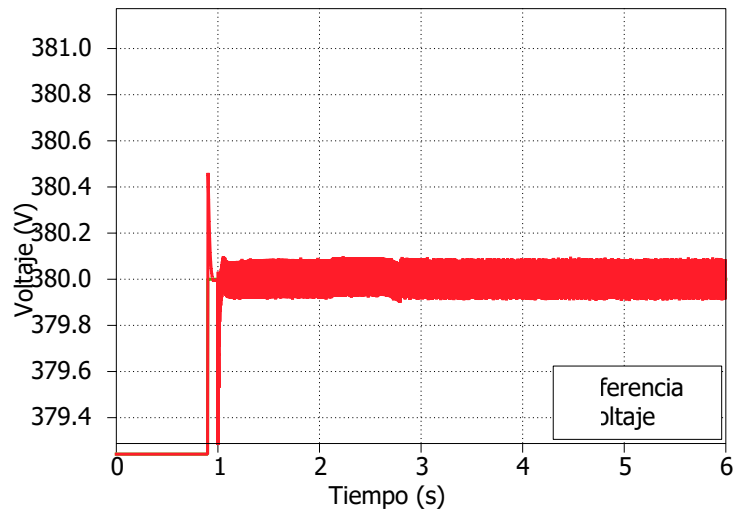
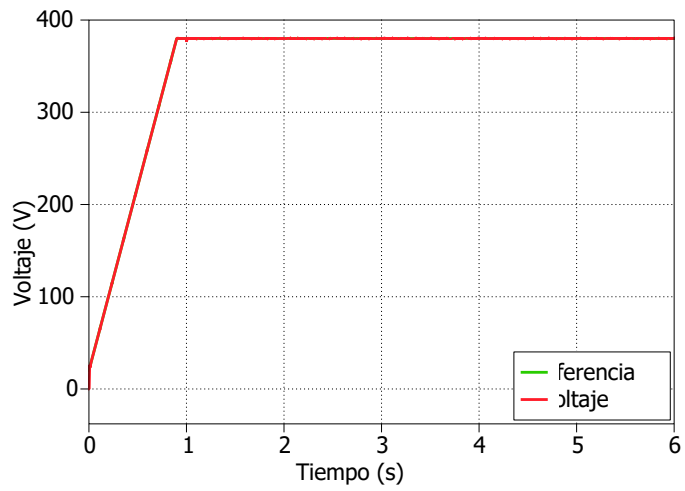


