

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR SEPIC PARA EL SEGUIMIENTO DEL
PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR SEPIC PARA EL SEGUIMIENTO DEL
PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar
El Título de Magister en Ingeniería Electrónica**

Director

MIE. Jaime Guillermo Barrero Pérez

Codirectora

MIE. María Alejandra Mantilla

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

Agradecimientos

Gracias totales a mí Dios y señor Jesucristo, Familia, Directores del proyecto de investigación y compañeros.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. IRRADIANCIA Y TEMPERATURA DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA.....	18
2. CONVERTIDOR SEPIC.	21
2.1 MODELO A PEQUEÑA SEÑAL DEL CONVERTIDOR SEPIC	23
2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR SEPIC.	28
2.3 ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR CON LOS PARÁMETROS SELECCIONADOS.....	31
3. SIMULACIÓN DEL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.	33
3.1 ALGORITMO DE PERTURBAR Y OBSERVAR (P&O)	35
3.2 ALGORITMO P&O CON RED DE COMPENSACIÓN	39
3.3 MÉTODO PROPUESTO: OBSERVAR, COMPARAR Y PERTURBAR (OC&P).....	44
3.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MÉTODO POPUESTO: OBSERVAR, COMPARAR Y PERTURBAR (OC&P)	52
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	54
4.1 PROTOTIPO EXPERIMENTAL	54
4.1.1 Paneles Fotovoltaicos:	55
4.1.2 Etapa de sensado:	56
4.1.3 Procesador Digital de Señales:.....	56
4.1.4 Computador:	56
4.1.5 Circuito de disparo:	57
4.1.6 Convertidor SEPIC:.....	57
4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ALGORITMO P&O CLÁSICO.....	59
4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TÉCNICA P&O CLÁSICA Y LA TÉCNICA P&O CON RED DE COMPENSACIÓN.	60

5. CONCLUSIONES	64
5.1. PUBLICACIÓN REALIZADA	65
5.2. TRABAJOS CO-DIRIGIDOS.....	65
CITAS.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	74

LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1.Etapas del sistema fotovoltaico conectado a la red	16
Figura 2.Metodología realizada en el trabajo de investigación.	17
Figura 3.Radiación máxima de Piedecuesta entre Junio y Diciembre del año 2015	18
Figura 4.Radiación del 21 de junio-2015 (fecha de la radiación máxima mensual).	19
Figura 5.Temperatura máxima estación UPB Piedecuesta entre Junio y Diciembre del año 2015	20
Figura 6. Convertidor SEPIC.....	23
Figura 7. Modo 1 de operación con resistencias parasitas, mientras el transistor conduce.	24
Figura 8. Modo 2 de operación con resistencias parasitas, mientras el diodo conduce.	24
Figura 9. Diagrama de bode de la función de transferencia G_u del convertidor SEPIC	32
Figura 10. Esquemático del circuito considerando el algoritmo para la búsqueda de máxima potencia del arreglo fotovoltaico	35
Figura 11. Búsqueda del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O.	36

Figura 12. Diagrama de flujo de la técnica P&O.	37
Figura 13. Curvas de Potencia de los paneles fotovoltaicos a 31°C, $P_3=300 \text{ w/m}^2$, $P_2= 600 \text{ w/m}^2$, $P_1= 900 \text{ w/m}^2$	38
Figura 14. Búsqueda de potencia mediante P&O:($0<t<1\text{s}$) 300W/m^2 , ($1\leq t<2\text{s}$) 900W/m^2 , ($2\leq t<3\text{s}$) 600W/m^2	39
Figura 15. Esquemático para la búsqueda de máxima potencia con red de compensación.....	40
Figura 16. Modelo a pequeña señal de la red de compensación.....	41
Figura 17. Diagrama de bode de la función de transferencia de lazo abierto $-G_d*G_c$	42
Figura 18 Diagrama de bode de la función de transferencia $G_{lc}(s)$ y de $G_u(s)$	43
Figura 19. Búsqueda de potencia mediante P&O con red de compensación: ($0<t<1\text{s}$) 300W/m^2 , ($1\leq t<2\text{s}$) 900W/m^2 , ($2\leq t<3\text{s}$) 600W/m^2	44
Figura 20. Diagrama de flujo de la técnica OC&P.....	48
Figura 21. Búsqueda del máximo punto de potencia mediante el algoritmo OC&P, para un arreglo de tres paneles solares conectados en serie bajo condiciones de sombras parciales.....	49
Figura 22. Caso 1: Curvas características de Potencia-Tensión para el generador fotovoltaico en los intervalos de tiempo: a.) $0\leq t\leq 1$ [s]. b). $1<t\leq 2$ [s].....	50
Figura 23 Caso 2: Curvas características de Potencia-Tensión para el generador fotovoltaico en los intervalos de tiempo: a.) $0\leq t\leq 1$ [s]. b). $1<t\leq 2$ [s].....	50

