

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

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

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA MEDIANTE CONVERSORES DC/DC Y LA TÉCNICA DE CONTROL MPPT**

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

**JUAN FERNANDO VARGAS GUACHAMIN**

**juan.vargas01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. JORGE LUIS MEDINA MORA, MSc.**

**jorge.medinaj@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: Dr.-Ing. PAUL MARCELO POZO PALMA**

**marcelo.pozo@epn.edu.ec**

**Quito, julio 2018**

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Fernando Vargas Guachamin, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. JORGE LUIS MEDINA MORA, MSc.**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Dr.-Ing. PAUL MARCELO POZO PALMA**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo Juan Fernando Vargas Guachamin, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada 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 cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

JUAN FERNANDO VARGAS GUACHAMIN

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico a mi familia especialmente a mis padres Juan Vargas y Liliana Guachamin, por todo el sacrificio realizado que me permitió culminar esta etapa académica.

*“PER ASPERA AD ASTRA”*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, familia y amigos que de una u otra forma me brindaron su ayuda para culminar esta etapa académica.

Agradezco de forma especial al M.Sc. Jorge Medina y al Dr.-Ing. Marcelo Pozo por el apoyo y paciencia en el desarrollo de este trabajo de titulación.

De igual forma agradezco al Dr. Gabriel Salazar por la gestión y facilidades brindadas en la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Alcance .....	2
1.3 Marco Teórico .....	3
Energía solar fotovoltaica .....	3
Efecto fotovoltaico .....	3
Célula fotovoltaica .....	4
Radiación Solar .....	5
Tipos de radiación .....	5
Panel Fotovoltaico .....	5
Elementos.....	6
Modelo matemático .....	6
Curvas características .....	8
Efectos de la presencia de sombra parcial .....	8
Central fotovoltaica Salinas de Ibarra .....	9
Paneles Solares .....	9

Estación meteorológica .....	13
Etapa de inversión.....	13
Etapa de transformación .....	14
Conexión hacia la red pública.....	15
Topologías de conexión de los equipos en la etapa de generación de una central fotovoltaica.....	16
Modelo equivalente de central fotovoltaica .....	17
Arreglos de paneles solares .....	18
Inversores.....	18
Transformador .....	20
Red eléctrica.....	20
Convertidores DC/DC .....	21
Convertidor buck-boost .....	21
Convertidor cûk .....	25
Conversor sepic.....	29
Técnicas de seguimiento del punto máximo de potencia .....	33
Algoritmo perturbador y observador “P&O” .....	33
Algoritmo de conductancia incremental “CI” .....	35
Algoritmo basado en lógica difusa “LD” .....	36
Algoritmo Hill Climb “HC” .....	38
Algoritmo basado en redes neuronales “RN” .....	39
Algoritmo de optimización por enjambre de partículas “PSO” .....	40
Selección del algoritmo MPPT .....	43
Esquema de control.....	44
Controlador PI .....	44
Control en modo deslizante .....	45
Criterio de estabilidad de Lyapunov .....	47

2. METODOLOGÍA .....	48
2.1. Diseño de los convertidores DC/DC.....	49
Parámetros de diseño de los convertidores DC/DC .....	50
Selección del semiconductor de potencia y frecuencia de conmutación .....	51
Convertidor Buck-Boost.....	52
Convertidor Cûk.....	53
Convertidor Sepic .....	54
2.2. Diseño del esquema de control.....	55
Diseño del algoritmo PSO-P&O.....	55
Etapas del algoritmo PSO .....	56
Controlador PI de voltaje .....	57
Controlador SMC de corriente .....	59
Conversor buck-boost .....	59
Conversor cûk .....	60
Conversor sepic.....	62
Análisis de estabilidad .....	63
Conversor buck-boost .....	63
Conversor cûk .....	64
Conversor sepic.....	65
2.3. Diseño de los perfiles de radiación .....	66
Radiación solar constante.....	66
Radiación solar con la presencia parcial de sombra.....	67
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67
3.1. Resultados de la simulación de los convertidores DC/DC .....	68
Convertidor buck-boost.....	69
Radiación solar variable y temperatura constante.....	69
Radiación solar constante y temperatura variable.....	70



Convertidor cûk.....	71
Radiación solar variable y temperatura constante.....	71
Radiación solar constante y temperatura variable.....	72
Convertidor sepic.....	73
Radiación solar variable y temperatura constante.....	73
Radiación solar constante y temperatura variable.....	74
3.2. Validación y resultados del funcionamiento del sistema .....	75
Análisis de datos históricos.....	76
Perfil de radiación solar variable y temperatura constante .....	77
Perfil de radiación solar constante y temperatura variables.....	81
Perfil de radiación solar a cielo despejado.....	85
Perfil de radiación solar con la presencia parcial de sombras. ....	89
Perfil de radiación solar en función de datos de la central fotovoltaica.....	93
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
4.1 Conclusiones.....	97
4.2 Recomendaciones.....	98
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99
6. ANEXOS.....	104
ANEXO I.....	104
ANEXO II.....	107
ANEXO III.....	109
ANEXO IV. ....	112
ORDEN DE EMPASTADO.....	113

## RESUMEN

Este trabajo se realiza con la finalidad de brindar una alternativa óptima y eficaz para incrementar la cantidad de potencia activa de la etapa de generación de la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra, mediante el uso de convertidores DC/DC y técnicas de control MPPT.

La etapa de generación de la Central Fotovoltaica está constituida por varios arreglos de módulos de paneles solares conectados en serie y paralelo. Además, presenta dos inversores trifásicos que transforman la energía en régimen DC generada por los paneles solares a energía alterna y un transformador trifásico encargado de elevar el nivel de voltaje entregado por cada inversor, para luego ser conectada a la Red de la empresa eléctrica local.

La inserción de los convertidores DC/DC busca extraer la mayor cantidad de energía producida por los arreglos de los paneles solares en plantas fotovoltaicas de grandes áreas ante la presencia de sombras parciales, objetos sobre la superficie del panel solar y variaciones de temperatura, esto se consigue mediante la aplicación de un algoritmo MPPT en convertidores DC/DC locales encargados de guiar y mantener a los paneles solares trabajando en el punto de mayor potencia. Físicamente lo que se desea lograr es que a niveles bajos de producción de energía eléctrica por parte de los arreglos de paneles solares entren en funcionamiento los diodos conectados en antiparalelo de cada panel solar.

**PALABRAS CLAVE:** panel solar, algoritmo MPPT, conversores, semiconductor, DC/DC.

## ABSTRACT

This study was carried out in order to provide an optimal and effective alternative to increase the amount of active power of the generation stage of Salinas de Ibarra Photovoltaic Power Plant, through the use of DC/DC converters and MPPT control techniques.

The generation stage of the Photovoltaic Central is constituted by several arrays of solar panels connected in series and parallel. In addition, it presents two three-phase inverters that transform the energy in the DC regime generated by the solar panels to alternating energy and a three-phase transformer in charge of raising the voltage level delivered by each inverter, to then be connected to the network of the local electricity company.

The insertion of the DC/DC converters seeks to extract the highest amount of energy produced by arrays of the solar panels in photovoltaic plants of large areas in the presence of partial shadows, objects on the surface of the solar panel and temperature variations, this is achieved through the application of a MPPT algorithm in local DC/DC converters responsible for guiding and maintaining the solar panels working at the point of greatest power.

Physically what you want to achieve is that at low levels of electrical energy production by arrays of solar panels come into operation the diodes connected in antiparallel to each solar panel.

**KEYWORDS:** solar panel, MPPT algorithm, converters, semiconductor, DC/DC.

# 1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se considera como la principal fuente de energía renovable con mayor proyección para el desarrollo de un futuro sostenible en la generación de energía eléctrica, ya que está disponible aproximadamente 12 horas al día en mayor o menor cantidad en cualquier parte del mundo. Este tipo de energía es de naturaleza intermitente, por lo que está fuera del control del ser humano [1].

Los sistemas de generación fotovoltaica se caracterizan por ser amigables con el medio ambiente y minimizar las emisiones de dióxido de carbono. Poseen alta fiabilidad, larga vida útil, bajo costo de operación y mantenimiento [2]. Por otro lado, la cantidad de energía eléctrica generada a través de paneles fotovoltaicos dependen de la radiación solar incidente en la superficie del panel y de la temperatura del ambiente. Sin embargo, la variación de estos parámetros y la presencia de condiciones de sombra parcial-PSC (por sus siglas en inglés) causan superposiciones en las gráficas características de potencia y voltaje, conocidos como puntos de máxima potencia locales-LMPP (por sus siglas en inglés), los cuales provocan que los paneles fotovoltaicos afectados pasen de generar a consumir energía causando sobrecalentamiento y destrucción de estos, además de evidenciar una disminución de la potencia generada [3]. Este efecto se ve evidenciado físicamente cuando el diodo bypass entra en funcionamiento dando un paso alternativo a la corriente que fluye de los paneles solares.

Las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia-MPPT (por sus siglas en inglés) busca extraer la mayor cantidad de energía posible del sistema, rastreando los picos donde existe la presencia de la potencia más alta.

## 1.1 Objetivos

El objetivo general de este estudio técnico es: Diseñar y simular la optimización en la generación de energía en una central fotovoltaica mediante convertidores DC/DC y la técnica de control MPPT.

Los objetivos específicos de este estudio técnico son:

- Realizar el estudio teórico de la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra y además del funcionamiento de tres topologías de convertidores DC/DC y las diferentes técnicas de control MPPT más usadas.
- Obtener un modelo equivalente de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

- Diseñar y simular tres tipos de convertidores DC/DC controlados mediante una técnica MPPT.
- Simular y analizar la etapa de generación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra sin convertidores y con la inclusión de los mismos.
- Contrastar los resultados obtenidos de la simulación de la central fotovoltaica en las condiciones actuales de operación versus la simulación de la etapa de generación con la inclusión de convertidores DC/DC.

## 1.2 Alcance

Se realizará un estudio teórico:

- De la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, es decir los elementos, equipos y la técnica de control con la que trabaja actualmente el inversor.
- Del funcionamiento de las tres topologías de convertidores DC/DC a usarse:
  - 1) Buck-boost.
  - 2) C<sub>û</sub>k.
  - 3) Sepic (Single-Ended Primary-Inductor Converter).
- De las diferentes técnicas de control MPPT más usadas para escoger la que mejor se acople al caso en estudio.

Se obtendrá el modelo equivalente de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra para poder contrastar resultados cuando se implemente la optimización.

Se diseñará y simulará tres tipos de convertidores DC/DC controlados mediante una técnica MPPT.

Se simulará y analizará bajo dos perfiles de irradiancia solar:

- La etapa de generación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, tomando en cuenta un modelo de la misma que permita contrastar los resultados obtenidos con la condición actual de operación.
- La etapa de generación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra incluyendo los convertidores DC/DC a la salida de cada una de las cajas de conexiones (bus DC), antes de la etapa de inversión del sistema.

**Nota.** - Siendo los perfiles de irradiancia los siguientes:

**Irradiancia constante.** – Los paneles solares reciben la radiación del sol a cielo despejado y por ende se puede aprovechar esta condición para operar los paneles solares a su capacidad nominal.

**Otros perfiles de irradiancia.** - Se simulará la presencia de sombras totales y parciales generadas por las nubes, que limitaran el trabajo óptimo de los paneles solares.

Se contrastará los resultados obtenidos de la simulación de la central fotovoltaica en las condiciones actuales de operación versus la simulación de la etapa de generación con la inclusión de convertidores DC/DC controlados por un algoritmo MPPT determinado.

### 1.3 Marco Teórico

En esta sección se describen y analizan conceptos básicos que servirán de guía y sustento para el desarrollo del trabajo de titulación, buscando generar comprensión y confiabilidad al momento de escoger una determinada metodología para el desarrollo del trabajo. Para la recopilación de información se toma como referencia libros, artículos científicos, sitio webs académicos, revistas científicas, etc.

#### Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía proveniente del sol que puede ser transformada en energía eléctrica como se muestra en la Figura 1.1. Además, no produce agentes contaminantes en las etapas de extracción, manipulación y transformación de la misma. Es de naturaleza intermitente ya que depende del clima y del número de horas donde exista presencia de sol [4].

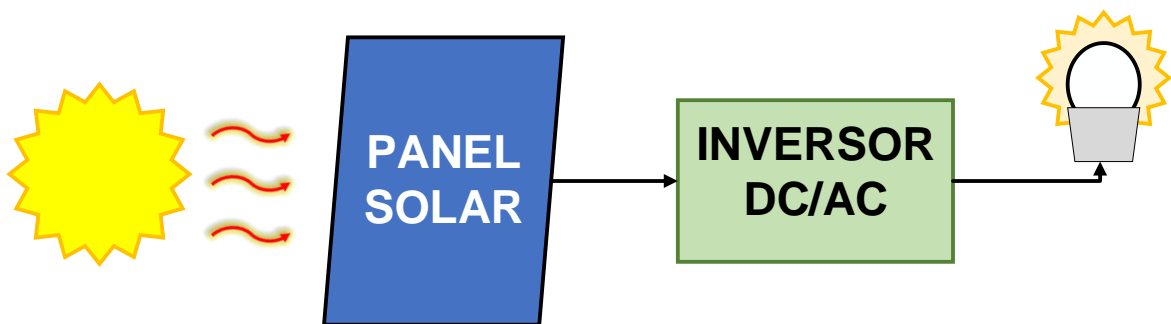
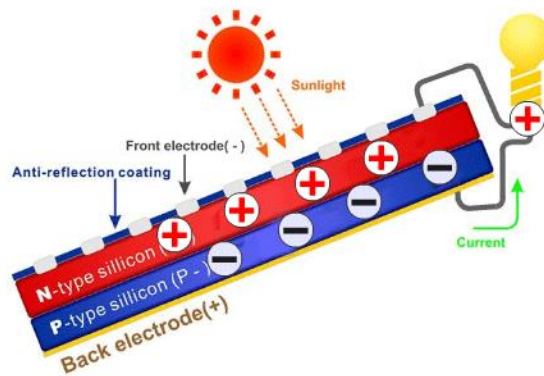


Figura 1.1. Energía solar fotovoltaica [5].

#### Efecto fotovoltaico

Este fenómeno físico permite transformar energía solar en energía eléctrica de manera directa, a través de células fotovoltaicas generalmente construidas por materiales semiconductores que tienen la propiedad de producir corriente eléctrica mediante la incidencia de la radiación solar en su superficie. Este proceso conocido como efecto fotoeléctrico viene descrito en la Figura 1.2, cuando los fotones de luz emitidos por el sol transmiten su energía a los electrones del material semiconductor, provocando que los electrones se desplacen de un átomo a otro produciendo corriente eléctrica.



**Figura 1.2.** Funcionamiento del efecto fotovoltaico [6].

### Célula fotovoltaica

Las células fotovoltaicas basan su funcionamiento en el efecto fotovoltaico para la generación de corriente eléctrica, la producción de corriente depende del nivel de radiación y de la temperatura ambiente. En cuanto a la fabricación están construidas con láminas de materiales semiconductores como el silicio y el germanio, siendo el silicio el más utilizado actualmente en la construcción de paneles fotovoltaicos. En la Tabla 1.1 se muestra más a detalle la clasificación por generaciones de los materiales semiconductores, así como también el rendimiento que ofrece cada uno.

**Tabla 1.1.** Tipos de materiales semiconductores y su rendimiento [7] [8].

Generación	Material	Rendimiento
<b>Primera</b>	Silicio monocristalino	15 -18%
	Silicio policristalino	12 – 14%
	Silicio amorfo	Menor del 10%
<b>Segunda</b>	Silicio y germanio	37 %
<b>Tercera</b>	Nanotecnología	42 %
<b>Cuarta</b>	Polímeros y nanotecnología	Aún en investigación

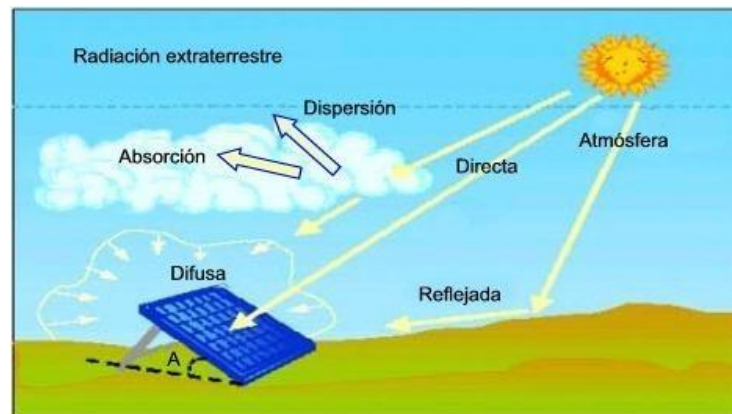
Es posible conectar células fotovoltaicas en serie y paralelo para dar cabida a un módulo fotovoltaico, éstos a su vez interconectados entre si forman el panel solar. El tipo de configuración y arreglo determinará cual va a ser la potencia máxima que se puede generar, así como el nivel de voltaje y corriente.

## Radiación Solar

La radiación solar es flujo de energía que se recibe del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias, algunas pueden ser detectadas por el ojo humano y son conocidas como luz visible, mientras que otras están presentes en la zona infrarroja o ultravioleta del espectro electromagnético.

### Tipos de radiación

En la Figura 1.3. se muestra los tipos de radiación solar en función de cómo inciden los rayos solares en la Tierra:



**Figura 1.3.** Tipos de radiación [9].

- Radiación directa. – es aquella que recibe el panel fotovoltaico sin haber sufrido un cambio en su dirección en su paso por la atmósfera terrestre.
- Radiación difusa. - este tipo de radiación sufre cambios en su dirección cuando atraviesa la atmósfera, ya que se ve reflejada o absorbida por las nubes para luego incidir en el panel fotovoltaico.
- Radiación reflejada. – es aquella que se refleja en la superficie terrestre, la cantidad de radiación dependerá del coeficiente de reflexión de la radiación.

La suma de estas tres radiaciones se denomina radiación global, que es la que incide en el panel solar. Cabe mencionar que el panel solar es capaz de absorber los tres tipos de radiación [10].

### Panel Fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son placas rectangulares compuestas por un gran número de células fotovoltaicas conectadas eléctricamente entre sí, en serie y/o en paralelo, protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizado, que transforman la energía que proviene de la radiación solar en energía eléctrica [11].



## Elementos

En la Figura 1.4 se observa los diferentes elementos que conforman a un panel fotovoltaico encargado de transformar la energía solar producida por el sol en energía eléctrica.

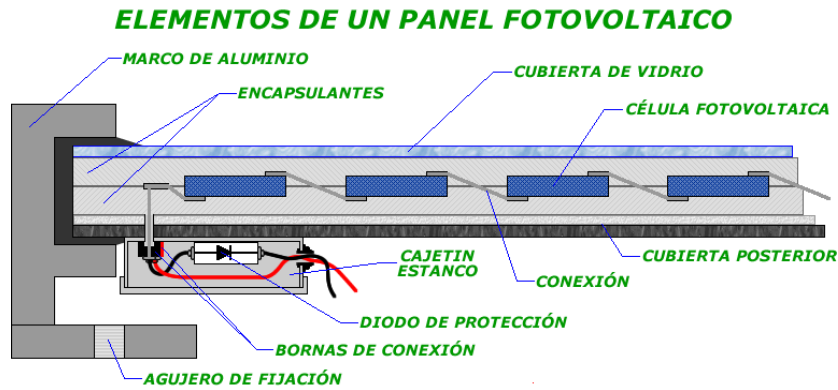


Figura 1.4. Elementos de un panel fotovoltaico [12].

**Marco de aluminio.** – asegura una rigidez y estanqueidad al módulo, incorpora agujeros de fijación a la estructura exterior del panel.

**Encapsulantes.** – busca generar una refracción similar a la proporcionada por la cubierta de vidrio, generalmente se trata de silicona o EVA (etileno-vinil-acetato).

**Cubierta de vidrio.** – facilita la máxima transmisión de la radiación solar, caracterizado por su resistencia mecánica y bajo contenido de hierro.

**Célula fotovoltaica.** – es la parte principal del módulo, su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico.

**Cubierta posterior.** – brinda rigidez y protección al módulo frente a los agentes externos.

**Diodo de protección.** – protege contra sobrecargas u otras fluctuaciones que se puedan presentar en el funcionamiento del panel.

**Bornas de conexión.** – puntos adecuados para realizar conexiones eléctricas, protegidas de la intemperie por cajas [12].

## Modelo matemático

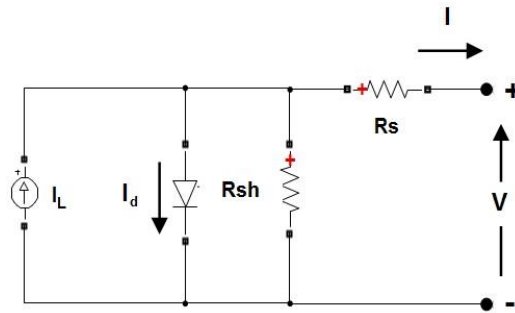
En la Figura 1.5 se muestra el circuito equivalente de un panel fotovoltaico, el cual está constituido por varios elementos.

$I_L$ : Fuente de corriente que físicamente representa la corriente generada por incidencia de la radiación solar sobre el panel fotovoltaico [13].

$I_d$ : Corriente circulante a través del diodo *bypass* debido a la presencia parcial de sombras [13].

$R_s$ : Resistencia generada por los contactos metálicos con el material semiconductor del panel [14].

$R_{sh}$ : Resistencia generada por pérdidas producidas en el material semiconductor [13].



**Figura 1.5.** Circuito equivalente del panel fotovoltaico [13].

Las ecuaciones que describen el circuito equivalente son las siguientes:

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

**Ecuación 1.1.** Corriente del diodo *bypass* [13].

$$I = I_L - I_o \left[ e^{\frac{q(V+R_s I)}{kT}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$

**Ecuación 1.2.** Ley de nodos [13].

$$I = I_{sc} \left( 1 - e^{\frac{-q(V_{oc}-V)}{mkT}} \right)$$

**Ecuación 1.3.** Corriente de salida del panel fotovoltaico [13].

$$V_T = \frac{kT}{q} * N * nI$$

**Ecuación 1.4.** Voltaje de salida en función de la temperatura [13].

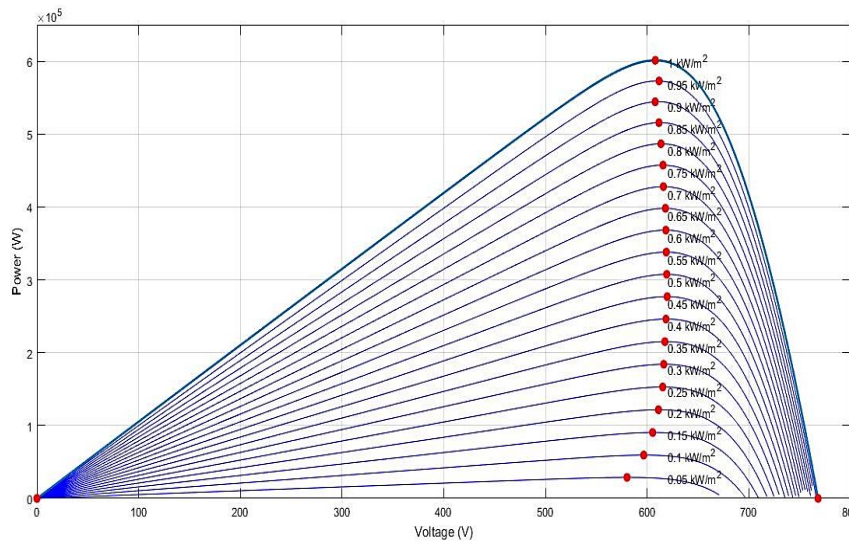
Siendo:

- $I_d$  = Corriente del diodo.
- $V_d$  = Voltaje del diodo.
- $I_o$  = Corriente de saturación del diodo.

- $nI$  = Factor de idealidad del diodo ( $nI = 1$  ideal) y ( $nI \neq 1$  dependiendo del número de portadores que tienden a juntarse).
- $N$  = Número de células.
- $k$  = Constante de Boltzmann  $1.3806e-23$  J.K-1
- $T$  = Temperatura de la célula.
- $q$  = Carga del electrón  $1.6022e-19$  C

### Curvas características

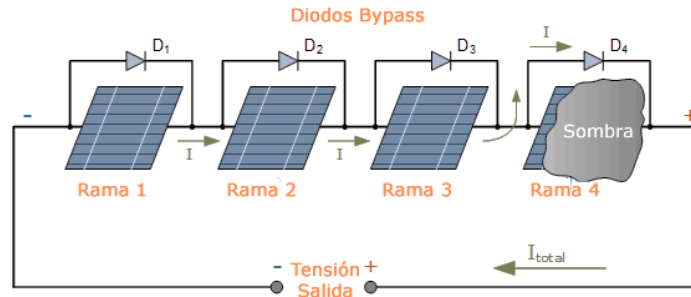
En la Figura 1.6 se detallan las curvas características de potencia vs voltaje del arreglo fotovoltaico conformado de 120 hileras paralelas, cada una de 20 módulos YL250P-29b conectados en serie [15]. En estas curvas se puede observar como varía la cantidad de generación de potencia dependiendo del nivel de radiación que se aplique en el panel solar.



**Figura 1.6.** Curva de P-V de un panel fotovoltaico.

### Efectos de la presencia de sombra parcial

La presencia de sombra ya sea por nubosidades u objetos sobre el panel solar, provoca escalones en las curvas características de P-V del panel, dificultando el control del sistema debido a la presencia de varios sobre-picos llamados puntos locales de máxima potencia-LMPP (por sus siglas en inglés) y causando una reducción en la generación de energía. Además, cuando una o varias células fotovoltaicas están sometidas a sombra pasan de producir energía a consumir energía, lo que provoca un sobrecalentamiento y en algunos casos la destrucción de las células. Debido a esta razón se da la presencia del diodo *bypass* que brinda un camino alternativo al flujo de corriente como se muestra en la Figura 1.7. [16].

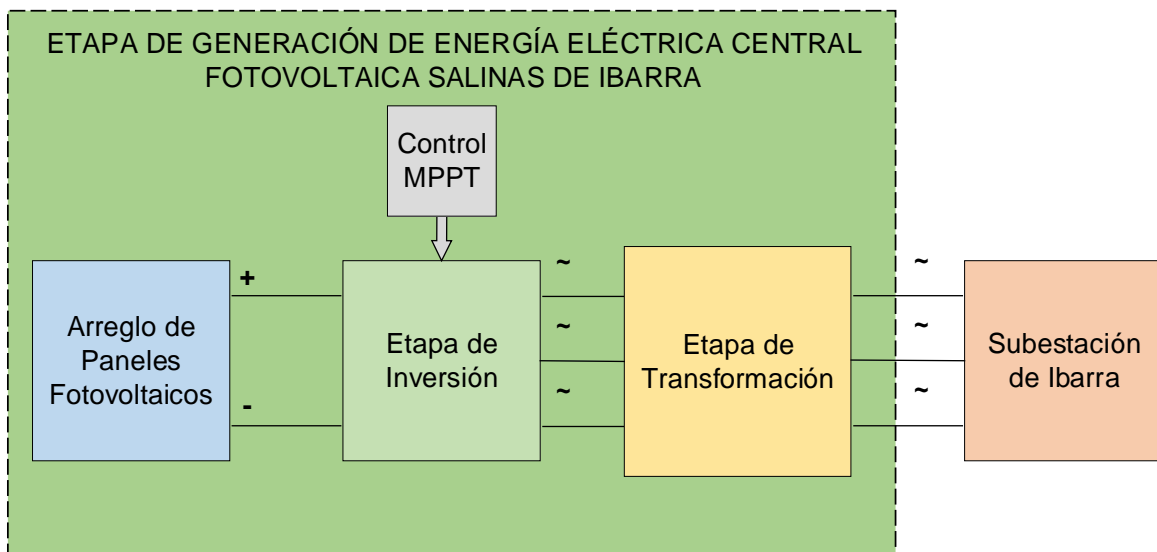


**Figura 1.7.** Funcionamiento del diodo *bypass* [16].

### Central fotovoltaica Salinas de Ibarra

Actualmente la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra genera aproximadamente 3MW de potencia activa, distribuidos en la Central Tren Salinas de 1MW y Central Salinas de 2MW, para luego atravesar 53 Km de distancia e interconectarse a la Empresa Eléctrica Norte “EMELNORTE” más específicamente a la subestación ALPACHACA. En este trabajo se desarrolla el sistema Tren Salinas debido a que el sistema Salinas es una réplica de este.

En la Figura 1.8 se representa las etapas que sigue el sistema para la generación de energía eléctrica en una central fotovoltaica.



**Figura 1.8.** Etapas de generación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

### Paneles Solares

La Central Fotovoltaica Tren Salinas de Ibarra cuenta actualmente con 4800 paneles fotovoltaicos (YL250P-29b) conectados en serie y en paralelo, para formar hileras de paneles solares. La conexión de estas hileras se realiza mediante cajas de conexiones C.C y cajas de conexiones strings C.C.S.



**Figura 1.9.** Arreglos de los paneles Solares.

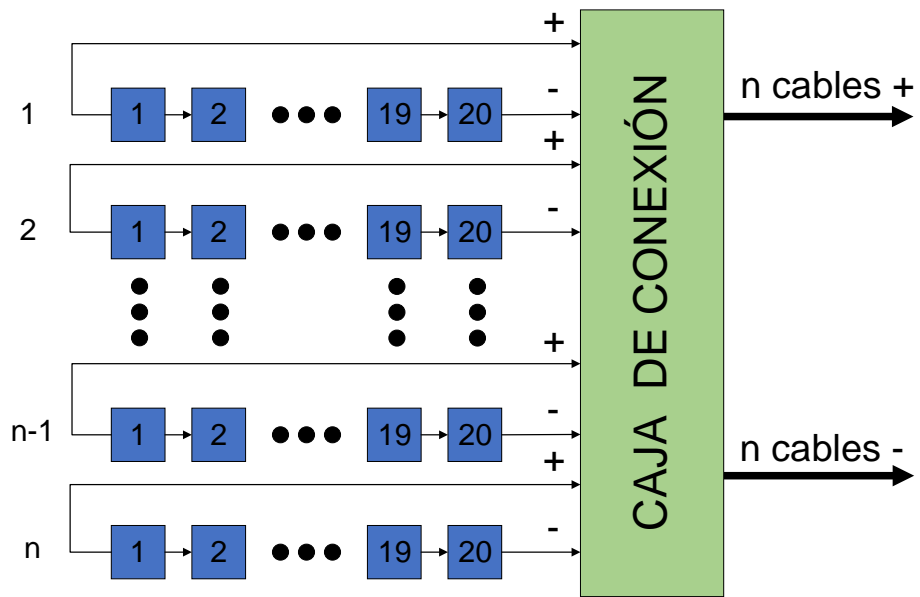
La Figura 1.9 muestra los paneles utilizados en la central fotovoltaica. Son de la marca Yingli Solar modelo YL250P-29b que interconectados permiten la generación de energía eléctrica. En la Tabla 1.2 se presentan los parámetros técnicos de funcionamiento de los paneles tomando en consideración una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiente de 25°C.

**Tabla 1.2.** Parámetros del panel solar YL250P-29b [15].

<b>PARÁMETROS PANEL SOLAR YL250P-29b</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Número de Células Fotovoltaicas	60	---
Potencia Máxima	250	W
Voltaje a Potencia Máxima	30,4	V
Corriente a Potencia Máxima	8,24	A
Voltaje a Circuito Abierto	37,8	V
Corriente a Corto Circuito	8,79	A

### **Caja de conexiones (C.C.) “String”**

Una caja de conexión es un punto intermedio de paso al cual llegan  $n$  número de hileras, cada hilera representa la conexión física en serie de 20 paneles solares como se muestra en la Figura 1.10. De la salida de la caja de conexiones se obtiene un paquete de  $n$  cables positivos y  $n$  cables negativos que serán dirigidos a la caja de conexiones string.



**Figura 1.10.** Diagrama de conexión de C.C.

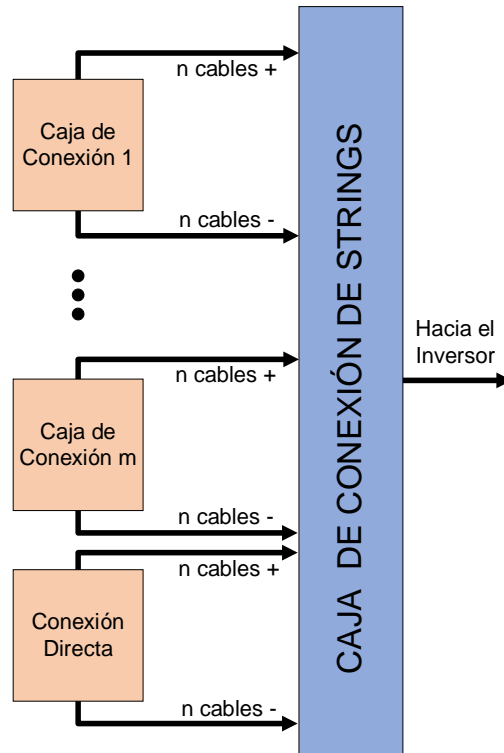
En la Figura 1.11 se muestra un ejemplo "in situ" de la disposición de un conjunto de cajas de conexiones.



**Figura 1.11.** Representación in situ de las cajas de conexiones.

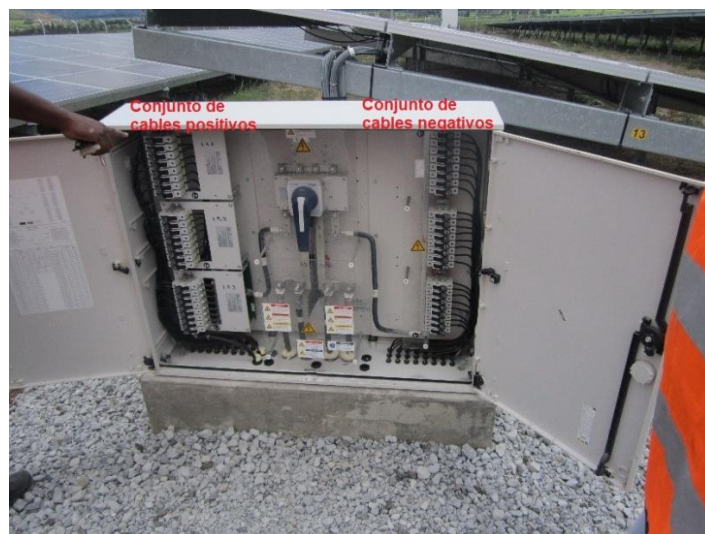
### Caja de conexiones string (C.C.S.)

La caja de conexiones string recibe  $n$  cables positivos y  $n$  cables negativos de cada caja de conexión, en algunos casos a cada C.C.S se conecta directamente un conjunto de hileras de paneles sin pasar previamente por una C.C. como se muestra en la Figura 1.12.



**Figura 1.12.** Diagrama de conexión de la C.C.S.

En la Figura 1.13 se representa como está dispuesta la conexión de cada hilera de los paneles (cable positivo y negativo) con su respectivo fusible de protección.



**Figura 1.13.** Representación interna de la C.C.S.

## Estación meteorológica

En la Figura 1.14 se presenta la torre de medición encargada de sensar la radiación, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento que inciden en la central fotovoltaica.



**Figura 1.14.** Torre meteorológica.

## Etapa de inversión

La etapa de inversión de la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra está conformada de dos inversores fotovoltaicos (SUNNY CENTRAL), cada uno es capaz de manejar una potencia nominal de alrededor de 500 kW. En esta etapa la corriente continua generada por los paneles solares es transformada en corriente alterna para ser enviada al transformador.

En la Figura 1.15 se muestra un ejemplo “in situ” del inversor empleado en el sistema fotovoltaico.



**Figura 1.15.** Inversor sunny central.



En la Tabla 1.3 se presentan los parámetros de entrada en corriente continua y de salida en corriente alterna del inversor Sunny Central 500 CP XT.

**Tabla 1.3.** Parámetros del inversor sunny central 500CP XT [17].

<b>PARÁMETROS INVERSOR SUNNY CENTRAL 500CP XT</b>		
<b>Entrada CC</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia Máxima ( $\cos \varphi=1$ )	560	kW
Voltaje Máximo	1000 / 1100 opcional	V
Voltaje Mínimo	429 / 430 opcional	V
Corriente Máxima	1259	A
<b>Salida AC</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia Nominal (25°C / 50°C)	550 / 500	kVA
Voltaje Nominal	270	V
Frecuencia / Rango	50, 60 / 47 a 63	Hz
Factor de Potencia	1	---
Rendimiento máximo / europeo / americano	98.6 / 98.4 / 98.5	%

### **Algoritmo MPPT aplicado en el inversor**

Conocer el algoritmo MPPT utilizado en el inversor presento ciertos inconvenientes por parte de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, debido a que se manifestó que es información únicamente de uso exclusivo por parte de la empresa encargada de la construcción de la central. Por lo tanto, a manera de asemejar el sistema real con el sistema simulado se tomó la decisión de trabajar con el algoritmo Perturbador y Observador encargado de buscar y mantener al sistema trabajando en el punto de máxima potencia. En la siguiente sección se realiza una descripción de funcionamiento de este algoritmo.

### **Etapas de transformación**

La etapa de transformación esta compuesto de un transformador trifásico compacto (TCS-1000-SC), esta conformado por tres devanados situando dos de estos devanados en el lado de bajo voltaje y uno devanado en el lado de alto voltaje, el tipo de conexión de los devanados del transformador es Dy11y11.

En la Figura 1.16. se muestra un ejemplo “in situ” del transformador trifásico empleado en el sistema fotovoltaico.



**Figura 1.16.** Transformador TCS-1000-SC.

En la Tabla 1.4 se presentan los valores nominales que maneja el transformador tanto en el lado de alto voltaje como en el lado de bajo voltaje.

**Tabla 1.4.** Parámetros del transformador SMA 1000SC [18].

<b>PARÁMETROS TRANSFORMADOR SMA 1000SC</b>		
<b>Lado de Alto Voltaje</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia Nominal	1000	kW
Voltaje Nominal	22 - 33 / 30 - 36	kV
Frecuencia Nominal	50	Hz
Corriente Nominal de Salida	28.9	A
<b>Lado de Bajo Voltaje</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Voltaje Nominal	270	V
Corriente Nominal de Entrada	2 x 1070	A

### **Conexión hacia la red pública**

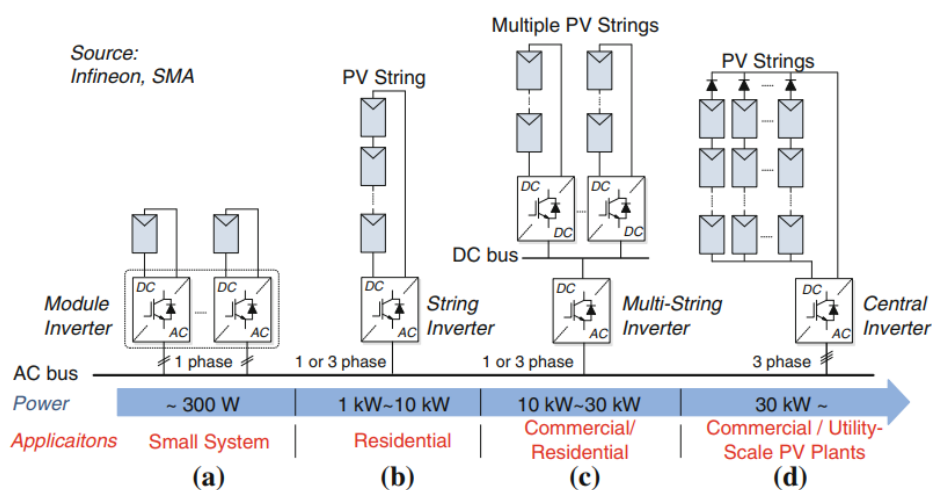
En la Figura 1.17 se muestra el punto de conexión físico de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra con la red pública, esta línea de transmisión recorre 53 Km. de distancia hasta llegar a la subestación respectiva.