**Voltaje de enlace**

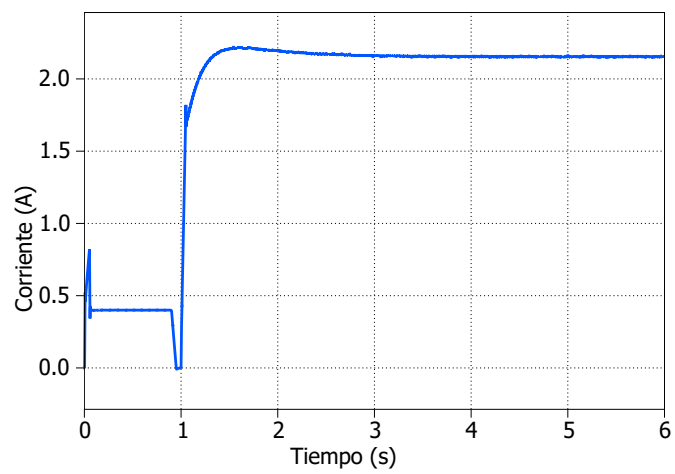


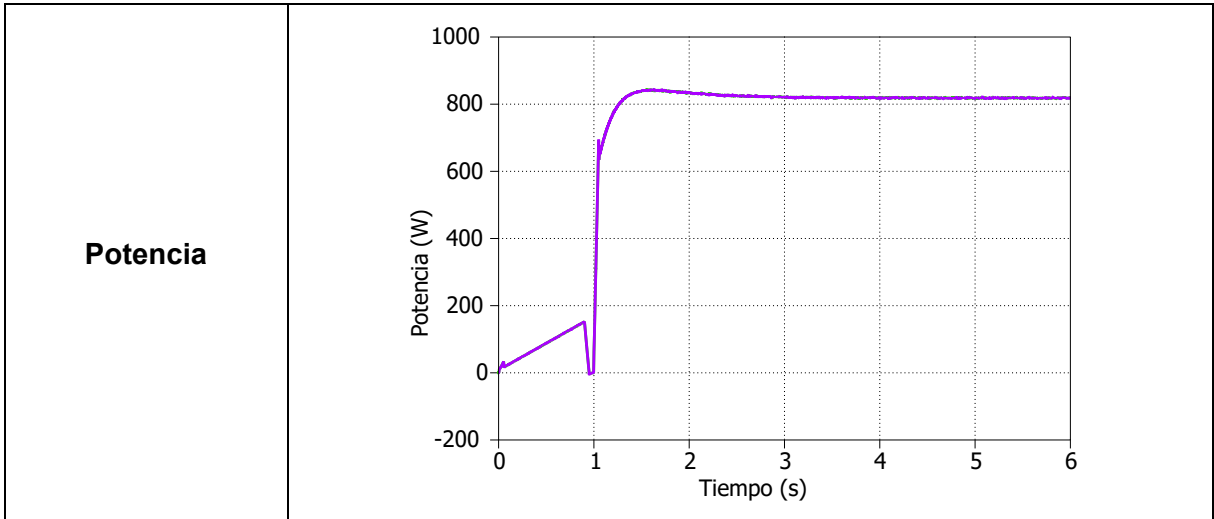
## Bus DC

**Voltaje = 380V**

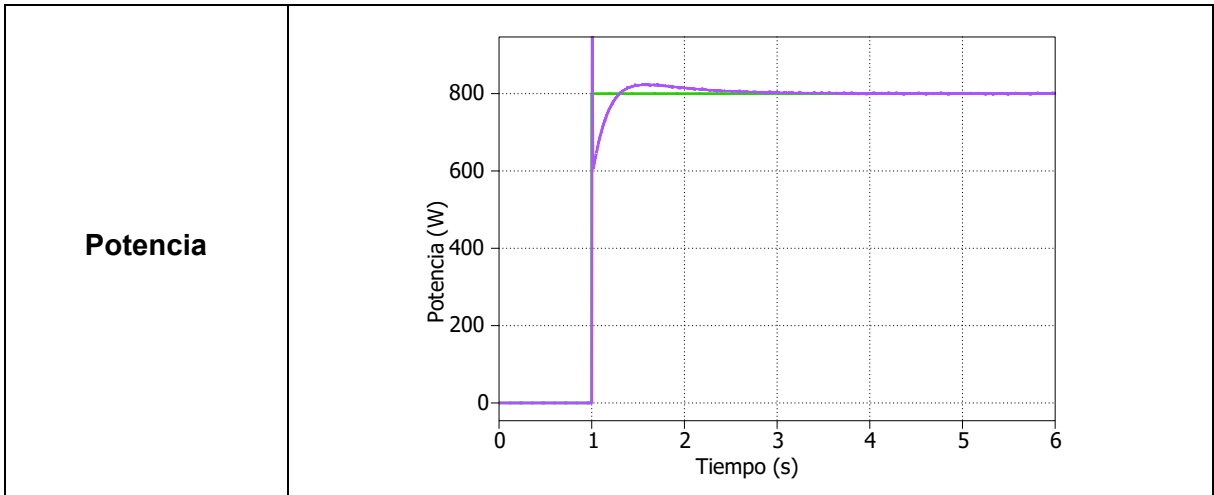


**Corriente**

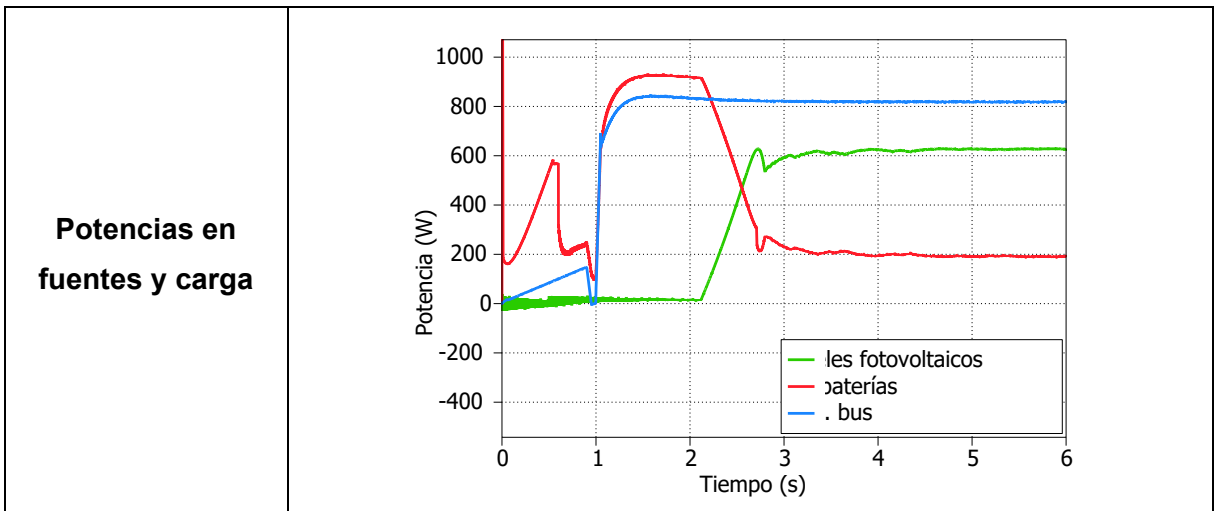


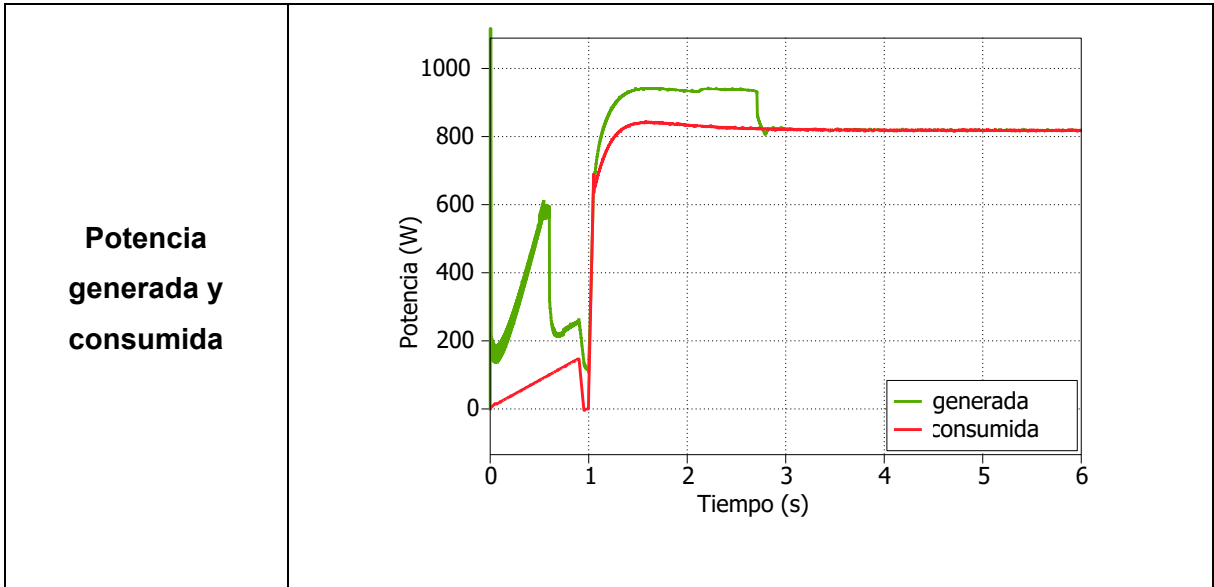


**Carga**



**Comparación de potencia**





Se puede ejecutar cualquier combinación de los perfiles propuestos.

# ANEXO B

## DESCRIPCIÓN DE ARCHIVO DE SIMULACIÓN EN PLECS®

### 1. VENTANA PRINCIPAL

A continuación, se explican los elementos implementados en el interfaz de simulación de PLECS® y cómo fueron implementados los modelos, convertidores y controladores.

En la Figura AB.1 se presenta la ventana principal, en donde se muestra un esquema generalizado del sistema, similar a como fue implementado en la interfaz gráfica.

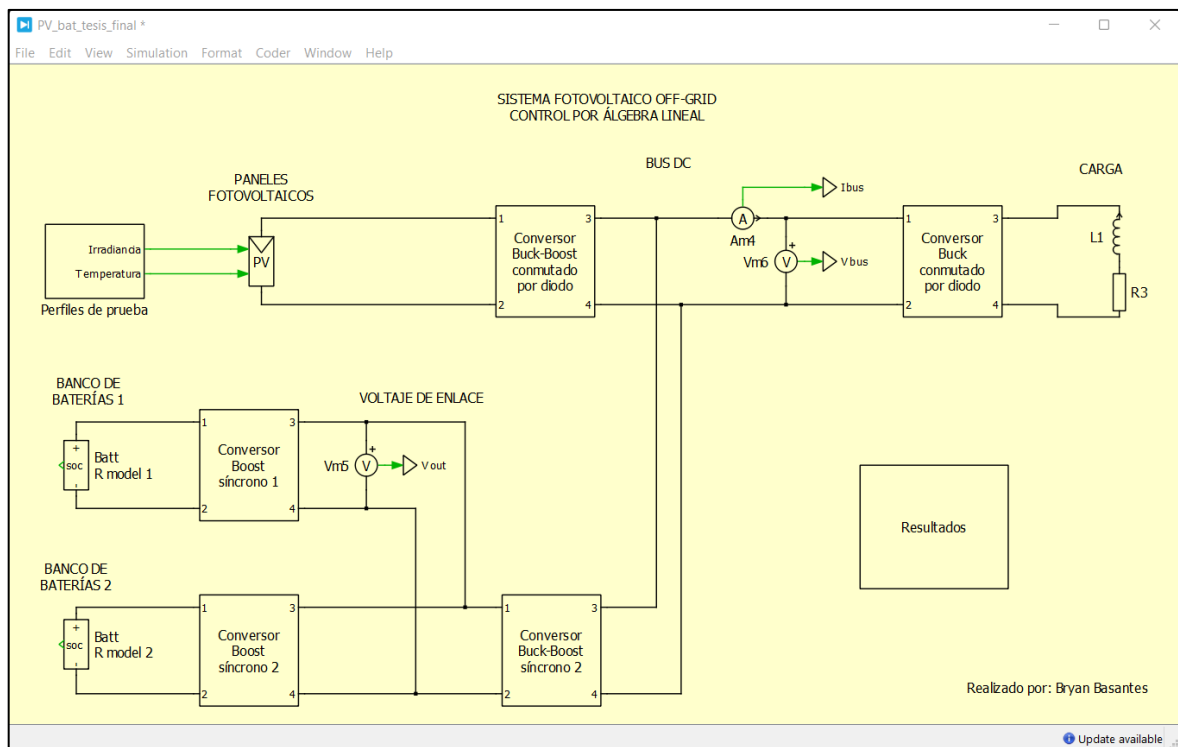
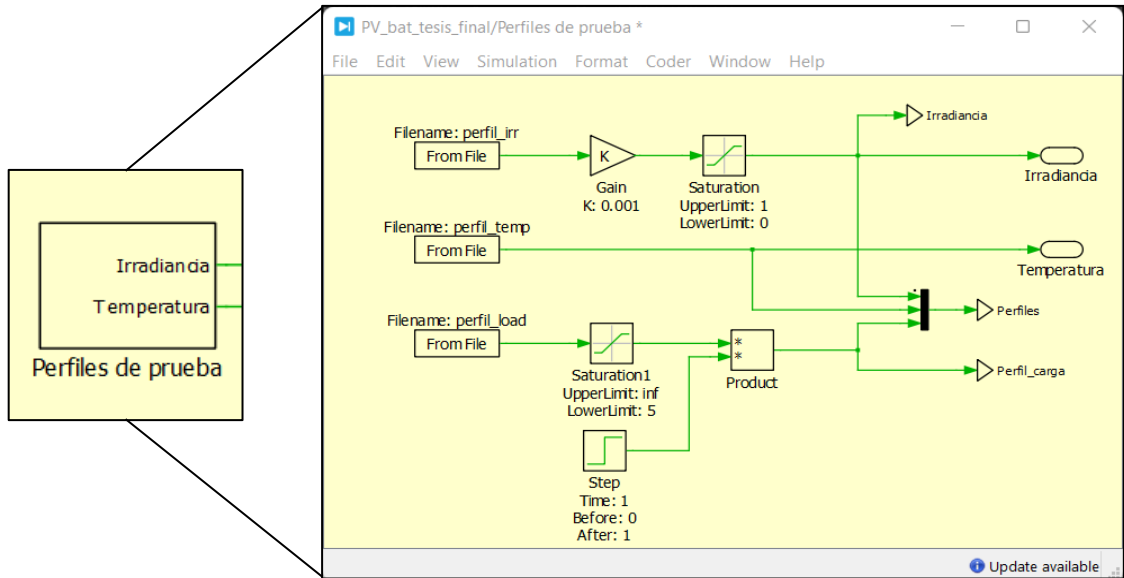


Figura AB.1. Ventana principal del archivo de simulación de PLECS®

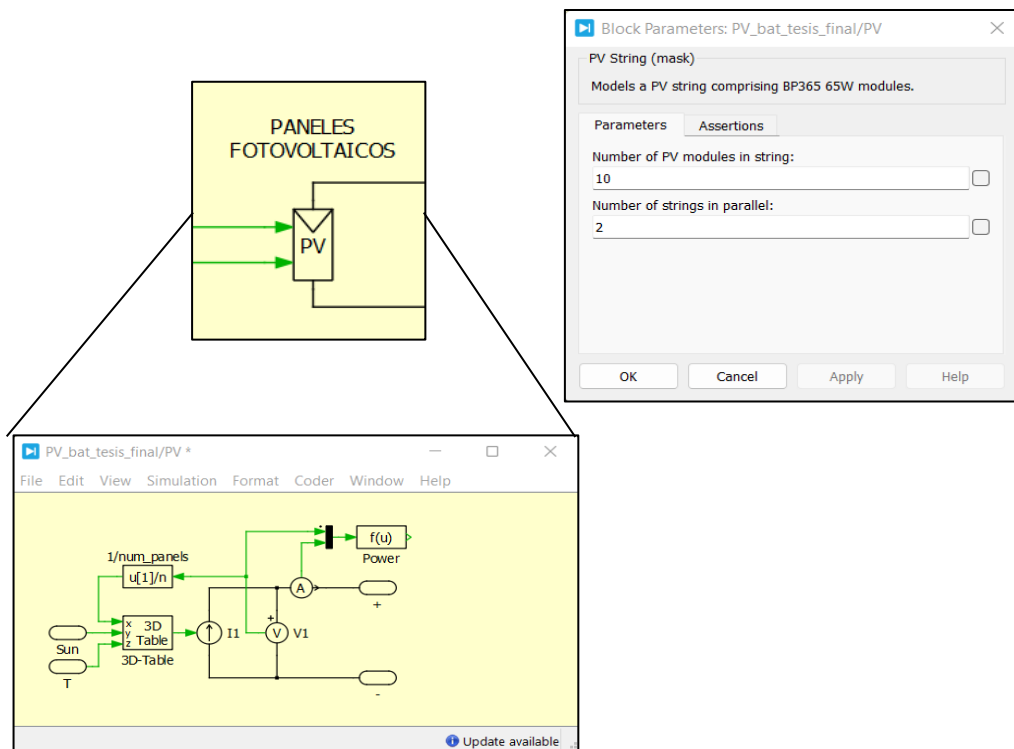
La simulación consta de varios subsistemas que contienen los circuitos y elementos necesarios para la simulación. Así, empezando de la parte izquierda, la Figura AB.2 presenta los perfiles de prueba (radiación solar, temperatura y perfil de carga) extraídos desde archivos .mat y procesados para su implementación.