Figura 24. Caso 1: Seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica OC&P.....	52
Figura 25Caso 2: Seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica OC&P.....	53
Figura 26.Diagrama de bloques del sistema implementado (en línea continua)....	54
Figura 27. Paneles instalados en el parque tecnológico de Guatiguará	55
Figura 28.Panel de conexión de la dSPACE.	57
Figura 29. Eficiencia del convertidor SEPIC para diferentes cargas a diferentes ciclos de trabajo.	58
Figura 30Convertidor SEPIC experimental.	58
Figura 31Potencia entregada de la técnica P&O mediante simulación.....	59
Figura 32Potencia entregada de la técnica P&O del prototipo experimental.	60
Figura 33. tensiones de salida del convertidor SEPIC. (Cada capacitor en serie 230[V])	61
Figura 34.Tensión del sistema fotovoltaico mediante P&O sin red de compensación.....	61
Figura 35.Tensión del sistema fotovoltaico mediante P&O con red de compensación.....	62
Figura 36.Potencia del sistema fotovoltaico mediante P&O sin red de compensación.....	62
Figura 37.Potencia del sistema fotovoltaico mediante P&O con red de compensación.....	63
Figura 38Diagrama de conexión del sensor LV 25-P.....	75

Figura 39.Diagrama de conexión para el sensor LA 25-NP76

Figura 40.Circuito Impreso de la etapa de medición.....76

Figura 41. Tarjeta de conmutación.77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Irradiancia y temperatura de Piedecuesta comprendidas entre junio y diciembre del año 2015.....	20
Tabla 2.comparación de diferentes convertidores en aplicaciones fotovoltaica basada en [3].	22
Tabla 3.Rangos de operación del convertidor.	29
Tabla 4.Valores asumidos del convertidor SEPIC.	29
Tabla 5.Dimensionamiento del convertidor SEPIC.	30
Tabla 6.Técnicas de uso frecuente para el seguimiento del punto de máxima potencia.	34
Tabla 7.Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos. ...	49
Tabla 8.Características eléctricas del sistema fotovoltaico	55

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR SEPIC PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

AUTOR: JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA

PALABRAS CLAVES: convertidor SEPIC, MPPT, sistemas fotovoltaicos.

En el presente trabajo de investigación, se realiza la implementación de la etapa de conversión DC-DC para un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Esta etapa de conversión está conformada por cuatro sistemas principales: circuito de disparo, convertidor SEPIC, sistema de medición y sistema de control.

En lo que respecta al sistema de control, éste se enfoca en garantizar la operación del generador fotovoltaico en el punto de máxima potencia. En este trabajo se implementaron, en una tarjeta de control digital, dos técnicas para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT): la técnica de perturbar y observar (P&O) tradicional y la técnica P&O con red de compensación. La red de compensación es diseñada buscando disminuir las variaciones de tensión en los paneles debido a oscilaciones en el capacitor de salida del convertidor SEPIC, para aumentar la vida útil de los paneles y la eficiencia del sistema.

Además, se propuso un nuevo algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia bajo condiciones de sombras parciales, es decir, las sombras parciales ocurren algunos paneles del arreglo fotovoltaico presentan diferentes radiaciones respecto a los demás paneles, la anterior situación conlleva a la presencia de máximos locales de potencia en la curva potencia-tensión del arreglo fotovoltaico, el objetivo del algoritmo es encontrar el máximo global de potencia y evitar la oscilación en máximos locales. El funcionamiento del algoritmo propuesto se verificó mediante simulaciones en el *software* PSIM.