**Figura 1.17.** Punto de conexión hacia la red pública.

### Topologías de conexión de los equipos en la etapa de generación de una central fotovoltaica.

El tipo de topología de conexionado empleado en un sistema fotovoltaico depende principalmente del tipo de aplicación donde brindará servicio, en la actualidad la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra presenta una conexión de hileras de paneles solares conectados en serio/paralelo con un inversor común como se presenta en la Figura 1.18d [19].



**Figura 1.18.** Tipos de conexión de los paneles e inversores (a) Modulo - inversor (b) String - inversor (c) Varios string - inversor (d) Inversor central [19].

En la Tabla 1.5. se presenta ventajas y desventajas de las diferentes topologías de conexión utilizadas en sistemas fotovoltaicos.

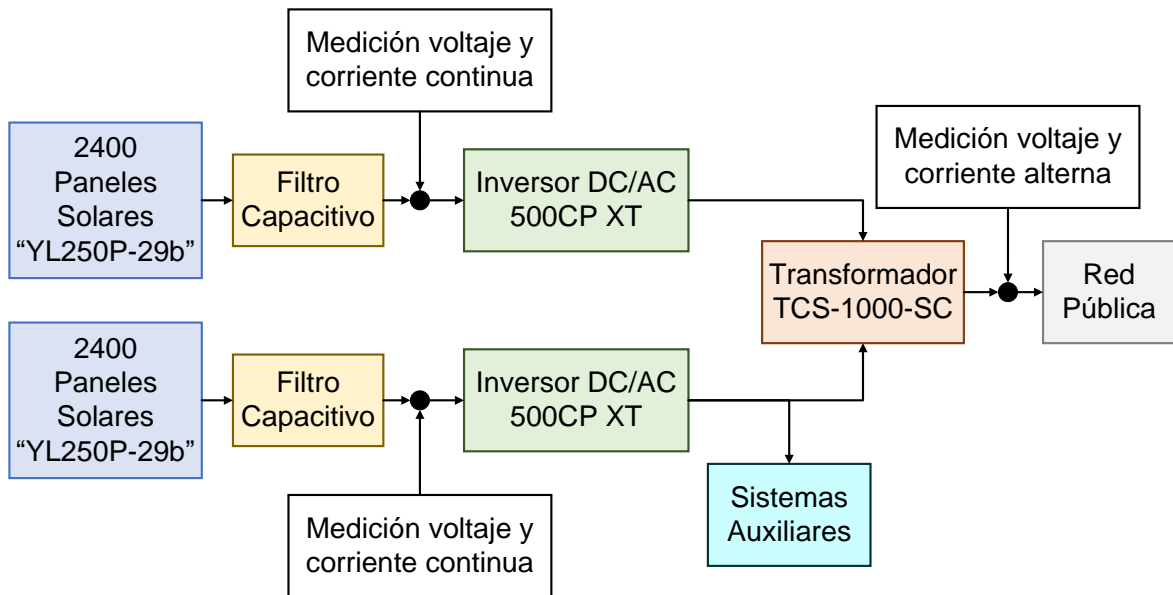
**Tabla 1.5.** Comparación de las topologías de conexión para sistemas fotovoltaicos [19] [20] [21].

<b>Modulo - inversor</b>	
<b>Aplicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños sistemas fotovoltaicos.</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brinda gran libertad en el diseño del sistema fotovoltaico.</li> <li>• No es necesario utilizar gran cantidad de conexiones.</li> <li>• Es de instalación sencilla y minimiza el riesgo de incendios y otros problemas.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta una generación de baja potencia a una baja eficiencia y a un gran costo.</li> <li>• Bajo tiempo de vida útil.</li> </ul>
<b>String - inversor</b>	
<b>Aplicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de uso residencial</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta la eficiencia del sistema ya que trabaja con menor número de arreglo de paneles solares.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta la cantidad de equipos y monitoreo.</li> <li>• Incremento en el costo de generación de energía eléctrica.</li> </ul>
<b>Varios string – inversor</b>	
<b>Aplicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas residenciales y comerciales</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera mayor potencia con respecto a la configuración string-inversor.</li> <li>• Presenta gran libertad en el diseño del sistema fotovoltaico.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento en la cantidad de equipos y monitoreo.</li> <li>• Incremento en el costo de generación de energía eléctrica.</li> </ul>
<b>Inversor central</b>	
<b>Aplicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas comerciales y plantas fotovoltaicas a gran escala</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia debido al alto nivel de potencia manejada.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas de potencia debido a las alteraciones del funcionamiento de los paneles solares por las variaciones ambientales.</li> <li>• Difícil detección de errores.</li> </ul>

En función de buscar un incremento en la cantidad de energía eléctrica generada en la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, se propone la inserción de convertidores DC/DC aplicando algoritmos de MPPT en las hileras de los paneles solares como se muestra en la Figura 1.18.c, tratando de obtener un mejor control sobre el sistema fotovoltaico al trabajar en áreas reducidas [19].

### **Modelo equivalente de central fotovoltaica**

El modelo de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra fue desarrollado y simulado en su totalidad en el software Matlab/Simulink en función de la información técnica de los equipos con los que cuenta la central fotovoltaica. En la Figura 1.19. se muestra la topología del conexionado del sistema fotovoltaico y los respectivos puntos de medición de los niveles de voltaje y corriente en régimen continuo y alterno.



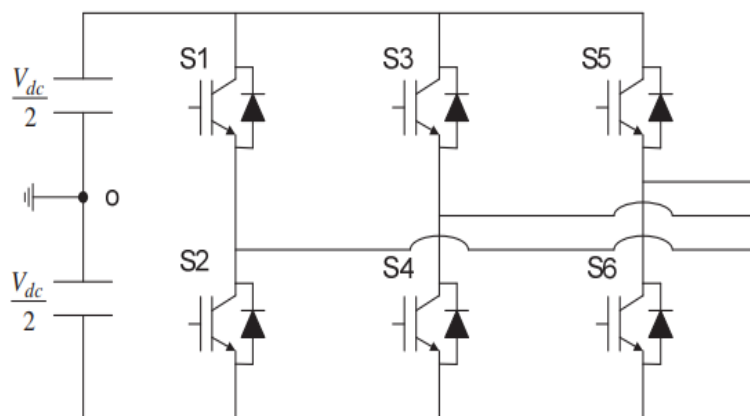
**Figura 1.19.** Modelo equivalente de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

### Arreglos de paneles solares

Para la etapa de generación de potencia en régimen DC se trabaja con módulos propios de Simulink que representan a los paneles solares, el cual permite configurar el número de paneles conectados en serie y en paralelo [13].

### Inversores

En la etapa de inversión se utilizó un inversor trifásico de seis semiconductores de potencia como se muestra en la Figura 1.20. Mientras, para el control se utilizó una técnica de control que se acopla al inversor seleccionado y al funcionamiento propio de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.



**Figura 1.20.** Inversor trifásico de tres ramas [22].

En la Figura 1.21. se presenta el esquema de control utilizado en el inversor en donde se aplica:

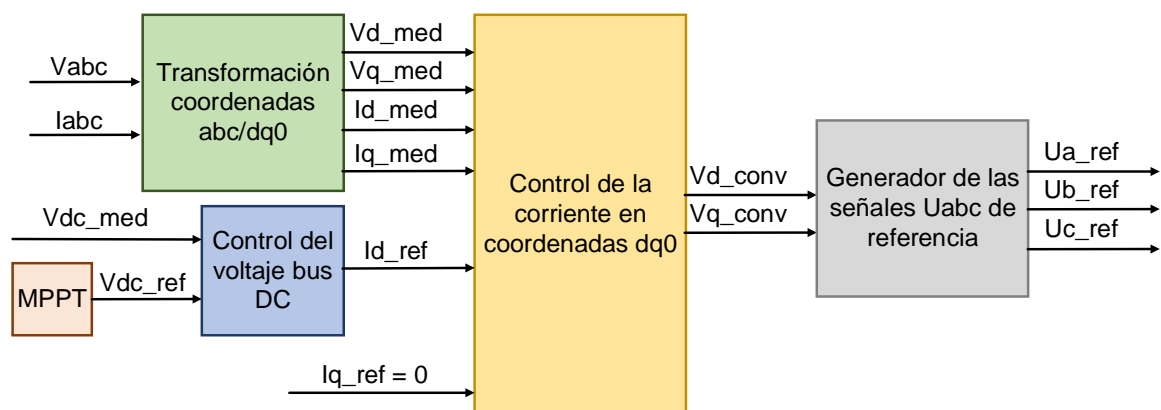
**Algoritmo MPPT “P&O”:** encargado de buscar y mantener al sistema trabajando en el punto de máxima potencia [22] [23].

**Transformación de coordenadas trifásicas “ABC” a coordenadas dinámicas “dq0”:** realiza la sincronización y genera voltajes y corriente de referencia en coordenadas dq0 [22] [23].

**Controlador del voltaje del bus DC:** determina la referencia de la corriente  $I_d$  requerida por el sistema [22] [23].

**Controlar de corriente:** basado en las referencias de la corriente  $I_d$  e  $I_q$ , determina los voltajes de referencia requeridos por el inversor [22] [23].

**Generador de señales de control:** genera las señales de conmutación para los semiconductores de potencia [22] [23].



**Figura 1.21.** Esquema de control del inversor [22] [23].

Siendo:

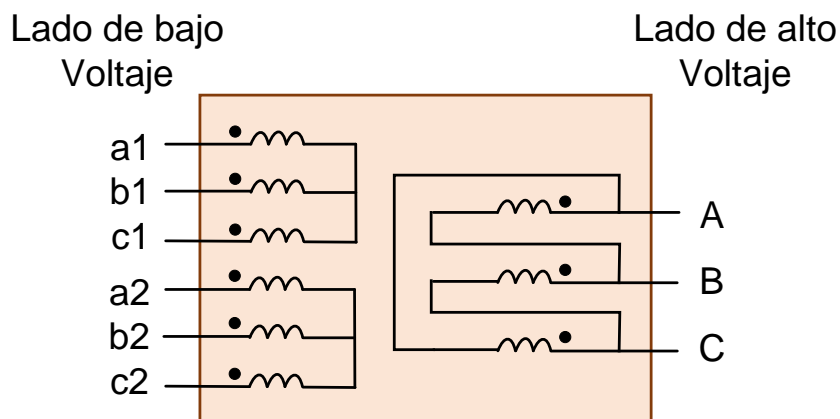
- $V_{abc}$ : Voltaje trifásico sensado.
- $I_{abc}$ : Corriente trifásica sensada.
- $V_{dc\_med}$ : Voltaje DC sensado.
- $V_{dc\_ref}$ : Voltaje DC generado por el algoritmo MPPT.
- $V_{d\_med}$ : Voltaje sensado de la coordenada “d”.
- $V_{q\_med}$ : Voltaje sensado de la coordenada “q”.

- Id\_med: Corriente sensado de la coordenada “d”.
- Iq\_med: Corriente sensado de la coordenada “q”.
- Id\_ref: Corriente de referencia de la coordenada “d”.
- Iq\_ref: Corriente de referencia de la coordenada “q”.
- Vd\_con: Voltaje de referencia “d” requerido por el inversor.
- Vq\_con: Voltaje de referencia “q” requerido por el inversor.
- Ua, Ub, Uc: Señales de conmutación de los semiconductores.

En la técnica de control aplicada en el inversor la corriente de referencia en la coordenada “q” se establece un valor de cero, debido a que no se realiza el control de la potencia reactiva generada por el sistema fotovoltaico, ya que únicamente la central fotovoltaica Salinas de Ibarra únicamente inyecta a la red eléctrica pública potencia activa [22] [23].

### Transformador

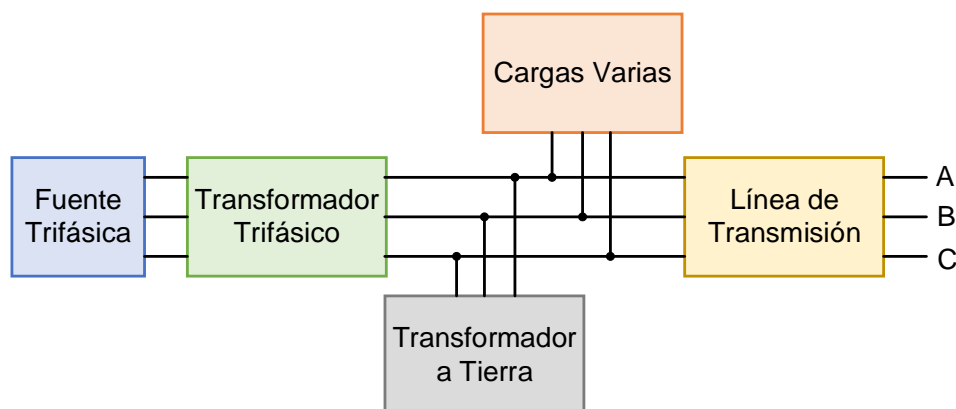
Para la etapa de transformación se trabajó con un transformador trifásico de 3 devanados empleando la configuración Dy11y11 para la conexión de las bobinas del transformador como se muestra en la Figura 1.22., el cual se encarga de manejar los niveles de voltaje y corriente que serán suministrados a la red eléctrica.



**Figura 1.22.** Tipo de conexión del transformador trifásico [24].

### Red eléctrica

La red eléctrica pública está conformada por una fuente trifásica encargada de mantener el voltaje constante, un transformador trifásico que maneja los niveles de voltaje y corriente, un transformador de puesta a tierra que brinda al sistema un punto de neutro artificial, cargas varias utilizadas para compensar al sistema y líneas de transmisión encargadas de interconectar a la central fotovoltaica Salinas de Ibarra con red eléctrica como se muestra en la Figura 1.23.



**Figura 1.23.** Representación de la red eléctrica [25].

### Convertidores DC/DC

Los convertidores DC/DC, son circuitos que convierten un voltaje continuo en otro también continuo pero regulado. El funcionamiento de estos convertidores se basa en el almacenamiento temporal de energía y en la transmisión de esta en un periodo de tiempo.

En los convertidores buck-boost, cûk y sepic la relación presente entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida dependerá del ciclo de trabajo ( $\delta$ ) con el que esté operando el convertidor [26].

$$\frac{V_0}{E} = \frac{\delta}{1 - \delta}$$

**Ecuación 1.5.** Relación del voltaje de entrada y salida de los convertidores buck-boost, cûk y sepic [26].

Siendo

- $V_0$  : Voltaje de salida del convertidor
- $E$  : Voltaje de entrada del convertidor.

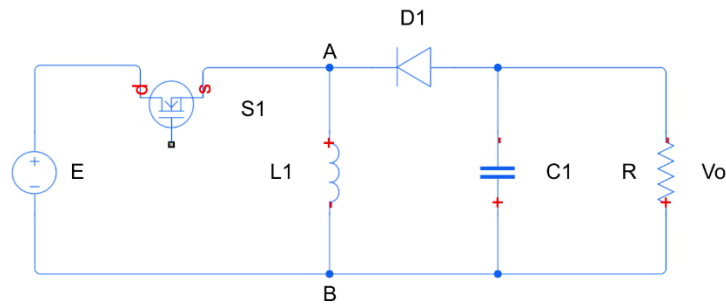
Estos convertidores son capaces de trabajar tanto en modo continuo y discontinuo, siendo modo continuo cuando la corriente en los inductores no se reduce hasta el valor de cero, mientras en modo discontinuo la corriente en un instante de tiempo llega a ser cero hasta que inicie nuevamente un periodo [26].

### Convertidor buck-boost

El convertidor buck-boost como bien lo expresa su nombre, permite elevar y disminuir el voltaje de salida, adicionalmente el convertidor posee una polaridad inversa a la salida de voltaje en comparación a la entrada.



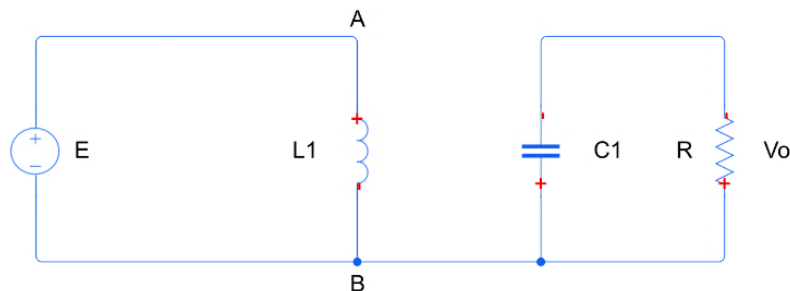
El convertidor buck-boost está compuesto de un inductor ( $L1$ ), un capacitor ( $C1$ ), un semiconductor de potencia ( $S1$ ) y un diodo ( $D1$ ). En la Figura 1.24. se muestra el circuito equivalente del convertidor buck-boost dado como resultado de la conexión en cascada de un convertidor reductor (buck) y un convertidor elevador (boost) [26] [27].



**Figura 1.24.** Topología del conversor buck-boost [26] [27].

### Conmutador S1 encendido

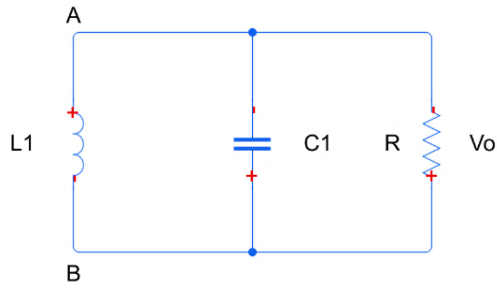
En la Figura 1.25. se presenta el circuito equivalente una vez que el conmutador S1 se enciende (ON), el inductor  $L1$  al estar conectado directamente con la fuente de alimentación  $E$  empezará con el proceso de almacenamiento de energía para ser suministrado en el siguiente ciclo de conmutación. Además, el diodo  $D1$  se polarizará inversamente impidiendo la circulación de corriente, mientras que el  $C1$  será el encargado de suministrar corriente a la carga [26] [27].



**Figura 1.25.** Circuito equivalente con switch ON [26] [27].

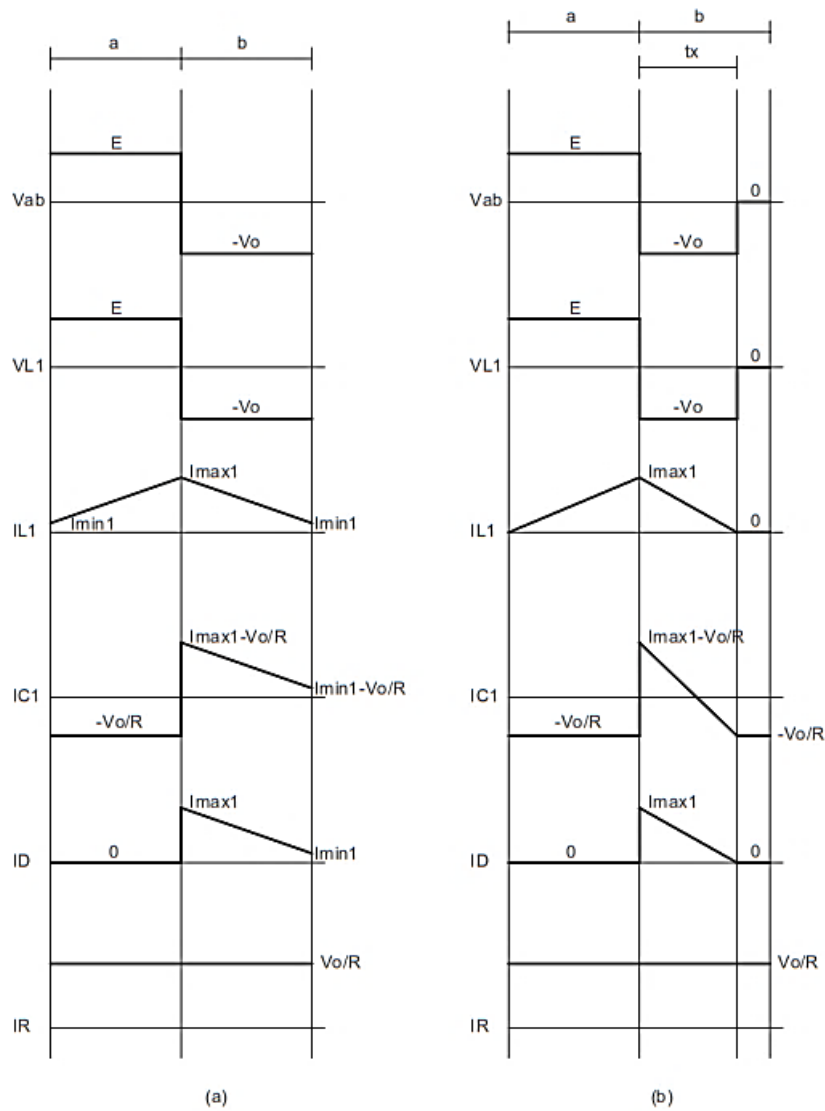
### Conmutador S1 apagado

La Figura 1.26. muestra el circuito equivalente cuando el conmutador S1 pasa del estado encendido (ON) a apagado (OFF), el diodo se polarizará directamente permitiendo el flujo de corriente y el inductor  $L1$  entregará la energía almacenada en el ciclo anterior [26] [27].



**Figura 1.26.** Circuito equivalente con switch OFF [26] [27].

En la Figura 1.27. se muestra las formas de onda de cada uno de los elementos que forman parte del convertidor buck-boost, evidenciando la disparidad que existe entre el modo continuo y discontinuo.



**Figura 1.27.** Formas de onda de los elementos del convertidor buck-boost (a) Conducción continua (b) Conducción discontinua [26] [27].

El modelo matemático del convertidor buck-boost en variables de estado se representa en la Ecuación 1.8. y 1.9. obtenido a partir del análisis del convertidor en un ciclo de trabajo encendiendo y apagando el semiconductor de potencia.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

**Ecuación 1.6.** Representación en variables de estado.

$$y = Cx$$

**Ecuación 1.7.** Representación en variables de estado.

En este caso, se toma como variables de estado la corriente circulante en el inductor L1 y el voltaje en los terminales del capacitor C1 de la Figura 1.24.

Siendo:

$$x = (i_{L1} \quad v_{C1})^T \quad \text{Variables de estado}$$

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{(1-\delta)}{L_1} \\ \frac{(1-\delta)}{C_1} & \frac{1}{RC_1} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \delta \\ 0 \end{pmatrix} u$$

**Ecuación 1.8.** Representación en variables de estado del conversor buck-boost [28] [29].

$$y = (0 \quad 1) x$$

**Ecuación 1.9.** Representación en variables de estado del conversor buck-boost [28] [29].

Mientras que la corriente en el inductor L1 y el voltaje en el capacitor C1 del circuito del convertidor buck-boost de la Figura 1.24. en estado estacionario vienen definidas por las siguientes ecuaciones matemáticas.

$$i_{L1} = \frac{V_0}{1-\delta} \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.10.** Corriente en el inductor L1 [28] [29].

$$v_{C1} = -\frac{E \delta}{1-\delta}$$

**Ecuación 1.11.** Voltaje en el capacitor C1 [28] [29].

El inductor L1 se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L1 = \frac{E \delta}{\Delta i_{L1} f_c}$$

**Ecuación 1.12.** Cálculo del inductor L1 [28] [29].

De igual forma, para calcular el capacitor C1 se hace uso de la siguiente expresión.

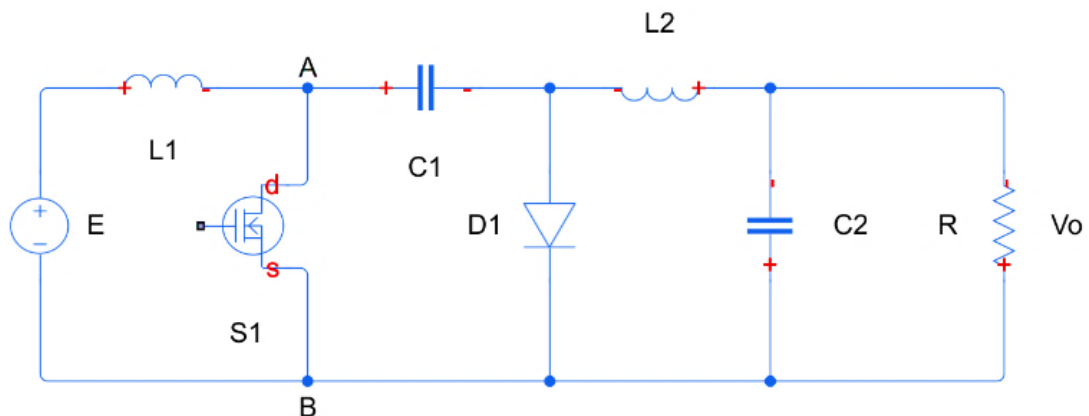
$$C1 = \left( \frac{\delta V_o}{\Delta v_{C1} f_c} \right) \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.13.** Cálculo del capacitor C1 [28] [29].

### Convertidor cûk

El convertidor cûk brinda la facilidad que la magnitud del voltaje de salida pueda ser tanto inferior como superior con respecto al voltaje de entrada, la polaridad únicamente será inversa con respecto a la entrada. En este convertidor la principal fuente de almacenamiento de energía es un capacitor [26].

El convertidor está formado por dos inductores (L1, L2), dos capacitores (C1, C2), un diodo (D1) y un semiconductor de potencia (S1) funcionando como interruptor. En la Figura 1.28 se presenta el diagrama circuital del convertidor [26] [27].

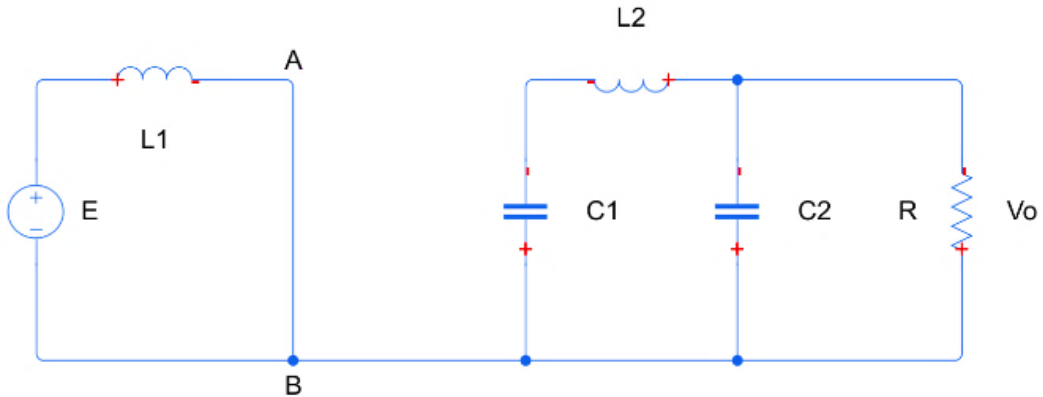


**Figura 1.28.** Topología del convertidor cûk [26] [27].

### Conmutador S1 encendido

En la Figura 1.29. se presenta el circuito equivalente del convertidor cûk una vez que el conmutador S1 se enciende (ON), el inductor L1 se encuentra conectado directamente a la

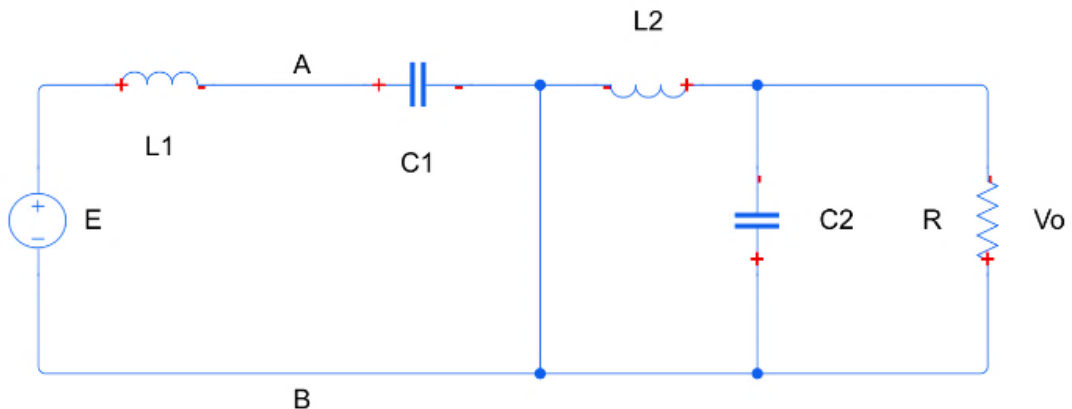
fuente de alimentación E, el diodo D1 se polarizará inversamente impidiendo el paso de corriente al resto del circuito. Mientras que el C1 es el encargado de suministrar energía a la carga [26] [27].



**Figura 1.29.** Circuito equivalente con switch ON [26] [27].

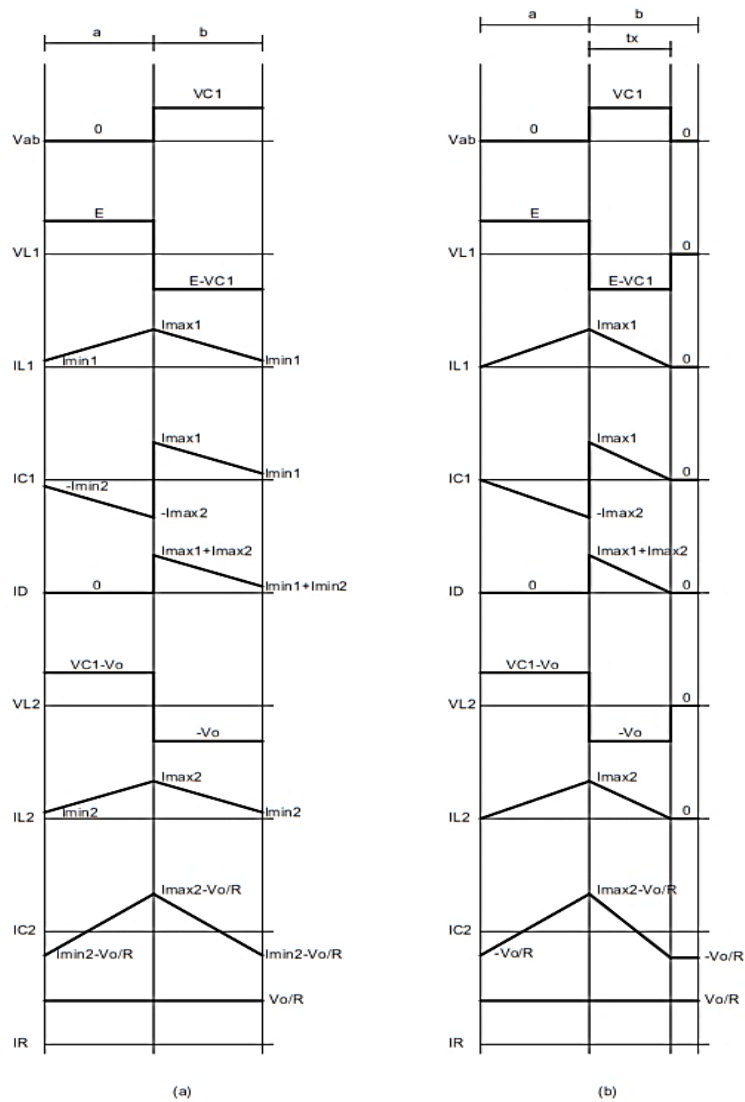
### Conmutador S1 apagado

La Figura 1.30. muestra el circuito equivalente una vez que el conmutador S1 se apaga (OFF), el capacitor C1 recuperará la energía entregada en el anterior ciclo, el diodo D1 se polarizará directamente y el inductor L2 suministrará energía a la carga [26] [27].



**Figura 1.30.** Circuito equivalente con switch OFF [26] [27].

En la Figura 1.31. se detalla el comportamiento de cada uno de los elementos que conforman el convertidor cûk en un periodo de conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 1.31.** Formas de onda de los elementos del convertidor  $c\hat{u}k$  (a) Conducción continua (b) Conducción discontinua [26] [27].

El modelo matemático en variables de estado del convertidor  $c\hat{u}k$  se representa en la Ecuación 1.16. y 1.17. desarrollado a partir del análisis del convertidor en los ciclos de encendido y apagado del semiconductor de potencia.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

**Ecuación 1.14.** Representación en variables de estado.

$$y = Cx$$

**Ecuación 1.15.** Representación en variables de estado.

Para el convertidor cûk se toma como variables de estado la corriente circulante en los inductores L1, L2 y el voltaje en los terminales de los capacitores C1, C2 de la Figura 1.28.

Siendo:

$$x = (i_{L1} \quad i_{L2} \quad v_{C1} \quad v_{C2})^T \quad \text{Variables de estado}$$

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1-\delta}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\delta}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1-\delta}{C_1} & \frac{\delta}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u$$

**Ecuación 1.16.** Representación en variables de estado del convertidor cûk [11].

$$y = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1) x$$

**Ecuación 1.17.** Representación en variables de estado del convertidor cûk [11].

En las siguientes expresiones matemáticas en estado estacionario se representa las corrientes de los inductores L1, L2 y los voltajes de los capacitores C1, C2.

$$i_{L1} = \frac{V_O \delta}{1-\delta} \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.18.** Corriente en el inductor L1 [11].

$$i_{L2} = V_O \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.19.** Corriente en el inductor L2 [11].

$$v_{C1} = \frac{E}{1-\delta}$$

**Ecuación 1.20.** Voltaje en el capacitor C1 [11].

$$v_{C2} = V_O$$

**Ecuación 1.21.** Voltaje en el capacitor C2 [11].

El inductor L1 se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L1 = \frac{E \delta}{\Delta i_{L1} f_c}$$

**Ecuación 1.22.** Cálculo del inductor L1 [11] [26].

Mientras que el inductor L2 se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L2 = \frac{E \delta}{\Delta i_{L2} f_c}$$

**Ecuación 1.23.** Cálculo del inductor L2 [11] [26].

El capacitor C1 se calcula mediante la siguiente expresión matemática descrita.

$$C1 = \left( \frac{\delta V_O}{\Delta v_{C1} f_c} \right) \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.24.** Cálculo del capacitor C1 [11] [26].

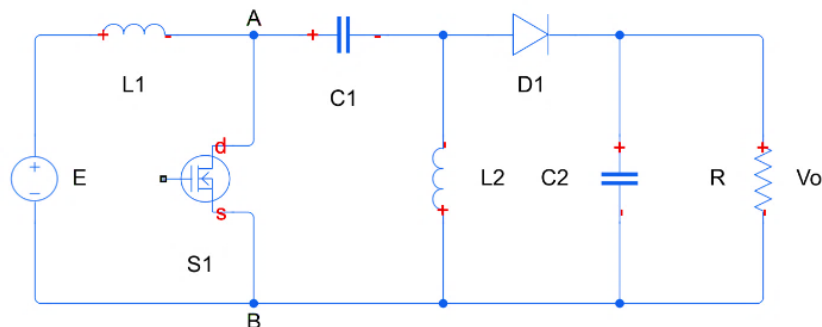
Para finalizar la Ecuación 1.25. se utiliza para calcular el capacitor C2.

$$C2 = \frac{\delta^2 E}{8 f_c^2 L_2 \Delta v_{C2}}$$

**Ecuación 1.25.** Cálculo del capacitor C2 [11] [26].

### Convertor sepic

A diferencia de los convertidores ya mencionados el convertidor sepic conserva la polaridad de la entrada en la salida, de igual manera se puede elevar o reducir el voltaje de salida. Está compuesto por dos inductores (L1, L2), dos capacitores (C1, C2), un diodo (D1) y un semiconductor de potencia (S1). En la Figura 1.32. se presenta una configuración básica del convertidor [30].



**Figura 1.32.** Topología del convertidor Sepic [30].



### Conmutador S1 encendido

En la Figura 1.33. se presenta el circuito equivalente del convertidor cuando el conmutador S1 se encuentre en estado encendido (ON), el inductor L1 se estará conectado a la fuente de alimentación E, el diodo D1 se polariza inversamente y el capacitor C2 será el encargado de suministrar energía a la carga [30].

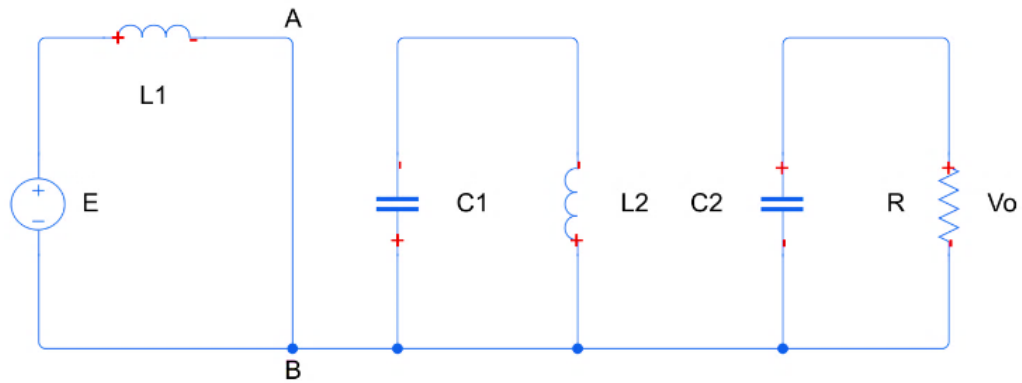


Figura 1.33. Circuito equivalente con switch ON [30].

### Conmutador S1 apagado

La Figura 1.34. muestra el circuito equivalente en el ciclo de apagado (OFF), el capacitor C2 iniciará el proceso de almacenamiento de energía, el diodo D1 se polarizará directamente, mientras que el inductor L2 transferirá energía a la carga [30].