**Figura AB.2.** Subsistema de los perfiles de prueba configurados

## 2. PANELES FOTOVOLTAICOS

En la Figura AB.3 se presenta el modelo de los paneles fotovoltaicos, así como el número de paneles conectados en serie y en paralelo.



**Figura AB.3.** Modelo de los paneles fotovoltaicos

En la Figura AB.4 se presenta el circuito del convertor y controlador encargado de regular la potencia de los paneles fotovoltaicos. Consta de un convertor Buck-Boost conmutado por diodo, cuyo control es detallado en la Tabla AB.1.

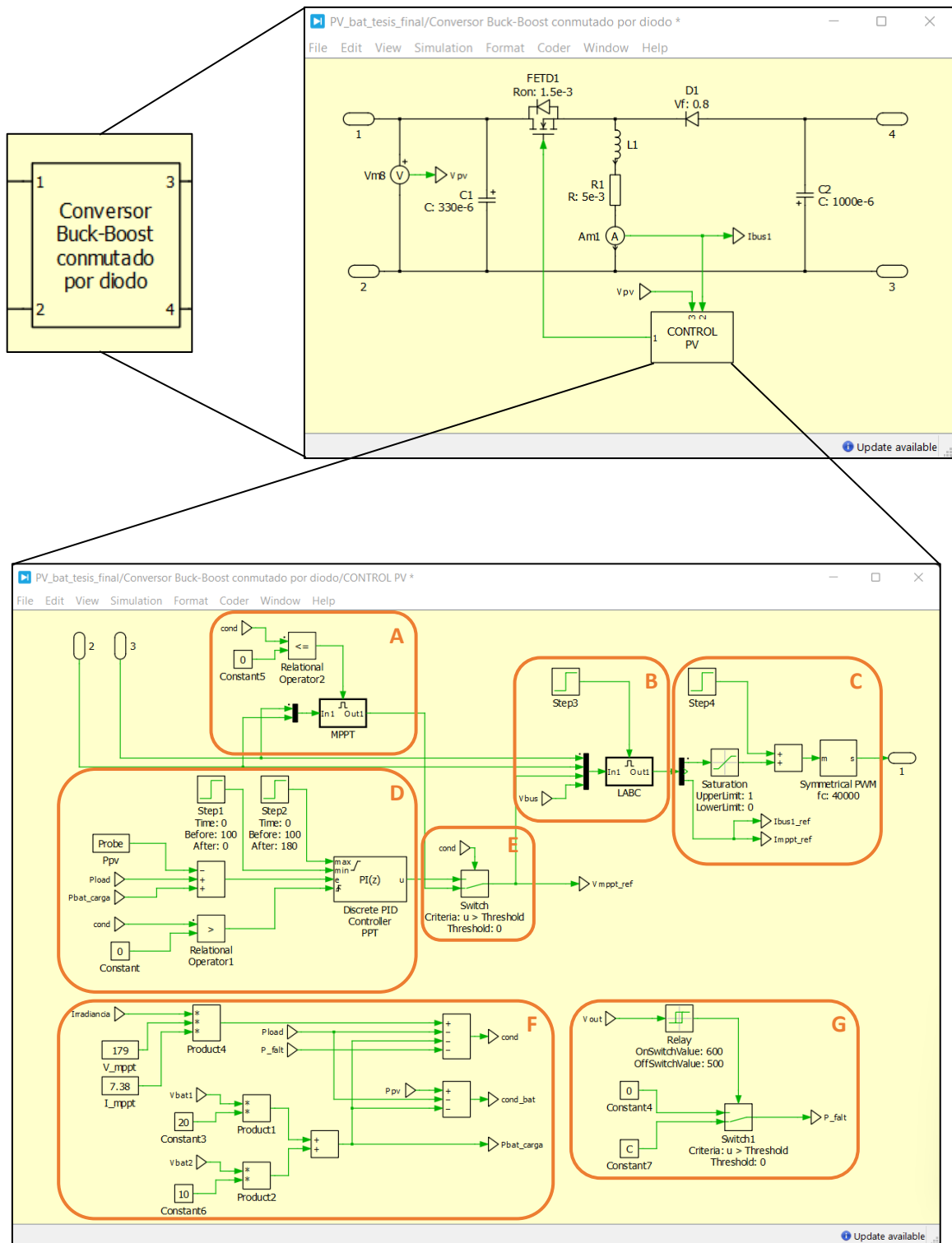
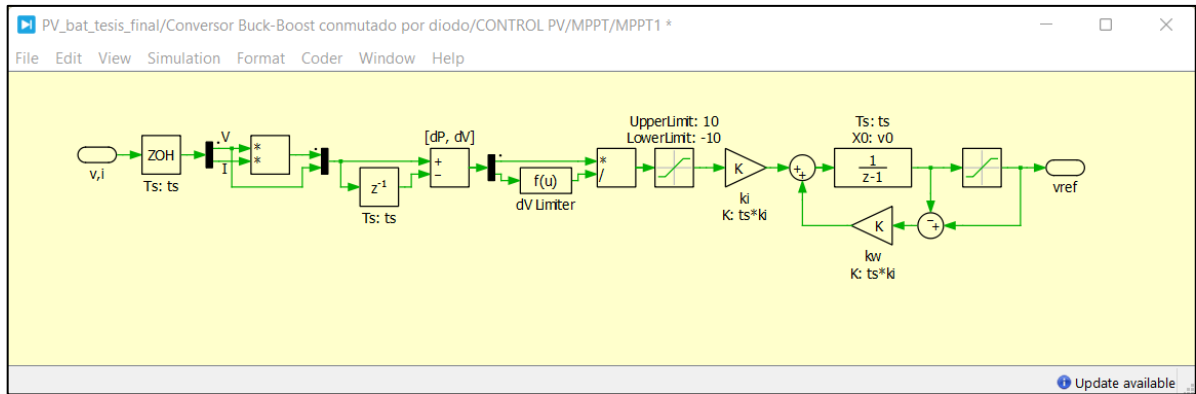


Figura AB.4. Modelo y controlador de potencia implementado para los paneles fotovoltaicos



**Figura AB.5.** Algoritmo MPPT P&O

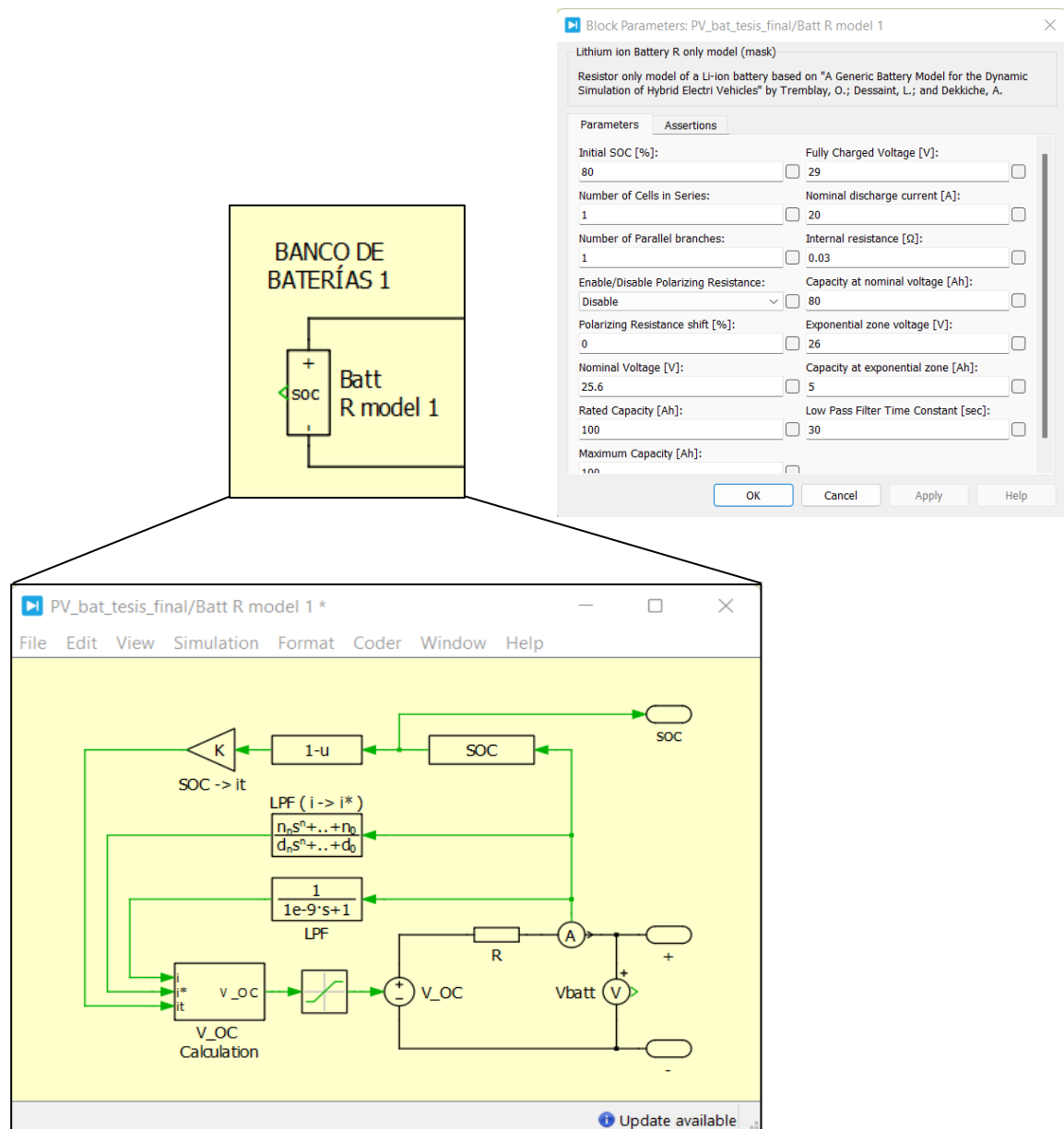
**Tabla AB.1.** Partes del controlador de potencia de los paneles fotovoltaicos

Detalle	Descripción
A	Algoritmo MPPT (Perturbe and Observe) con trigger de activación
B	Controlador Basado en Álgebra Lineal (LABC) con trigger de activación
C	Generador PWM, f=40kHz
D	Algoritmo PPT (Controlador PI)
E	Selector de algoritmo de control de potencia (MPPT o PPT)
F	Condiciones para el selector de algoritmo de control de potencia de los paneles fotovoltaicos y de las baterías
G	Control por histéresis del voltaje de enlace (límites: 500V - 600V)

### 3. BATERÍAS

En la Figura AB.6 se presenta el modelo de las baterías implementado con los parámetros configurados de acuerdo al diseño.