En este trabajo también se describe el dimensionamiento, diseño y análisis de los diferentes componentes de la etapa de conversión DC-DC. El funcionamiento de la etapa se verificó en simulación en el *software* PSIM y los resultados obtenidos en la implementación corroboran el correcto funcionamiento de la etapa al operar integrada a un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

Proyecto de Maestría
Facultad de ingenierías Fisicomecánicas Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director: MIE. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirectora: MIE. María Alejandra Mantilla

ABSTRACT

TITLE: SEPIC CONVERTER IMPLEMENTATION FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING IN PHOTOVOLTAICS SYSTEMS

AUTHOR: JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA

KEYWORDS: SEPIC converter, MPPT, photovoltaic systems.

This work presents the implementation of a DC-DC conversion stage for a grid-tied photovoltaic system. This stage has four main systems: switching circuit, SEPIC converter, measurement system and control system.

Regarding the control system, this is focused on tracking the maximum power point in the PV generator. This research considers two techniques for this purpose: the 'perturb and observe' (P&O) and the P&O with compensation network. These techniques are implemented in a digital controller board. The compensation network reduces voltage variations in the solar panels due to oscillations in the output capacitor voltage of the SEPIC converter in order to increase the useful life of the solar panels and improve the system efficiency.

In addition, this research presents a new algorithm for the maximum power point tracking under partially shaded conditions, therefore, some panels of array photovoltaic have different radiation of the others panels, the previous situation include local maximums power in the graphic power-voltage, the main goal of the proposed algorithms is to find the global maximum power point and avoid the oscillation in local maximums. Simulations on PSIM verify this technique.

This document describes the sizing, design and analysis of the DC-DC conversion stage. The behavior of the system is verified through simulation on software PSIM and experimental results when the DC-DC conversion stage is integrated to a grid-tied photovoltaic system.

Master project

Physical-mechanical engineering faculty. School of Electrical, Electronics and Telecommunications.
Directors: MIE. Jaime Guillermo Barrero Pérez and MIE. María Alejandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de maestría hace parte de una tesis doctoral realizada en el grupo GISEL de la UIS¹. En términos generales, la tesis doctoral aborda el estudio de sistemas de generación fotovoltaica conectadas a la red. Principalmente está compuesta de 3 etapas (ver figura 1): etapa de conversión DC-DC, etapa inversora y etapa de filtrado.

La etapa de conversión DC-DC, permite que los paneles entreguen la máxima potencia del arreglo fotovoltaico, mediante la variación del ciclo de trabajo del convertidor y el uso de algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia.

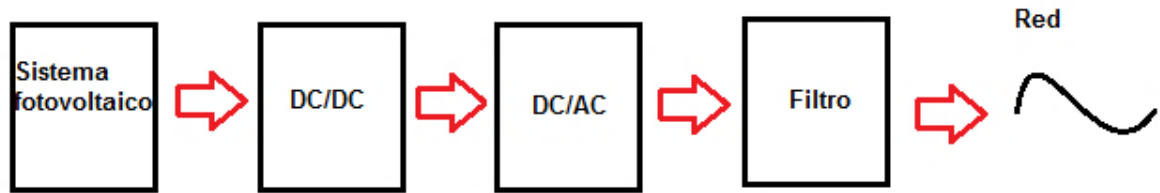
La etapa de inversión, es la encargada de generar las corrientes de referencia para inyectar a la red, controlar el ciclo de trabajo para la conmutación del inversor y mantener la tensión de salida del convertidor DC-DC constante (460 V), a un valor de tensión mayor que la tensión de línea de la red.

La etapa de filtrado consiste en eliminar armónicos causadas por cargas no lineales y mejorar la calidad de la energía suministrada a la red.

El presente proyecto de investigación se centra en el diseño, simulación e implementación de la etapa de conversión DC-DC, la cual está compuesta por el circuito de disparo, el convertidor DC-DC, sistema de sensado y sistema de control.

¹ M. Mantilla. "Control de generadores fotovoltaicos con funciones de filtrado activo en sistemas trifásicos distorsionados y desequilibrados". Tesis de doctorado. Universidad Industrial de Santander. Actualmente en desarrollo.

Figura 1. Etapas del sistema fotovoltaico conectado a la red



El convertidor DC-DC diseñado, simulado e implementado corresponde a la topología SEPIC (*Single-ended primary-inductance converter*), este convertidor puede elevar o reducir la tensión de entrada, tal como la topología *buck-boost*, *cuk*, *Flyback* pero se diferencia de dichas topologías, por no presentar inversión en la tensión de salida y presentar algunas ventajas respecto a las demás, tal como se exponen en el capítulo 2.