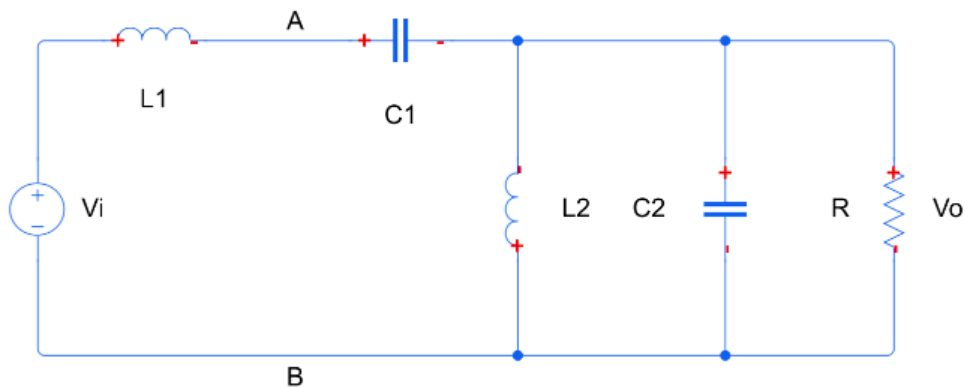
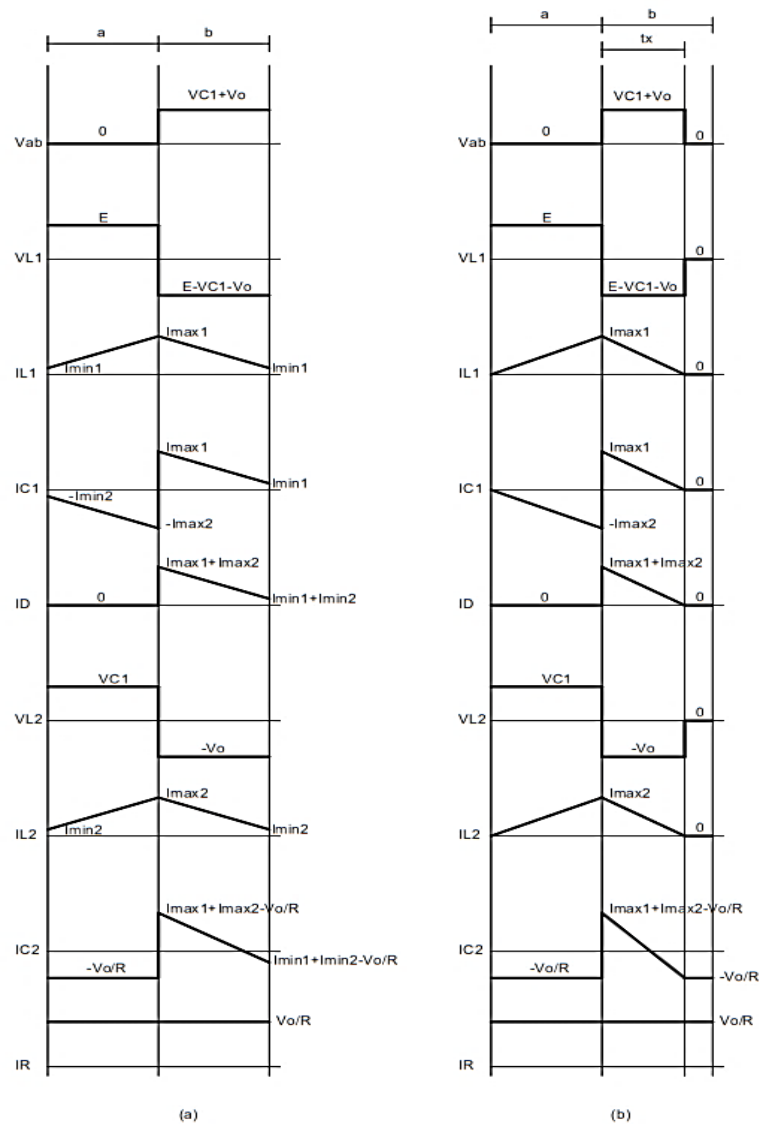


Figura 1.34. Circuito equivalente con switch OFF [30].

En la siguiente Figura 1.35. se presentan las formas de onda de voltaje y corriente de cada uno de los elementos que forman parte del convertidor sepic [30].



**Figura 1.35.** Formas de onda de los elementos del convertidor sepic (a) Conducción continua (b) Conducción discontinua [30].

En la Ecuación 1.28. y 1.29. se presenta el modelo matemático en variables de estado determinado a partir del análisis del convertidor en los ciclos de encendido y apagado del semiconductor de potencia.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

**Ecuación 1.26.** Representación en variables de estado.

$$y = Cx$$

**Ecuación 1.27.** Representación en variables de estado.

Mientras para este convertidor se toma como variables de estado las corrientes circulantes en los inductores L1, L2 y el voltaje en los terminales de los capacitores C1, C2 de la Figura 1.32.

$$\mathbf{x} = (i_{L1} \quad i_{L2} \quad v_{C1} \quad v_{C2})^T \quad \text{Variables de estado}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1-\delta}{L_1} & -\frac{1-\delta}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{\delta}{L_2} & -\frac{1-\delta}{L_2} \\ \frac{1-\delta}{C_1} & -\frac{\delta}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-\delta}{C_2} & \frac{1-\delta}{C_2} & 0 & \frac{1}{RC_2} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 1 \\ L_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{u}$$

**Ecuación 1.28.** Representación en variables de estado del convertidor sepic [31].

$$\mathbf{y} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1) \mathbf{x}$$

**Ecuación 1.29.** Representación en variables de estado del convertidor sepic [31].

Mientras que las expresiones matemáticas de las corrientes de los inductores L1, L2 y los voltajes de los capacitores C1, C2 en estado estacionario son las siguientes.

$$i_{L1} = \frac{2 V_O \delta^2}{1-\delta} \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.30.** Corriente en el inductor L1 [31].

$$i_{L2} = 2 V_O \delta \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.31.** Corriente en el inductor L2 [31].

$$v_{C1} = \frac{E}{1-\delta} - V_O$$

**Ecuación 1.32.** Voltaje en el inductor L1 [31].

$$v_{C2} = V_O$$

**Ecuación 1.33.** Voltaje en el inductor L2 [31].

El inductor L1 se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L1 = \frac{E \delta}{\Delta i_{L1} f_c}$$

**Ecuación 1.34.** Cálculo del inductor L1 [31].

Mientras que el inductor L2 se calcula mediante la siguiente expresión.

$$L2 = \frac{E \delta}{\Delta i_{L2} f_c}$$

**Ecuación 1.35.** Cálculo del inductor L2 [31].

El capacitor C1 se calcula mediante la siguiente expresión matemática descrita.

$$C1 = \left( \frac{V_0 \delta}{\Delta V_{C1} f_c} \right) \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.36.** Cálculo del capacitor C1 [31].

Por último, el capacitor C2 se calcula de la siguiente manera.

$$C2 = \left( \frac{V_0 \delta}{\Delta V_{C2} f_c} \right) \left( \frac{P_{nom}}{V_{nom}^2} \right)$$

**Ecuación 1.37.** Cálculo del capacitor C2 [31].

### **Técnicas de seguimiento del punto máximo de potencia**

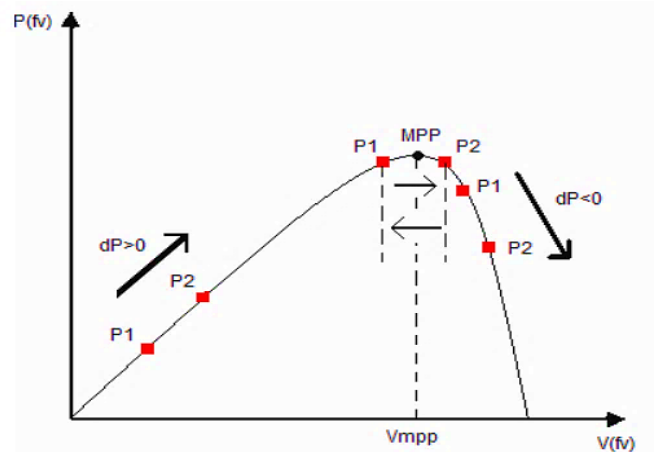
Las técnicas o algoritmos de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) están desarrollados con la finalidad de encontrar puntos donde sea posible extraer la mayor cantidad de potencia del sistema. Existen varios algoritmos cada uno con sus respectivas características de funcionamiento u operación, se diferencian básicamente por la velocidad de convergencia del algoritmo, la complejidad de desarrollar e implementar en un sistema y de las variables medidas del sistema tanto internas (Voltaje y Corriente) como externas (Irradiancia y Temperatura) [32].

A continuación, se realiza una descripción general de algunos métodos MPPT como ejemplo el algoritmo perturbador y observador, el algoritmo de conductancia incremental, el algoritmo basado en lógica difusa, el algoritmo Hill Climb, el algoritmo basado en redes neuronales y el algoritmo de optimización por enjambre de partículas.

#### **Algoritmo perturbador y observador “P&O”**

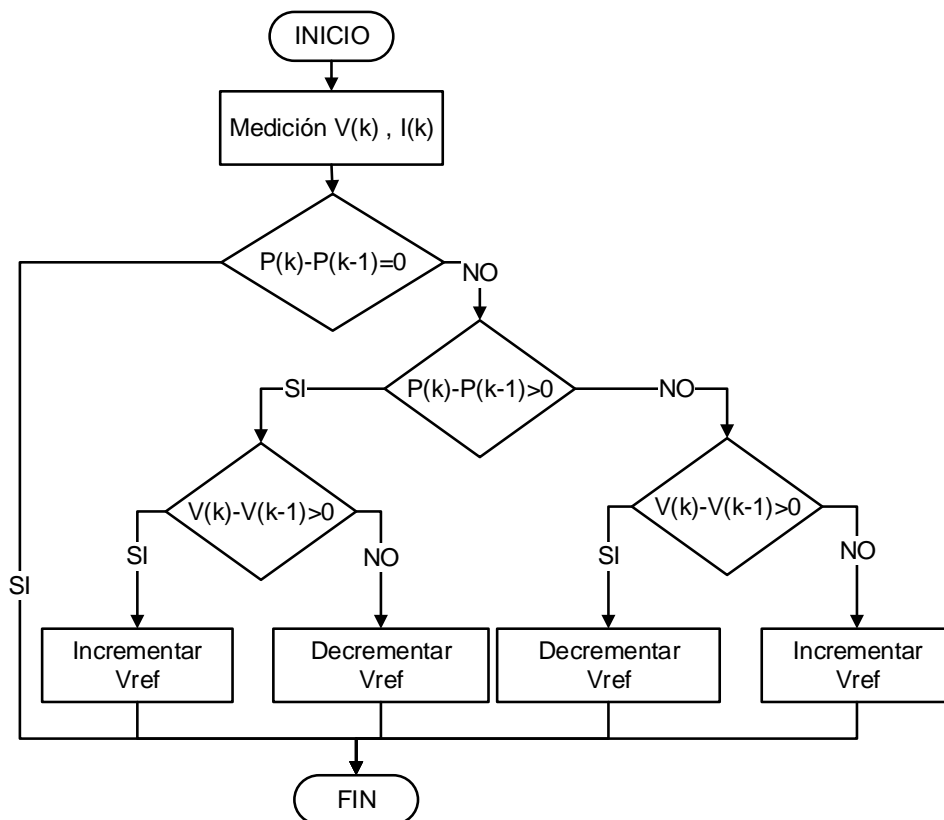
Este algoritmo, a través de un convertidor DC/DC aumenta o disminuye el voltaje que suministra el panel fotovoltaico, a la par monitoriza la potencia generada. Si la muestra actual de potencia es mayor a la muestra anterior se realiza una variación en el voltaje

(aumento); caso contrario si la muestra actual es menor que la muestra anterior, la variación del voltaje es de forma opuesta (disminución). Una vez que el sistema alcance el MPP, el algoritmo hará que el punto de operación oscile alrededor de este como se muestra en la Figura 1.36. [11] [14].



**Figura 1.36.** Funcionamiento del algoritmo perturbador y observador.

En la Figura 1.37. se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia.



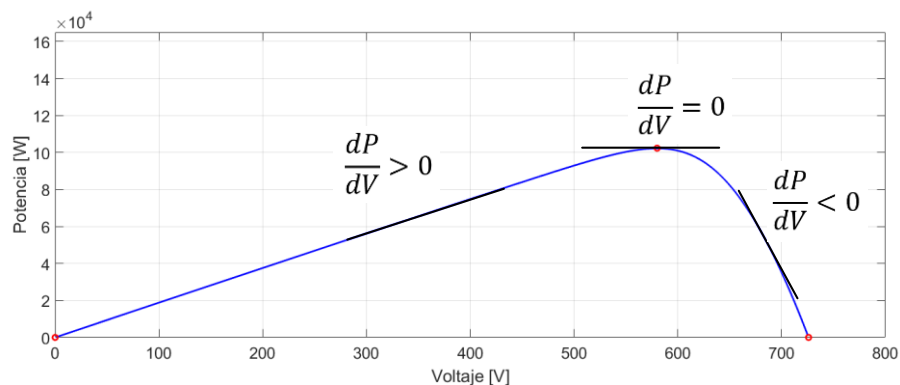
**Figura 1.37.** Diagrama de flujo del algoritmo perturbador y observador [14].

Siendo:

- $V(k)$ : Medición actual de voltaje.
- $V(k-1)$ : Medición anterior de voltaje.
- $I(k)$ : Medición actual de corriente.
- $P(k)$ : Medición actual de potencia.
- $P(k-1)$ : Medición anterior de potencia.
- $V_{ref}$ : Voltaje de referencia deseado.

### Algoritmo de conductancia incremental “CI”

El algoritmo MPPT de conductancia incremental aumenta o disminuye el voltaje generado por los paneles solares, en la Figura 1.38. se muestra el funcionamiento del algoritmo en la que compara y determina mediante el valor de la pendiente si se aumenta o reduce el voltaje.

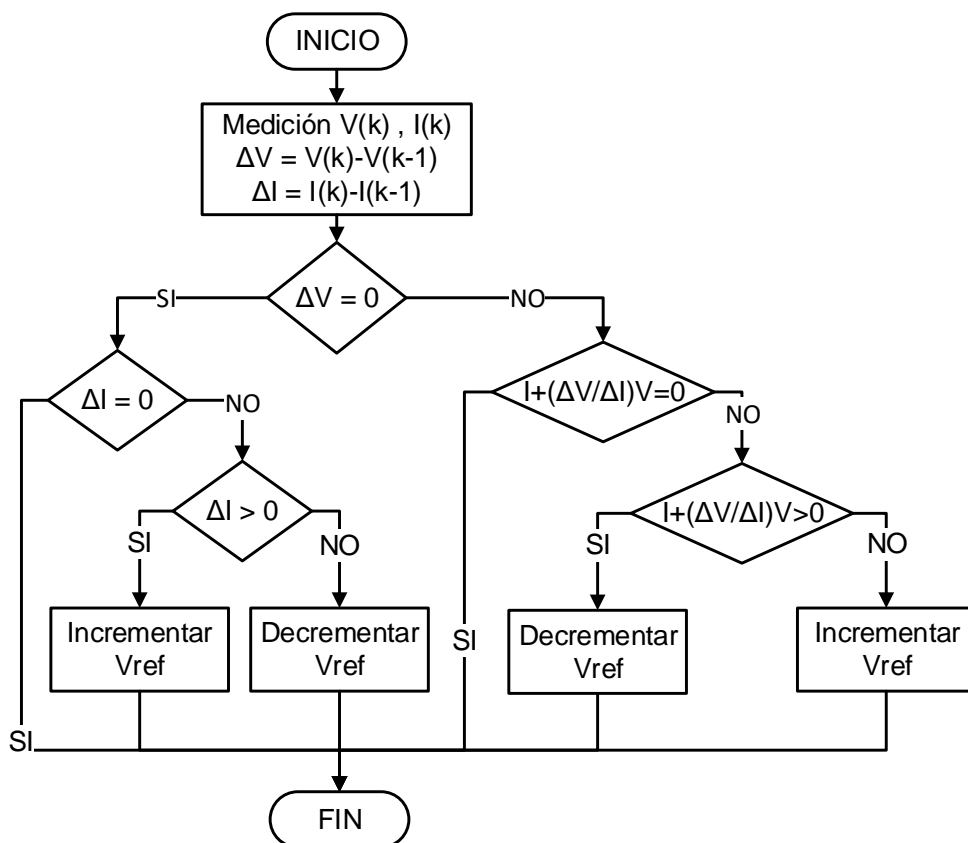


**Figura 1.38.** Funcionamiento del algoritmo de conductancia incremental.

En el momento en que el sistema llegue al MPP, el algoritmo trabajará de forma continua en este punto a la espera de que haya una modificación en el valor de la corriente, este cambio dependerá de la variación de la radiación solar que influye en el panel solar.

Si la radiación solar se incrementa, el MPP se moverá hacia la derecha con respecto al voltaje de operación del panel fotovoltaico. La manera de contrarrestar este acontecimiento es incrementar el voltaje de referencia. Si la radiación solar decreciera, el algoritmo actuará de forma inversa [11] [14].

En la Figura 1.39. se representa el diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo de conductancia incremental para la extracción de la mayor cantidad de potencia.



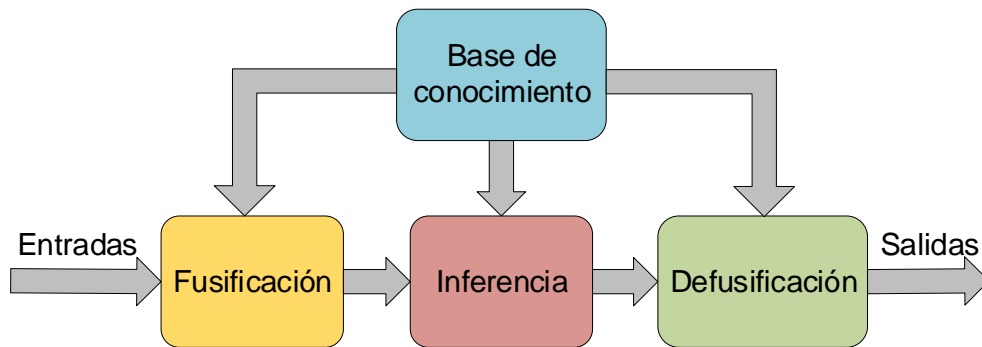
**Figura 1.39.** Diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental [11] [14].

Siendo:

- $V(k)$ : Medición actual de voltaje.
- $V(k-1)$ : Medición anterior de voltaje.
- $I(k)$ : Medición actual de corriente.
- $I(k)$ : Medición anterior de corriente
- $V_{ref}$ : Voltaje de referencia deseado.

### **Algoritmo basado en lógica difusa “LD”**

El algoritmo basado en lógica difusa está compuesto de varias etapas que convierten entradas en salidas acordes a las necesidades del sistema usando razonamiento lógico como se muestra en la Figura 1.40.



**Figura 1.40.** Etapas de la lógica difusa [33].

**Fusificación.** – en esta fase se transforman las entradas físicas de un sistema en variables difusas, a cada variable se le asigna un grado de pertenencia en cada uno de los conjuntos difusos mediante funciones de membresía [34] [35].

**Inferencia.** – se definen los valores difusos a partir de las reglas lingüísticas aplicadas a las variables difusas de entrada [34] [35].

**Base de conocimiento.** – comprende una base de datos y un conjunto de reglas del comportamiento del sistema, la base datos contienen definiciones lingüísticas de las entradas y salidas del sistema, las reglas combinan uno o varios conjuntos difusos de entrada, conocidos como antecedentes o premisas, a las que se le asocia a un conjunto difuso de salida, llamado consecuente o consecuencia [34] [35].

**Defusificación.** – en esta etapa se convierte a la salida difusa en una salida en valores numéricos mediante métodos matemáticos de defusificación [34] [35].

Para el desarrollo de este algoritmo no es necesario conocer el modelo matemático del sistema, y es posible trabajar con entradas imprecisas, por lo que esta técnica cuenta con dos entradas y una salida.

La primera entrada esta descrita en base del error de la derivada de la potencia generada con respecto al voltaje del instante actual con relación al instante anterior. Por lo tanto, es posible determinar la distancia en que se encuentra el punto de operación actual con respecto al MPP [11].

$$e(k) = \frac{dP}{dV}(k) - \frac{dP}{dV}(k - 1)$$

**Ecuación 1.38.** Primera entrada del algoritmo con lógica difusa.



La segunda entrada está definida como la variación del error, con esto se podrá determinar si el punto actual de operación se encuentra a la derecha o a la izquierda del MPP.

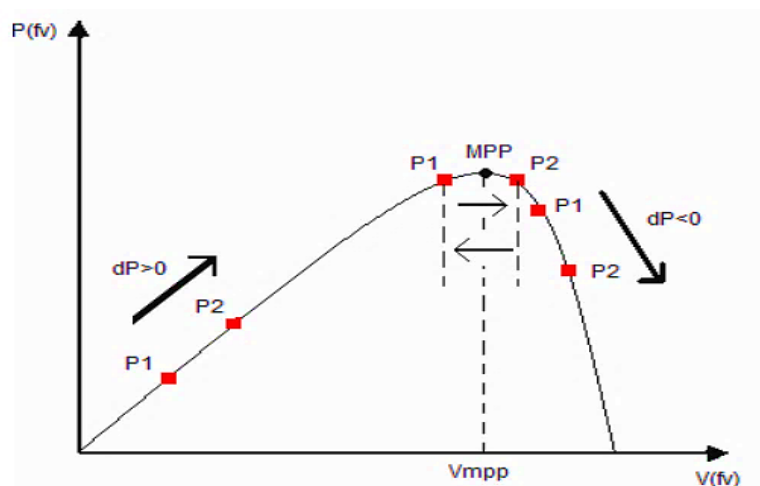
$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$$

**Ecuación 1.39.** Segunda entrada del algoritmo con lógica difusa.

La salida del algoritmo viene dada por la señal de control que se encargará de conmutar el elemento semiconductor del convertidor de potencia. Una de las principales ventajas de poner en práctica el algoritmo con lógica difusa es que presenta su respuesta dinámica más rápida y menos fluctuaciones en estado estable. Mientras que la desventaja es que es necesario contar con conocimientos especializados en lógica difusa para el desarrollo del algoritmo.

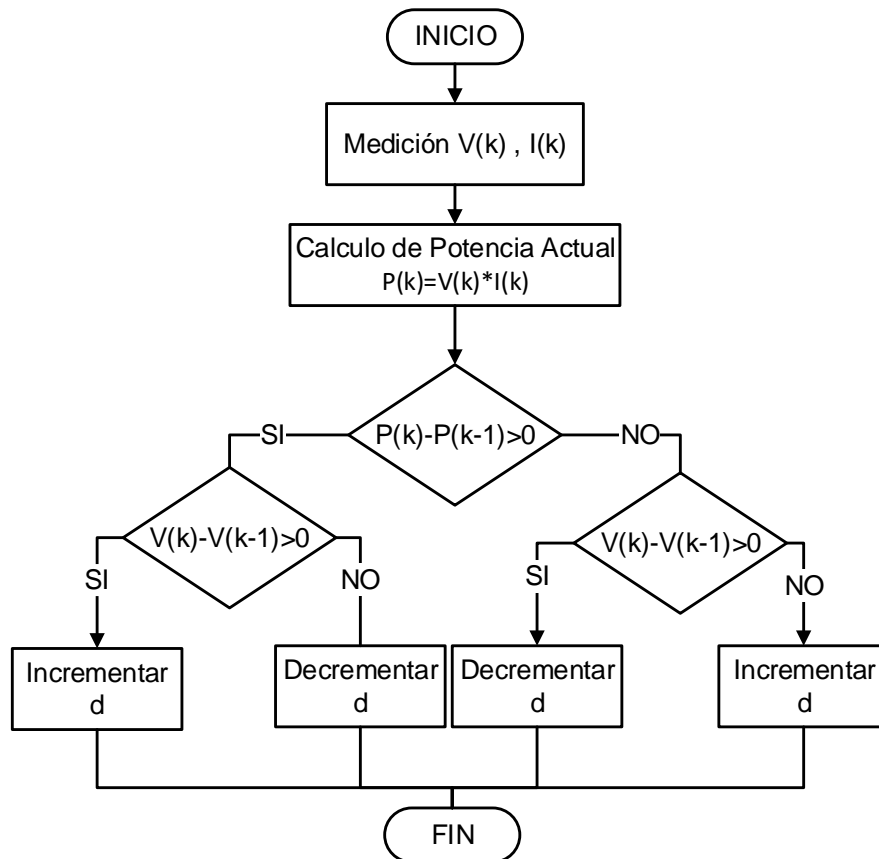
### Algoritmo Hill Climb “HC”

Este algoritmo es una derivación del algoritmo P&O que introduce una perturbación en el ciclo de trabajo del semiconductor de potencia del convertidor. Si esta perturbación es pequeña el algoritmo tiene una respuesta lenta, mientras que si la perturbación es grande aparecen grandes oscilaciones alrededor del MPP. En la Figura 1.41. se puede observar el funcionamiento del algoritmo en base a la curva característica de P-V de los paneles solares [11]. La principal desventaja que presenta este algoritmo es que a la más mínima presencia de variaciones en la temperatura y en la radiación solar presenta fallos en su funcionamiento. Por otra parte, presenta una baja complejidad en su implementación [36] [37].



**Figura 1.41.** Funcionamiento del algoritmo Hill Climb [14].

El funcionamiento del algoritmo Hill Climb está representado en la Figura 1.42.



**Figura 1.42.** Diagrama de flujo del algoritmo Hill Climb [11].

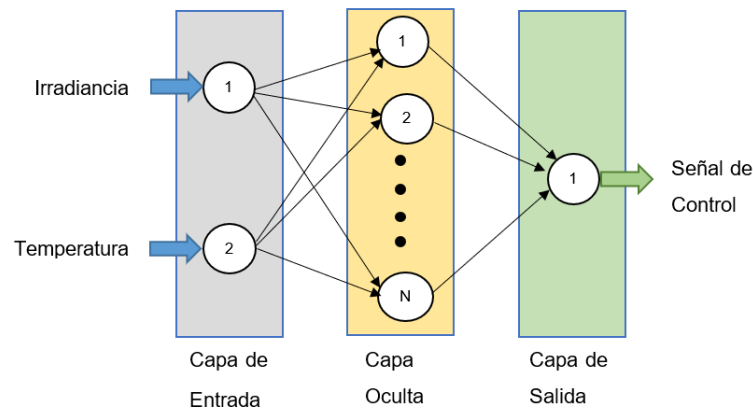
Siendo:

- $V(k)$ : Medición actual de voltaje.
- $V(k-1)$ : Medición anterior de voltaje.
- $I(k)$ : Medición actual de corriente.
- $P(k)$ : Medición actual de potencia.
- $P(k-1)$ : Medición anterior de potencia.
- $d$ : Ciclo de trabajo del conmutador.

### **Algoritmo basado en redes neuronales “RN”**

El algoritmo basado en redes neuronales homologa el comportamiento de los seres humanos. Su arquitectura cuenta de tres capas como se muestra en la Figura 1.38, la primera capa representa a las entradas del sistema, en este caso se considera como entradas a la irradiancia solar y la temperatura ambiental que son parámetros que afectan la producción de potencia. La segunda capa conocida como capa oculta ya que no tiene acceso de agentes externos, contiene en su interior neuronas ocultas que

manipulan/transforman los datos recibidos para generar una salida. La tercera es la capa de salida que en este caso muestra la señal de control que permitirá obtener el MPP [33].



**Figura 1.43.** Arquitectura de la red neuronal [33].

Su principal ventaja respecto a los algoritmos más comunes utilizados en aplicaciones fotovoltaicas es que presenta una respuesta dinámica más rápida y con menos oscilaciones en el MPP. Al hacer uso de variables medioambientales incrementa el costo de implementación del sistema para el monitoreo de las mismas.

### **Algoritmo de optimización por enjambre de partículas “PSO”**

Este algoritmo basa su funcionamiento en el uso de agentes cooperativos que intercambian la información obtenida durante el proceso, estos agentes son conocidos como partículas, que rigen su comportamiento por dos reglas:

1. Seguir al agente con mejor desempeño denominado  $G_{best}$ .
2. Moverse hacia las mejores condiciones encontradas por la partícula denominado  $P_{best}$  [3].

La velocidad del desplazamiento de la partícula en función de las reglas se describe de la siguiente manera:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - x_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - x_i^k)$$

**Ecuación 1.40.** Velocidad de desplazamiento de la partícula [3].

Siendo:

- $v_i$ : Velocidad de la partícula “i”.
- $x_i$ : Posición de la partícula “i”.
- $P_{best}$ : Mejor posición de la partícula “i”.

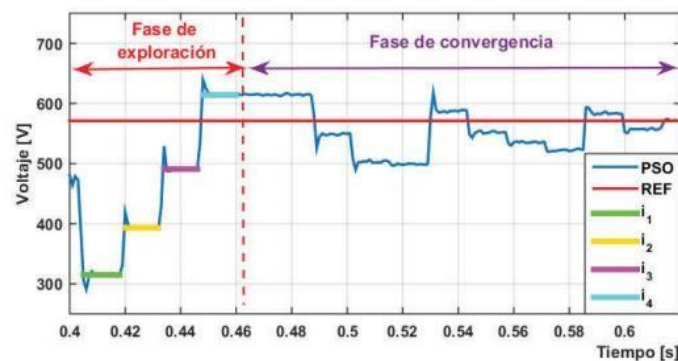
- $G_{best}$ : Mejor posición del enjambre.
- $k$ : Número de iteración.
- $c_1, c_2$  Primero y segundo coeficientes de aceleración.
- $r_1, r_2$  Primero y segundo coeficientes aleatorios entre 0 y 1.

Mientras que la posición de la partícula en función de la velocidad se calcula de la siguiente manera.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

**Ecuación 1.41.** Posición de la partícula [3].

En la Figura 1.44. se muestra el funcionamiento del algoritmo PSO que empieza con una inicialización de las partículas de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme que cubra todo el espacio de búsqueda y su respectiva velocidad es escogida al azar. Para luego pasar a la evaluación de aptitud de la función objetivo de cada partícula. Posteriormente, se actualiza los mejores datos obtenidos tanto individuales como globales, esto mediante una comparación entre los valores actuales y anteriores. A continuación, se actualiza la velocidad y posición de la partícula aplicando las ecuaciones ya mencionadas anteriormente. Para finalizar se comprueba el criterio de convergencia, si cumple el proceso finaliza, caso contrario se aumenta la iteración en 1 y se regresa a la evaluación de aptitud [3].



**Figura 1.44.** Funcionamiento del algoritmo PSO [11].

En la Figura 1.45. se presenta el diagrama de flujo donde se detalla el funcionamiento del algoritmo de optimización por enjambre de partículas.

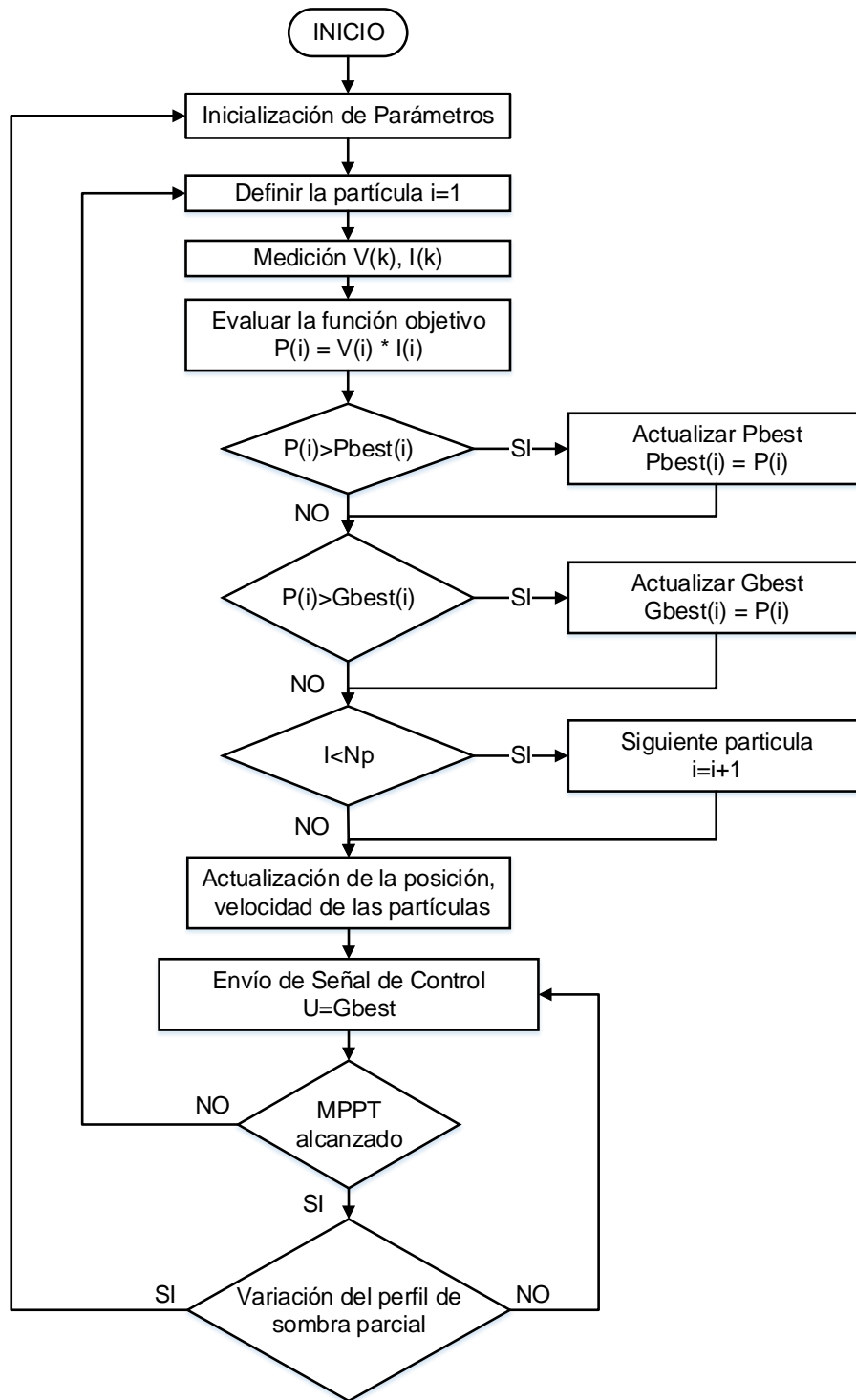


Figura 1.45. Diagrama de flujo del algoritmo PSO [11].

Siendo:

- $V(k)$ : Medición actual de voltaje.
- $I(k)$ : Medición actual de corriente.
- $i$ : Partícula.

- $P(k-1)$ : Medición anterior de potencia.
- $V_{ref}$ : Voltaje de referencia deseado.

### Selección del algoritmo MPPT

En la Tabla 1.6. se realiza una comparación de los parámetros más importantes a la hora de escoger el algoritmo MPPT que se acople de la mejor manera a las condiciones del sistema fotovoltaico, tanto en la parte de software como hardware de la misma.

**Tabla 1.6.** Comparación de los algoritmos MPPT [38].

Algoritmo MPPT	P&O	CI	LD	HC	RN	PSO
Dependencia del panel fotovoltaico	No	No	Si	No	Si	No
Parámetros medidos	V, I	V, I	Varia	V, I	Varia	V, I
Velocidad de convergencia	Variable	Variable	Rápida	Variable	Rápida	Rápida
Complejidad de implementación	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Alta
Detección de LMPP	No	No	Si	No	Si	Si

Siendo:

- V: Voltaje del Panel Solar.
- I: Corriente del Panel Solar.

Tomando como referencia la comparación previa realizada, las exigencias propias del sistema (presencia de LMPP) y las necesidades que se puedan presentar en una futura implementación de este trabajo (económicas y físicas), se emplea un algoritmo MPPT híbrido tomando la fase de exploración del algoritmo por enjambre de partículas y para la fase de convergencia se trabaja con el algoritmo P&O, con la finalidad de determinar el GMPP del sistema, descartando los demás LMPP que se presentan en la operación del sistema [11].

## Esquema de control

En la Figura 1.46. se presenta el esquema de control que se utilizara para realizar la conmutación del semiconductor de potencia del convertidor. Para lo que se utiliza un algoritmo MPPT encargado de generar el voltaje de referencia de los arreglos de los paneles solares, mientras que para el control de voltaje (lazo externo) se utilizará un controlador PI y para el control de corriente (lazo interno) se trabajará con un controlador SMC que será capaz de contrarrestar los cambios bruscos en el nivel de corriente, garantizando una mayor velocidad y mejor desempeño del sistema [11].

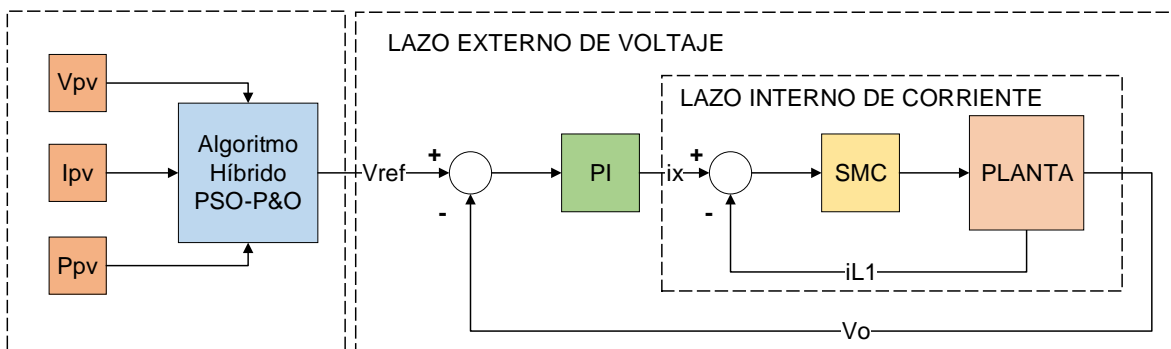


Figura 1.46. Esquema de control para los convertidores DC/DC [11].

## Controlador PI

El controlador PI está formado por una ganancia proporcional “kp” y una ganancia integral “ki”, la ganancia proporcional reduce el tiempo de crecimiento y elimina parte del error estacionario, mientras la ganancia integral elimina el error en estado estacionario, pero presenta una afectación en el estado transitoria del sistema como se muestra en la Figura 1.47. [39].

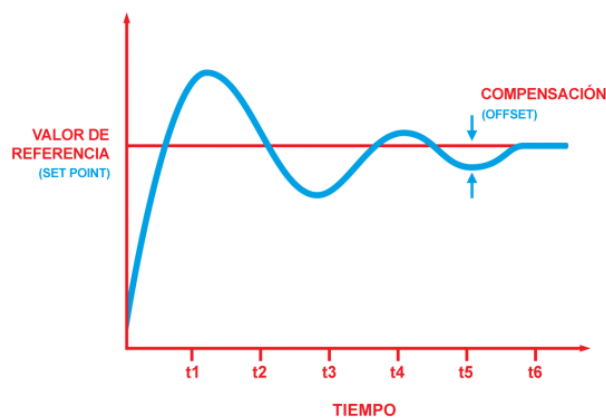


Figura 1.47. Comportamiento del controlador PI [40].

## Control en modo deslizante

El control de modo deslizante-SMC (por sus siglas en inglés) se caracteriza por poseer una gran estabilidad, excelente respuesta dinámica, alta robustez ante variaciones y perturbaciones, simplicidad en su implementación y particularmente atractivo para controlar sistemas lineales y no lineales [41].

El propósito de la aplicación del controlador SMC es garantizar que la variable a controlarse sea igual en cada instante a la referencia definida, matemáticamente pretende que el error y sus respectivas derivadas sean igual a cero. La ley de control del controlador SMC esta descrita por dos partes una parte continua y otra discontinua [41].