**Figura AB.6.** Modelo de las baterías implementado

En la Figura AB.7 se presenta el circuito del convertor y controlador encargado de regular la carga y descarga de las baterías. Consta de un convertor Boost síncrono, cuyo control es detallado en la Tabla AB.2. La configuración es la misma para ambos bancos de baterías.

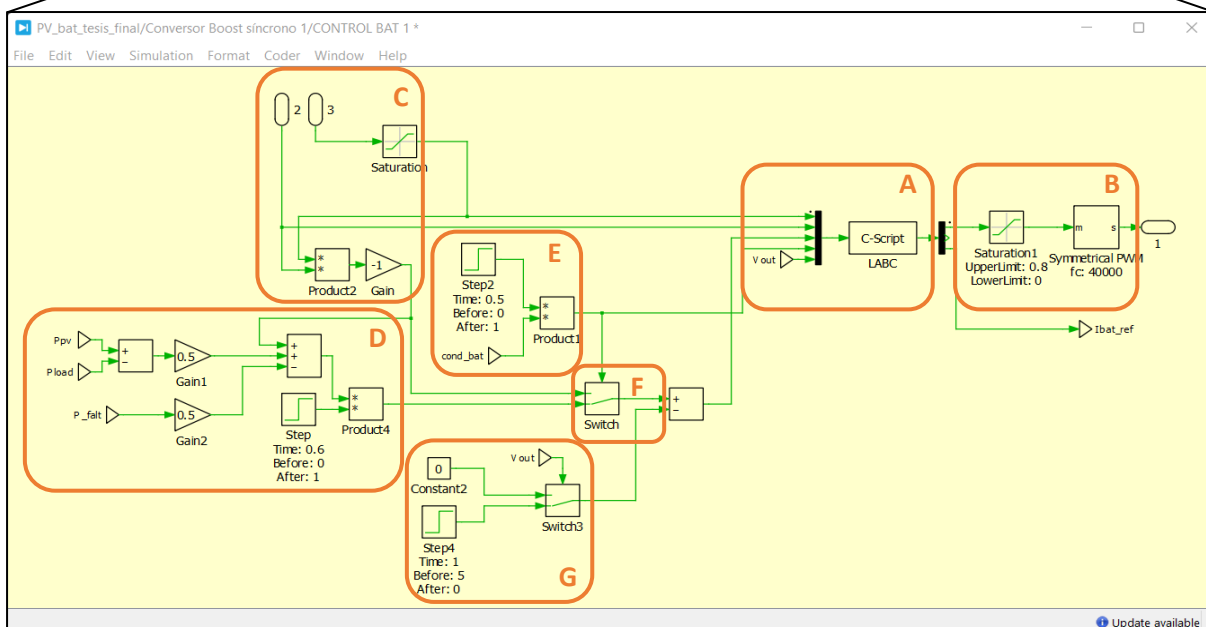
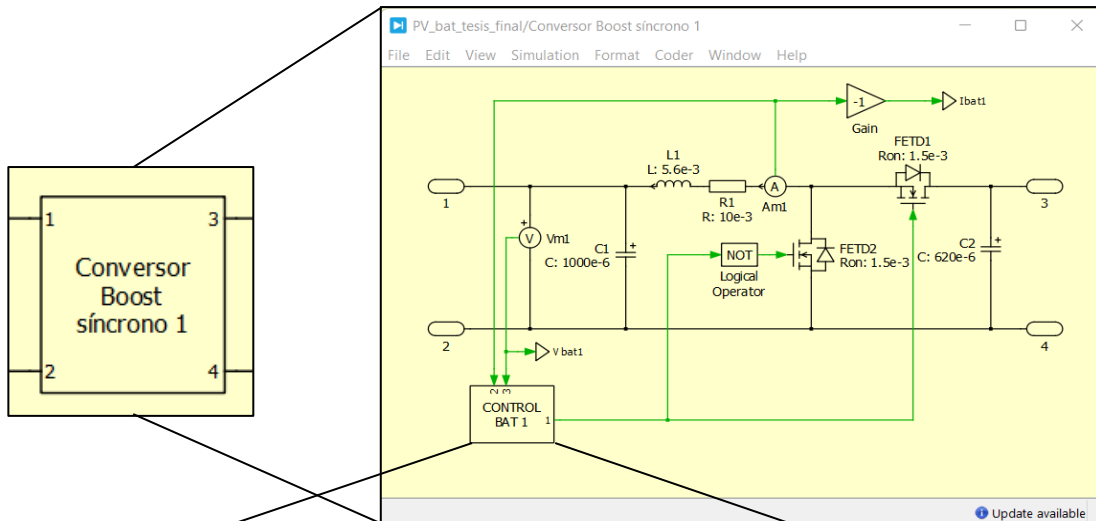


Figura AB.7. Modelo y controlador de potencia implementado para los bancos de baterías

Tabla AB.2. Partes del controlador de potencia de las baterías

Detalle	Descripción
A	Controlador Basado en Álgebra Lineal (LABC)
B	Generador PWM, f=40kHz
C	Realimentación de potencia de las baterías (carga de baterías)

D	Realimentación de potencia requerida por la carga (descarga de baterías). Se ejecuta el Load Sharing o compartición de carga.
E	Condición para el cambio de realimentación del controlador
F	Selector de realimentación de potencia
G	Eta de inicialización del sistema.

#### 4. BUS DC

En la Figura AB.8 se presenta el circuito del convertor y controlador encargado de regular el voltaje del bus DC. Consta de un convertor Buck-Boost síncrono, cuyo control es detallado en la Tabla AB.3.