El sistema de control permite la máxima entrega de potencia del generador fotovoltaico a partir del uso de algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia "*Maximum Power Point Tracking*" (MPPT). Con el MPPT se calcula la potencia que entregan los paneles en el instante presente y en un instante anterior, se varia el ciclo de trabajo tal que la potencia entregada por los paneles sea máxima.

El documento presenta la metodología de la figura 2, en la cual se estudia la irradiancia y temperatura del lugar, con el objetivo de diseñar el software y hardware adecuados para la aplicación específica, posteriormente los resultados se validan en simulación y luego con la certeza de los resultados de simulación, se procede a la realización del prototipo experimental y a la validación de los resultados experimentales.

El documento contiene la siguiente estructura, en el capítulo 1, se presentan los resultados de irradiancia y temperatura del municipio de Piedecuesta, lugar donde se encuentran instalados los paneles fotovoltaicos.

Figura 2. Metodología realizada en el trabajo de investigación.



En el capítulo 2, se realiza un análisis y dimensionamiento del convertidor SEPIC basado en los valores de irradiancia y temperatura del capítulo 1.

En el capítulo 3, se explican las estrategias de control y se simulan mediante PSIM con el convertidor dimensionado en el capítulo 2.

En el capítulo 4 se describe el hardware implementado y los resultados del prototipo experimental.

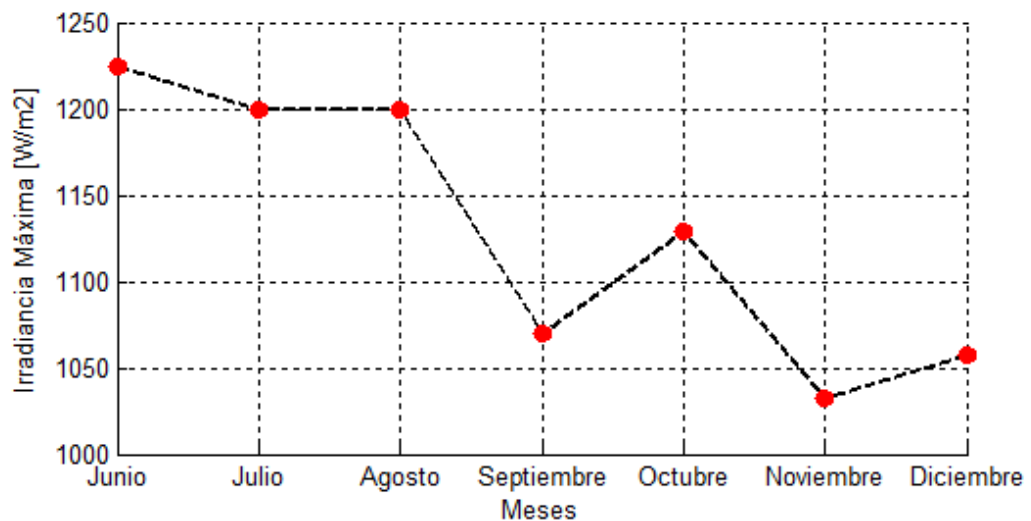
En el capítulo 5 se evidencian las conclusiones, los trabajos codirigidos y las publicaciones realizadas. Finalmente se presenta la bibliografía y el capítulo de anexos.

1. IRRADIANCIA Y TEMPERATURA DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA.

Para la aplicación específica, los paneles se encuentran en el parque tecnológico Guatiguará del municipio de Piedecuesta, por lo tanto se requiere medir las variables de irradiancia y temperatura o conocer la información de alguna estación que registre las variables del municipio, debido a que la entrega de potencia de los paneles varía en función de dichas variables.

Mediante la información en línea de la estación meteorología de la UPB Piedecuesta [1], se registran las radiaciones máximas durante los meses de junio a diciembre del año 2015, tal como se aprecia en la figura 3.