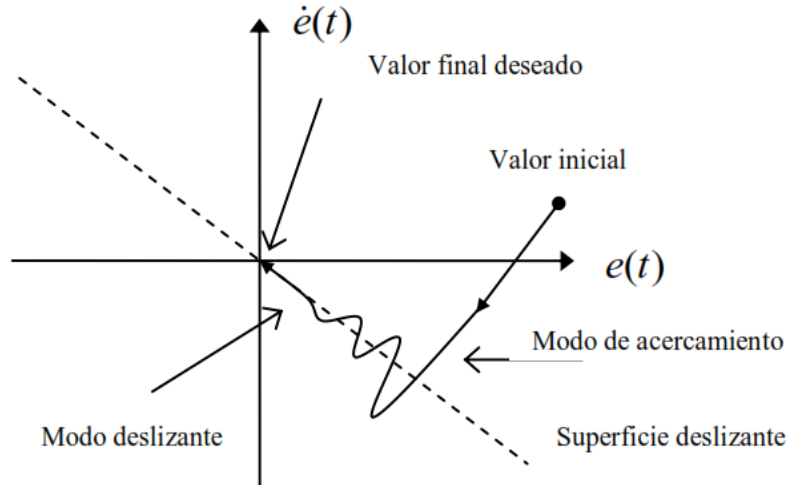
$$U(t) = U_C(t) + U_D(t)$$

**Ecuación 1.42.** Ley de control del controlador de modo deslizante.

Siendo:

$U_C(t)$ : Parte continua.

$U_D(t)$ : Parte discontinua.



**Figura 1.48.** Interpretación gráfica del controlador SMC [41].

La parte discontinua  $U_D(t)$  se encarga de que la variable controlada alcance a la superficie deslizante (fase de acercamiento), una vez que esta variable se encuentra en la superficie, la parte continua  $U_C(t)$  mantiene a la variable en la superficie (fase deslizante) [11] [41]. En la Figura 1.40 se representa gráficamente el funcionamiento del controlador SMC.



## Superficie deslizante

En el controlador SMC la superficie  $S(t)$  representa el comportamiento global deseado del sistema, tomando en cuenta parámetros de estabilidad y desempeño. A partir de esto, la superficie se escoge tratando de que el error de la variable controlada tienda a cero [11].

$$S(t) = V_{\text{referencia}} - V_{\text{medido}}$$

**Ecuación 1.43.** Superficie deslizante en función del error.

Donde:

- $V_{\text{referencia}}$ : Valor de referencia (Set Point).
- $V_{\text{medido}}$ : Valor medido o variable de proceso.

A pesar de ello, es posible que la superficie requiera de una parte proporcional, integral y derivativa, con la finalidad de mejorar la respuesta dinámica del sistema. Por lo que la superficie se definirá de la siguiente manera.

$$S(t) = \left( \frac{d}{dt} + \tau \right)^{n-1} * \int e(t) dt$$

**Ecuación 1.44.** Superficie deslizante según Slotine y Li [42].

Siendo:

- $\tau$ : Constante.
- $n - 1$ : Orden de la superficie.
- $e(t)$ : Error ( $V_{\text{referencia}} - V_{\text{medido}}$ ).

## Fase deslizante

Para el cálculo de la parte continua de la ley de control se asume que el punto de operación del sistema se encuentra en la superficie deslizante. Teniendo que la derivada de la superficie deslizante y la parte discontinua de la ley de control son cero ( $\dot{S}(t) = 0$  y  $U_D = 0$ ). Por lo que resulta que la ley de control está definida únicamente por la parte continua.

1. Derivar la superficie deslizante propuesta e igualar a cero.

$$\dot{S}(t) = \dot{V}_{\text{referencia}} - \dot{V}_{\text{medido}} = 0$$

**Ecuación 1.45.** Derivada de la superficie deslizante.

2. Reemplazar la ecuación que representa el comportamiento de la variable del proceso ( $V_{\text{medido}} = f(\delta)$ ).

$$S'(t) = V_{\text{referencia}} - f(\delta) = 0$$

**Ecuación 1.46.** Reemplazo del valor de la variable del proceso.

3. Aplicar la condición de la fase deslizante ( $\delta = U_C$ ).

$$S'(t) = V_{\text{referencia}} - f(U_C) = 0$$

**Ecuación 1.47.** Aplicación de la condición de la fase deslizante.

4. Despejar el valor de la parte continua de la ley de control ( $U_C$ ).

### Fase de acercamiento

Para la parte discontinua con la finalidad de suavizar la discontinuidad se emplea la función sigma o de saturación.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 1.48.** Función sigma o de saturación [41].

Siendo:

- $K_D$ : Parámetro responsable del modo de acercamiento (Velocidad).
- $\rho$ : Parámetro responsable para reducir oscilaciones de alta frecuencia.

### Criterio de estabilidad de Lyapunov

El criterio de estabilidad de Lyapunov busca extraer conclusiones acerca del comportamiento de un sistema sin determinar la solución de este.

Siendo el teorema el siguiente:

**Teorema:** *Considere el sistema:*

$$\dot{x} = f(x)$$

**Ecuación 1.49** Sistema Considerado

Donde  $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  es un mapeo continuo de un dominio  $D \subset \mathbb{R}^n$  a  $\mathbb{R}^n$  que contiene al origen. Sea  $x = 0$  un punto de equilibrio de Ecuación 1.17 y sea  $V : D \rightarrow \mathbb{R}$  una función continuamente diferenciable tal que

$$V(0) = 0 \text{ y } V(x) > 0 \text{ en } D - \{0\}$$

$$V(\dot{x}) \leq 0 \text{ en } D - \{0\}$$

Entonces  $x = 0$  es estable. Más aún, si

$$V(\dot{x}) < 0 \text{ en } D - \{0\}$$

Entonces  $x = 0$  es asintóticamente estable [43].

En síntesis, el criterio de Lyapunov describe tres condiciones, que de ser cumplidas se puede afirmar que el sistema es estable.

1.  $V(t) > 0$
2.  $V(0) = 0$
3.  $V(\dot{t}) < 0$

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo se hace uso de la investigación aplicada, ya que se introducen tres topologías diferentes de convertidores DC/DC entre la etapa de los paneles solares y la etapa de inversión, con la finalidad de determinar si existe un incremento en la cantidad de energía eléctrica generada por la central fotovoltaica Salinas de Ibarra. Para esto, se utiliza un algoritmo MPPT y técnicas de control que son empleadas para realizar la conmutación del semiconductor de potencia y que permiten a los paneles solares trabajar en el punto de máxima potencia, contrarrestando variaciones ambientales que pueden presentarse.

Con respecto a las referencias bibliográficas utilizadas, se hace uso de información obtenida de libros, trabajos de titulación, documentos científicos, revistas científicas y sitios web académicos. Que servirán como base para la elaboración del marco teórico del trabajo de titulación.

Adicionalmente, las fases metodológicas aplicadas en el trabajo desarrollado son las siguientes:

### A. Fase teórica

- Se realizará un estudio teórico del estado actual de operación de la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

- Se realizará un estudio teórico del funcionamiento de tres topologías de convertidores DC/DC, para acoplarlos al sistema de generación de la central fotovoltaica.
  - Se realizará un estudio teórico de los diferentes algoritmos de control MPPT, para poder aplicarlo a nivel de los convertidores DC/DC.
- B. Fase de diseño
- Se obtendrá un modelo equivalente de la central para poder contrastar resultados cuando se implemente la optimización.
  - Se diseñará los convertidores DC/DC tomando como referencia la información obtenida de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra y el análisis teórico realizado.
  - Se diseñará la técnica de control MPPT escogida para los convertidores DC/DC con la finalidad de incrementar la potencia activa generada por la planta fotovoltaica.
- C. Fase de simulación
- Se simulará la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, en función de la información adquirida del estado actual de operación.
  - Se simulará el sistema de generación de la central fotovoltaica incluyendo los convertidores DC/DC con su respectivo control MPPT.
  - Se analizará la simulación de la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica bajo dos perfiles de irradiación solar.
  - Se analizará la simulación de la etapa de generación de la central fotovoltaica incluyendo los convertidores DC/DC antes de la etapa de inversión, para esto se tomará como base dos perfiles de irradiación solar.
- D. Fase de análisis de resultados
- Se contrastarán los resultados obtenidos del parque fotovoltaico actual con los resultados del parque fotovoltaico con convertidores DC/DC.

## 2.1. Diseño de los convertidores DC/DC

En la Tabla 2.1 se presenta una comparación de las tres topologías de convertidores DC/DC a ser insertados a la salida de la cada C.C. en primera instancia y luego en cada

C.C.S, tomando en cuenta parámetros que puedan ayudar a mejorar la generación de potencia activa en la Central Fotovoltaica.

**Tabla 2.1.** Comparación de los convertidores DC/DC [26] [27] [30].

Convertidor	Eleva y reduce voltaje	Polaridad con respecto a la entrada	Dificultad control	Eficiencia	Perdidas en conmutación
Buck-Boost	SI	Invertida	Baja	Alta	Baja
Cûk	SI	Invertida	Alta	Alta	Baja
Sepic	SI	Mantiene	Alta	Baja	Baja

### Parámetros de diseño de los convertidores DC/DC

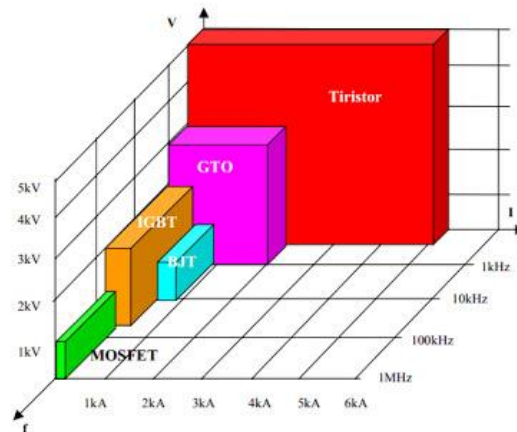
Para el diseño de las tres topologías de los convertidores DC/DC a conectarse a la salida de cada C.C. y de cada C.C.S. se tomará como base los siguientes parámetros propios del sistema fotovoltaico.

**Tabla 2.2.** Parámetros de diseño de los convertidores [15] [17].

Caja de Conexión "C.C."								
Parámetro	Símbolo	Valor						Unidad
Potencia nominal	$P_{nom}$	10	20	30	40	50	60	kW
Voltaje nominal de salida	$V_{nom}$	1000						V
Voltaje de entrada	E	608						V
Ciclo de trabajo	$\delta$	0.62						-
Frecuencia de conmutación	$f_c$	40						kHz
Voltaje de rizado en capacitores	$\Delta v_C$	1% $v_C$						V
Caja de Conexión String "C.C.S."								
Potencia nominal	$P_{nom}$	120						kW
Voltaje nominal de salida	$V_{nom}$	1000						V
Voltaje de entrada	E	608						V
Ciclo de trabajo	$\delta$	0.62						-
Frecuencia de conmutación	$f_c$	40						kHz
Voltaje de rizado en capacitores	$\Delta v_C$	1% $v_C$						V

## Selección del semiconductor de potencia y frecuencia de conmutación

En la Figura 2.1. se muestra los rangos de los niveles de voltaje, corriente y frecuencia de los semiconductores de potencia para la selección del conmutador que mejor se adapte a los paneles solares.



**Figura 2.1.** Curva característica de los semiconductores de potencia comerciales [44].

En la Tabla 2.3. se presenta una comparación de las características físicas de los principales semiconductores comerciales que se debe tener en cuenta en el desarrollo del circuito de potencia.

**Tabla 2.3.** Características físicas de los semiconductores de potencia [44].

Características	SCR	GTO	BJT	MOSFET	IGBT
Características de disparo	Por corriente	Por corriente	Por corriente	Por voltaje	Por voltaje
Potencia del circuito de control	Media/Alta	Alta	Media/Alta	Muy baja	Muy baja
Complejidad del circuito de control	Baja	Alta	Alta	Muy baja	Muy baja
Densidad de corriente	Alta	Media/Alta	Media	Alta/Baja	Alta
Máximo voltaje inverso	Alta	Alta	Media/Baja	Media/Baja	Media/Alta
Perdidas en la conmutación	Alta	Alta	Media/Alta	Muy baja	Media/Alta

Considerando el rango de voltaje y corriente generado por los paneles solares y las características físicas de los semiconductores el conmutador más idóneo para ser empleado en los convertidores solares son los IGBT's.

## Convertidor Buck-Boost

Tomando en cuenta los parámetros de diseño de la Tabla 2.2. se realiza un ejemplo de cálculo para 2 hileras conectadas en paralelo cada una con 20 paneles solares conectados en serie. En el dimensionamiento de los elementos se realiza una aproximación a los valores estandarizados.

$$i_{L1} = \frac{1000}{1 - 0.62} \left( \frac{10000}{1000^2} \right) = 26.32 \text{ A}$$

**Ecuación 2.1.** Cálculo de la corriente en el inductor L1.

$$v_{C1} = \frac{608 * 0.62}{1 - 0.62} = 992 \text{ V}$$

**Ecuación 2.2.** Cálculo del voltaje en el capacitor C1.

$$L1 = \frac{608 * 0.62}{0.01 * 26.32 * 40000} = 35.8 \text{ mH} \approx 39 \text{ mH}$$

**Ecuación 2.3.** Cálculo del inductor L1.

$$C1 = \left( \frac{608 * 0.62}{0.01 * 992 * 40000} \right) \left( \frac{10000}{1000^2} \right) = 15.62 \text{ uF} \approx 22 \text{ uF}$$

**Ecuación 2.4.** Cálculo del capacitor C1.

En la Tabla 2.4 se resume el valor del dimensionamiento de los elementos del convertidor a conectarse a la salida de cada C.C. y de cada C.C.S.

**Tabla 2.4.** Dimensionamiento de los elementos del convertidor Buck-Boost.

<b>Caja de Conexión "C.C."</b>		
<b>Número de Hileras</b>	<b>L1 (mH)</b>	<b>C1 (uF)</b>
2	39	22
4	22	33
6	15	56
8	10	68
10	8.2	83
12	6.8	100
<b>Caja de Conexión String "C.C.S."</b>		
24	3.3	220

## Convertidor Cûk

Considerando los parámetros de diseño de la Tabla 2.2 se realiza un ejemplo de cálculo para 4 hileras conectadas en paralelo cada una con 20 paneles solares conectados en serie. En el dimensionamiento de los elementos se realiza una aproximación a los valores estandarizados.

$$i_{L1} = \frac{1000 * 0.62}{1 - 0.62} \left( \frac{20000}{1000^2} \right) = 32.63 \text{ A}$$

**Ecuación 2.5.** Cálculo de la corriente en el inductor L1.

$$i_{L2} = 1000 \left( \frac{20000}{1000^2} \right) = 20 \text{ A}$$

**Ecuación 2.6.** Cálculo de la corriente en el inductor L2.

$$v_{C1} = \frac{608}{1 - 0.62} = 1600 \text{ V}$$

**Ecuación 2.7.** Cálculo del voltaje en el capacitor C1.

$$v_{C2} = 1000$$

**Ecuación 2.8.** Cálculo del voltaje en el capacitor C2.

$$L1 = \frac{608 * 0.62}{0.01 * 32.63 * 40000} = 28.88 \text{ mH} \approx 33 \text{ mH}$$

**Ecuación 2.9.** Cálculo del inductor L1.

$$L2 = \frac{608 * 0.62}{0.01 * 20 * 40000} = 47.12 \text{ mH} \approx 56 \text{ mH}$$

**Ecuación 2.10.** Cálculo del inductor L2.

$$C1 = \left( \frac{1000 * 0.62}{0.01 * 1600 * 40000} \right) \left( \frac{20000}{1000^2} \right) = 19.37 \text{ uF} \approx 22 \text{ uF}$$

**Ecuación 2.11.** Cálculo del capacitor C1.

$$C2 = \frac{0.62^2 * 608}{8 * 0.01 * 1000 * 0.04712 * 40000^2} = 0.0625 \text{ uF} \approx 0.068 \text{ uF}$$

**Ecuación 2.12.** Cálculo del capacitor C2.

Presentando los resultados del dimensionamiento de los elementos del convertidor cûk en la Tabla 2.5. para la conexión a la salida de cada caja de conexión y de cada caja de conexión string.



**Tabla 2.5.** Dimensionamiento de los elementos del convertidor cûk.

<b>Caja de Conexión "C.C."</b>				
<b>Número de Hileras</b>	<b>L1 (mH)</b>	<b>L2 (mH)</b>	<b>C1 (uF)</b>	<b>C2 (uF)</b>
<b>2</b>	68	100	12	0.033
<b>4</b>	33	56	22	0.068
<b>6</b>	22	33	33	0.1
<b>8</b>	18	27	47	0.22
<b>10</b>	15	22	56	0.22
<b>12</b>	12	18	68	0.22
<b>Caja de Conexión String "C.C.S."</b>				
<b>24</b>	5.6	8.2	120	0.47

### Convertidor Sepic

Tomando en cuenta los parámetros de diseño de la Tabla 2.2. se realiza un ejemplo de cálculo para 24 hileras conectadas en paralelo cada una con 20 paneles solares conectados en serie. En el dimensionamiento de los elementos se realiza una aproximación a los valores estandarizados.

$$i_{L1} = \frac{2 * 1000 * 0.62^2}{1 - 0.62} \left( \frac{120000}{1000^2} \right) = 242.78 \text{ A}$$

**Ecuación 2.13.** Cálculo de la corriente en el inductor L1.

$$i_{L2} = 2 * 1000 * 0.62 \left( \frac{120000}{1000^2} \right) = 148.8 \text{ A}$$

**Ecuación 2.14.** Cálculo de la corriente en el inductor L2.

$$v_{C1} = \frac{608}{1 - 0.62} - 1000 = 600 \text{ V}$$

**Ecuación 2.15.** Cálculo del voltaje en el inductor L1.

$$v_{C2} = 1000 \text{ V}$$

**Ecuación 2.16.** Cálculo del voltaje en el inductor L2.

$$L1 = \frac{608 * 0.62}{0.01 * 242.78 * 40000} = 3.88 \text{ mH} \approx 6.8 \text{ mH}$$

**Ecuación 2.17.** Cálculo del inductor L1.

$$L2 = \frac{608 * 0.62}{0.01 * 148.8 * 40000} = 6.33 \text{ mH} \approx 8.2 \text{ mH}$$

**Ecuación 2.18.** Cálculo del inductor L2.

$$C1 = \left( \frac{1000 * 0.62}{0.01 * 600 * 40000} \right) \left( \frac{120000}{1000^2} \right) = 310 \text{ uF} \approx 330 \text{ uF}$$

**Ecuación 2.19.** Cálculo del capacitor C1.

$$C2 = \left( \frac{1000 * 0.62}{0.01 * 1000 * 40000} \right) \left( \frac{120000}{1000^2} \right) = 186 \text{ uF} \approx 220 \text{ uF}$$

**Ecuación 2.20.** Cálculo del capacitor C2.

En la Tabla 2.6. se resume el valor del dimensionamiento de los elementos del convertidor a conectarse a la salida de cada C.C. y de cada C.C.S.

**Tabla 2.6.** Dimensionamiento de los elementos del convertidor sepic.

<b>Caja de Conexión "C.C."</b>				
<b>Número de Hileras</b>	<b>L1 (mH)</b>	<b>L2 (mH)</b>	<b>C1 (uF)</b>	<b>C2 (uF)</b>
<b>2</b>	68	100	33	22
<b>4</b>	33	68	56	33
<b>6</b>	22	47	82	47
<b>8</b>	18	33	120	68
<b>10</b>	15	22	220	82
<b>12</b>	10	18	220	100
<b>Caja de Conexión String "C.C.S."</b>				
<b>24</b>	6.8	8.2	330	220

## 2.2. Diseño del esquema de control

El esquema de control empleado se muestra en la Figura 1.48. el cual está constituido por un algoritmo MPPT encargado de suministrar el voltaje de referencia que a su vez representa el punto de máxima potencia, Además, un controlador PI empleado para el lazo externo de voltaje y un controlador SMC para el lazo interno de corriente [11].

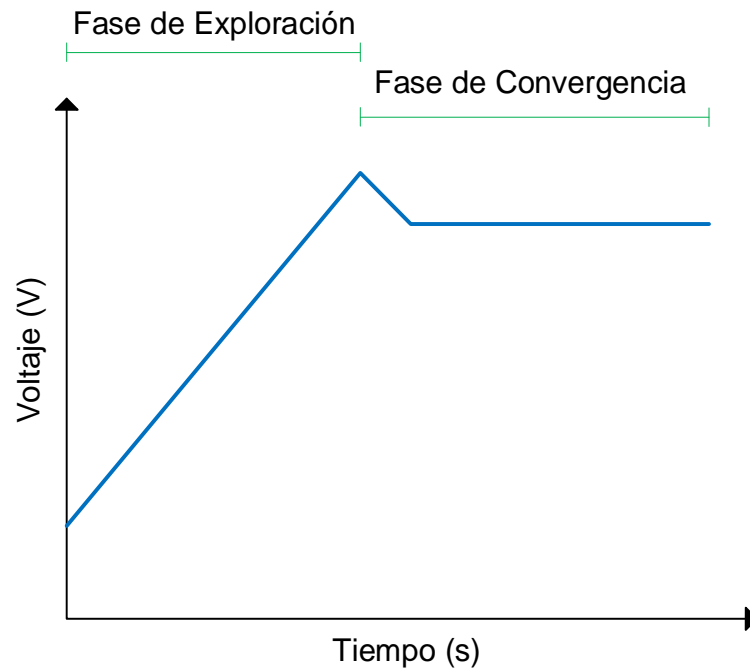
### Diseño del algoritmo PSO-P&O

El algoritmo MPPT presenta como entradas el voltaje y corriente generados por los arreglos de los paneles y como salida el voltaje de referencia que a su vez es el punto de mayor

voltaje que generan los paneles solares, para lo que es necesario conocer los puntos de máxima potencia, siendo estos determinados por las curvas de potencia vs voltaje de los paneles solares a diferentes niveles de radiación.

### **Etapas del algoritmo PSO**

En la Figura 2.2. se muestra las dos etapas del algoritmo PSO-P&O, conocidas como fase de exploración y fase de convergencia.

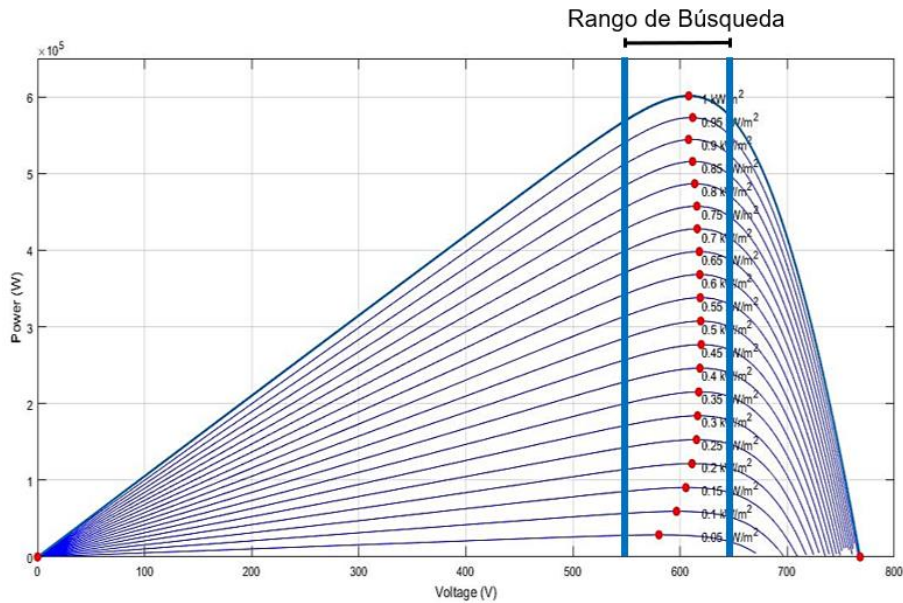


**Figura 2.2.** Algoritmo PSO-P&O [11].

#### **Fase de exploración**

La fase de exploración es la encargada de hacer un barrido del voltaje de los paneles solares con finalidad de encontrar el punto que presente mayor generación de potencia. El rango de búsqueda viene a ser representado por el número de partículas que se utilizan para el rastreo.

El rango de búsqueda del algoritmo es escogido en base a las curvas P-V de los paneles solares a diferentes niveles de radiación como se muestra en la Figura 2.3. Por lo tanto, el rango de búsqueda escogido está definido entre los 550 voltios y 630 voltios, es decir la fase de exploración contará con 80 partículas, de manera que el barrido de voltaje será realizado cada voltio.



**Figura 2.3.** Rango de búsqueda del algoritmo PSO-P&O.

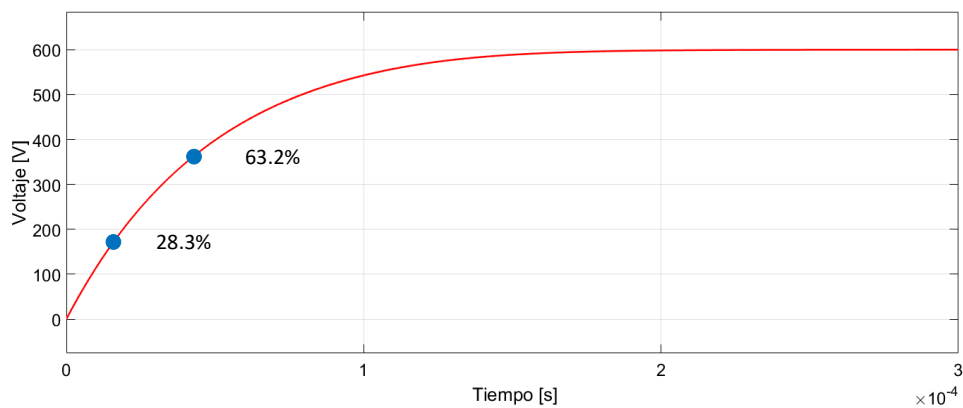
### Fase de convergencia

Una vez que ya se ha determinado el GMPP, en la fase de convergencia se busca que el voltaje de referencia alcance este punto, considerando que ha alcanzado este punto se pone en marcha el algoritmo P&O.

En el Anexo II se presenta el diagrama de flujo del algoritmo PSO-P&O utilizado en los convertidores DC/DC.

### Controlador PI de voltaje

El diseño del controlador PI se basa en el método de la curva de reacción, en la Figura 2.4. se muestra respuesta de voltaje de los arreglos de paneles solares.



**Figura 2.4.** Curva de reacción de los paneles solares.

El modelo aproximado de la planta se determina en base a dos puntos sobre la curva de reacción de voltaje [45] [46].

$$608 * (63.2\%) = 384.256 \rightarrow t_2 = 4.608 \times 10^{-5}$$

**Ecuación 2.21.** Primer punto sobre la curva de reacción.

$$608 * (28.3\%) = 172.064 \rightarrow t_1 = 1.577 \times 10^{-5}$$

**Ecuación 2.22.** Segundo punto sobre la curva de reacción.

$$K = \frac{608}{600} = 1.013$$

**Ecuación 2.23.** Ganancia de la función de transferencia.

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1) = 4.546 \times 10^{-5}$$

**Ecuación 2.24.** Parámetro de la función de transferencia.

$$t_o = t_2 - \tau = 4.6 \times 10^{-5}$$

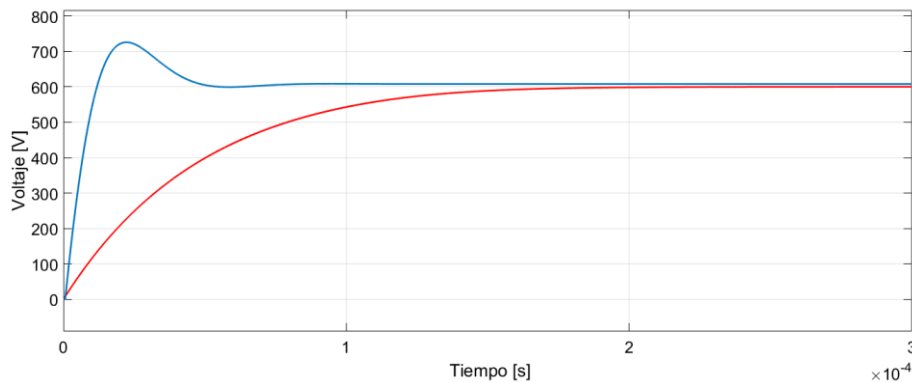
**Ecuación 2.25.** Parámetro de la función de transferencia.

De esta manera la función de transferencia queda descrita de la siguiente forma.

$$F(s) = \frac{1}{4.54 \times 10^{-5}s + 1} e^{0.0615 \times 10^{-5}}$$

**Ecuación 2.26.** Función de transferencia del arreglo de paneles solares.

Por medio de la sintonización por curva de reacción los parámetros proporcional e integral del controlador de voltaje a la entrada de los convertidores DC/DC, resulta ser 43.78 y 4.546e-8. En la Figura 2.5. se muestra la respuesta del sistema con y sin el controlador PI, evidenciando un mejor desempeño del sistema al introducir el controlador.



**Figura 2.5.** Respuesta del sistema con y sin el controlador PI.

## Controlador SMC de corriente

El controlador SMC se desarrolla para controlar la corriente circulante en la entrada del convertidor DC/DC, esta corriente físicamente es generada por los arreglos de paneles solares. Este controlador dependerá del tipo de configuración de cada convertidor.

### Conversor buck-boost

Se define la superficie deslizante.

$$S(t) = I_{Ld} - I_{L1}$$

**Ecuación 2.27.** Superficie deslizante.

Derivando la superficie deslizante.

$$\dot{S}(t) = \dot{I}_{Ld} - \dot{I}_{L1} = 0$$

**Ecuación 2.28.** Derivada de la superficie deslizante.

La ecuación que determina la derivada de la corriente circulante en la bobina L1 se determina en función del análisis del estado de encendido y apagado del semiconductor de potencia de las Figuras 1.25. y 1.26.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E$$

**Ecuación 2.29.** Voltaje en la bobina L1 con switch ON.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = -V_{C1}$$

**Ecuación 2.30.** Voltaje en la bobina L1 con switch OFF.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E\delta - V_{C1}(1 - \delta)$$

Ecuación 2.31. Voltaje en la bobina L1 para un ciclo completo de conmutación.

Despejando la derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

$$\dot{I}_{L1} = \frac{1}{L1} [E\delta - V_{C1}(1 - \delta)]$$

**Ecuación 2.32.** Derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuaciones 2.32. en la Ecuación 2.27, siendo  $\dot{I}_{Ld} = 0$

$$-\frac{1}{L1} [E\delta - V_{C1}(1 - \delta)] = 0$$

**Ecuación 2.33.** Reemplazando la derivada de la corriente del inductor L1.

Despejando  $\delta$ , siendo  $U_c = \delta$  se tiene que la parte continua de la ley de control del controlador SMC de corriente resulta ser.

$$\delta = \frac{V_{C1}}{E + V_{C1}} = U_c$$

**Ecuación 2.34.** Parte continua de la ley de control.

Mientras para la parte discontinua se utiliza la función sigma.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.35.** Parte discontinua de la ley de control.

Resultando la ley de control para el controlador SMC de corriente.

$$U = \frac{V_{C1}}{E + V_{C1}} + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.36.** Ley de control del controlador SMC de corriente.

Las constantes de la parte discontinua resultan ser  $K_D=1.5$  el factor que determina la velocidad con la que el sistema llega a la superficie deslizante, mientras la constante  $\rho=0.05$  contrarresta las oscilaciones que se presentan en el control de la corriente de entrada de los convertidores.

### Convertor cûk

Se define la superficie deslizante.

$$S(t) = I_{Ld} - I_{L1}$$

**Ecuación 2.37.** Superficie deslizante.

Derivando la superficie deslizante.

$$S'(t) = I_{Ld}' - I_{L1}' = 0$$

**Ecuación 2.38.** Derivada de la superficie deslizante.

La ecuación que determina la derivada de la corriente circulante en la bobina L1 se determina en función del análisis del estado de encendido y apagado del semiconductor de potencia de las Figuras 1.29. y 1.30.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E$$

**Ecuación 2.39.** Voltaje en la bobina L1 con switch ON.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E - V_{C1}$$

**Ecuación 2.40.** Voltaje en la bobina L1 con switch OFF.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E\delta + (E - V_{C1})(1 - \delta)$$

**Ecuación 2.41.** Voltaje en la bobina L1 para un ciclo completo de conmutación.

Despejando la derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

$$I_{L1}' = \frac{1}{L1} [E - V_{C1}(1 - \delta)]$$

**Ecuación 2.42.** Derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuaciones 2.42. en la Ecuación 2.37, siendo  $I_{Ld}' = 0$

$$-\frac{1}{L1} [E - V_{C1}(1 - \delta)] = 0$$

**Ecuación 2.43.** Reemplazando la derivada de la corriente del inductor L1.

Despejando  $\delta$ , siendo  $U_C = \delta$  se tiene que la parte continua de la ley de control del controlador SMC de corriente resulta ser.

$$\delta = 1 - \frac{E}{V_{C1}} = U_C$$

**Ecuación 2.44.** Parte continua de la ley de control.

Mientras para la parte discontinua se utiliza la función sigma.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.45.** Parte discontinua de la ley de control.

Resultando la ley de control para el controlador SMC de corriente.

$$U = 1 - \frac{E}{V_{C1}} + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.46.** Ley de control del controlador SMC de corriente.

Las constantes de la parte discontinua resultan ser  $K_D=1.5$  el factor que determina la velocidad con la que el sistema llega a la superficie deslizante, mientras la constante



$\rho=0.05$  contrarresta las oscilaciones que se presentan en el control de la corriente de entrada de los convertidores.

### Conversor sepic

Se define la superficie deslizante.

$$S(t) = I_{Ld} - I_{L1}$$

**Ecuación 2.47.** Superficie deslizante.

Derivando la superficie deslizante.

$$\dot{S}(t) = \dot{I}_{Ld} - \dot{I}_{L1} = 0$$

**Ecuación 2.48.** Derivada de la superficie deslizante.

La ecuación que determina la derivada de la corriente circulante en la bobina L1 se determina en función del análisis del estado de encendido y apagado del semiconductor de potencia de las Figuras 1.29. y 1.30.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E$$

**Ecuación 2.49.** Voltaje en la bobina L1 con switch ON.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E - V_{C1} - V_{C2}$$

**Ecuación 2.50.** Voltaje en la bobina L1 con switch OFF.

$$V_{L1} = L1 \frac{dI_{L1}}{dt} = E\delta + (E - V_{C1} - V_{C2})(1 - \delta)$$

**Ecuación 2.51.** Voltaje en la bobina L1 para un ciclo completo de conmutación.

Despejando la derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

$$\dot{I}_{L1} = \frac{1}{L1} [E - (V_{C1} + V_{C2})(1 - \delta)]$$

**Ecuación 2.52.** Derivada de la corriente circulante en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuaciones 2.52. en la Ecuación 2.47, siendo  $\dot{I}_{Ld} = 0$

$$-\frac{1}{L1} [E - (V_{C1} + V_{C2})(1 - \delta)] = 0$$

**Ecuación 2.53.** Reemplazando la derivada de la corriente del inductor L1.

Despejando  $\delta$ , siendo  $U_c = \delta$  se tiene que la parte continua de la ley de control del controlador SMC de corriente resulta ser.

$$\delta = 1 - \frac{E}{V_{C1} + V_{C2}} = U_C$$

**Ecuación 2.54.** Parte continua de la ley de control.

Mientras para la parte discontinua se utiliza la función sigma.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.55.** Parte discontinua de la ley de control.

Resultando la ley de control para el controlador SMC de corriente.

$$U = 1 - \frac{E}{V_{C1} + V_{C2}} + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho}$$

**Ecuación 2.56.** Ley de control del controlador SMC de corriente.

Las constantes de la parte discontinua resultan ser  $K_D=1.5$  el factor que determina la velocidad con la que el sistema llega a la superficie deslizante, mientras la constante  $\rho=0.05$  contrarresta las oscilaciones que se presentan en el control de la corriente de entrada de los convertidores.

### **Análisis de estabilidad**

El análisis de la estabilidad del controlador SMC de corriente para cada convertidor DC/DC se realiza en base al criterio de estabilidad de Lyapunov.

#### **Convertor buck-boost**

Se define la función de Lyapunov que cumpla la primera condición.

$$V(t) = \frac{1}{2} S(t)^2 > 0$$

**Ecuación 2.57.** Primer criterio de Lyapunov.

Evaluando la función de Lyapunov en el instante cero.

$$V(0) = \frac{1}{2} S(0)^2 = 0$$

**Ecuación 2.58.** Segundo criterio de Lyapunov.

Comprobando que la derivada de la función de Lyapunov es menor que cero.

$$V(t) = S(t) \dot{S}(t) < 0$$

**Ecuación 2.59.** Tercer criterio de Lyapunov.

Reemplazando la Ecuación 2.28 en la Ecuación 2.59.

$$S(t) (\dot{I}_{Ld} - \dot{I}_{L1}) < 0$$

**Ecuación 2.60.** Reemplazando la derivada de la superficie.

Reemplazando la Ecuación 2.32 en la Ecuación 2.60.

$$S(t) \left\{ -\frac{1}{L1} [E \delta - V_{C1} (1 - \delta)] \right\} < 0$$

**Ecuación 2.61.** Reemplazando la derivada de la corriente en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuación 2.36. en la Ecuación 2.61., siendo  $U = \delta$ .

$$S(t) \left\{ -\frac{E + V_{C1}}{L1} \left( K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho} \right) \right\} < 0$$

**Ecuación 2.62.** Reemplazando la ley de control del controlador SMC.

Si la expresión  $\frac{V_{C1} + E}{L1} K_D$  es mayor que cero, cumplirá con el criterio de estabilidad de Lyapunov. Considerando que E y  $V_{C1}$  es mayor que cero y que L1 y  $K_D$  toman valores positivos. Con lo que se concluye que la función de Lyapunov cumple con el criterio de estabilidad.

### Convertor cûk

Se define la función de Lyapunov que cumpla la primera condición.

$$V(t) = \frac{1}{2} S(t)^2 > 0$$

**Ecuación 2.63.** Primer criterio de Lyapunov.

Evaluando la función de Lyapunov en el instante cero.

$$V(0) = \frac{1}{2} S(0)^2 = 0$$

**Ecuación 2.64.** Segundo criterio de Lyapunov.

Comprobando que la derivada de la función de Lyapunov es menor que cero.

$$\dot{V}(t) = S(t) \dot{S}(t) < 0$$

**Ecuación 2.65.** Tercer criterio de Lyapunov.

Reemplazando la Ecuación 2.38. en la Ecuación 2.65.

$$S(t) (\dot{I}_{Ld} - \dot{I}_{L1}) < 0$$

**Ecuación 2.66.** Reemplazando la derivada de la superficie.

Reemplazando la Ecuación 2.42 en la Ecuación 2.66.

$$S(t) \left\{ -\frac{1}{L1} [E - V_{C1}(1 - \delta)] \right\} < 0$$

**Ecuación 2.67.** Reemplazando la derivada de la corriente en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuación 2.46 en la Ecuación 2.67., siendo  $U = \delta$ .

$$S(t) \left\{ -\frac{V_{C1}}{L1} \left( K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho} \right) \right\} < 0$$

**Ecuación 2.68.** Reemplazando la ley de control del controlador SMC.

Para concluir que la función de Lyapunov cumple el criterio de estabilidad  $\frac{V_{C1}}{L1} K_D$  debe ser mayor que cero. Tomando en consideración el  $v_{C1}$  es mayor que cero y  $L1, K_D$  toman valores mayores que cero. Por lo que se puede concluir que la función de Lyapunov cumple con el criterio de estabilidad.