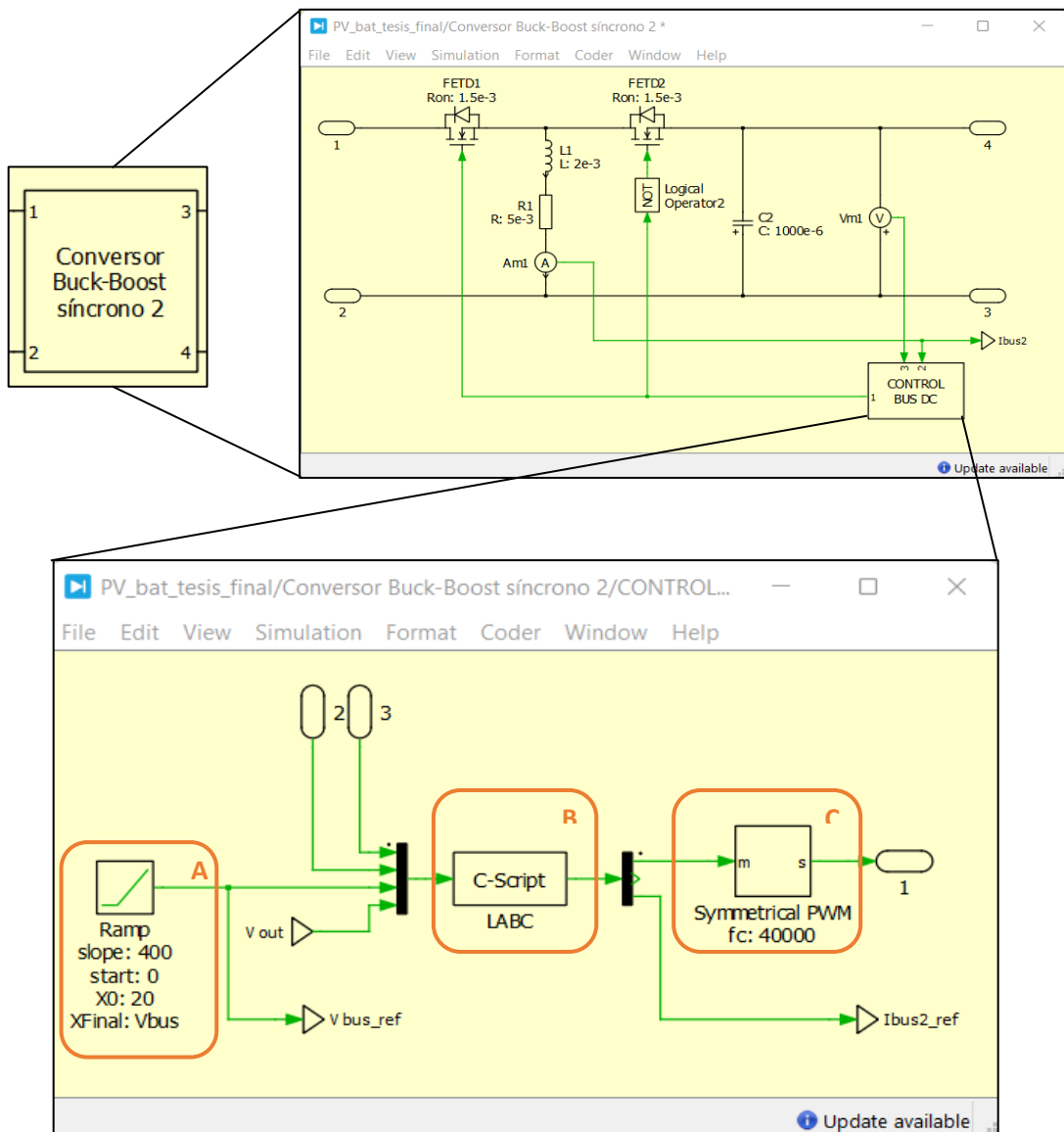
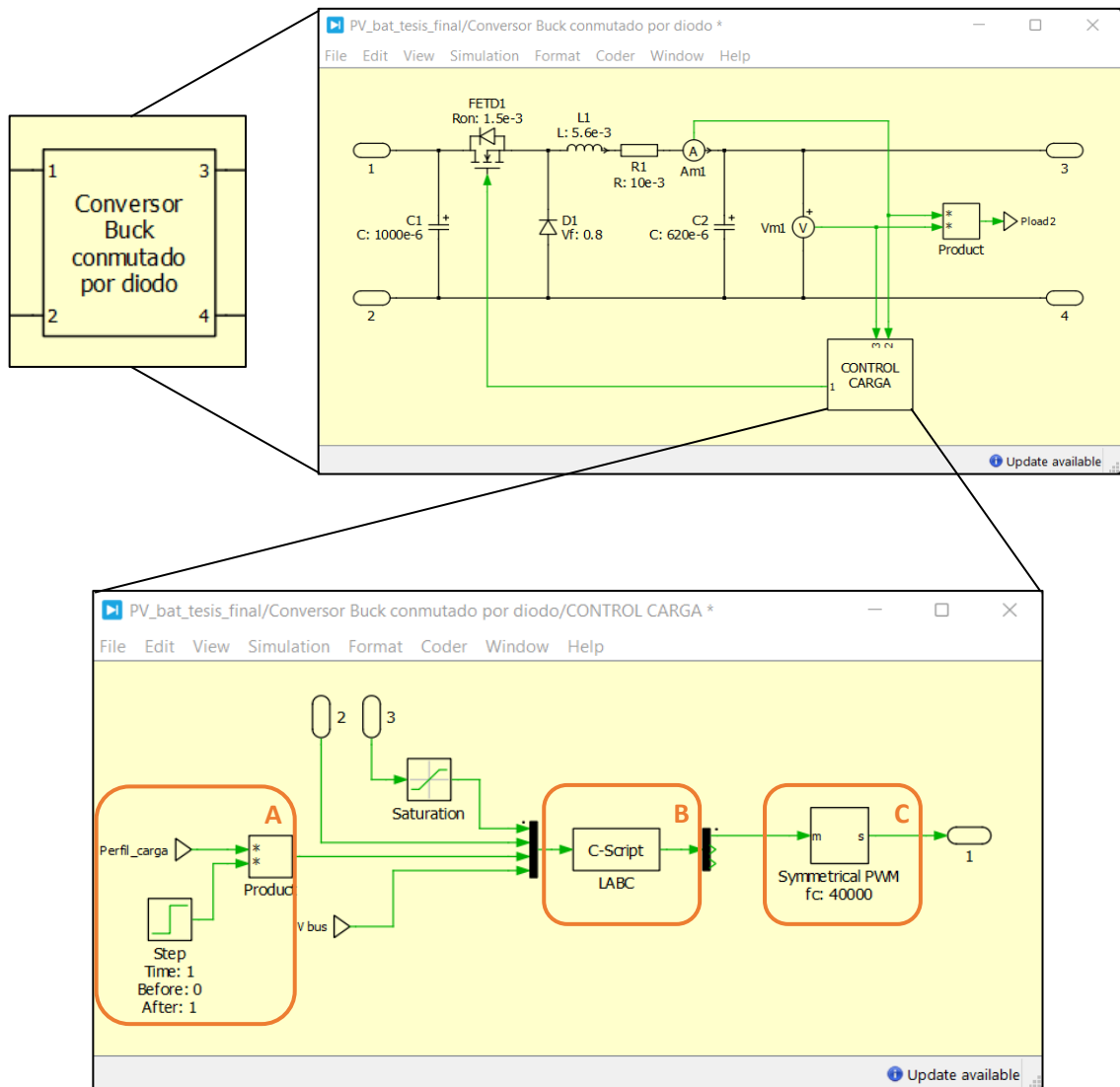


Figura AB.8. Modelo y controlador de voltaje para el bus DC

**Tabla AB.3.** Partes del controlador de voltaje del bus DC

Detalle	Descripción
A	Referencia tipo rampa para la inicialización
B	Controlador Basado en Álgebra Lineal (LABC)
C	Generador PWM, $f=40\text{kHz}$

En la Figura AB.9 se presenta el circuito del convertor y controlador encargado de regular la potencia que va a la carga, con carga RL simulando un motor. Consta de un convertor Buck conmutado por diodo, cuyo control es detallado en la Tabla AB.4.



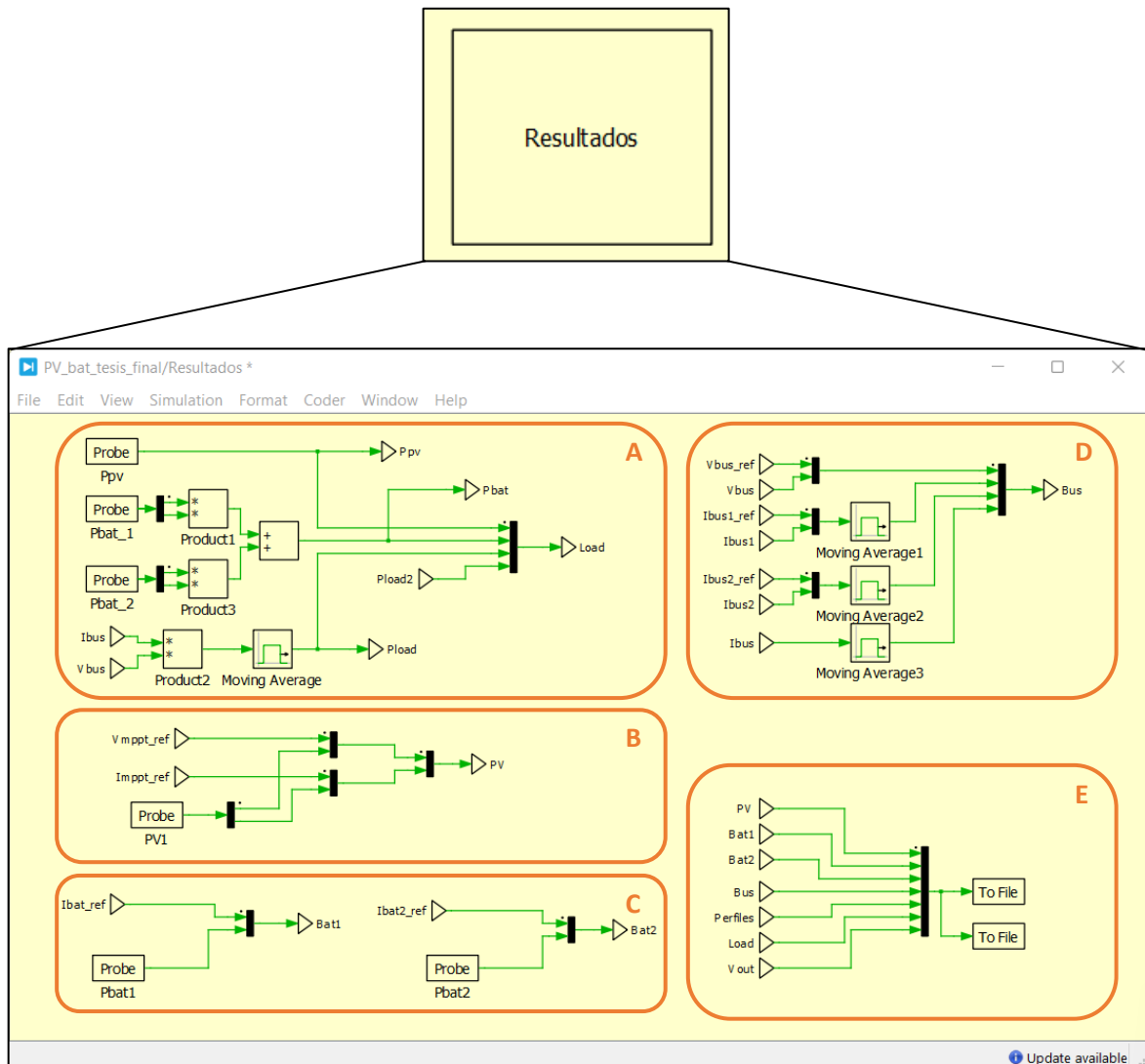
**Figura AB.9.** Modelo y controlador de potencia implementado para la carga

**Tabla AB.4.** Partes del controlador de voltaje del bus DC

Detalle	Descripción
A	Referencia o perfil de carga
B	Controlador Basado en Álgebra Lineal (LABC)
C	Generador PWM, f=40kHz

## 5. EXPORTACIÓN DE RESULTADOS

Finalmente, en la Figura AB.10 se presenta como fue implementado la exportación de mediciones para su posterior procesamiento en la interfaz gráfica. Mientras que en la Tabla AB.5 se presentan la descripción de sus elementos.