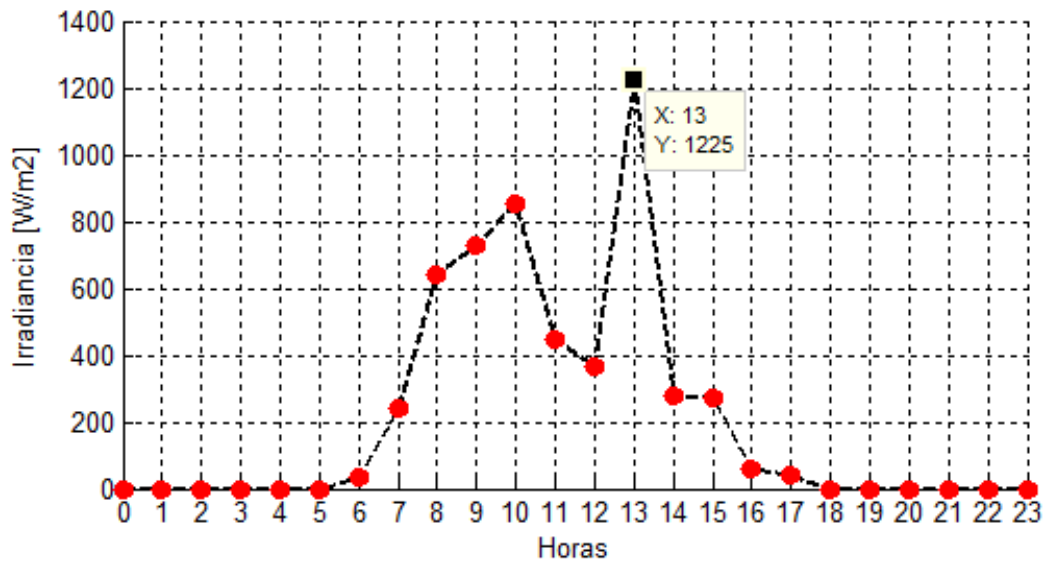
Figura 3. Irradiancia máxima de Piedecuesta entre Junio y Diciembre del año 2015



El mes de junio presenta la máxima irradiancia comprendida entre el segundo semestre del año 2015; específicamente se presentó el 21 de junio [1], en la figura 4 se aprecia la irradiancia diaria del 21 de junio, cuyo valor máximo es

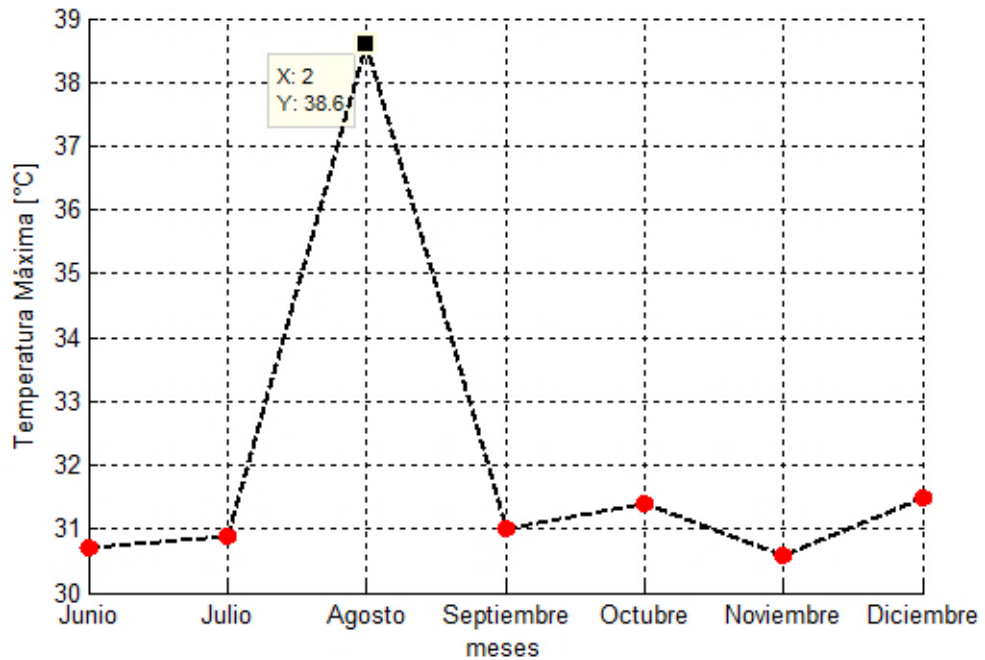
1225 W/m^2 . Con el valor máximo de irradiancia se determina la máxima corriente de entrada del convertidor.

Figura 4. Irradiancia del 21 de junio-2015 (fecha de la radiación máxima mensual).