### Convertor sepic

Se define la función de Lyapunov que cumpla la primera condición.

$$V(t) = \frac{1}{2} S(t)^2 > 0$$

**Ecuación 2.69.** Primer criterio de Lyapunov.

Evaluando la función de Lyapunov en el instante cero.

$$V(0) = \frac{1}{2} S(0)^2 = 0$$

**Ecuación 2.70.** Segundo criterio de Lyapunov.

Comprobando que la derivada de la función de Lyapunov es menor que cero.

$$V\dot{(t)} = S(t) S'(t) < 0$$

**Ecuación 2.71.** Tercer criterio de Lyapunov.

Reemplazando la Ecuación 2.48 en la Ecuación 2.71.

$$S(t) (I_{Ld} - I_{L1}) < 0$$

**Ecuación 2.72.** Reemplazando la derivada de la superficie.

Reemplazando la Ecuación 2.52 en la Ecuación 2.72.

$$S(t) \left\{ -\frac{1}{L1} [E - (V_{C1} + V_{C2})(1 - \delta)] \right\} < 0$$

**Ecuación 2.73.** Reemplazando la derivada de la corriente en la bobina L1.

Reemplazando la Ecuación 2.56 en la Ecuación 2.73., siendo  $U = \delta$ .

$$S(t) \left\{ -\frac{V_{C1} + V_{C2}}{L1} \left( K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \rho} \right) \right\} < 0$$

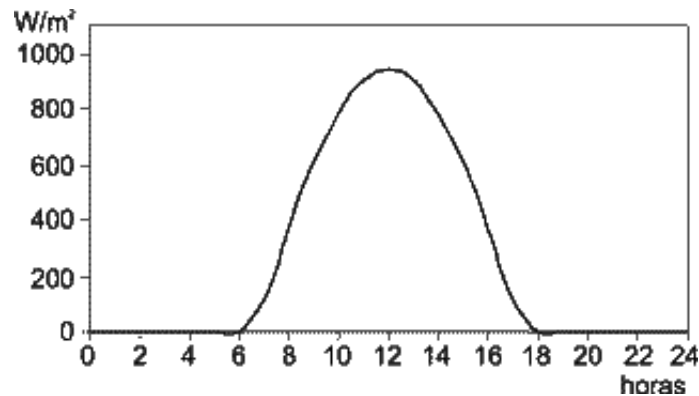
**Ecuación 2.74.** Reemplazando la ley de control del controlador SMC.

Para determinar que la función de Lyapunov cumple el criterio de estabilidad  $\frac{V_{C1} + V_{C2}}{L1} K_D$  debe ser mayor que cero. Teniendo en consideración que el  $V_{C1}$  y  $V_{C2}$  es mayor que cero y que  $L1$  y  $K_D$  toman valores mayores que cero. Con lo que se concluye que la función de Lyapunov cumple con el criterio de estabilidad.

## 2.3. Diseño de los perfiles de radiación

### Radiación solar constante

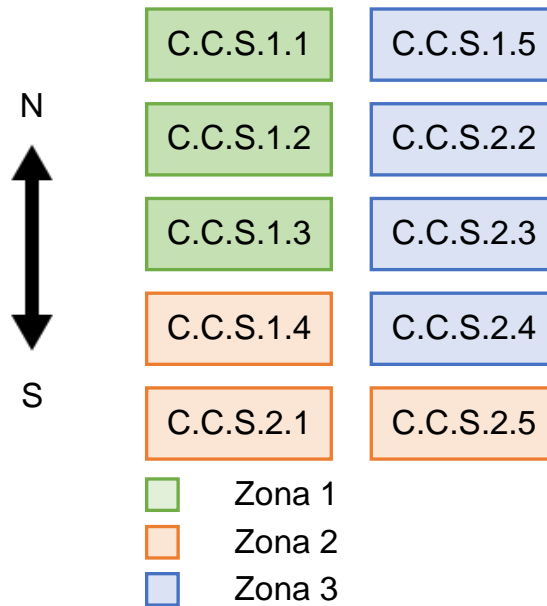
En el desarrollo del perfil de radiación constante se toma como base a la curva de radiación solar diaria sin la presencia de nubes como se presenta en la siguiente figura.



**Figura 2.6.** Radiación solar sin presencia de nubes [47].

## Radiación solar con la presencia parcial de sombra

El perfil de radiación con presencia de nubes se desarrolló a partir de una división por zonas del conjunto total de los paneles solares dispuestos en la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra. En la Figura 2.6 se presenta que para cada zona le corresponde un número de arreglos conectados en paralelo, con cada arreglo formado de 20 paneles solares en serie. Por lo tanto, a cada zona le corresponde una curva de radiación característica.



**Figura 2.7.** División por zonas de los arreglos de los paneles solares

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

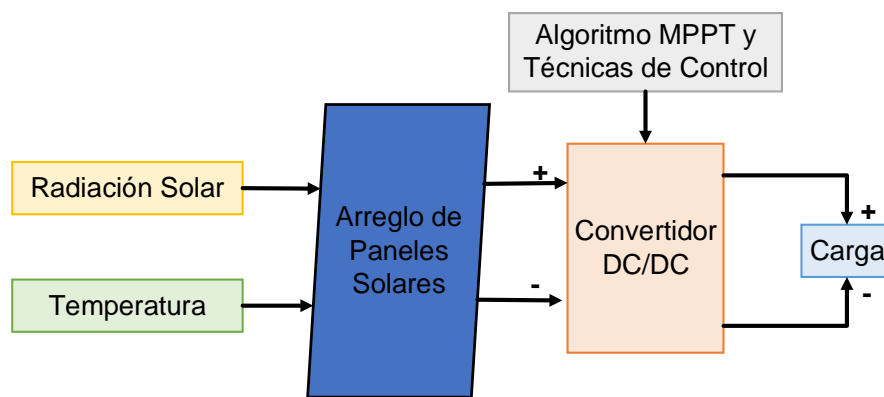
En el siguiente capítulo se muestran las mediciones obtenidas de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema fotovoltaico actual y el sistema con la inserción de los convertidores Cûk, Sepic y Reductor Elevador en los arreglos de los paneles solares. Inicialmente se presentan resultados de la simulación de cada convertidor DC/DC controlados por el algoritmo MPPT.

Una vez simulado los convertidores DC/DC se presenta la validación de los resultados obtenidos considerando un caso real tomando como referencia datos históricos de radiación y temperatura suministrados por la Central Fotovoltaica Salinas de Ibarra y dos perfiles de radiación desarrollados en función de las curvas de radiación solar incidentes en la superficie terrestre.

Finalmente, se presenta una comparación de los resultados obtenidos de la cantidad de energía generada del modelo actual y del modelo con convertidores ubicados a la salida de cada C.C.S. y C.C.

### 3.1. Resultados de la simulación de los convertidores DC/DC

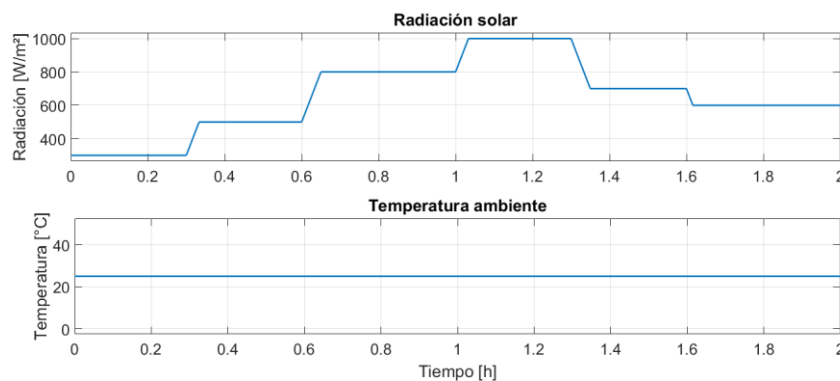
En la Figura 3.1. se muestra un esquema gráfico del tipo de conexión que se utilizó para realizar las pruebas de los convertidores DC/DC acoplados a los paneles solares. Inicialmente se presenta la potencia teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída con la inserción de los convertidores aplicando técnicas de control y el algoritmo PSO-P&O.



**Figura 3.1.** Esquema del tipo de conexionado de los paneles solares y convertidores DC/DC.

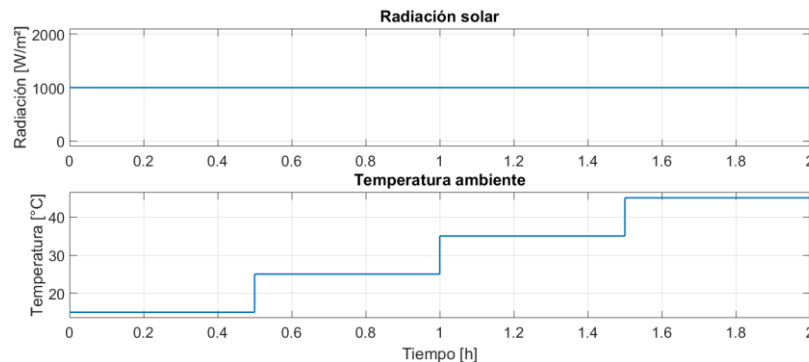
Para evidenciar el comportamiento de los paneles solares con la inserción de los convertidores DC/DC se realiza las siguientes pruebas:

- La primera prueba consiste en variar la radiación solar incidente en los paneles solares y mantener la temperatura ambiente en un valor fijo como se muestra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Radiación solar y temperatura ambiente.

- La segunda prueba consiste en mantener la radiación solar en un valor determinado y variar la temperatura como se muestra en la Figura 3.3.



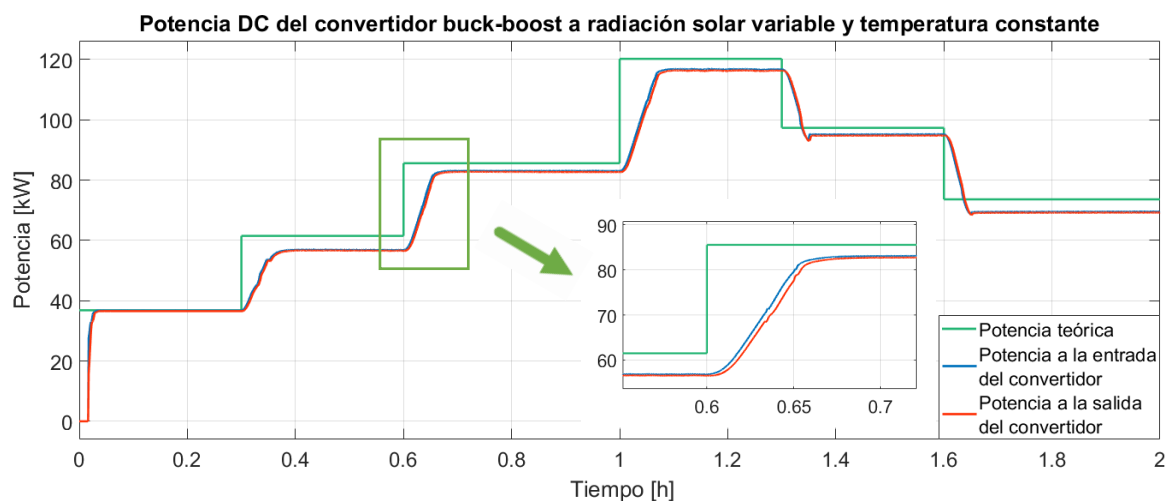
**Figura 3.3.** Radiación solar y temperatura ambiente.

### Convertidor buck-boost

Para realizar las siguientes pruebas se toma como referencia el circuito eléctrico del convertidor buck-boost presente en la Figura 1.24.

#### Radiación solar variable y temperatura constante

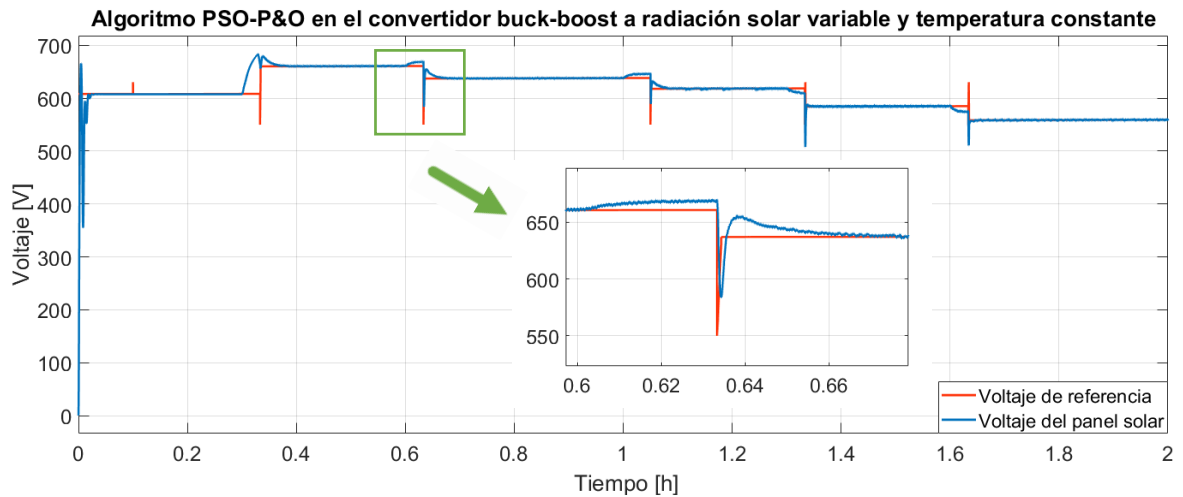
En la Figura 3.4. se observar la comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor buck-boost, pudiendo notar que existe una disminución de la potencia a la salida del convertidor debido a las pérdidas en la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.4.** Potencia en régimen DC con convertidores buck-boost.

El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede apreciar en la Figura 3.5., evidenciando que el algoritmo busca, converge y mantiene al sistema trabajando en el punto de máxima potencia.

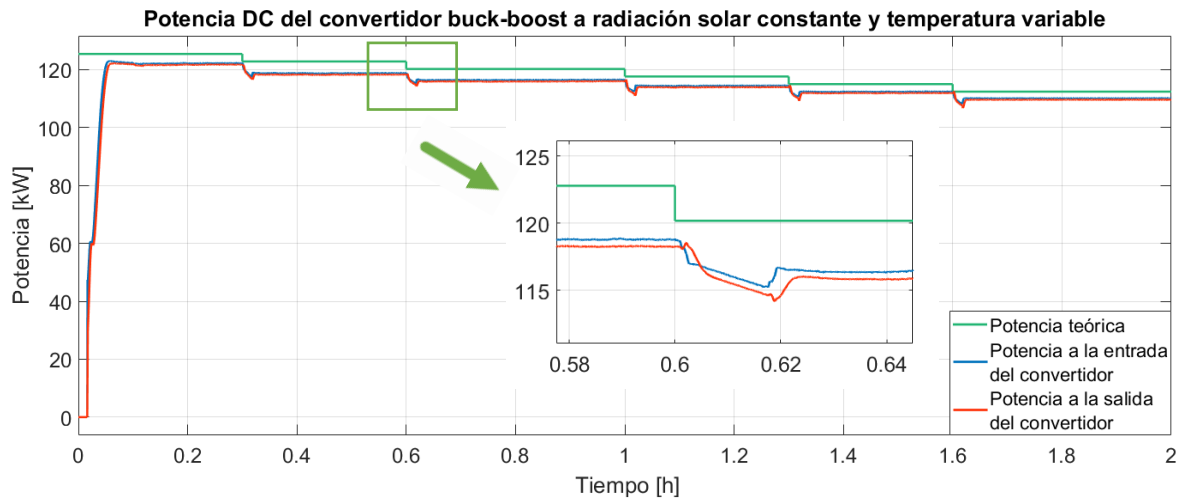




**Figura 3.5.** Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

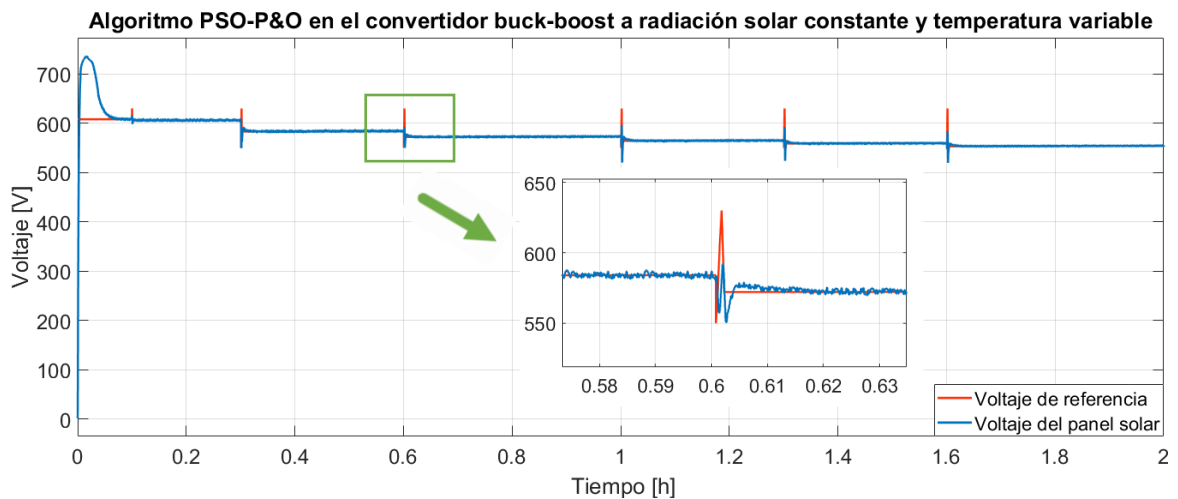
### Radiación solar constante y temperatura variable

En la Figura 3.6. se presenta una comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor buck-boost evidenciando pérdidas en de potencia a la salida del convertidor debido a la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.6.** Potencia en régimen DC con convertidores buck-boost.

El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede describir por la Figura 3.7., evidenciando que el algoritmo busca, encuentra y mantiene al sistema trabajando en el punto de máxima potencia.



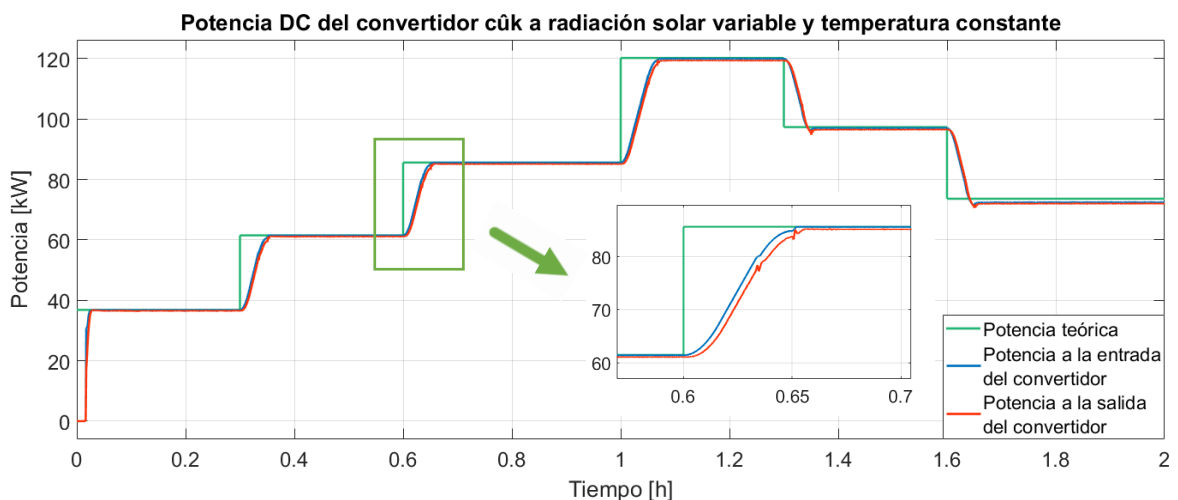
**Figura 3.7.** Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

### Convertidor cûk

Las siguientes pruebas se realizan tomando como referencia el circuito equivalente del convertidor cûk de la Figura 1.28.

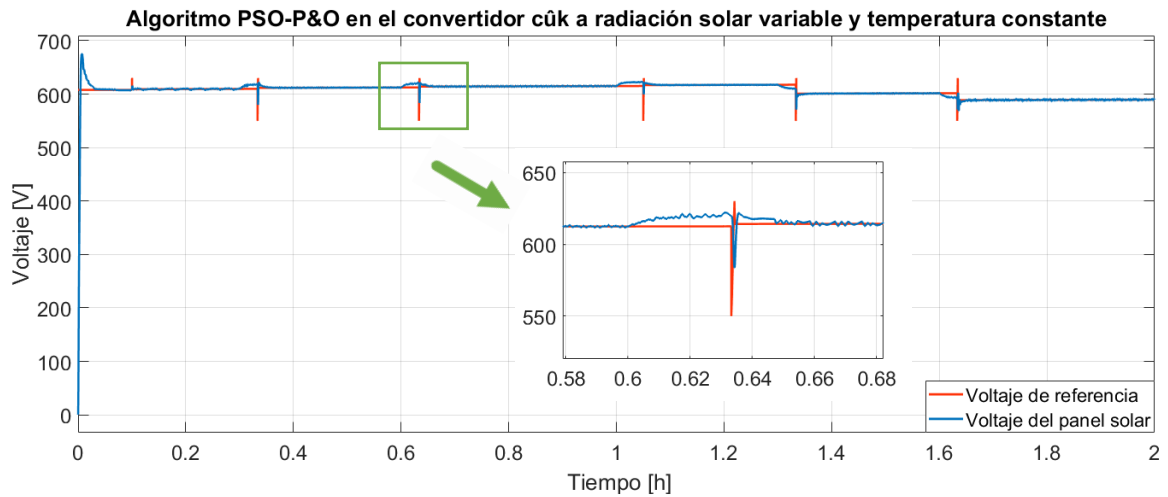
### Radiación solar variable y temperatura constante

En la Figura 3.8. se presenta una comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor cûk, evidenciando una disminución de la potencia a la salida del convertidor debido a las pérdidas en la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.8.** Potencia en régimen DC con convertidores cûk.

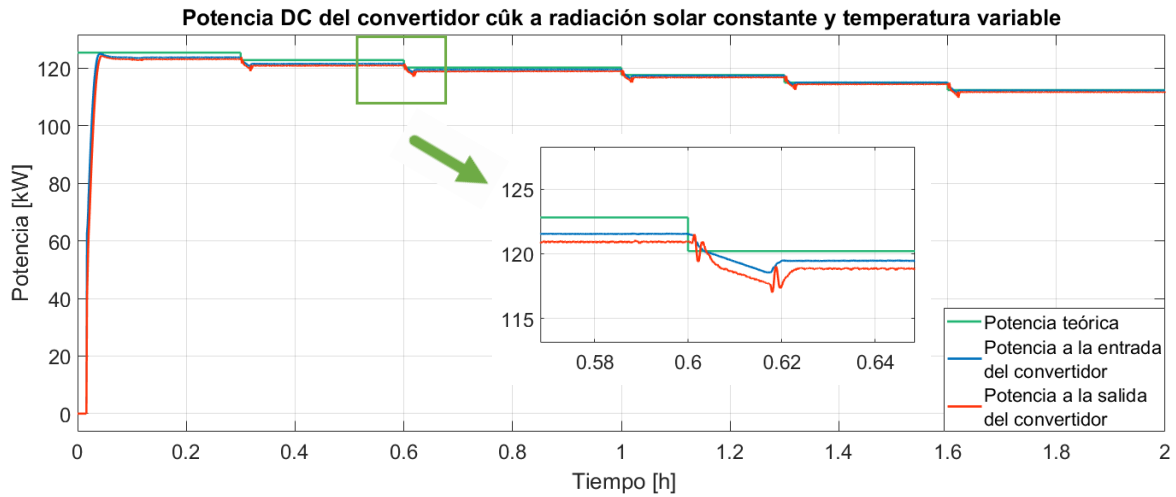
El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede apreciar en la Figura 3.9., evidenciando que el algoritmo cumple con las etapas de búsqueda y convergencia hacia el MPP.



**Figura 3.9.** Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

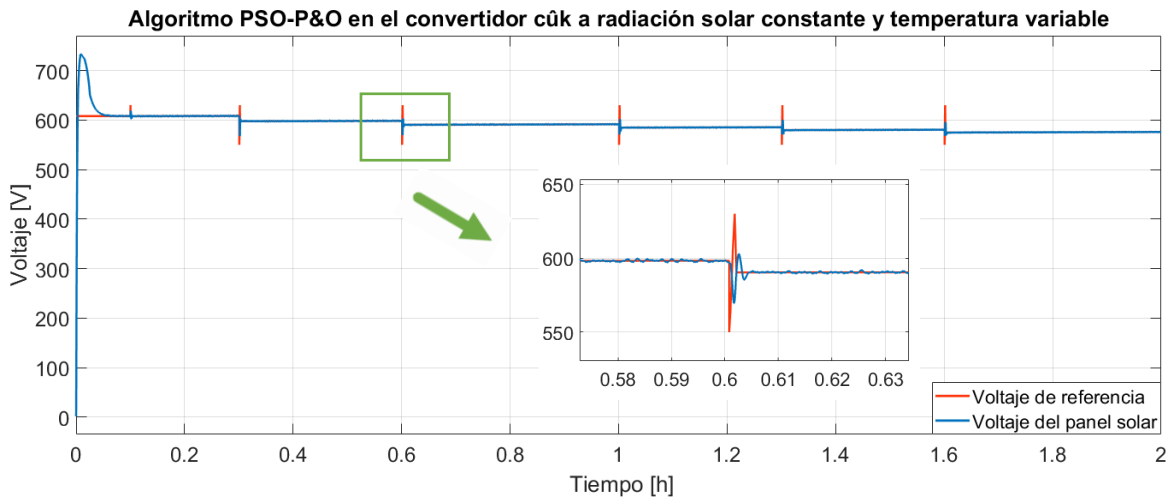
### Radiación solar constante y temperatura variable

En la Figura 3.10. se presenta una comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor cùk evidenciando pérdidas de la potencia a la salida del convertidor debido a la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.10.** Potencia en régimen DC con convertidores cùk.

El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede describir por la Figura 3.11., evidenciando que el algoritmo busca, encuentra y mantiene al sistema trabajando en el punto de máxima potencia.



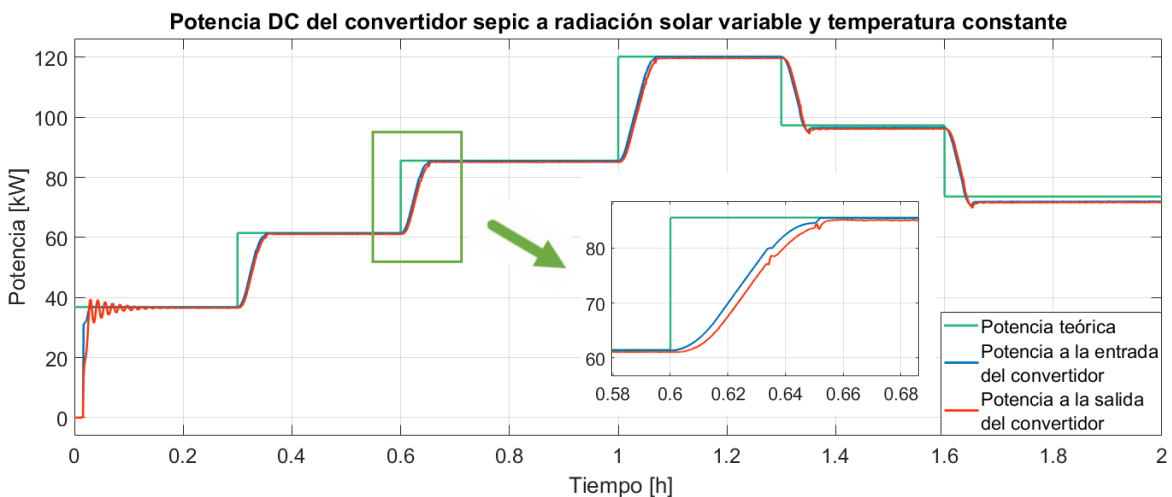
**Figura 3.11.** Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

### Convertidor sepic

Para realizar las siguientes pruebas se toma como referencia el circuito eléctrico del convertidor sepic presente en la Figura 1.32.

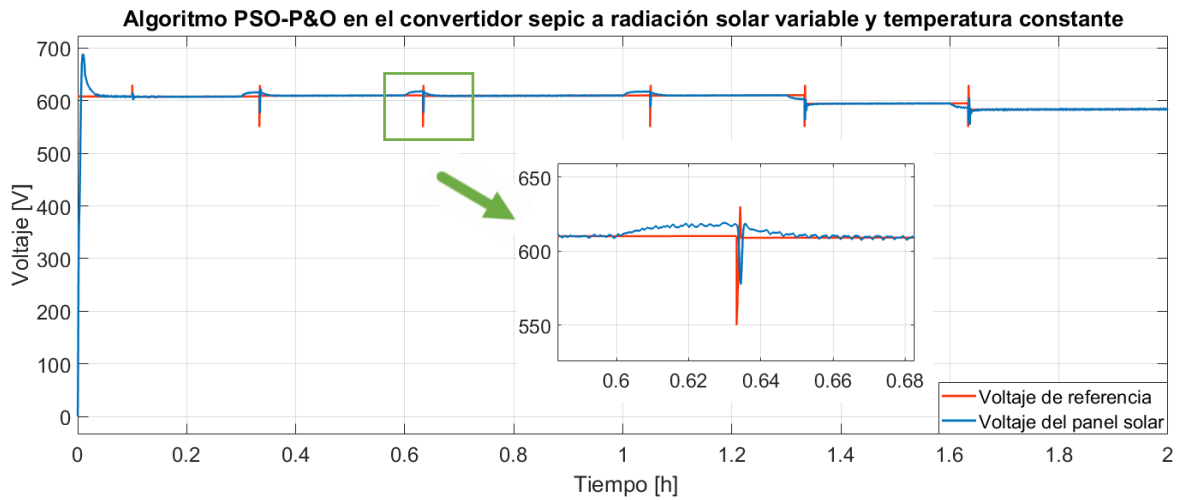
### Radiación solar variable y temperatura constante

En la Figura 3.12. se presenta una comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor sepic, pudiendo notar que existe una disminución de potencia debido a las pérdidas en la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.12.** Potencia en régimen DC con convertidores sepic.

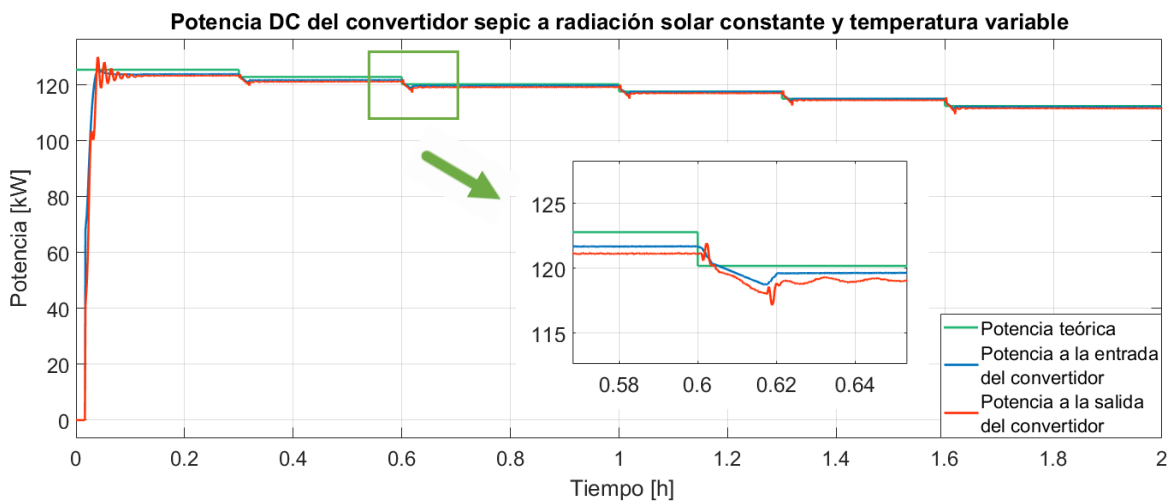
El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede apreciar en la Figura 3.13., evidenciando que el algoritmo cumple con las etapas de búsqueda y convergencia hacia el punto de máxima potencia.



**Figura 3.13.** Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

### Radiación solar constante y temperatura variable

En la Figura 3.14. se presenta una comparación entre la potencia activa teórica generada por los paneles solares y la potencia extraída a la entrada y a la salida del convertidor sepic evidenciando pérdidas en de potencia debido a la conmutación del convertidor DC/DC.



**Figura 3.14.** Potencia en régimen DC con convertidores sepic.

El funcionamiento del algoritmo PSO-P&O se puede describir por la Figura 3.15., evidenciando que el algoritmo busca, encuentra y mantiene al sistema trabajando en el MPP.

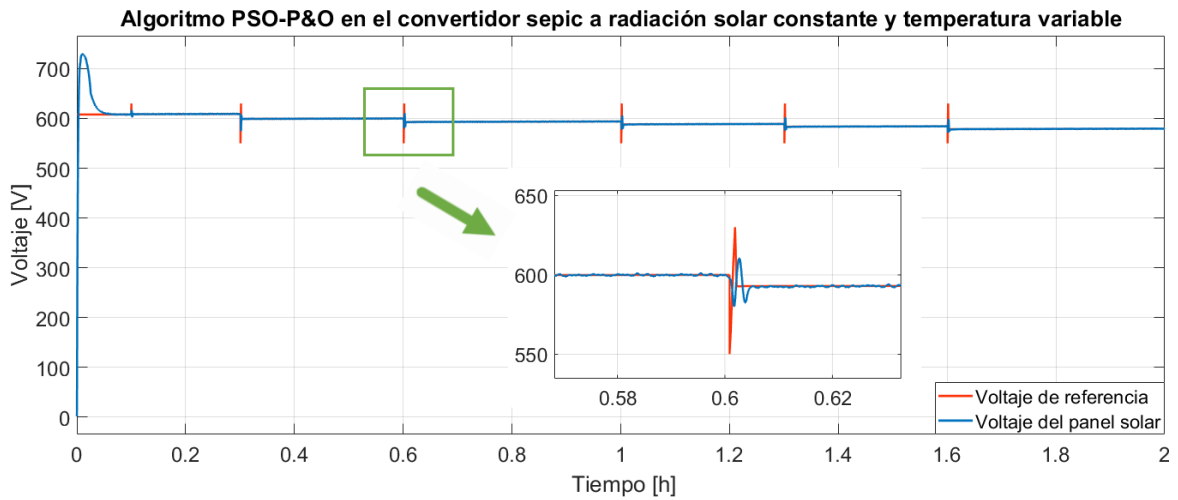


Figura 3.15. Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O.

### 3.2. Validación y resultados del funcionamiento del sistema

En la Figura 3.16. se presenta un esquema gráfico simplificado de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra que está constituido por las etapas de generación, inversión y transformación.

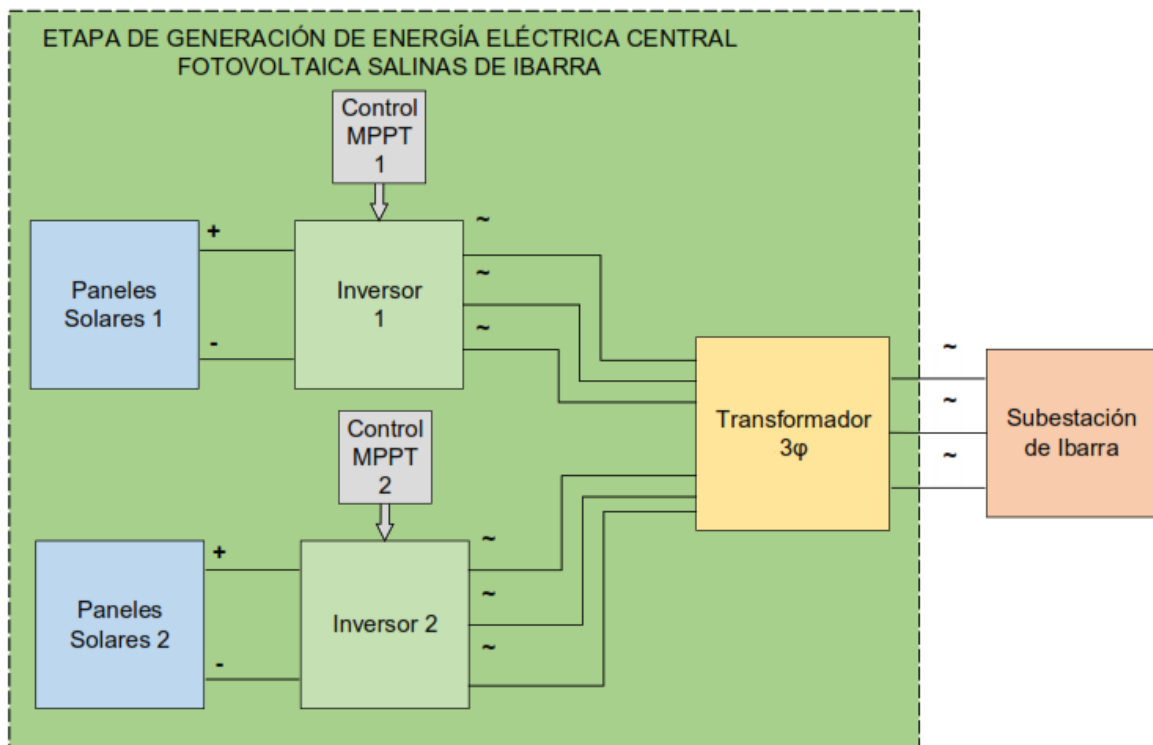
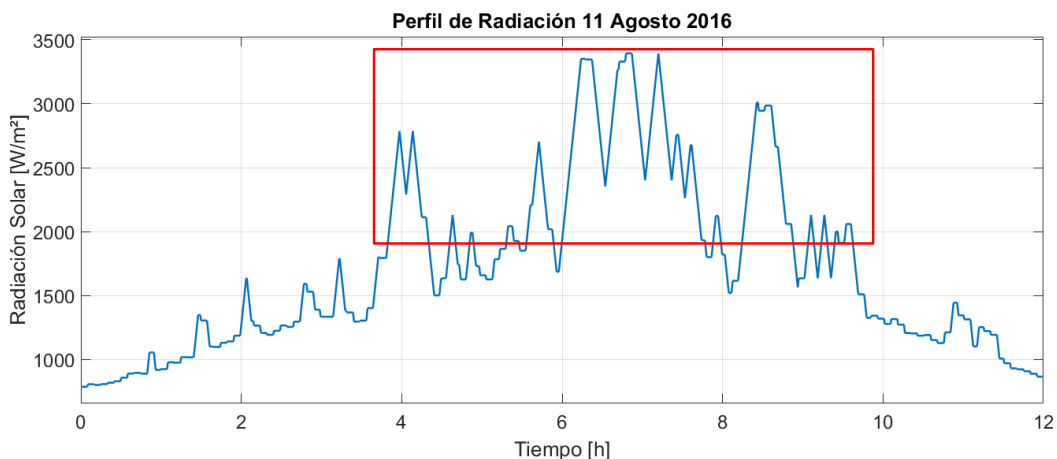


Figura 3.16. Modelo equivalente de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

### Análisis de datos históricos

El análisis previo se realiza con la finalidad de justificar que los valores históricos de irradiancia solar cuentan con cierto nivel de incertidumbre que hace difícil una interpretación correcta de los mismos. De esta manera, como se presenta en la Figura 3.8 los valores de radiación del 11 de agosto del 2016 en un intervalo de tiempo de 6 AM a 6 PM proporcionados por la central fotovoltaica exceden con los niveles de radiación incidentes en la superficie de la tierra, este perfil arroja un valor de energía solar diaria de 9.518 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que datos reflejados en un atlas solar elaborado por parte del Consejo Nacional de Electricidad "CONELEC" para el mes de agosto del 2008 se presenta una energía solar media de 5.2 kWh/m<sup>2</sup> por día [48]. Además, un mapa de radiación global desarrollado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología "INAMHI" se tiene que para el área de ubicación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra se presenta una media máxima de 5 a 5.2 kWh/m<sup>2</sup> por día. Esta información se encuentra detallada en los anexos III y IV [49].