**Figura AB.10.** Ventana de exportación de resultados

**Tabla AB.5.** Partes del controlador de voltaje del bus DC

<b>Detalle</b>	<b>Descripción</b>
A	Mediciones de parámetros en la carga
B	Mediciones de parámetros en los paneles fotovoltaicos
C	Mediciones de parámetros en las baterías
D	Mediciones de parámetros en el bus DC
E	Exportación de mediciones

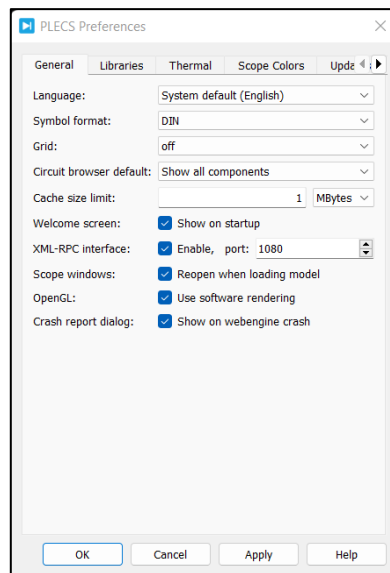
# ANEXO C

## GUÍA DE USO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

### 1. TAREAS PREVIOS

Primero, es necesario tener instalado PLECS® Standalone®, el cual puede ser descargado del siguiente la página oficial de PLECS®: <https://www.plexim.com/products/PLECS®>.

Una vez instalado, asegurarse de que la interfaz **XML-RPC** esté activada y con el puerto 1080 configurado, este será el medio para conectar PLECS® con Python. Para hacerlo, abrir el programa acceder a las preferencias haciendo clic en **File > PLECS® Preferences** y en la pestaña **General** configurar como se muestra en la siguiente figura.



**Figura AC.1.** Configuración de las preferencias en PLECS®

### 2. APERTURA Y MANEJO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Se anexará el link de una carpeta que contiene todos los archivos necesarios para el manejo del programa. Descargar la carpeta y ejecutar el archivo PVsim.exe.



**Figura AC.2.** Icono del ejecutable del programa

En general, la aplicación permite visualizar las formas de onda en diferentes puntos del sistema diseñado por medio de dos métodos:

En el primero, se ejecutaron simulaciones con anterioridad y se guardaron las mediciones en una base de datos, estos son importados y graficados de manera inmediata en las ventanas correspondientes.

En el segundo, la aplicación se comunica con PLECS® Standalone mediante el servidor proxy XML-RPC, abre el archivo de la simulación y ejecuta la simulación, PLECS® exporta los datos a un archivo .csv y la aplicación las importa para mostrarlos en tiempo real en las ventanas correspondientes.

Al ejecutar la aplicación, se mostrará una ventana de bienvenida con el nombre de la universidad, título del proyecto, autor, etc.



**Figura AC.2.** Ventana de bienvenida

Adicionalmente se encuentra un espacio para colocar el directorio donde se encuentra instalado PLECS®, o bien, mediante el botón de **Buscar** se puede acceder a una ventana de navegación, donde se puede seleccionar buscar y seleccionar el ejecutable PLECS®.exe.

Al hacer clic sobre el botón **Buscar** se abrirá una ventana emergente en donde se tendrá que buscar y seleccionar el archivo PLECS®.exe en su directorio de instalación y hacer clic en **Open**.



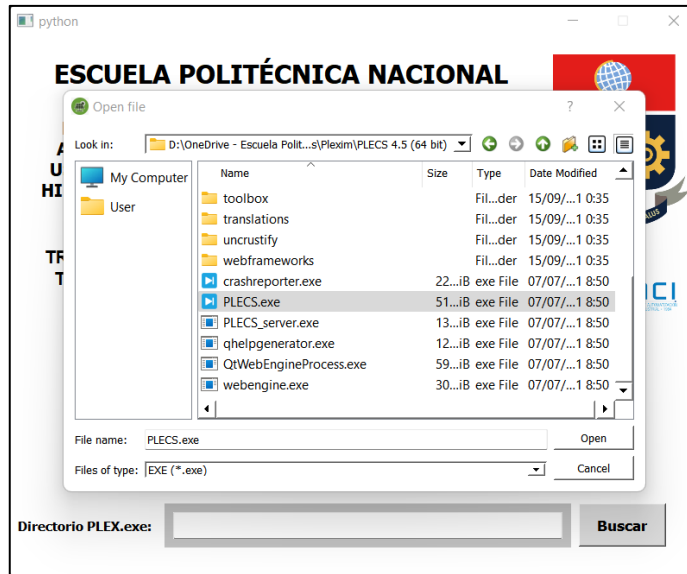


Figura AC.3. Ventana de navegación de archivos

Si se selecciona otro archivo .exe se desplegará un mensaje de error.



Figura AC.4. Ventana de diálogo de error

Al seleccionar el archivo PLECS®.exe se ejecutará el programa y se habilitará el botón **Continuar**, que permitirá acceder a la ventana principal de interfaz. Al hacer clic sobre este se abrirá la siguiente ventana.

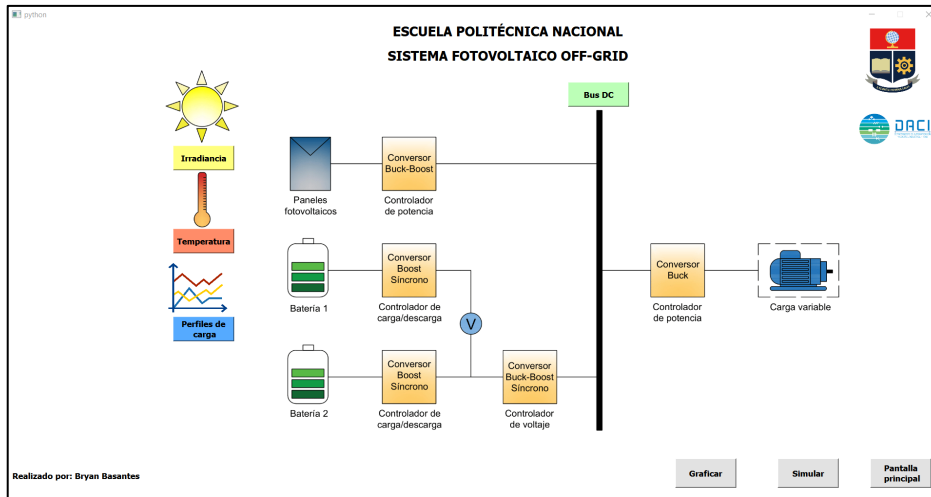


Figura AC.5. Ventana principal de interfaz

### 3. INTERFAZ PRINCIPAL

A continuación, se presenta el detalle de los elementos de la ventana y todos los botones disponibles. Primero, se presentan los botones que permiten visualizar los circuitos de los convertidores.