En la figura 5 se aprecia la máxima temperatura mensual comprendida entre junio y diciembre de 2015, cuyo valor corresponde a 38.6°C. La temperatura mínima (de 7 a.m a 4 p.m) entre los meses de junio y diciembre de 2015 corresponde a 23.5°C, estos valores son obtenidos, gracias a los datos disponibles en línea de la estación Piedecuesta UPB [1].

Figura 5. Temperatura máxima estación UPB Piedecuesta entre Junio y Diciembre del año 2015



En la siguiente tabla se presentan los datos de la irradiancia y temperatura de Piedecuesta.

Tabla 1. Irradiancia y temperatura de Piedecuesta comprendidas entre junio y diciembre del año 2015.

Radiación Máxima	1225 [W/m^2]
Temperatura Máxima. °C	38.6 °C
Temperatura Mínima. °C (de 7 a.m a 4 p.m)	23.5 °C

Una vez conocida la irradiancia y temperatura del municipio se procede a dimensionar las diferentes etapas del sistema.

2. CONVERTIDOR SEPIC.

Las topologías reductoras o elevadoras son de uso frecuente en el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos e híbridos, sin embargo, en [2] se realiza un análisis matemático de la topología reductora, la topología elevadora, la topología elevadora-reductora y se verifica mediante simulación, que la topología más apta para seguir el punto de máxima potencia, es la topología capaz de elevar y reducir la tensión de entrada, debido a que realiza el seguimiento para cualquier irradiancia y temperatura, situación que no es posible en topologías que únicamente elevan o reducen la tensión de entrada. Además, la topología elevadora-reductora, permite mayor flexibilidad en el diseño del convertidor en aplicaciones de energía solar fotovoltaica, ya que se puede aumentar o disminuir el número de paneles en su entrada y obtener la tensión de salida deseada aumentando o reduciendo el ciclo de trabajo del convertidor.

Aunque no existe un criterio unificado de cual topología elevadora-reductora resulta ser la más adecuada para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia, en [3] se realiza una comparación de diferentes topologías en función de diferentes criterios, que pueden orientar la escogencia de un convertidor respecto a otro para una determinada aplicación (ver tabla 2).

Comparaciones de diferentes topologías también fueron realizadas en [4], [5], [6]. En [4] se selecciona el convertidor SEPIC entre los convertidores *buck-boost*, *cuk*, *positive buck-Boost* y *flyback* por presentar polaridad no invertida, simple diseño del circuito de disparo y bajo rizado de la corriente de entrada. Otros autores en [5],[6] resaltan la escogencia del convertidor SEPIC respecto a topologías elevadoras–reductoras como el *CUK*, debido a que este último presenta dificultades en la estabilidad y requiere de un complejo circuito de compensación.

Tabla 2.comparación de diferentes convertidores en aplicaciones fotovoltaica basada en [3].

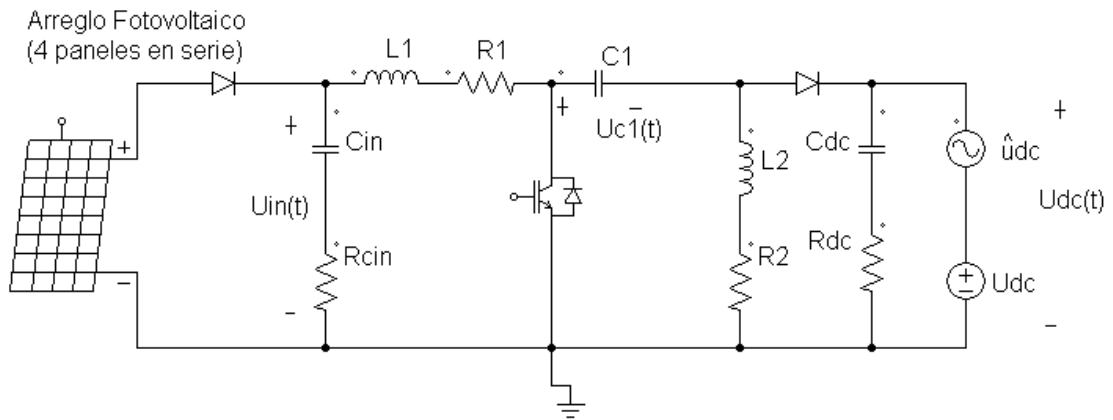
Criterios de Comparación	Buck-Boost	Cúk	Positive Buck-Boost	SEPIC
Polaridad de la tensión de salida	Invertida	Invertida	No invertida	No invertida
Corriente de Entrada	Discontinua	Continua	Depende del modo de operación	Continua
Circuito de disparo	No conectado a tierra	No conectado a tierra	Uno de los 2 está conectado a tierra	Conectado a tierra
Eficiencia	baja	media	Alta solamente en un modo de operación	Media
Costo	similar	similar	mayor	similar