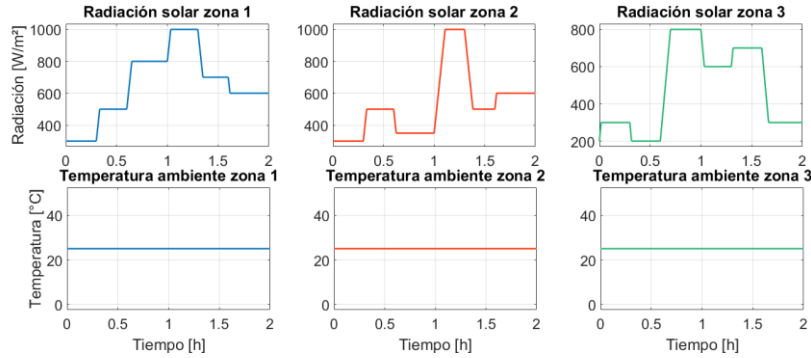
**Figura 3.17.** Datos reales de radiación solar de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra.

Debido a que los datos entregados por la central fotovoltaica Salinas de Ibarra no se encuentran en el rango máximo de radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra [47], se somete al sistema desarrollado a los siguientes perfiles de radiación y temperatura con la finalidad de validar el funcionamiento del sistema desarrollado.

- Radiación solar variable y temperatura constante.
- Radiación solar constante y temperatura variable.
- Radiación solar a cielo despejado y temperatura variable.
- Radiación solar con presencia parcial de sombra y temperatura variable.
- Radiación solar y temperatura en función de los valores provistos de la central fotovoltaica.

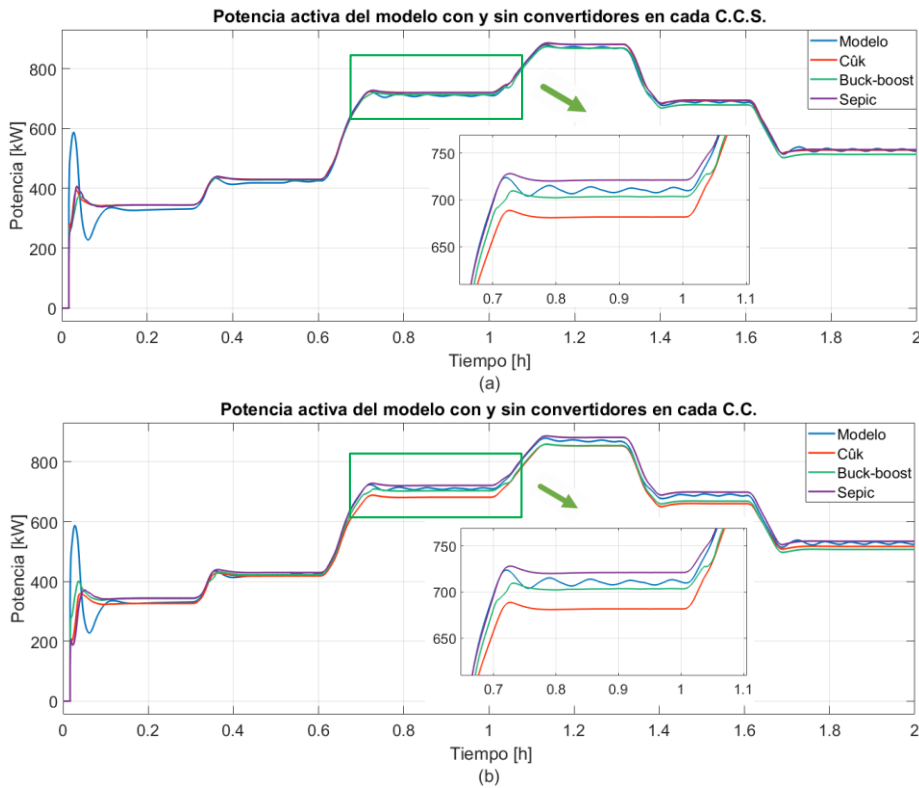
### Perfil de radiación solar variable y temperatura constante

En la Figura 3.18. se muestra el perfil de radiación solar para cada zona que será variable en el tiempo, mientras que el perfil de temperatura se mantendrá constante durante todo el periodo de prueba del sistema.



**Figura 3.18.** Perfil de radiación solar y perfil de temperatura ambiente.

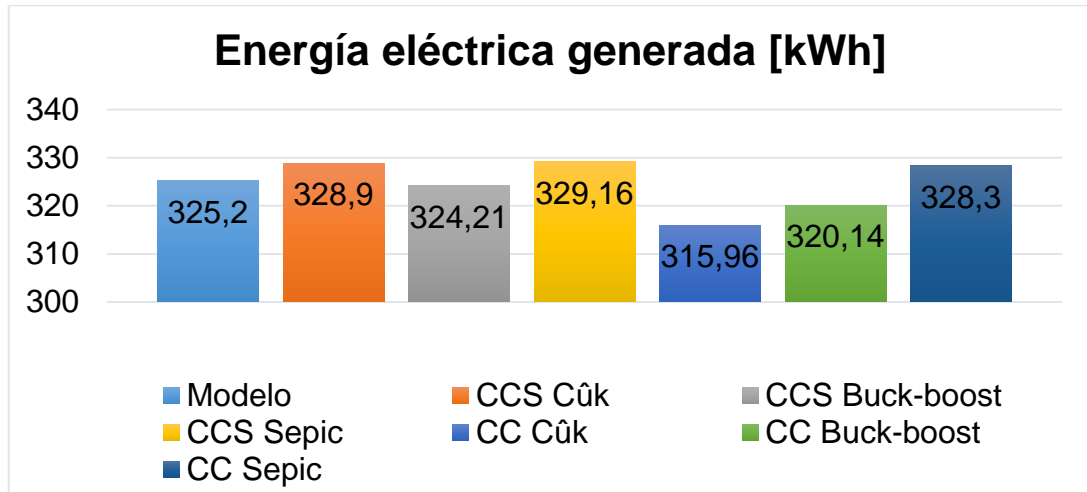
La Figura 3.19. muestra la comparación de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema y el modelo con la inserción de las tres topologías de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C.



**Figura 3.19.** (a) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.S., (b) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.

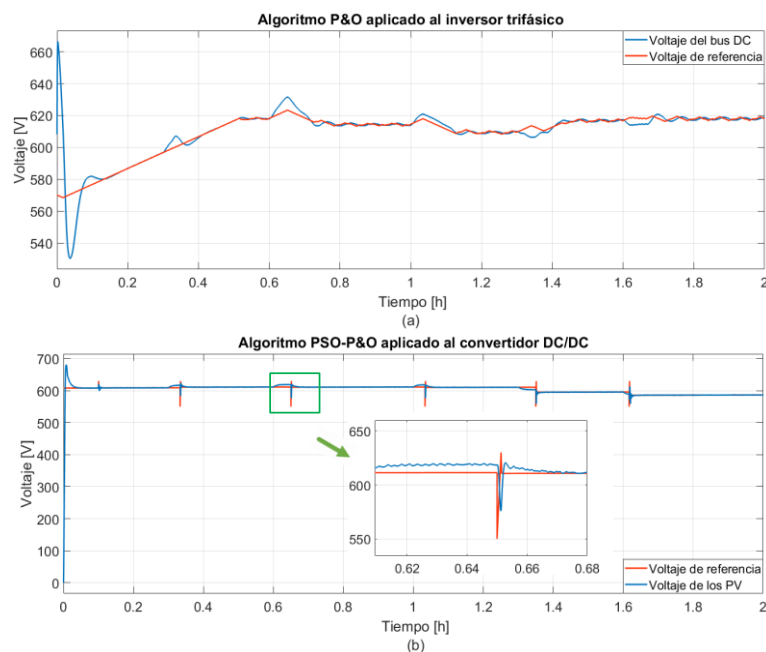


En la Figura 3.20. se muestra la cantidad de energía eléctrica generada por el modelo equivalente con y sin la inserción de cada uno de los tres tipos de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C., evidenciando un incremento de 3,96 kWh al comparar el modelo equivalente y el modelo con la inserción de los convertidores sepic a la salida de cada C.C.S.



**Figura 3.20.** Energía eléctrica generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC.

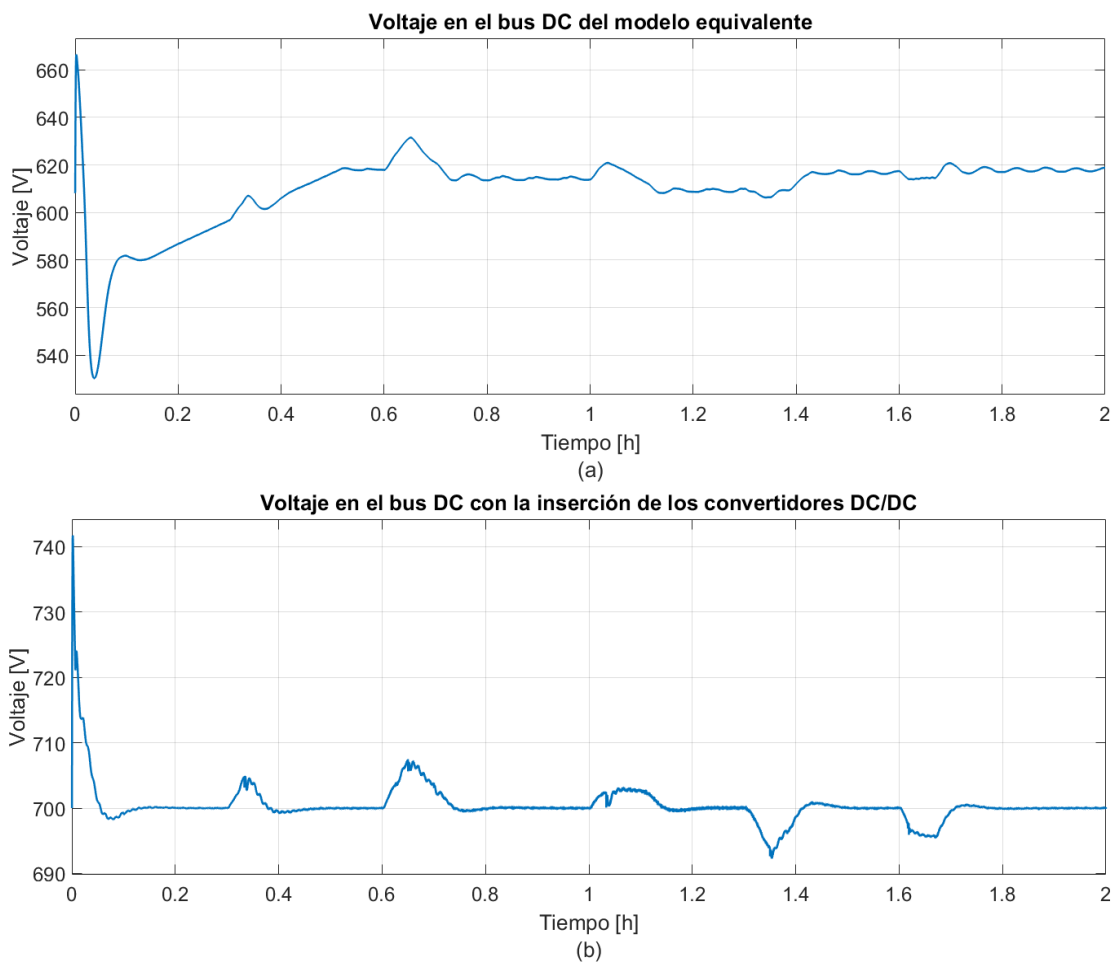
La Figura 3.21.a. muestra el funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor trifásico, evidenciando que el algoritmo tarda un cierto instante de tiempo en lograr estabilizarse en el punto de máxima potencia.



**Figura 3.21.** (a) Funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor, (b) Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O aplicado a los convertidores DC/DC.

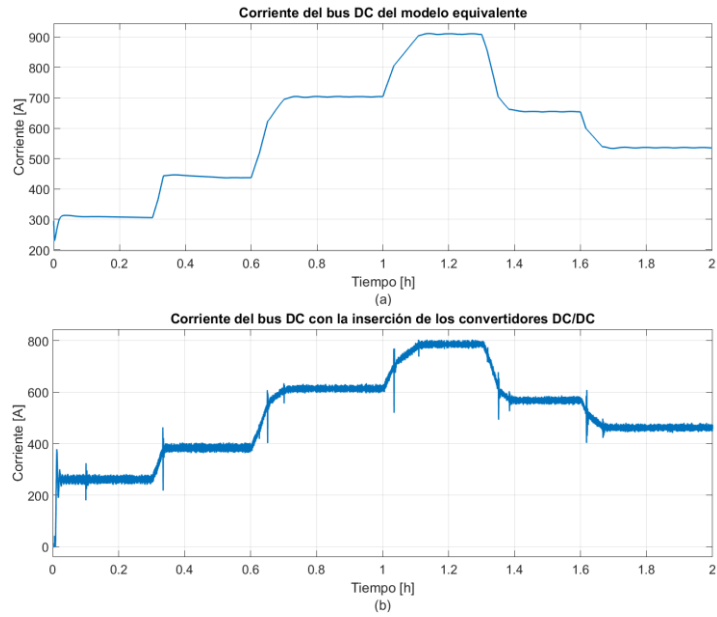
En la Figura 3.21.b. se detalla el funcionamiento del algoritmo PSO\_P&O aplicado al convertidor DC/DC, notando que el algoritmo desarrollado ayuda al sistema a converger más rápidamente al punto de máxima potencia.

El nivel de voltaje del bus DC del modelo equivalente se muestra en la Figura 3.22.a., en donde se puede observar que el nivel de voltaje cambia debido a la variación de radiación solar incidente en los paneles solares y a la aplicación del algoritmo P&O, mientras en la Figura 3.22.b. el nivel de voltaje en el bus DC permanece constante debido a la introducción de la etapa de convertidores en el sistema fotovoltaico.



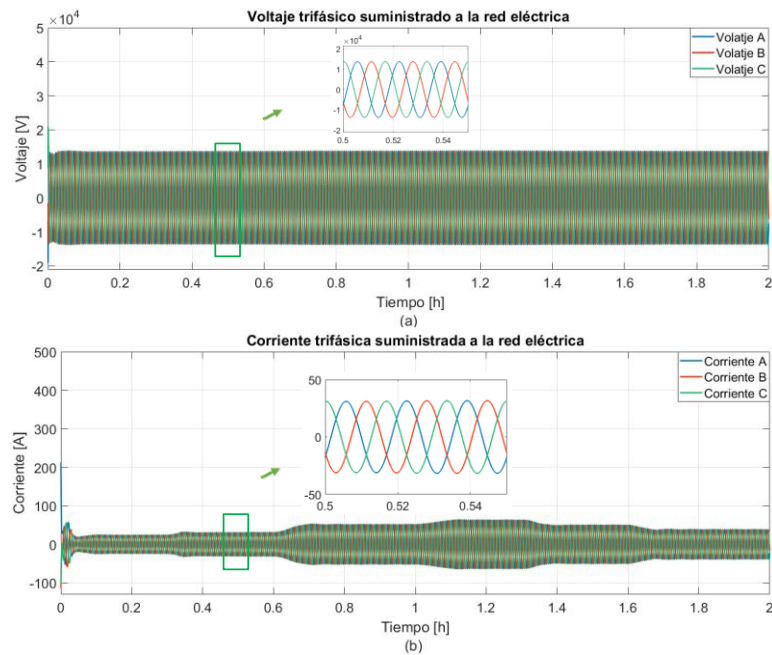
**Figura 3.22.** (a) Voltaje en el bus DC del modelo equivalente, (b) Voltaje en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.23. se presenta la comparación del nivel de corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando variaciones en la corriente del modelo con convertidores debido a la conmutación del semiconductor de potencia del convertidor DC/DC.



**Figura 3.23.** (a) Corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente, (b) Corriente circulante en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.24. se observa la corriente y el voltaje trifásicos inyectados a la red eléctrica pública, apreciando que el nivel de corriente generada dependerá principalmente de la cantidad de energía solar incidente en los paneles solares, mientras que el voltaje trifásico permanecerá constante.



**Figura 3.24.** (a) Voltaje trifásico suministrado a la red eléctrica, (b) Corriente trifásica suministrada a la red eléctrica.

### Perfil de radiación solar constante y temperatura variables

En la Figura 3.25. se muestra el perfil de radiación solar para cada zona que permanecerá constante, así como también el perfil de temperatura que variará durante el periodo de prueba del sistema.

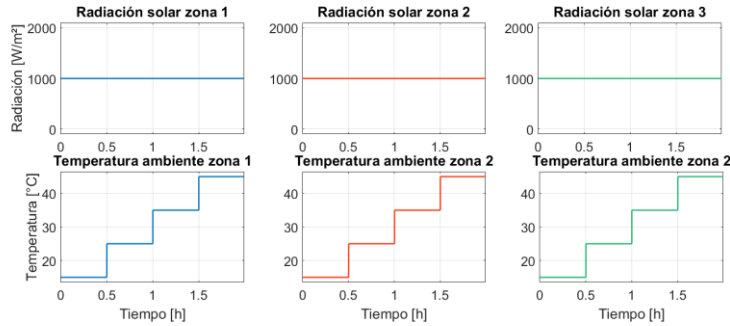
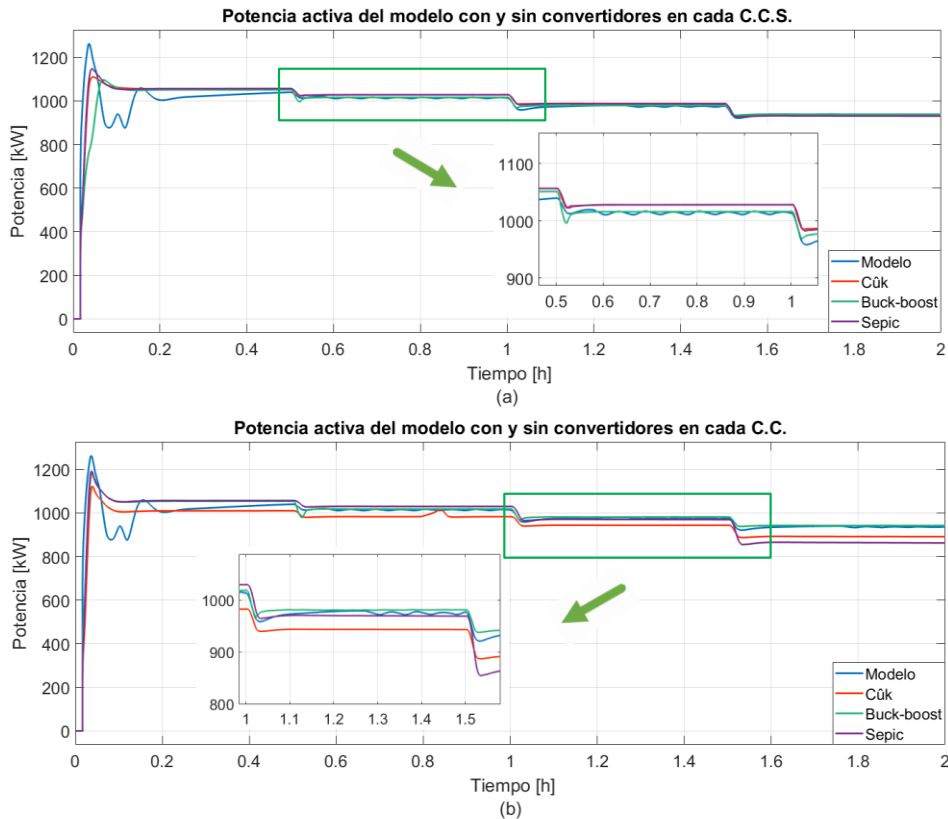


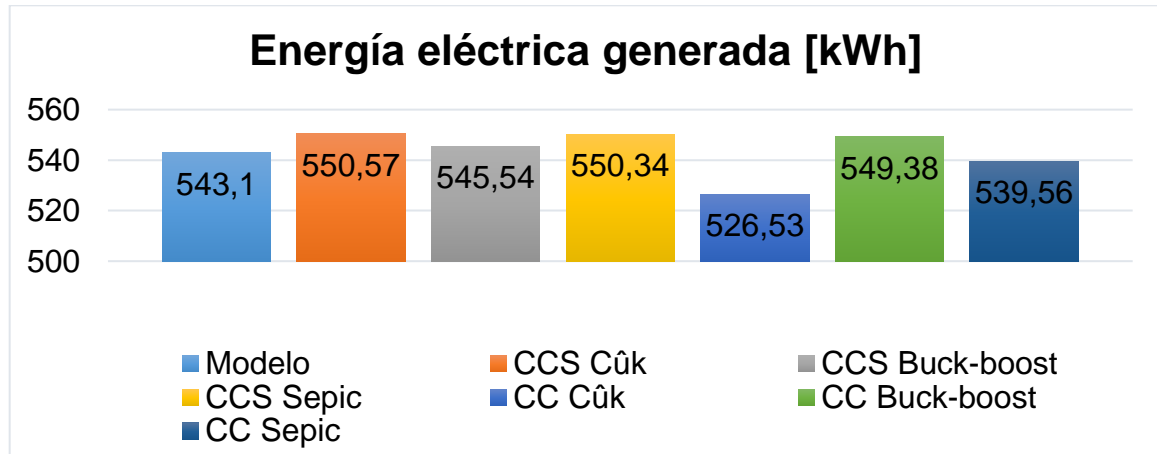
Figura 3.25. Perfil de radiación solar y perfil de temperatura ambiente.

La **Figura 3.26** muestra la comparación de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema y el modelo con la inserción de las tres topologías de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C.



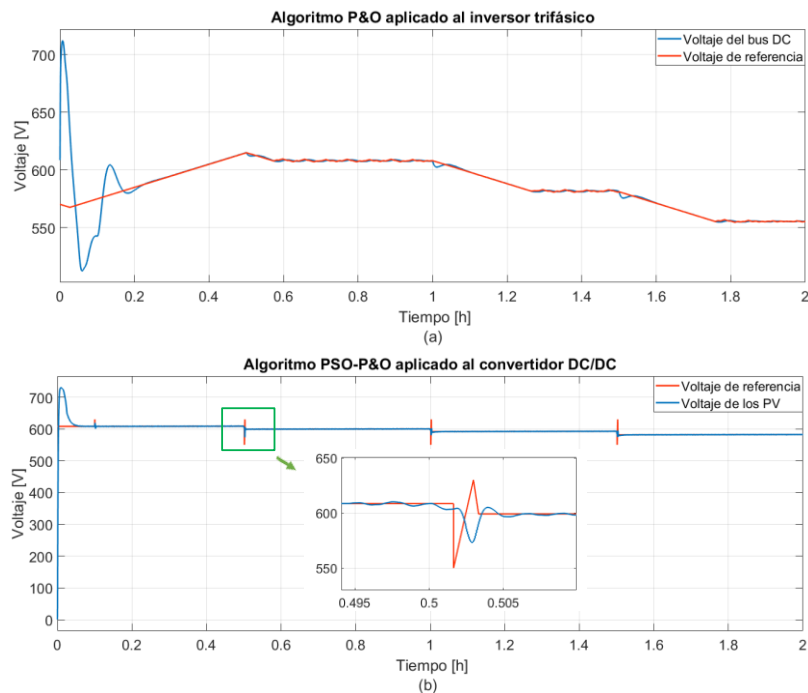
**Figura 3.26.** (a) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.S., (b) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.

En la Figura 3.27. se muestra un esquema gráfico de la cantidad de energía eléctrica generada por el modelo equivalente y el modelo con la inserción de cada uno de los tres tipos de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C., evidenciando un incremento de 7,47 kWh al comparar el modelo equivalente y el modelo con la inserción de los convertidores cûk a la salida de cada C.C.S.



**Figura 3.27.** Energía eléctrica generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC.

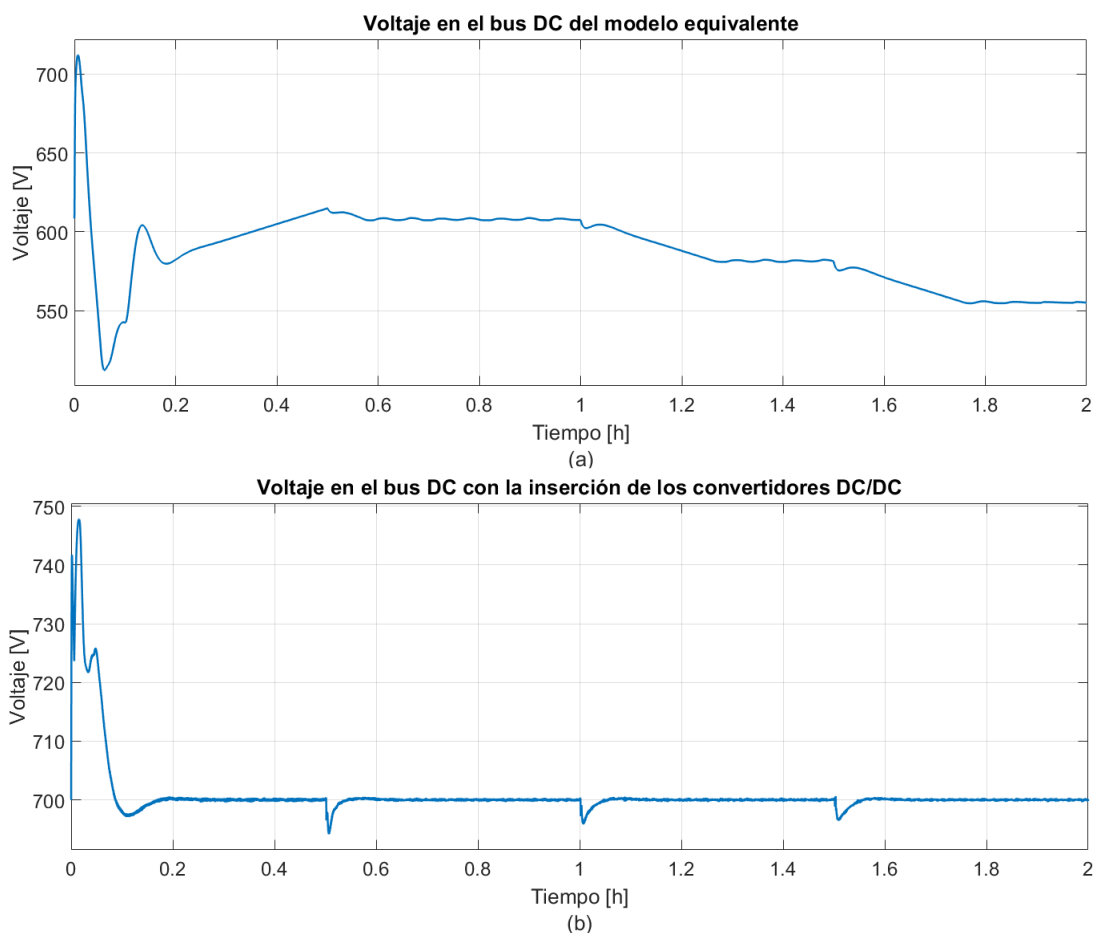
La Figura 3.28.a. muestra el funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor trifásico, evidenciando que el algoritmo tarda un cierto instante de tiempo en lograr estabilizarse en el punto de máxima potencia.



**Figura 3.28.** (a) Funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor, (b) Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O aplicado a los convertidores DC/DC.

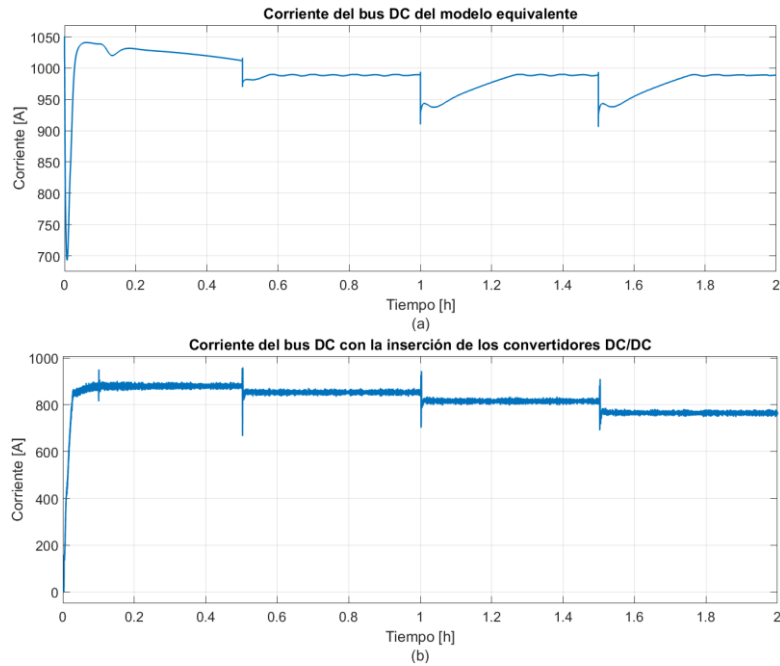
En la Figura 3.28.b. se detalla el funcionamiento del algoritmo PSO\_P&O aplicado al convertidor DC/DC, comprobando que el algoritmo desarrollado converge más rápidamente al punto de máxima potencia.

La Figura 3.29. muestra la comparación del nivel de voltaje del bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando que el nivel de voltaje en el bus DC del modelo equivalente presenta escalones debido principalmente a los cambios de temperatura en el ambiente, mientras que el voltaje en el bus DC del modelo con convertidores DC permanece constante debido a la introducción de una etapa de convertidores DC/DC.



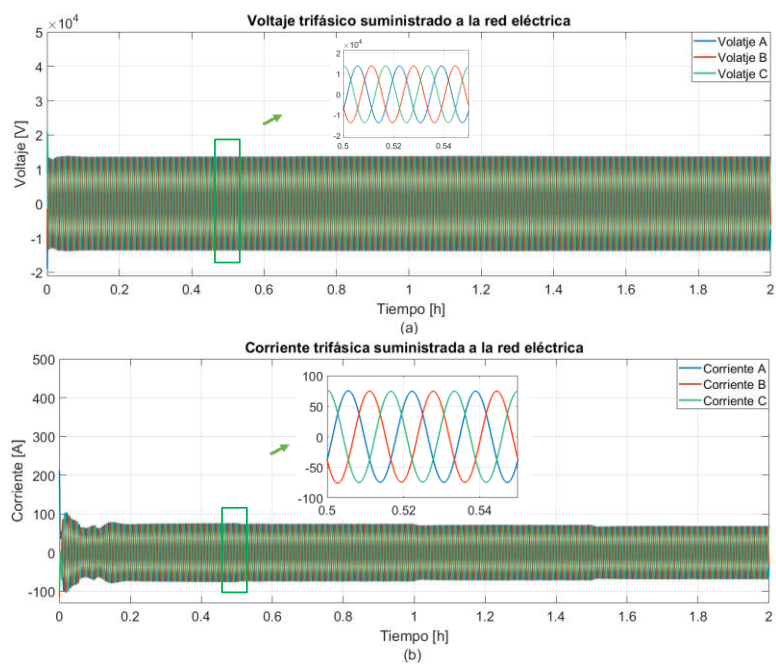
**Figura 3.29.** (a) Voltaje en el bus DC del modelo equivalente, (b) Voltaje en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.30. se presenta la comparación del nivel de corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando variaciones en la corriente del modelo con convertidores debido a la conmutación de los semiconductores de potencia.



**Figura 3.30.** (a) Corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente, (b) Corriente circulante en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

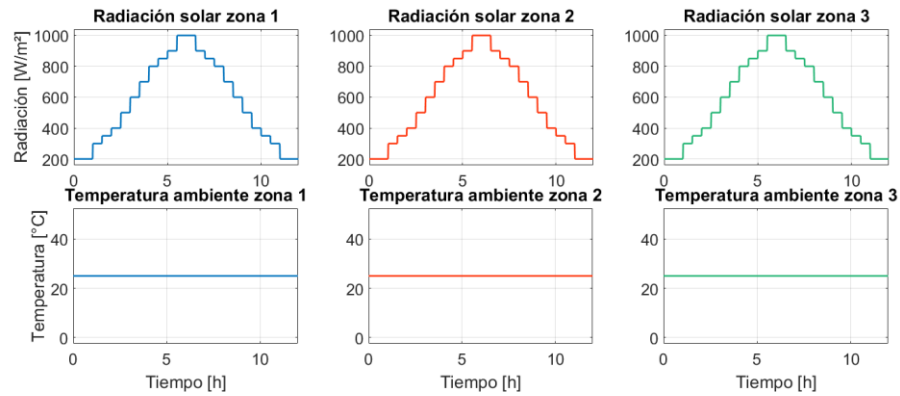
En la Figura 3.31. se observa la corriente y el voltaje trifásicos inyectados a la red eléctrica pública, apreciando que el voltaje trifásico permanecerá constante, mientras que la corriente generada sufre variaciones pequeñas debido al cambio de la temperatura ambiente.



**Figura 3.31.** (a) Voltaje trifásico suministrado a la red eléctrica, (b) Corriente trifásica suministrada a la red eléctrica.

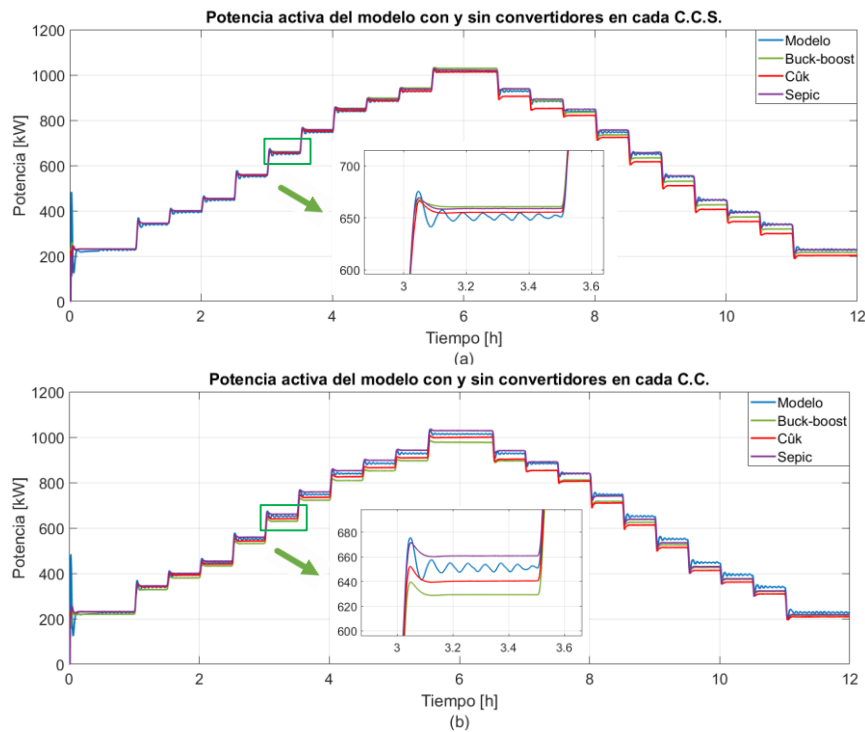
### Perfil de radiación solar a cielo despejado

En la Figura 3.32. se muestra el perfil de radiación solar para cada zona a cielo despejado es decir sin presencia de sombras parciales y el perfil de temperatura ambiente empleado para esta prueba.



**Figura 3.32.** Perfil de radiación solar y perfil de temperatura ambiente.

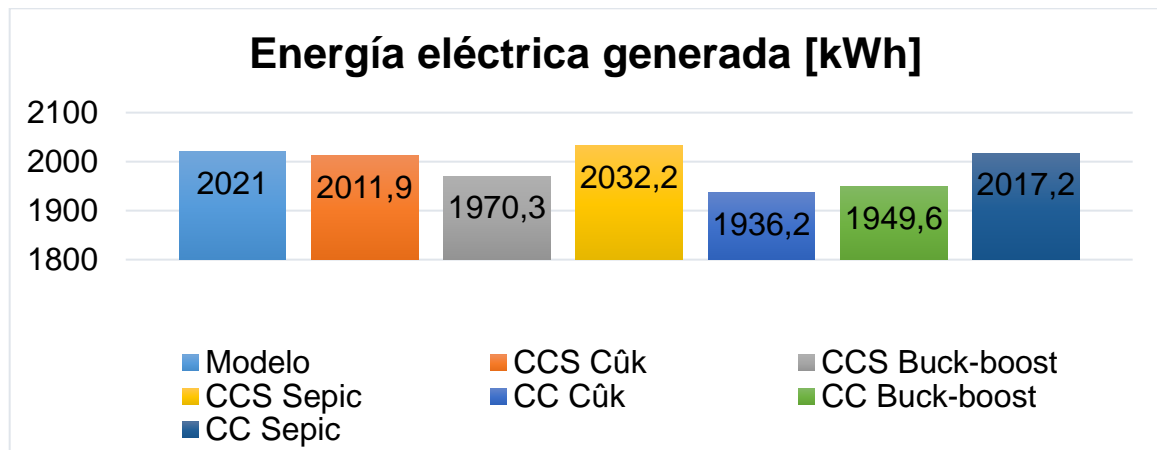
La Figura 3.33 muestra la comparación de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema y el modelo con la inserción de las tres topologías de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C.



**Figura 3.33.** (a) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.S., (b) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.

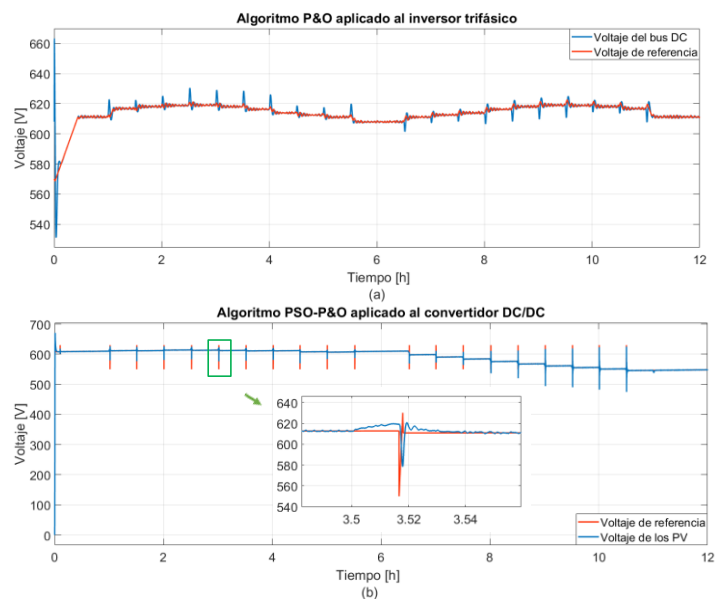


En la Figura 3.34 se muestra un esquema gráfico de la cantidad de energía eléctrica generada por el modelo equivalente y el modelo con la inserción de cada uno de los tres tipos de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C., evidenciando un incremento de 11,2 kWh al comparar el modelo equivalente y el modelo con la inserción de los convertidores sepic a la salida de cada C.C.S.