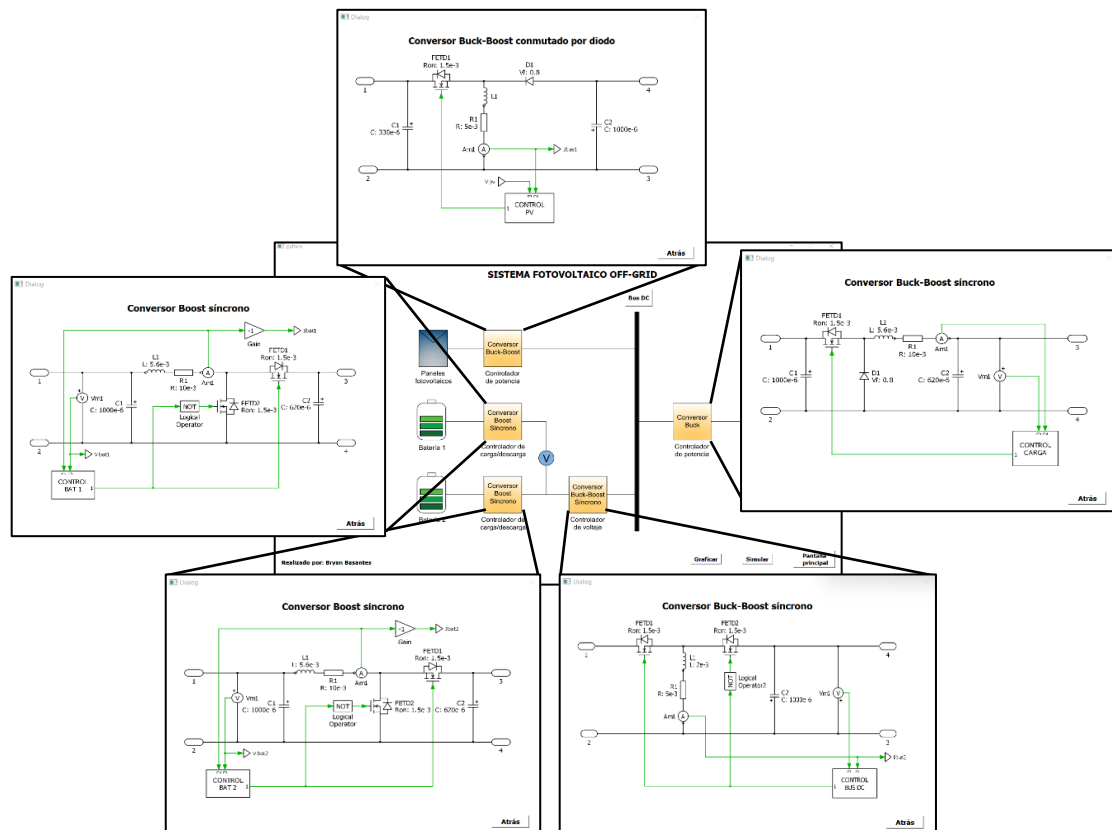
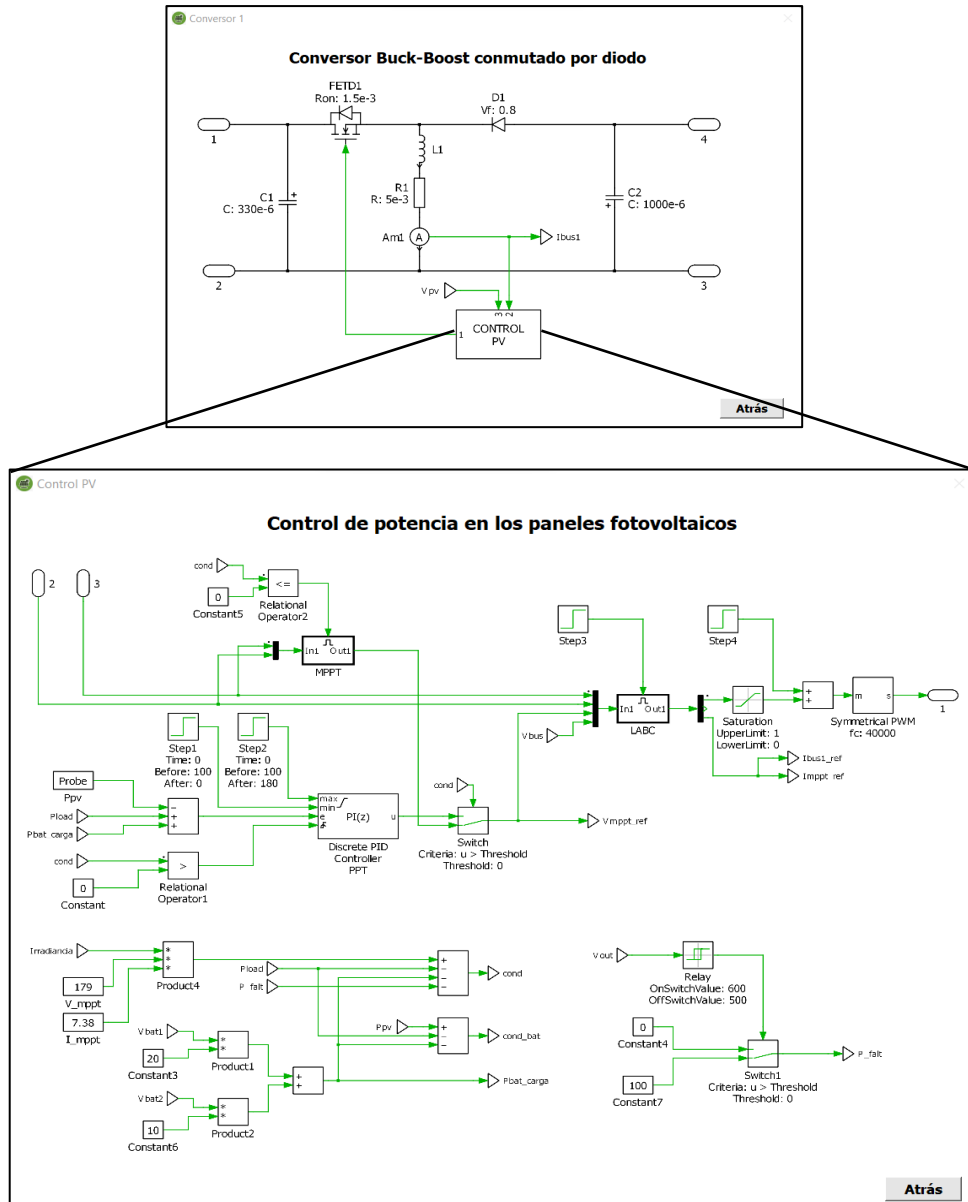


Figura AC.6. Ventanas de visualización de los convertidores DC-DC

A su vez, estas ventanas permiten acceder a sub-ventanas que permiten visualizar el control implementado en cada uno de los convertidores haciendo clic sobre el ícono del controlador, como se muestra a continuación.



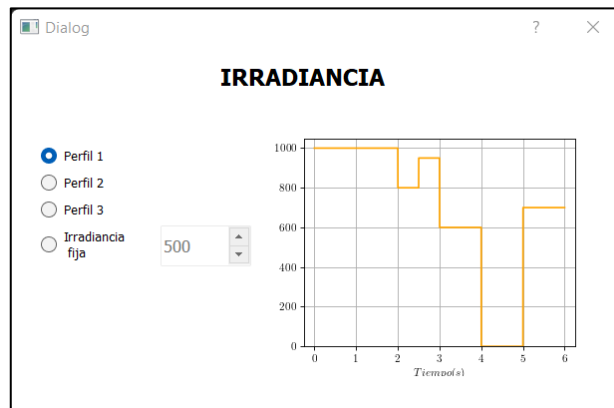
**Figura AC.7.** Ventana de visualización de algoritmos de control

En la ventana principal se podrán acceder tanto a las configuraciones de irradiancia, temperatura, carga y voltaje del bus DC, información técnica de los paneles fotovoltaicos y baterías; así como acceder a las gráficas.

Primero, se accede a las configuraciones de los perfiles de irradiancia, temperatura y carga al hacer clic sobre los botones respectivos.

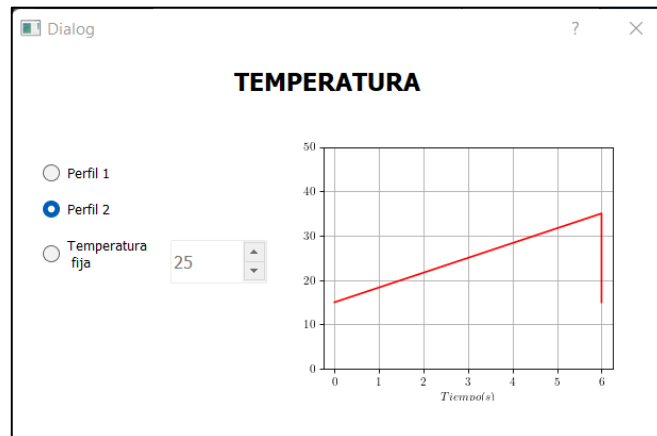
## Irradiancia

Se selecciona el perfil de irradiancia.



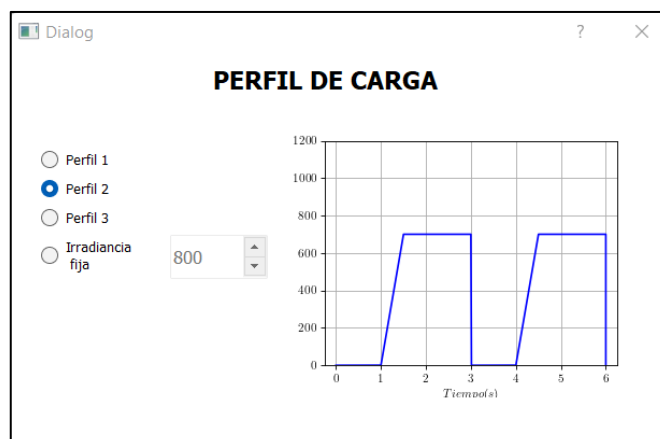
## Temperatura

Se selecciona el perfil de temperatura.



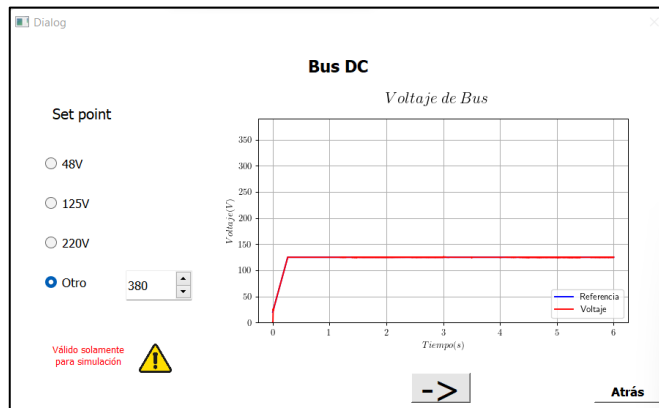
## Perfiles de carga

Se selecciona el perfil de carga o set point de potencia que consumirá la carga.



## Bus DC

Se selecciona el set point del voltaje en el bus DC



**Nota:** Si se escoge la opción donde se permite al usuario insertar un valor, obligatoriamente se tendrá que realizar la simulación ya que estos resultados no se encuentran en la base de datos.

En la pantalla principal de interfaz adicionalmente existen tres botones cuyas funciones son:

### Graficar

Carga las gráficas inmediatamente desde la base de datos (No disponible para perfiles configurados por el usuario).

### Simular

Si se desea corroborar los resultados o si se escoge configuraciones no disponibles en la base de datos, este botón permite ejecutar la simulación desde PLECS® y mostrar los resultados en tiempo real.

### Pantalla principal

Regresa a la pantalla de bienvenida.

Si se selecciona graficar las gráficas se cargarán y se mostrarán inmediatamente. Por otro lado, si se selecciona simular los otros botones se bloquearán y este botón cambiará.

### Stop

Detiene y cierra la simulación.

#### 4. SIMULACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Al hacer clic sobre el botón correspondiente se abrirá el archivo de simulación y se mostrará brevemente antes de minimizarse.