La topología SEPIC (ver figura 2) fue seleccionada principalmente por las siguientes razones y concuerdan con las preferencias de diferentes autores [5],[7],[8]:

- Corriente de entrada continua con bajo rizado, la cual facilita el sensado.
- Polaridad en la tensión de salida no invertida, muy útil para simplificar la integración de las etapas del sistema fotovoltaico.

- Diseño sencillo del circuito de disparo, debido a que el elemento de conmutación se encuentra conectado a tierra.

Figura 6. Convertidor SEPIC.



2.1 MODELO A PEQUEÑA SEÑAL DEL CONVERTIDOR SEPIC

En la presente sección se analiza el modelo a pequeña señal del convertidor y se determina la expresión en estado estable del convertidor SEPIC, para ello se consideran las siguientes suposiciones:

- El modulo fotovoltaico se modela como una carga resistiva (R_{MPP}), que corresponde al cociente entre la tensión del panel (U_{MPP}) en el punto de máxima potencia y la corriente del panel (I_{MPP}) en el punto de máxima potencia. Esta suposición es válida cuando el modulo fotovoltaico opera alrededor del punto de máxima potencia [9].

$$R_{MPP} = -U_{MPP}/I_{MPP} \quad (1)$$

- En el convertidor SEPIC se incluyen las resistencias parasitas (R_1, R_2, R_{in}, R_{DC}) que corresponden a la resistencia de los inductores y de los capacitores

de entrada y salida. La resistencia en la capacitancia $C1$ se considera nula. En las figuras 7 y 8, se observan los dos modos de operación del SEPIC, en el modo 1, el transistor conduce, en el modo 2, el diodo conduce.

- Para propósitos de simulación, la conversión DC-AC, el filtro, la carga y la red de distribución, se pueden modelar como una tensión constante DC (460 [V]) en adición a una fuente de alterna la cual modela las perturbaciones [9].

Figura 7. Modo 1 de operación con resistencias parasitas, mientras el transistor conduce.

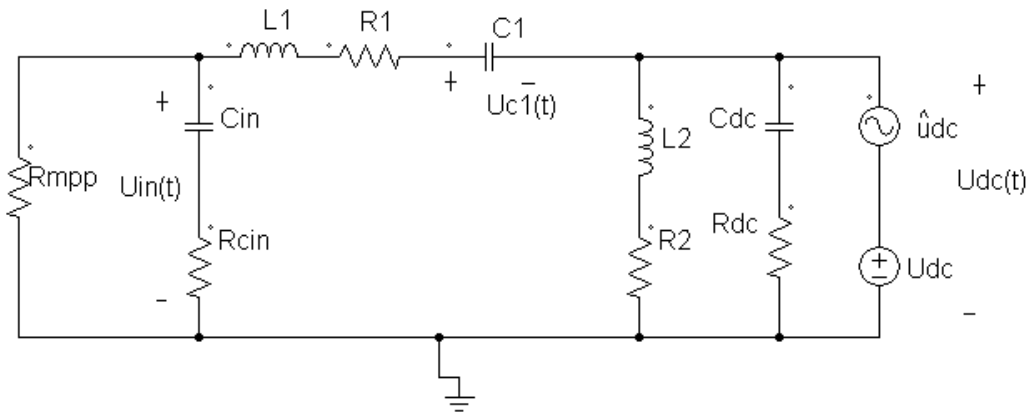
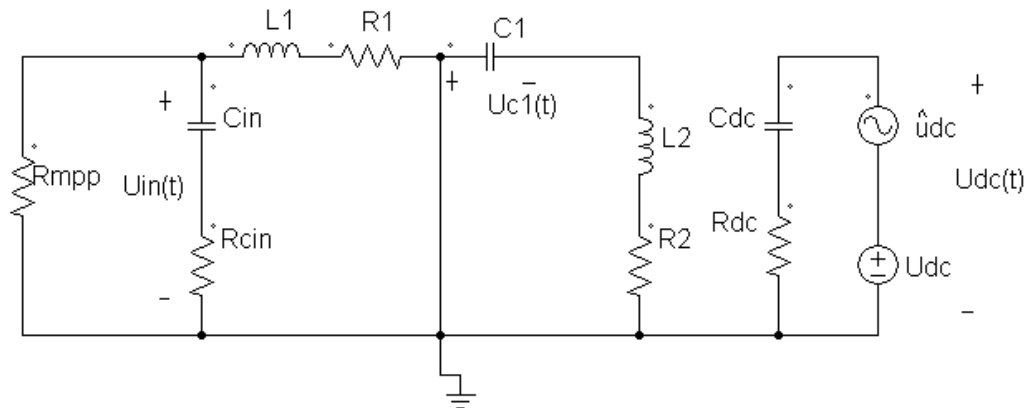