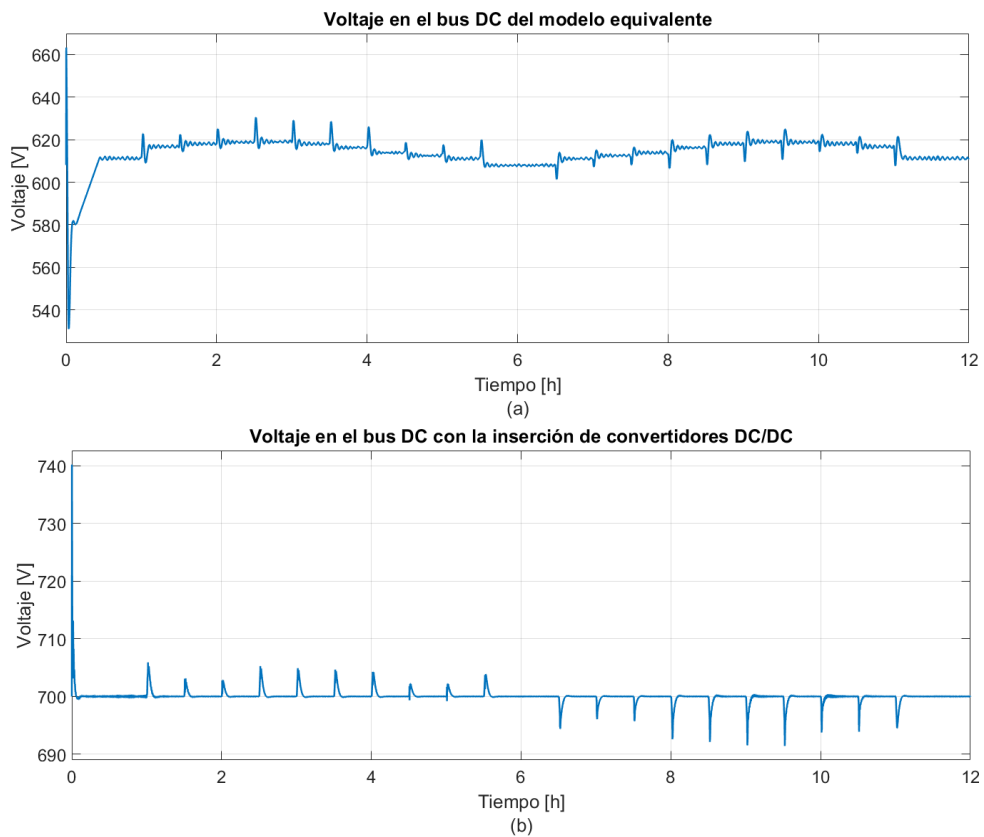
**Figura 3.34.** Energía eléctrica generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC.

La Figura 3.35 muestra el funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor trifásico y del algoritmo PSO\_P&O aplicado al convertidor DC/DC, evidenciando en los dos casos que el voltaje generado por los paneles solares sigue al voltaje de referencia generado por los algoritmos MPPT, evidenciando que el algoritmo desarrollado para los convertidores ayuda al sistema a converger más rápido al punto de máxima potencia.



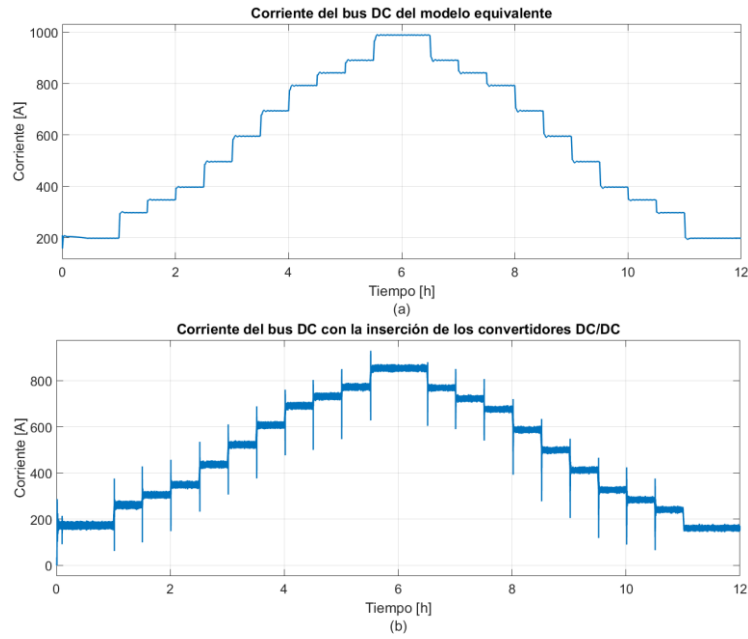
**Figura 3.35.** (a) Funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor, (b) Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O aplicado a los convertidores DC/DC.

La Figura 3.36 muestra la comparación del nivel de voltaje del bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando que el nivel de voltaje en el bus DC del modelo equivalente no permanece constante debido a los cambios de radiación solar que inciden en los paneles solares, mientras que el voltaje en el bus DC del modelo con convertidores DC permanece constante debido a la etapa de convertidores insertados.



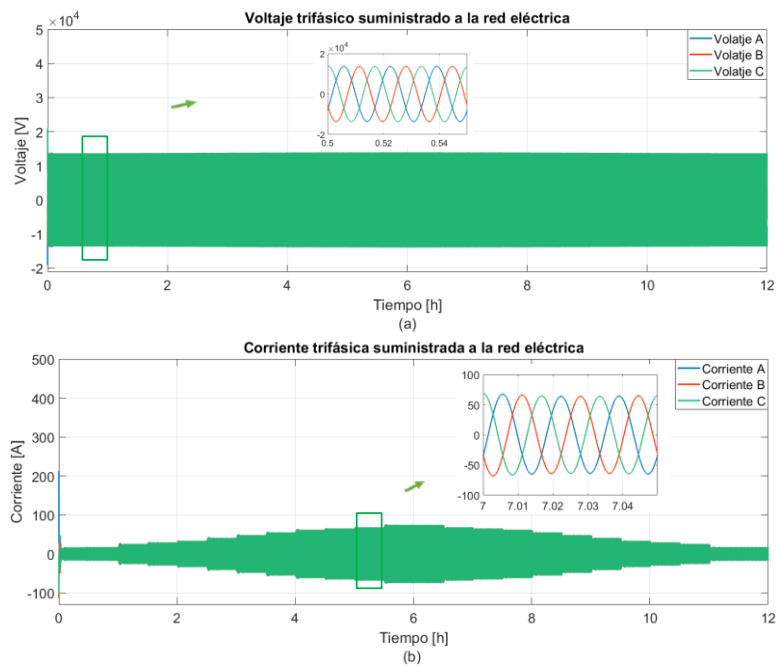
**Figura 3.36.** (a) Voltaje en el bus DC del modelo equivalente, (b) Voltaje en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.37 se presenta la comparación del nivel de corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando un rizado en la corriente del modelo con convertidores debido a la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.37.** (a) Corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente, (b) Corriente circulante en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

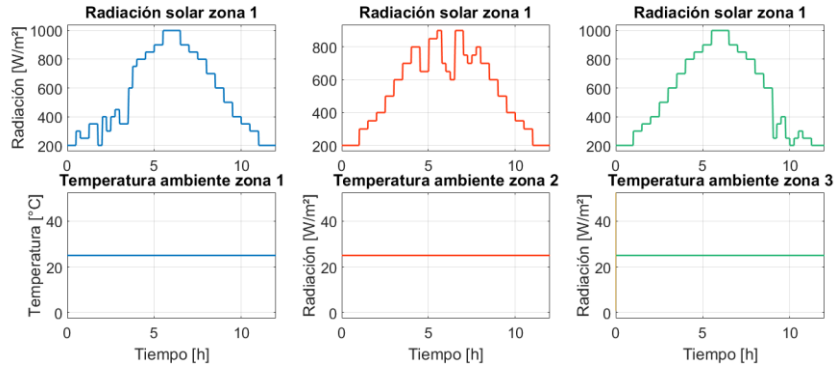
En la Figura 3.38 se observa la corriente y el voltaje trifásicos inyectados a la red eléctrica pública, apreciando que el nivel de corriente generada dependerá principalmente de la cantidad de energía solar incidente en los paneles solares y de la temperatura del ambiente, mientras que el voltaje trifásico permanecerá constante.



**Figura 3.38.** (a) Voltaje trifásico suministrado a la red eléctrica, (b) Corriente trifásica suministrada a la red eléctrica.

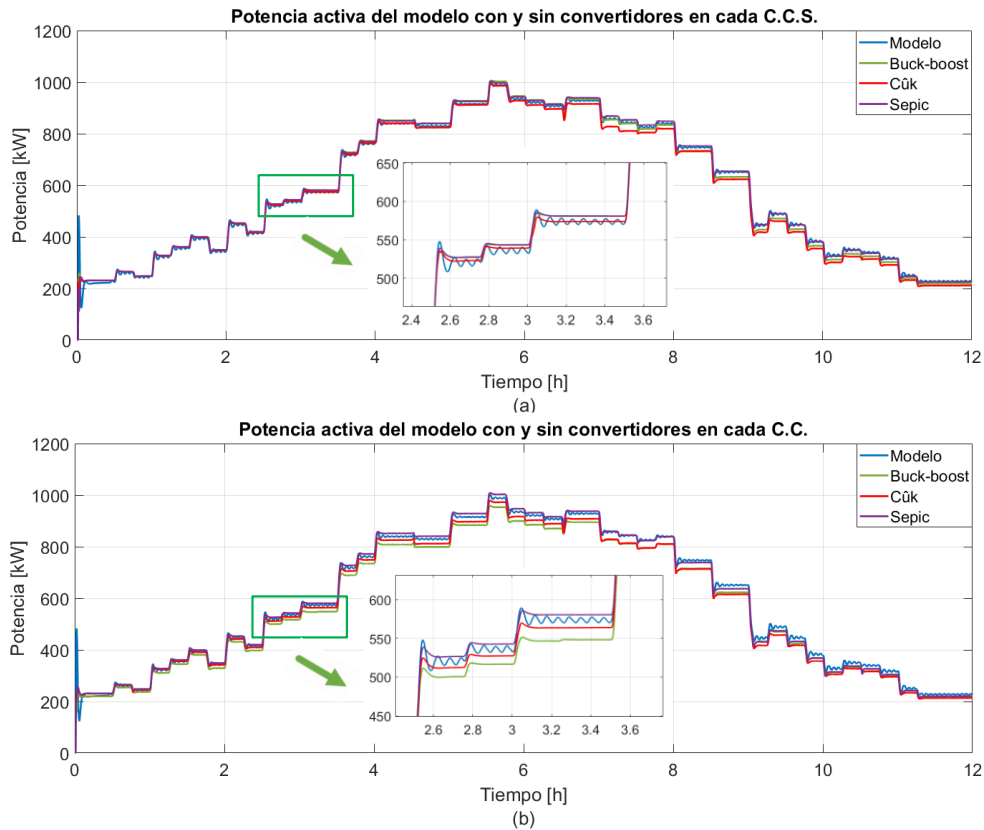
### Perfil de radiación solar con la presencia parcial de sombras.

En la Figura 3.39. se muestra el perfil de radiación solar para cada zona con presencia de sombras parciales y el perfil de temperatura ambiente empleado para esta prueba.



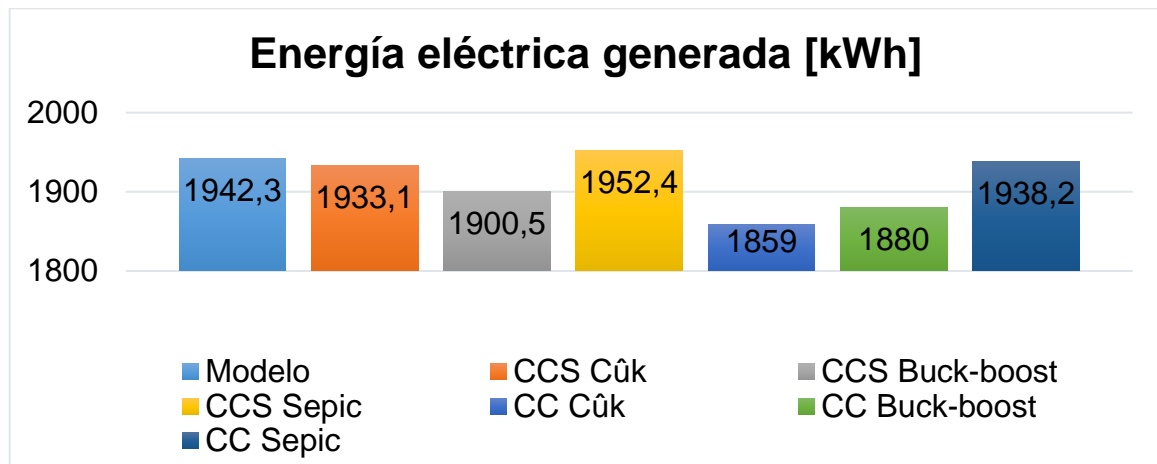
**Figura 3.39.** Perfil de radiación solar y perfil de temperatura ambiente.

La Figura 3.40. muestra la comparación de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema y el modelo con la inserción de las tres topologías de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C.



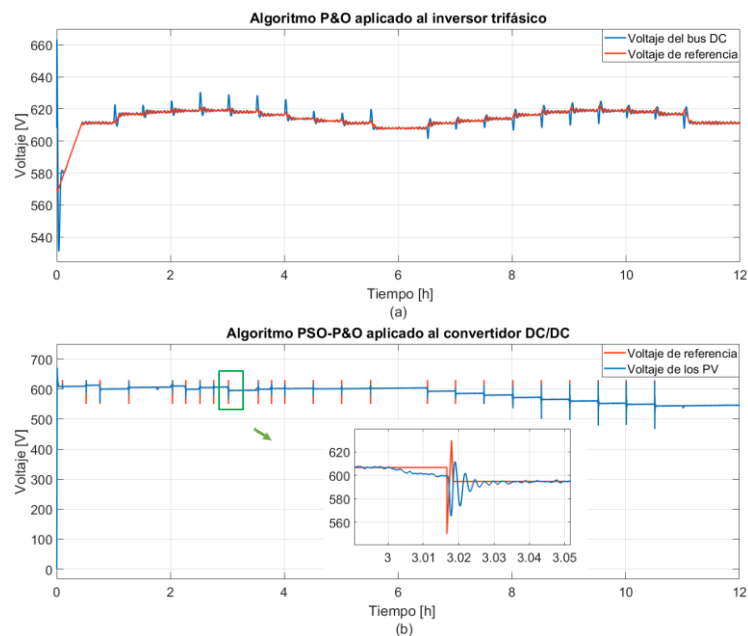
**Figura 3.40.** (a) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.S., (b) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.

En la Figura 3.41. se muestra un esquema gráfico de la cantidad de energía eléctrica generada por el modelo equivalente con y sin la inserción de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C., evidenciando un incremento de 10,1 kWh al comparar el modelo equivalente y el modelo con la inserción de los convertidores sepic a la salida de cada C.C.S.



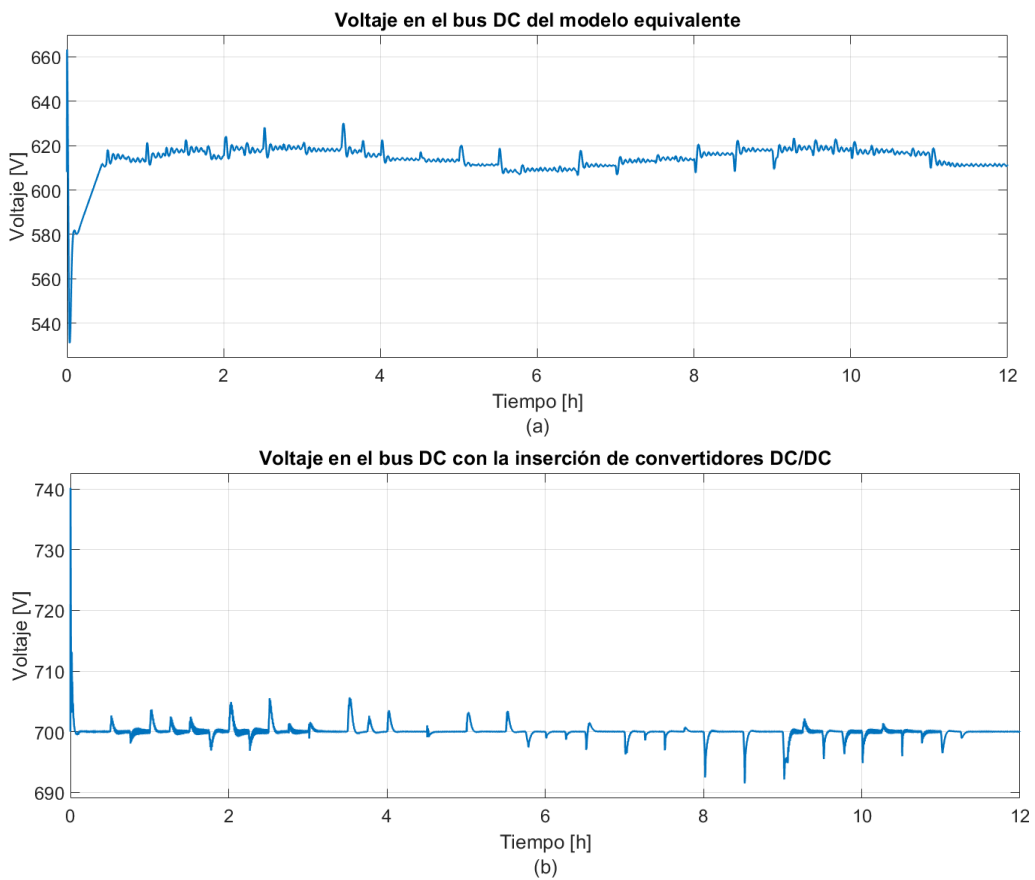
**Figura 3.41.** Energía eléctrica generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC.

La Figura 3.42. muestra el funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor trifásico y el algoritmo PSO\_P&O aplicado al convertidor DC/DC, evidenciando en los dos casos que el voltaje generado por los paneles solares sigue al voltaje de referencia generado por los algoritmos MPPT.



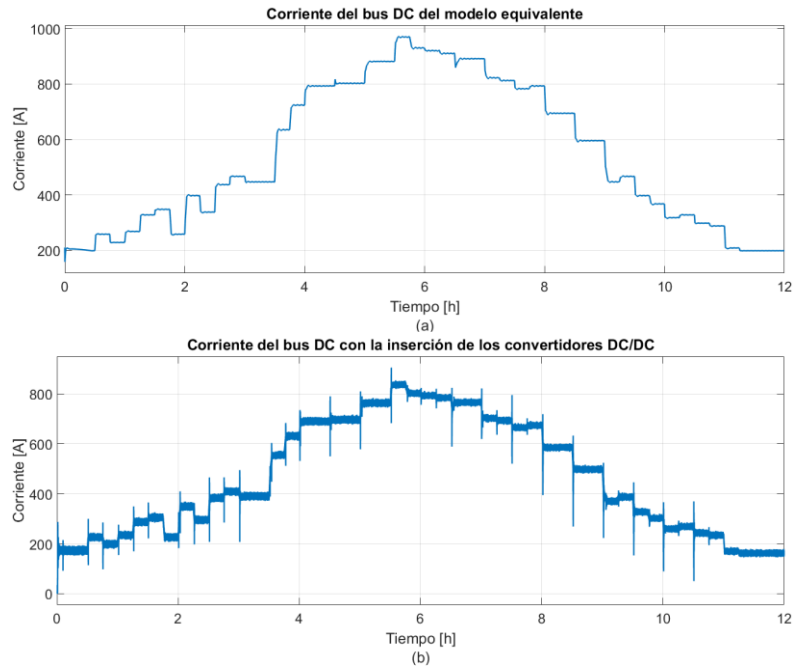
**Figura 3.42.** (a) Funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor, (b) Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O aplicado a los convertidores DC/DC.

La Figura 3.43. muestra la comparación del nivel de voltaje del bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando que el nivel de voltaje en el bus DC del modelo equivalente no permanece constante debido al funcionamiento propio del algoritmo P&O, mientras que el voltaje en el bus DC del modelo con convertidores DC permanece constante debido a la etapa de convertidores adicionales insertados.



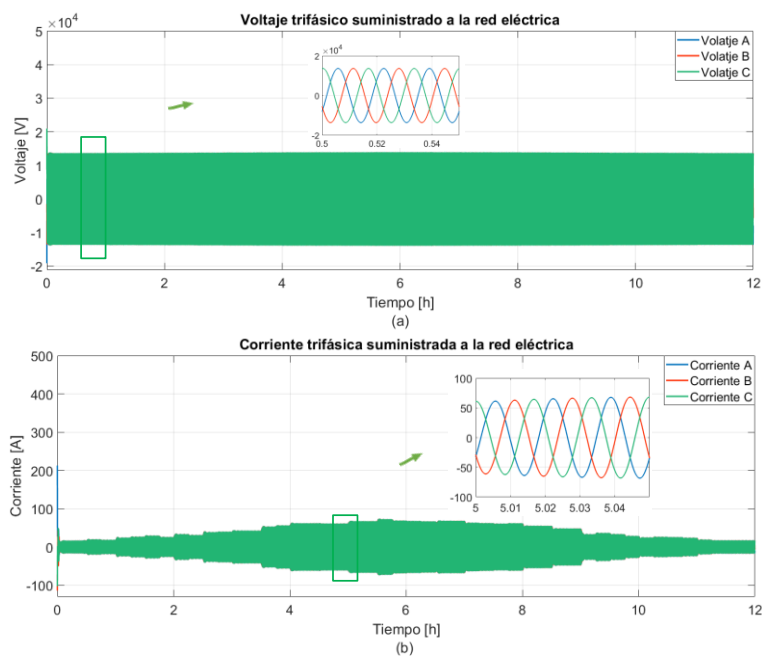
**Figura 3.43.** (a) Voltaje en el bus DC del modelo equivalente, (b) Voltaje en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.44. se presenta la comparación del nivel de corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando variaciones en la corriente del modelo con convertidores debido a la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.44.** (a) Corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente, (b) Corriente circulante en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

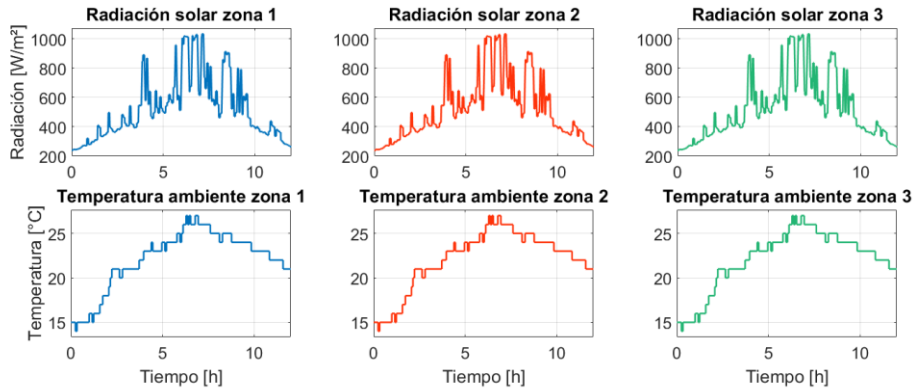
En la Figura 3.45. se observa la corriente y el voltaje trifásicos inyectados a la red eléctrica pública, apreciando que el nivel de corriente generada dependerá principalmente de la cantidad de energía solar incidente en los paneles solares y de la temperatura del ambiente, mientras que el voltaje trifásico permanecerá constante.



**Figura 3.45.** (a) Voltaje trifásico suministrado a la red eléctrica, (b) Corriente trifásica suministrada a la red eléctrica.

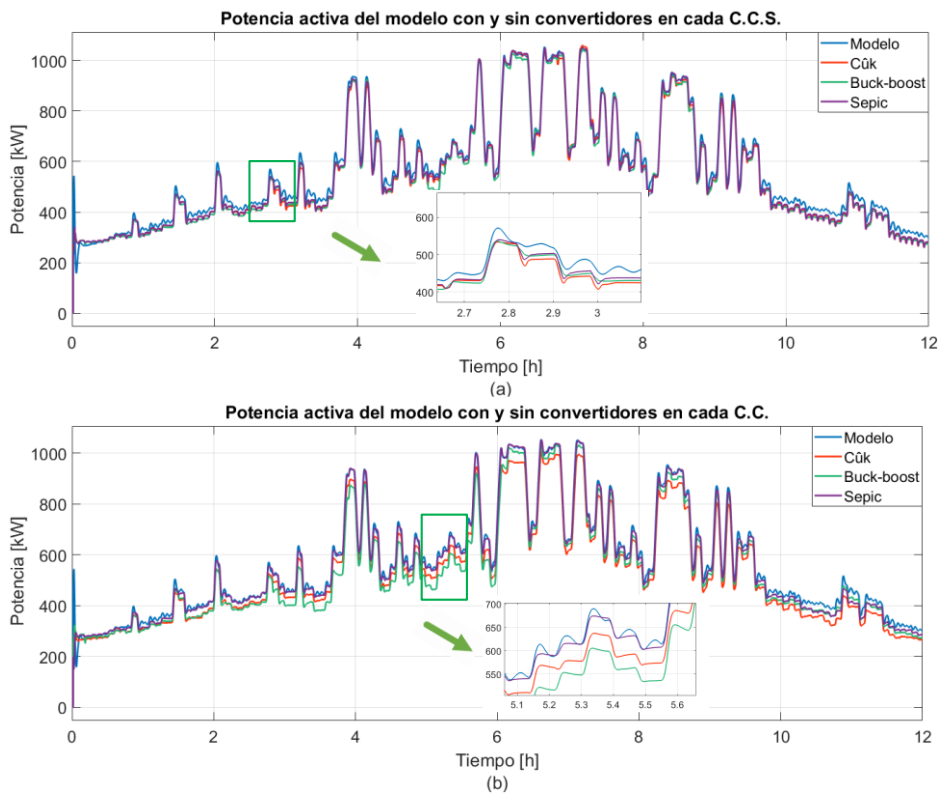
### Perfil de radiación solar en función de datos de la central fotovoltaica

En la Figura 3.46. se muestra el perfil de radiación solar para cada zona con presencia de sombras parciales y el perfil de temperatura ambiente empleado para esta prueba.



**Figura 3.46.** Perfil de radiación solar y perfil de temperatura ambiente.

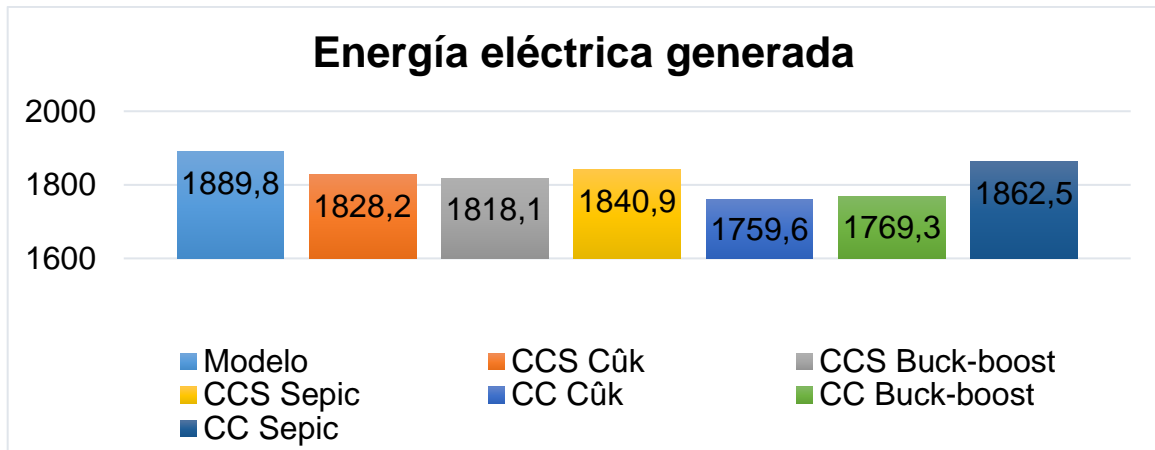
La Figura 3.47. muestra la comparación de la potencia activa generada por el modelo equivalente del sistema y el modelo con la inserción de las tres topologías de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C.



**Figura 3.47.** (a) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.S., (b) Potencia activa generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC en cada C.C.

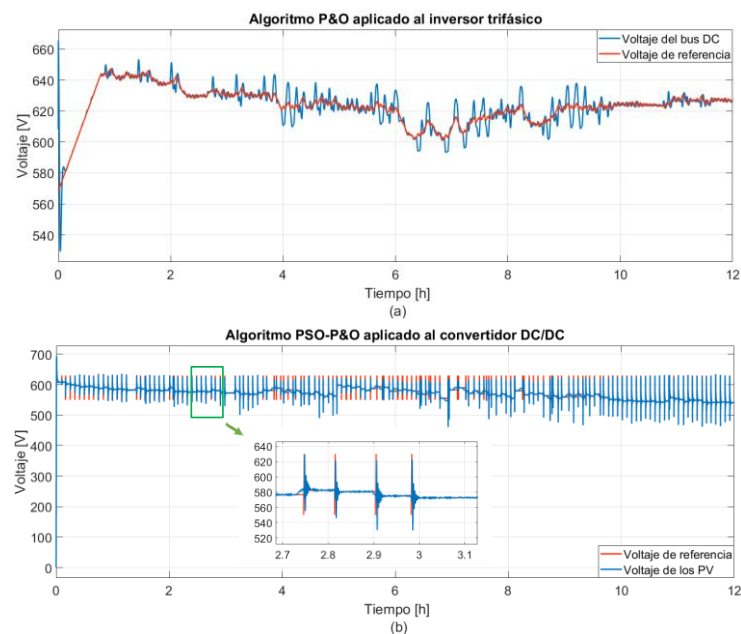


En la Figura 3.48. se muestra un esquema gráfico de la cantidad de energía eléctrica generada por el modelo equivalente con y sin la inserción de convertidores DC/DC en cada C.C.S. y en cada C.C., en este caso se presenta un decremento en la cantidad de energía generada debido a que la dinámica del sistema desarrollado se ve afectado ya que el tiempo entre cada variación de radiación solar y temperatura no permite al algoritmo PSO-P&O buscar y converger en el punto de máxima potencia.



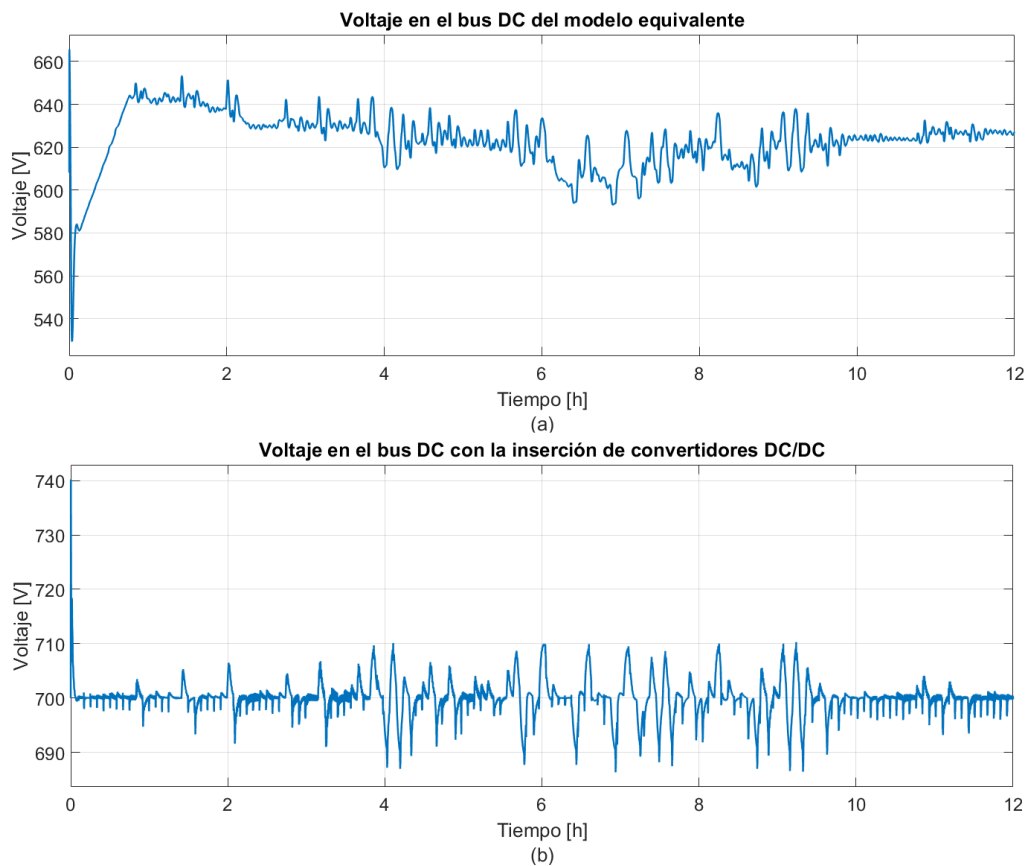
**Figura 3.48.** Energía eléctrica generada por el modelo con y sin convertidores DC/DC.

La Figura 3.49. muestra el funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor trifásico y el algoritmo PSO\_P&O aplicado al convertidor DC/DC, evidenciando que los algoritmos presentan mayores fluctuaciones que ven alterado su funcionamiento.



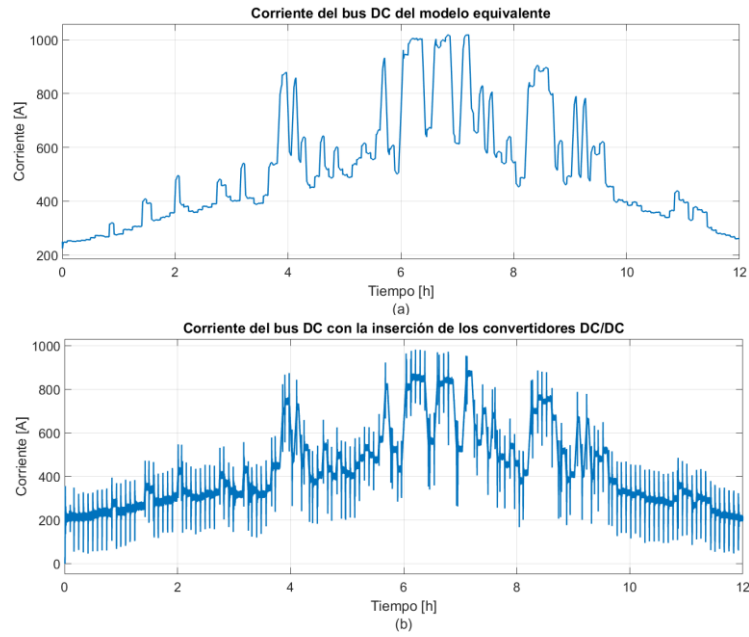
**Figura 3.49.** (a) Funcionamiento del algoritmo P&O aplicado al inversor, (b) Funcionamiento del algoritmo PSO-P&O aplicado a los convertidores DC/DC.

La Figura 3.50. muestra la comparación del nivel de voltaje del bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando que el nivel de voltaje en el bus DC del modelo equivalente no permanece constante debido a los cambios de radiación solar que inciden en los paneles solares, mientras que el voltaje en el bus DC del modelo con convertidores permanece constante debido a la etapa de convertidores DC/DC incluida.



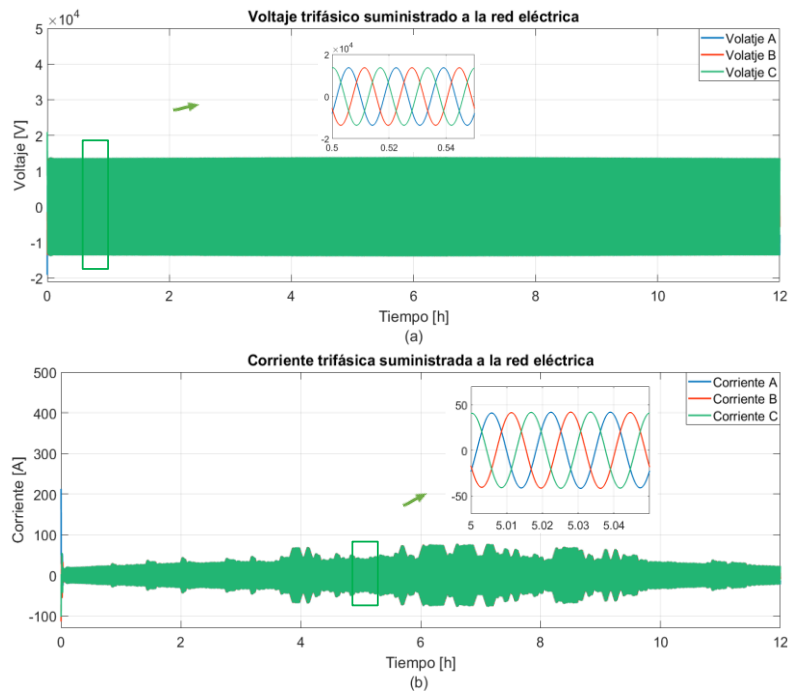
**Figura 3.50.** (a) Voltaje en el bus DC del modelo equivalente, (b) Voltaje en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.51. se presenta la comparación del nivel de corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente con y sin la inserción de los convertidores DC/DC, evidenciando variaciones en la corriente del modelo con convertidores debido a la conmutación del semiconductor de potencia.



**Figura 3.51.** (a) Corriente circulante en el bus DC del modelo equivalente, (b) Corriente circulante en el bus DC del modelo con la inserción de los convertidores DC/DC.

En la Figura 3.52. se observa la corriente y el voltaje trifásicos inyectados a la red eléctrica pública, apreciando que el nivel de corriente generada dependerá principalmente de la cantidad de energía solar incidente en los paneles solares y de la temperatura del ambiente, mientras que el voltaje trifásico permanecerá constante.



**Figura 3.52.** (a) Voltaje trifásico suministrado a la red eléctrica, (b) Corriente trifásica suministrada a la red eléctrica.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- De los resultados arrojados se puede concluir que mediante la inserción de los convertidores DC/DC controlados por un algoritmo MPPT en la etapa de generación de energía eléctrica de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra es posible extraer una mayor cantidad de energía de los paneles solares, evitando así que el panel solar pase a comportarse como carga debido a los cambios climáticos del ambiente.
- En base al estudio de los equipos, topología de conexión y consideraciones constructivas de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra se puede concluir que la central toma en consideración ciertos aspectos que evitan la presencia de pérdidas y mal funcionamiento de los equipos, como por ejemplo la ubicación donde está situada la central fotovoltaica presenta altos niveles de radiación solar perpendiculares a la superficie, así como también mantienen la misma orientación e inclinación de los paneles solares.
- Del estudio teórico realizado y los resultados obtenidos sometiendo al sistema a variaciones de radiación solar y temperatura ambiente se puede concluir que si bien los tres convertidores  $c\grave{u}k$ , sepic y buck-boost se adaptan a trabajar en sistemas fotovoltaicos, los que mejor funcionamiento y resultado presentaron en cuanto a cantidad de energía eléctrica extraída dentro del sistema fotovoltaico son los convertidores  $c\grave{u}k$  y sepic, mientras que la ubicación idónea para insertar los convertidores DC/DC resulta mejor insertar los convertidores a la salida de cada C.C.S.
- Del estudio teórico realizado de las diferentes técnicas de control MPPT, se puede concluir que dependiendo de las facilidades físicas con la que cuenta la central fotovoltaica Salinas de Ibarra se desarrolló y trabajó con un algoritmo híbrido PSO-P&O de tal manera que sea el encargado de buscar y mantener al sistema trabajando en el punto de mayor potencia, evitando que el funcionamiento del sistema se vea severamente afectado con el cambio brusco de las condiciones ambientales.
- En cuanto al control de voltaje y corriente en la entrada de los convertidores DC/DC, se emplea un controlador del tipo PI para el lazo externo de voltaje debido a que la variación de voltaje es lenta y no es necesario trabajar con un controlador más robusto, mientras para el lazo interno de corriente se desarrolla un controlador del

tipo SMC que brinda una robustez a la variación rápida que se presenta en la corriente a la entrada de los convertidores.