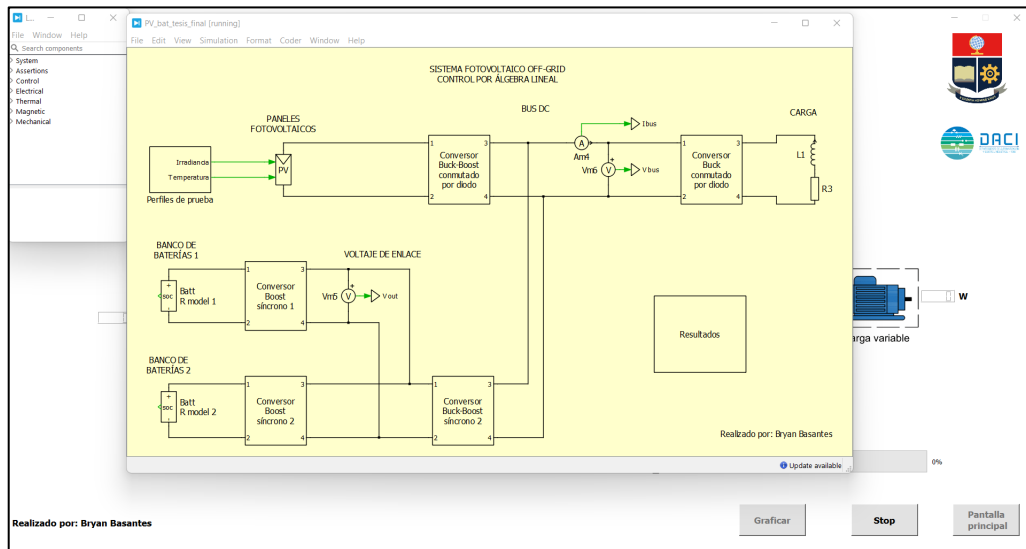


Figura AC.8. GUI conectándose con el archivo de simulación.

Durante la simulación en la ventana de interfaz se mostrarán diversos displays que mostrarán los valores en tiempo real de variables como voltaje, corriente, potencia, etc. correspondientes a cada circuito del sistema. Además, se mostrará una barra de progreso que permite observar el progreso de la simulación, que está preconfigurada en 6 segundos y no se puede modificar.

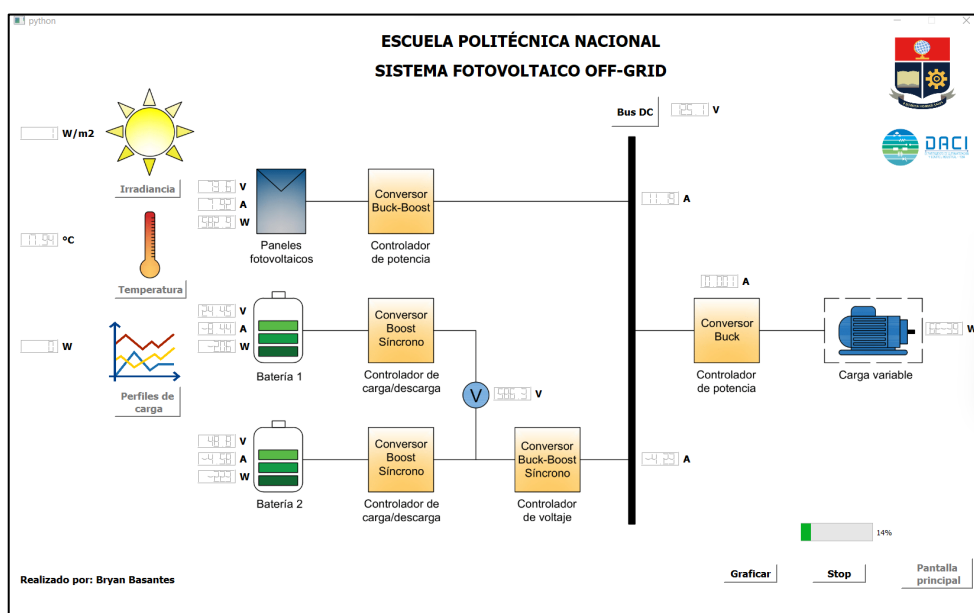


Figura AC.9. Displays con parámetros eléctricos

Cuando se esté ejecutándose la simulación es posible acceder a las ventanas de gráficas y observar en tiempo real los resultados. Es importante aclarar que por motivos de optimización en el despliegue de resultados estas ventanas solamente serán accesibles una a la vez.

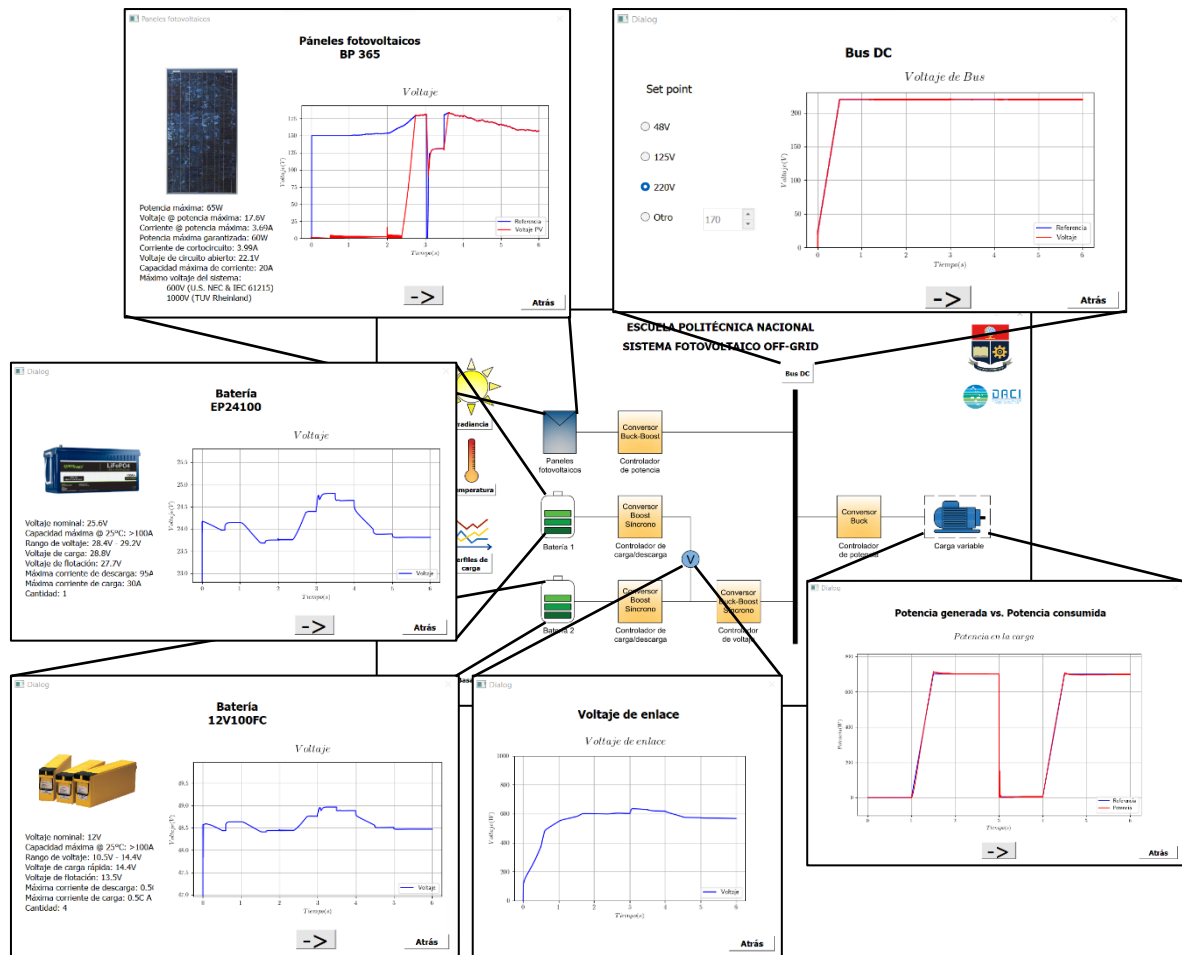
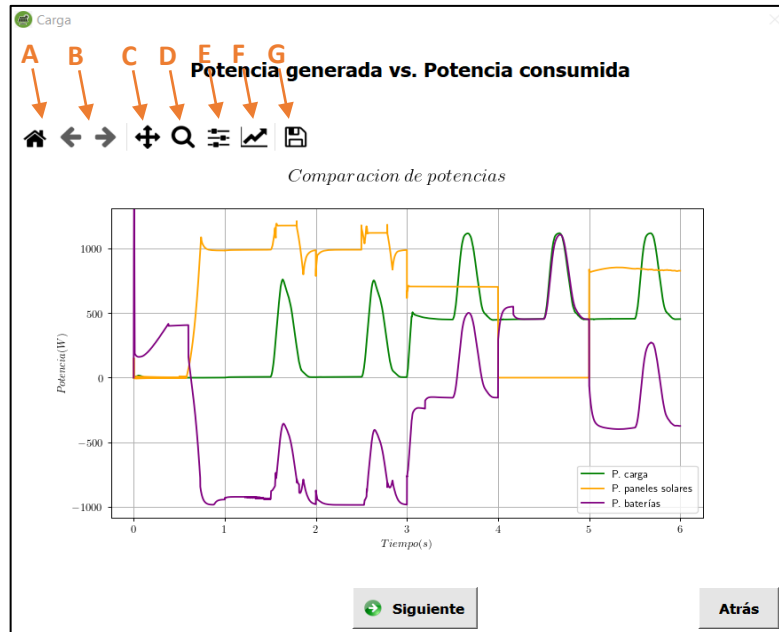


Figura AC.10. Ventanas con visualización de resultados disponibles

En estas gráficas se cuenta con una barra de herramientas en donde es posible hacer zoom o desplazarse por estas para una mejor visualización de las mismas. En la Tabla AC.1 se muestran las funciones que están disponibles en esta barra.



**Figura AC.11.** Gráfica con barra de herramientas de visualización

**Tabla AC.1.** Funcionalidades de la barra de herramientas de visualización de gráficas

Detalle	Descripción
A	Vista completa
B	Botones de navegación entre las vistas realizadas
C	Navegación en gráfica
D	Zoom
E	Opciones de presentación
F	Opciones de edición de figura (límites en eje x e y, color de trazos, etiquetas, leyendas)
G	Guardar vista actual

## 5. RECURSOS

En el siguiente link, se anexan los documentos, base de datos, archivos de simulación y los archivos de Python con el código desarrollado.

<https://mega.nz/folder/GoYB0Q6a#xSaExjb8SI6HX4tgQuOIBA>



## **ORDEN DE EMPASTADO**