- Si bien existe un incremento en la cantidad de potencia activa generada con la inserción de convertidores DC/DC a la etapa de generación de la central fotovoltaica Salinas de Ibarra, el redito económico no es realmente significativo como para decantarse como una alternativa útil para un mejoramiento futuro del sistema.

## **4.2 Recomendaciones**

- Es recomendable tomar cierta atención al método de recolección de información ya que presenta complejidad a la hora de interpretar dichos datos, debido a que las unidades y valores de las magnitudes sensadas no concuerdan con información revisada con anterioridad.
- En el desarrollo del modelo más específicamente en la radiación incidente de los paneles fotovoltaicos se recomienda utilizar el bloque Rate Limiter de Simulink que nos ayuda a generar una cierta rampa de subida y bajada en el perfil de radiación solar, esta consideración se realizó debido a que físicamente la variación de radiación solar no sigue el comportamiento de una señal escalón.
- En cuanto al desarrollo del algoritmo MPPT empleado en el control de los convertidores DC/DC es recomendable interpretar correctamente los valores de las magnitudes medidas por los equipos de medición con los que cuenta la central fotovoltaica y en las curvas de potencia y voltaje de los paneles solares a utilizarse debido a que estos datos nos ayudaran a escoger de mejor manera el número de partículas que se utilizan para la fase de exploración del algoritmo MPPT desarrollado.
- Tomar en consideración que la dinámica propia del sistema se ve afectada ya que el tiempo real de funcionamiento no se asemeja al tiempo de simulación, esto es posible evidenciar al comparar los perfiles de prueba en donde las variaciones de radiación y temperatura no se realizan en tiempos cortos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. A. Laborde y R. Williams, *Energía Solar*, Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2016.
- [2] P. Chen, B. Yan, C. Liu, S. Wang y Y. Liu, «A comparative study on MPPT for photovoltaic generation systems,» *IEEE*, 2015.
- [3] C. Liu, Y. Luo, J. Huang y Y. Liu, «A PSO-based MPPT algorithm for photovoltaic systems subject to inhomogeneous insolation,» *6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, 2012.
- [4] Grupo NAP, *Energías solar fotovoltaica*, Madrid: Colegio oficial ingenieros de telecomunicación, 2002.
- [5] R. Salgado Garciglia, «Saber más revista de divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,» 2013. [En línea]. Available: <https://sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/133-numero-1755/268-paneles-solares-generadores-de-energia-electrica.html>. [Último acceso: 11 Septiembre 2017].
- [6] P. Serrano Yuste, «Certificados energeticos,» 12 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.certificadosenergeticos.com/energia-solar-beneficios-que-efecto-fotovoltaico>. [Último acceso: 11 Septiembre 2017].
- [7] Education, Mc Graw Hill, «Mheducation,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>. [Último acceso: 6 Septiembre 2017].
- [8] S. Fehlandt y K. Salvatierra, *Guía Teórica Experiencia Solar Fotovoltaica*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2009.
- [9] MBA News, «MBA News actualidad y noticias sobre Posgrados y MBA,» 2014. [En línea]. Available: <http://mba-negocios.blogspot.com/2010/09/que-es-la-radiacion-solar-tipos-de.html>. [Último acceso: 6 Septiembre 2017].

- [10] J. M. Méndez Muñiz y R. Cuervo García, *Energía solar fotovoltaica*, Madrid: ECA, Instituto de Tecnología y Formación, 2006.
- [11] E. Ávila Balarezo, *Diseño y simulación de un control en cascada (PI-Deslizante) para los convertidores presentes en una planta virtual de generación de energía eléctrica*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [12] Universidad Jaen, «Curso de energía solar fotovoltaica "cursolar", el Panel Fotovoltaico,» 2011. [En línea]. Available: [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/01\\_generador/01\\_basico/4\\_gene\\_01.htm](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/01_generador/01_basico/4_gene_01.htm). [Último acceso: 06 Septiembre 2017].
- [13] The MathWorks, Inc., «PV Array,» 2015. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>. [Último acceso: 26 Septiembre 2017].
- [14] The Mathworks, Inc, «Algoritmo MPPT,» 2015. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>. [Último acceso: 16 Septiembre 2017].
- [15] I. Yingli Green Energy Americas, «YGE 60 Cell 40mm,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE\\_60\\_Cell\\_Series\\_EN.pdf](http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf). [Último acceso: 26 Septiembre 2017].
- [16] Departamento técnico de SunFields, «Efecto de las sombras en un panel solar fotovoltaico,» 06 11 2016. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/efecto-de-las-sombras-en-un-panel-solar-fotovoltaico/>. [Último acceso: 26 Septiembre 2017].
- [17] SMA Solar Technology, «SUNNY CENTRAL 500CP XT / 630CP XT / 720CP XT / 760CP XT,» [En línea]. Available: <http://files.sma.de/dl/18859/SC500CP-760CP-DES1751-V23web.pdf>. [Último acceso: 16 Septiembre 2017].
- [18] Solar Technology SMA, «TRANSFORMER COMPACT STATION 1000SC / 1250SC / 1600SC,» [En línea]. Available: <http://files.sma.de/dl/18859/SC500CP-760CP-DES1751-V23web.pdf>. [Último acceso: 16 Septiembre 2017].
- [19] T. Orłowska-Kowalska, F. Blaabjerg y J. Rodríguez, *Advanced and intelligent control in power electronics and drives*, New York: Springer, 2014.

- [20] E. Cruz Carrascal y P. de la Fuente Casal, *Inversores en aplicaciones fotovoltaicas*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2012.
- [21] A. Quezada Novoa, *Diseño e implementación de inversor fotovoltaico de bajo costo*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2012.
- [22] F. J. Rodríguez Ramiro, *Comparativa convertidores HVDC-VSC*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2011.
- [23] The MathWorks, Inc., «250-kW Grid-Connected PV Array,» [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/250-kw-grid-connected-pv-array.html?searchHighlight=pv%20array&s\\_tid=doc\\_srchttitle](https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/250-kw-grid-connected-pv-array.html?searchHighlight=pv%20array&s_tid=doc_srchttitle). [Último acceso: 18 Noviembre 2017].
- [24] The MathWorks, Inc, «Three-Phase Transformer (Three Windings),» 2006, [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerthreewindings.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerthreewindings.html?s_tid=doc_ta). [Último acceso: 20 Noviembre 2017].
- [25] The MathWorks, Inc, «Average Model of a 100-kW Grid- Connected PV Array,» [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/average-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html?searchHighlight=power\\_PVarray\\_grid\\_det&s\\_tid=doc\\_srchttitle](https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/average-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html?searchHighlight=power_PVarray_grid_det&s_tid=doc_srchttitle). [Último acceso: 29 Noviembre 2017].
- [26] M. Rashid, *Power Electronics*, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [27] S. Garzón Muñoz, *Análisis de convertidores de potencia DC-DC con software libre openmodelica*, Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército, 2012.
- [28] H. Chamorro, J. Soriano , L. Morales y N. Díaz, *Control óptimo para un conversor buck boost*, Montevideo: 7° Encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas, 2008.
- [29] M. Arteaga, *Control no lineal de convertidores conmutados CC/CC: Análisis de prestaciones y verificación experimental*, Barcelona: Uniersidad Politécnica de Cataluña, 2006.



- [30] J. Flórez Montero , *Diseño y simulación del convertidor CC-CC sepic para la utilización en sistemas portátiles (PDAs)*, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [31] J. Valle Rodríguez, *Análisis y diseño de un controlador para un convertidor DC-DC tipo sepic*, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [32] A. M. Abd el Motaleb, *Seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2010.
- [33] B. Chokri y O. Mohamed, *Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems*, Túnez: Design & Optimization of Complex Systems (ICOS), 2010.
- [34] J. A. Alvarado Rodríguez , J. García Rodríguez, W. Hernández Santos , E. O. Martínez Castillo y J. R. Vidaurri González , *Lógica Difusa*, Nuevo Laredo: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo, 2005.
- [35] I. S. Jiménez Escamilla, *Control de Temperatura de un Horno Eléctrico Mediante Lógica Difusa*, Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2012.
- [36] S. Pukhrem, *Comparative analysis of photovoltaic maximum power point tracking (MPPT) algorithm*, Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2014.
- [37] G. R. Pedrollo, F. B. d. Reis, P. F. S. R. d. Faria, R. C. Viero, G. H. Levin, J. C. M. d. Lima y F. S. d. Reis, «MPPT techniques applied to the control of a module-integrated inverter grid-connected based on Zeta converter for PV panels,» *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, pp. 1-8, Nov 2012.
- [38] N. Cruz de Lima Curral, *Micro inversor para módulo fotovoltaico*, Porto: Universidad do Porto, 2012.
- [39] A. P. Lorandi Medina , G. Hermida Saba , E. Ladrón de Guevara Durán y J. Hernández Silva , *Controladores PID y controladores difusos*, Veracruz: Revista de la Ingeniería Industrial, 2011.
- [40] AQS INDUSTRIAL, «Control PID en variadores de frecuencia,» 27 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://aquisistemas.mx/2016/07/27/pidenvfd/>. [Último acceso: 14 Enero 2018].

- [41] F. De la Cruz y O. Camacho, *Controlador de modos deslizantes basado en predictor de Smith y modelo de segundo orden para procesos con elevado retardo*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [42] J.-J. Slotine y W. Li, *Applied Nonlinear Control*, New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [43] F. López Ramírez, *Construcción de Funciones de Lyapunov para Sistemas Homogéneos de Segundo Orden (Método por Reducción de Variable)*, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [44] J. L. Zambrano, «Dispositivos Electrónica de Potencia,» Centro de Electricidad Electrónica y Telecomunicaciones, Marzo 2012. [En línea]. Available: <http://dispositivoselectronicadepotencia.blogspot.com/>. [Último acceso: 24 Febrero 2018].
- [45] M. Marcos y I. Cabanes, «Sistemas de orden superior: Identificación de modelo de POMTM. Estabilidad y régimen permanente de sistemas realimentados,» 2005. [En línea]. Available: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Laboratorio%20de%20control%20de%20Procesos/Planta%20Presion/Presion%20by%20Jose-Ximena/memoria/iNFORMES/pomtm/Practica3.pdf>. [Último acceso: 11 Enero 2018].
- [46] V. Alfaro, *Método de identificación de modelos de orden reducido de tres puntos 123c*, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2007.
- [47] A. Sarmiento Sera, «Una unidad de medida que comienza a conocer los cubanos beneficiados con instalaciones solares fotovoltaicas,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.htm>. [Último acceso: 27 Noviembre 2018].
- [48] CONELEC, «Corporación para la Investigación Energética,» [En línea]. Available: <http://energia.org.ec/cie/wp-content/uploads/2017/09/AtlasSolar.pdf>. [Último acceso: 24 Febrero 2018].
- [49] INAMHI, «Instituto Nacional de Metereología e Hidrología,» [En línea]. Available: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/MapasBiblioteca/3%20Irradiacion%20global\\_A0.pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/MapasBiblioteca/3%20Irradiacion%20global_A0.pdf). [Último acceso: 24 Febrero 2018].

## 6. ANEXOS

### ANEXO I. Manual de Usuario

#### Requerimientos para la simulación

El sistema está desarrollado en su totalidad en el software Matlab/Simulink por lo que es necesario cumplir con los siguientes requerimientos:

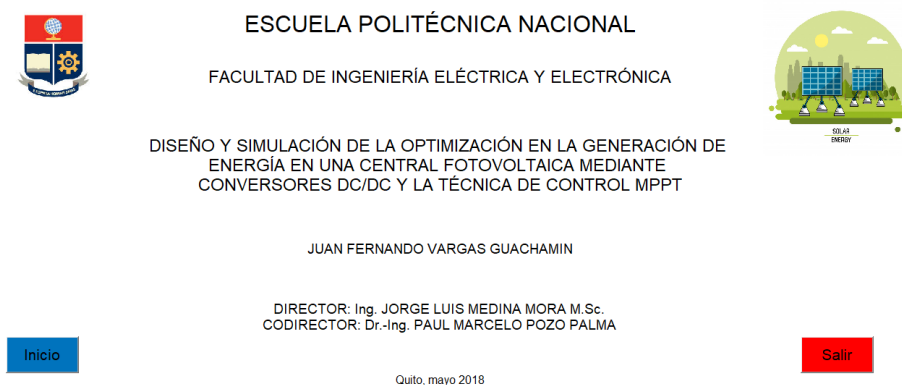
- Computador que contenga instalado el programa Matlab versión 2017a en adelante.
- Herramientas de Microsoft Office (Excel).
- Todos los archivos se deben encontrar en una carpeta común.

#### Descripción general del sistema

El sistema desarrollado cuenta con una interfaz gráfica que ayuda a la comprensión e interpretación de los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas.

#### Funcionamiento de la interfaz gráfica

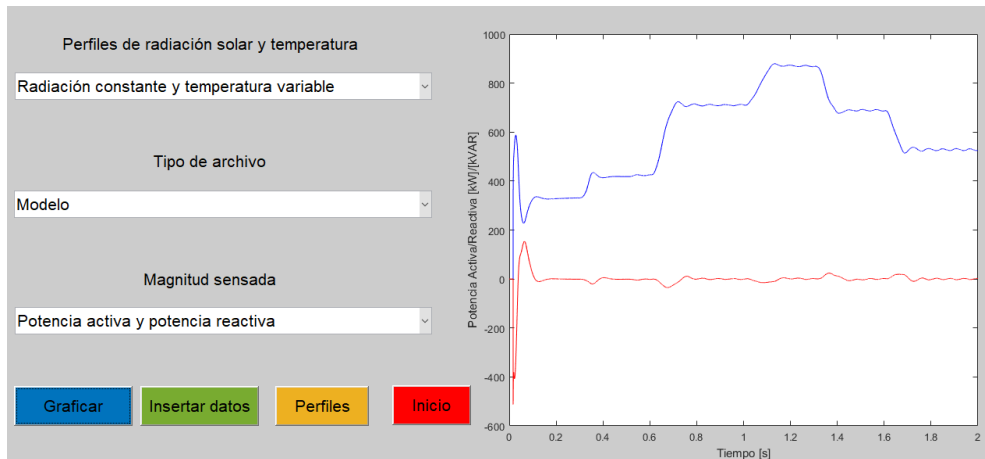
El inicio de la interfaz gráfica se realiza ejecutando el archivo “Cargar\_datos.m”. La primera pantalla presente en la Figura I.1. muestra una caratula del trabajo realizado. Además, contiene un botón “Inicio” que al ser pulsado da inicio a la presentación de resultados y un botón “Salir” que permite cerrar toda la interfaz.



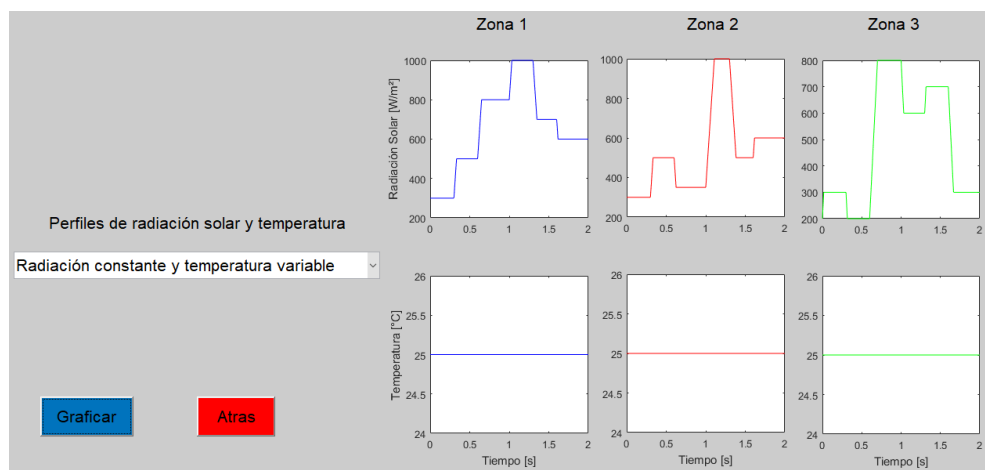
**Figura I.1.** Caratula de la interfaz gráfica.

Una vez inicie la interfaz, en la Figura I.2. se muestra los perfiles de radiación solar, temperatura ambiente y el tipo de simulación realizada en este trabajo, brindando al usuario la libertad de escoger que resultados desea visualizar. Así como también, se presentan un

botón “Insertar datos” que permiten al usuario insertar parámetros a su gusto para probar el funcionamiento del sistema. Además, presenta un botón “Perfiles” que muestra los perfiles de radiación y temperatura incidentes en cada zona de arreglos de paneles solares como se observa en la Figura I.3.



**Figura I.2.** Visualización de resultados obtenidos.

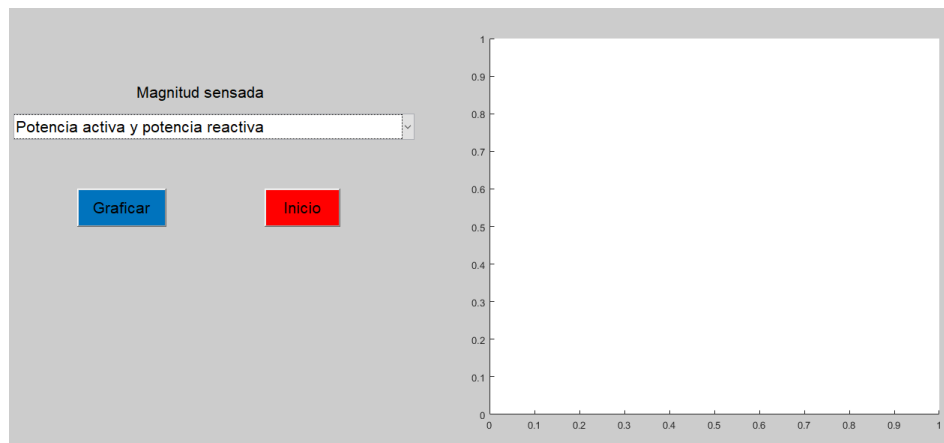


**Figura I.3.** Perfiles de radiación solar y temperatura.

Una vez seleccionado el perfil y el tipo de archivo que simular de la Figura I.2, el usuario puede observar los resultados al presionar el botón “Graficar”. Si el usuario presiona “Insertar datos” la interfaz dirige al usuario a la pantalla de la Figura I.4. permitiendo introducir datos de tiempo, radiación, temperatura y variables utilizadas en los algoritmos MPPT.

**Figura I.4.** Visualización de resultados.

Una vez insertados los datos el usuario debe cargar esta información mediante el botón “Cargar datos”. El siguiente paso es ejecutar manualmente el archivo “datos\_insertados.m” que permite cargar las variables no modificables del sistema. Una vez cargados todos los datos el usuario deberá escoger el tipo de simulación que desea realizar, ya seleccionada la opción anterior debe dirigirse al botón “Simular” que le dará acceso al archivo de Simulink escogido y le enviará a la pantalla de la Figura I.5, el paso siguiente será ejecutar el archivo de Simulink. Ya ejecutado completamente el archivo de Simulink el usuario puede escoger que magnitud sensada quiere visualizar y graficar mediante el botón “Graficar”.



**Figura I.5.** Insertar datos por parte del usuario.

**Nota.** – Si el usuario selecciona insertar datos, el sistema demorara en presentar los resultados obtenidos de acuerdo con el tiempo que demore ejecución de la simulación de los archivos de Simulink.

## ANEXO II.

### Diagrama de flujo del algoritmo PSO-P&O

En la figura II.1. se presenta el diagrama de flujo del algoritmo PSO-P&O desarrollado para encontrar el punto de máxima potencia.

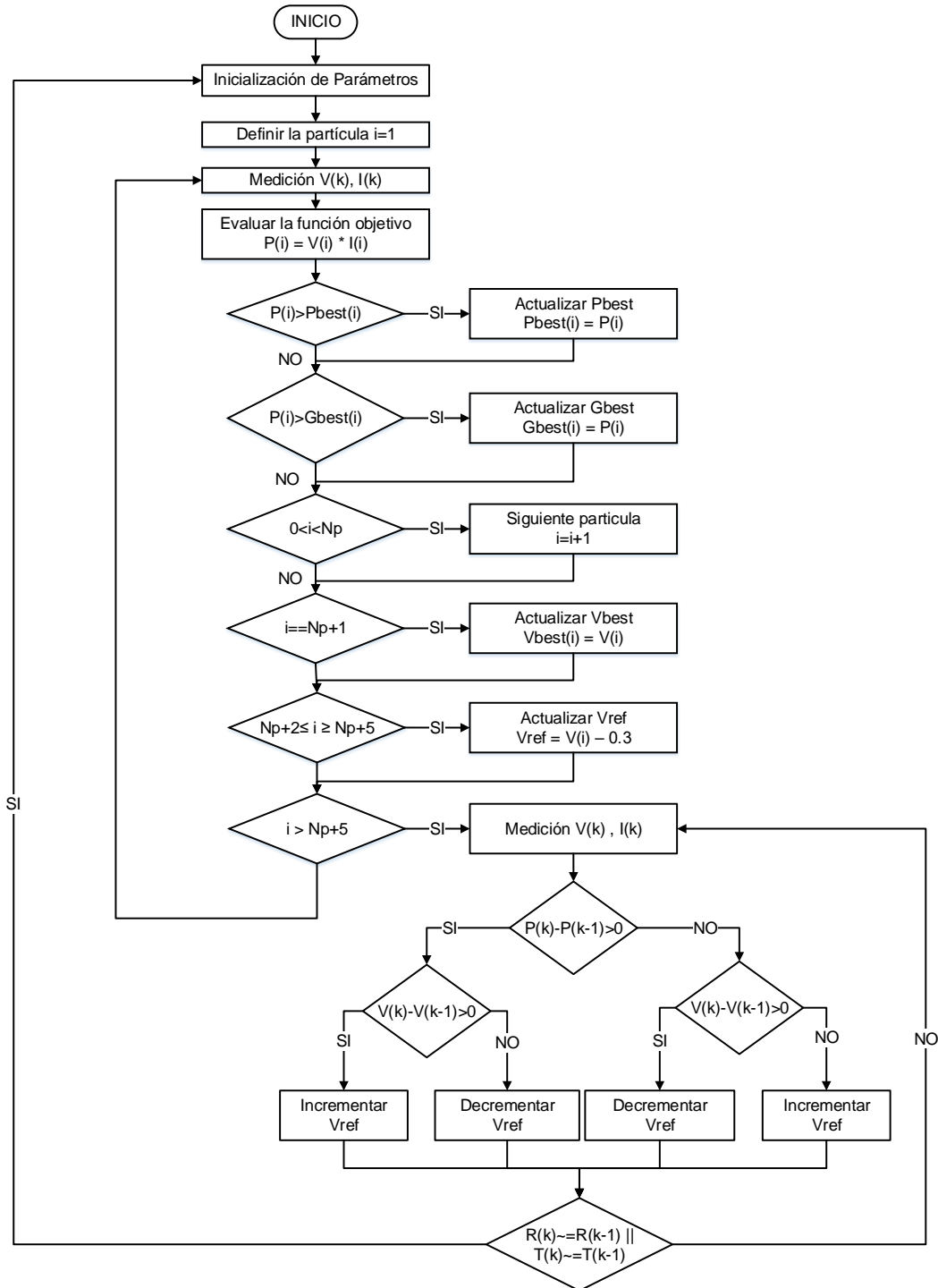


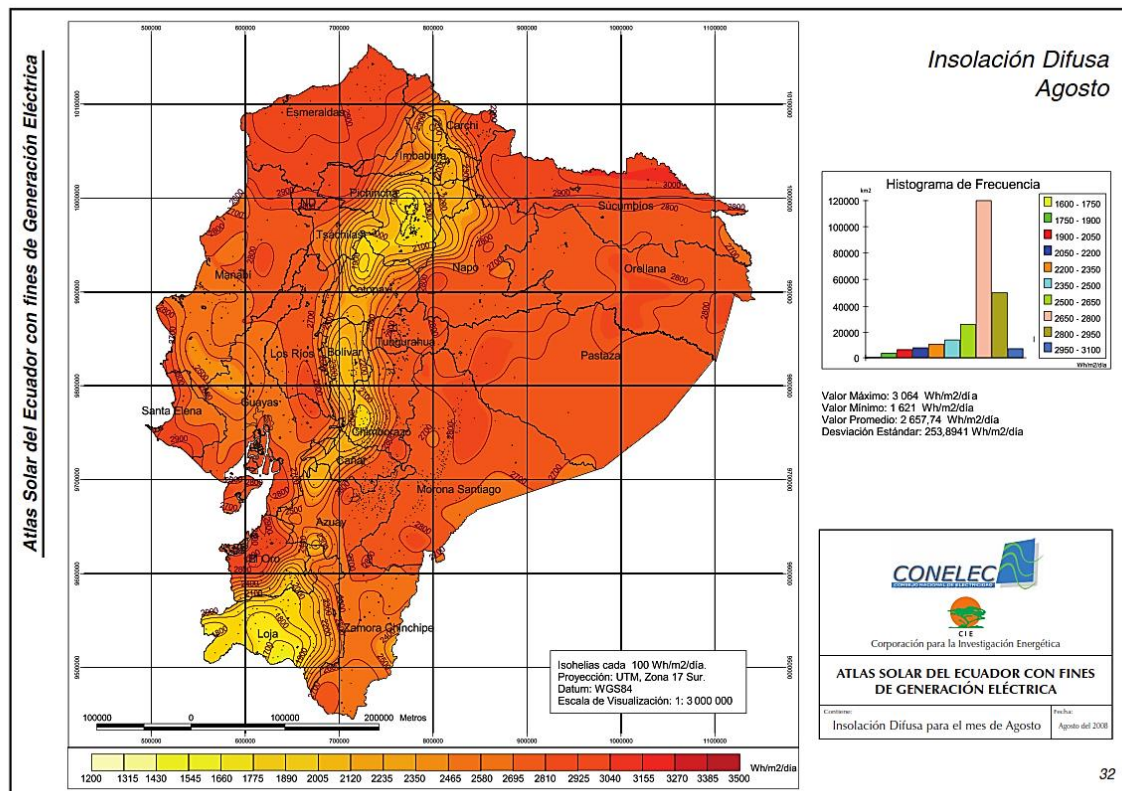
Figura II.1. Diagrama de flujo del algoritmo PSO-P&O.

Siendo:

- $V(k)$ : Medición actual de voltaje.
- $V(k-1)$ : Medición anterior de voltaje.
- $I(k)$ : Medición actual de corriente.
- $P(k)$ : Medición actual de potencia.
- $P(k-1)$ : Medición anterior de potencia.
- $V_{ref}$ : Voltaje de referencia deseado.
- $i$ : Partícula.
- $P(k-1)$ : Medición anterior de potencia.
- $V_{ref}$ : Voltaje de referencia deseado.
- $R(k)$ : Radiación solar actual.
- $R(k-1)$ : Radiación solar anterior.
- $T(k)$ : Temperatura ambiente actual.
- $T(k-1)$ : Temperatura ambiente anterior.

## ANEXO III. Atlas solar “CONELEC”

En la Figura III.1. se presenta la irradiación solar difusa del mes de agosto del 2008 incidente en el Ecuador.



**Figura III.1.** Irradiación solar difusa mes de agosto 2008.



En la Figura III.2. se presenta la irradiación solar directa del mes de agosto del 2008 incidente en el Ecuador.

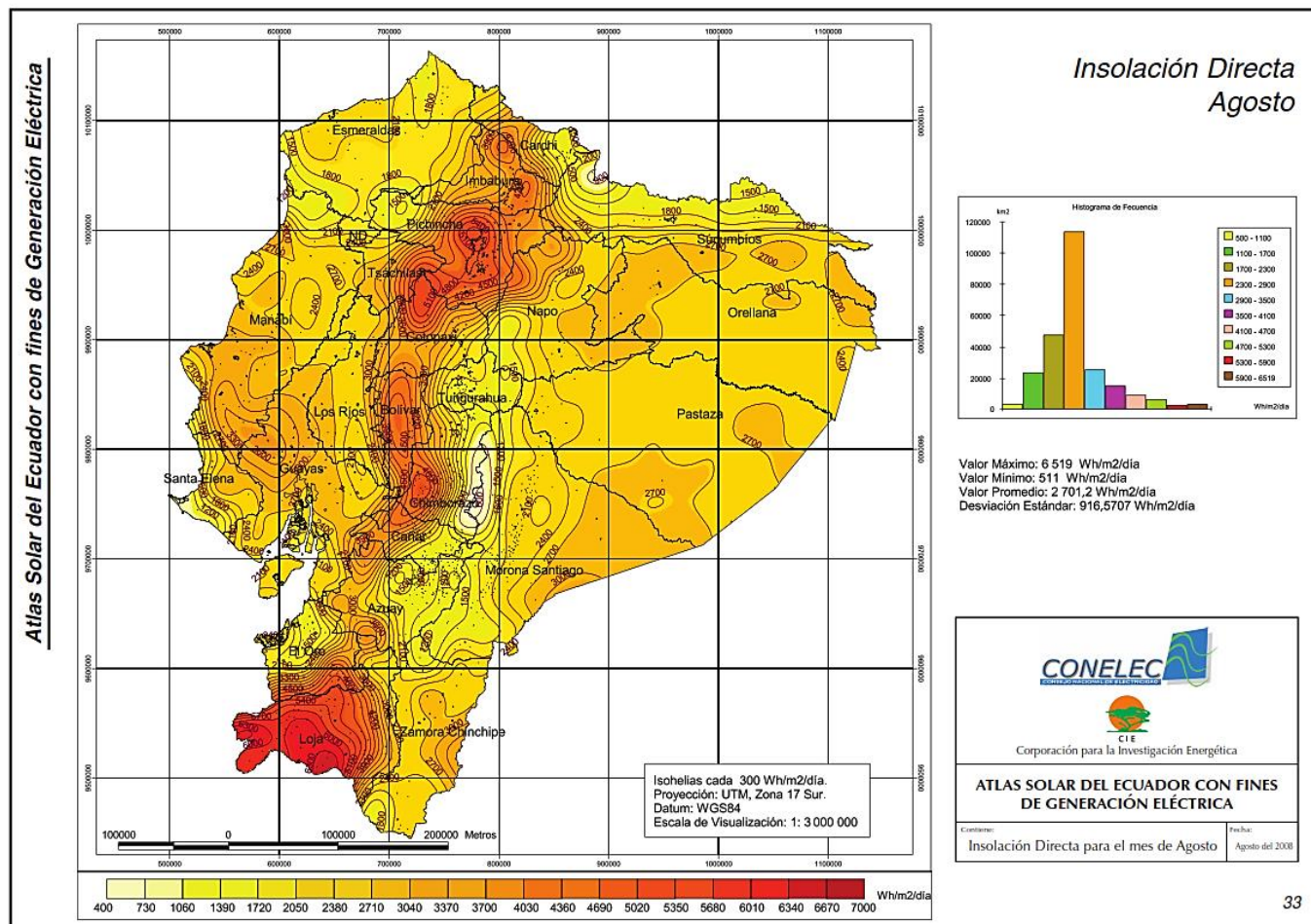


Figura III.2. Irradiación solar directa mes de agosto 2008.

En la Figura III.3. se presenta la irradiación solar global del mes de agosto del 2008 incidente en el Ecuador.

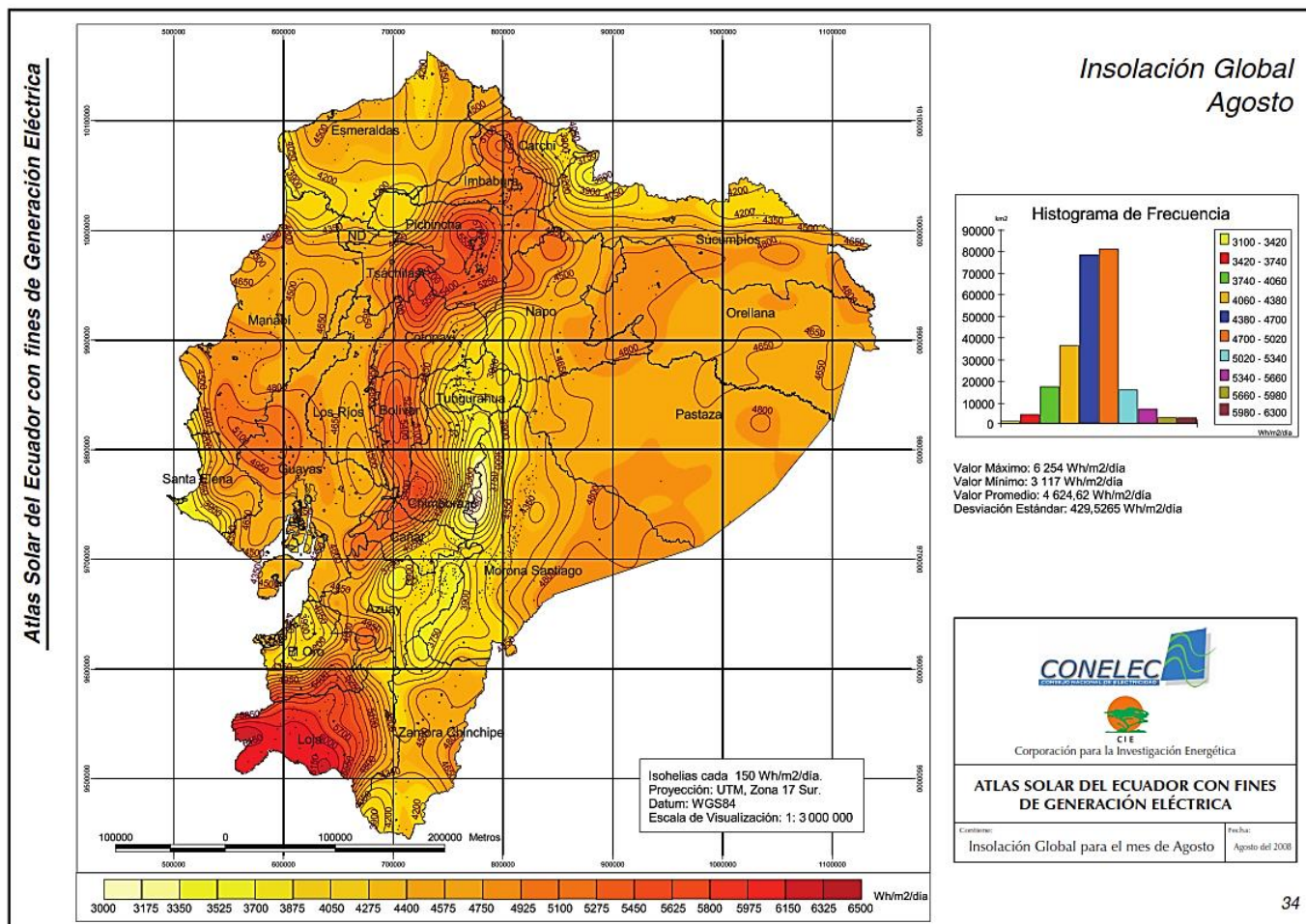


Figura III.3. Irradiación solar global mes de agosto 2008.

## ANEXO IV.

### Mapa de irradiación solar global “INAHMI”

En la Figura IV.1. se presenta el mapa de irradiación solar del Ecuador desarrollado por el INAHMI.

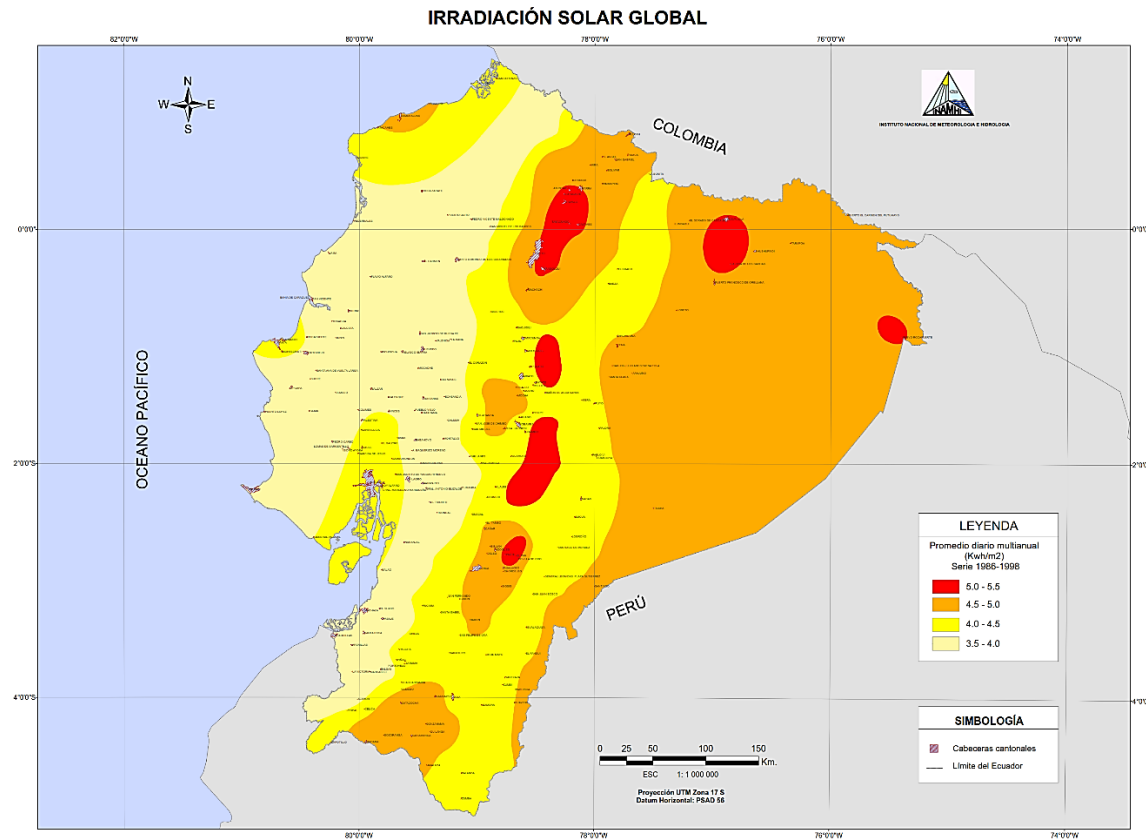


Figura IV.1. Mapa de irradiación solar del Ecuador.

## **ORDEN DE EMPASTADO**