Figura 8. Modo 2 de operación con resistencias parasitas, mientras el diodo conduce.



Los dos modos de operación se pueden representar mediante las siguientes ecuaciones:

Modo 1:

$$\dot{x} = A_1x + b_1u_{DC} \quad y = c_1x \quad (2)$$

Modo 2:

$$\dot{x} = A_2x + b_2u_{DC} \quad y = c_2x \quad (3)$$

El vector de estados (x) y la variable de salida (y) se representan como:

$$x(t) = \begin{pmatrix} i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ u_{in}(t) \\ u_{C1}(t) \end{pmatrix} \quad y(t) = (u_{in}(t)) \quad (4)$$

Donde $i_{L1}(t)$, $i_{L2}(t)$ corresponden a la corriente de los inductores, $u_{in}(t)$, y $u_{C1}(t)$ corresponden a la tensión del capacitor de entrada C_{in} y del capacitor de acople C_1 , respectivamente.

Las matrices (A) y los vectores (b) y (c) para los dos modos de operación están dados por:

$$A_1 = \begin{pmatrix} -R_1/L_1 & 0 & 1/L_1 & 0 \\ 0 & -R_2/L_2 & 0 & 1/L_2 \\ \frac{RMPP(R_1R_{in}C_{in}-L_1)}{L_1C_{in}(RMPP+R_{in})} & 0 & -\frac{RMPPR_{in}C_{in}+L_1}{L_1C_{in}(RMPP+R_{in})} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -R_1/L_1 & 0 & 1/L_1 & -1/L_1 \\ 0 & -R_2/L_2 & 0 & 0 \\ \frac{RMPP(R_1R_{in}C_{in}-L_1)}{L_1C_{in}(RMPP+R_{in})} & 0 & -\frac{RMPPR_{in}C_{in}+L_1}{L_1C_{in}(RMPP+R_{in})} & \frac{R_{in}RMPPC_{in}}{L_1C_{in}(RMPP+R_{in})} \\ 1/C_1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$b_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad b_2 = \begin{pmatrix} -1/L_1 \\ -1/L_2 \\ \frac{R_{in}R_{MPP}C_{in}}{L_1C_{in}(R_{MPP} + R_{in})} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$c_1 = c_2 = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0) \quad (8)$$

Con los dos modos de operación se puede obtener la representación básica en espacio de estados promedio, basado en la metodología general para un convertidor [10]:

$$\dot{\bar{x}} = \mathbf{A}(d)\bar{x} + \mathbf{b}(d)\bar{u}_{DC} \quad \bar{y} = \mathbf{C}(d)\bar{x} \quad (9)$$

Dónde:

$$\mathbf{A}(d) = \mathbf{A}_1d + \mathbf{A}_2(1 - d) \quad (10)$$

$$\mathbf{A}(d) = \begin{pmatrix} -R_1/L_1 & 0 & 1/L_1 & -(1-d)/L_1 \\ 0 & -R_2/L_2 & 0 & d/L_2 \\ \frac{R_{MPP}(R_1R_{in}C_{in}-L_1)}{L_1C_{in}(R_{MPP}+R_{in})} & 0 & -\frac{R_{MPP}R_{in}C_{in}+L_1}{L_1C_{in}(R_{MPP}+R_{in})} & \frac{(1-d)R_{in}R_{MPP}C_{in}}{L_1C_{in}(R_{MPP}+R_{in})} \\ (1-d)/C_1 & -\frac{d}{c_1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{b}(d) = \mathbf{b}_1(d) + \mathbf{b}_2(1 - d) \quad (12)$$

$$\mathbf{b}(d) = \begin{pmatrix} -(1-d)/L_1 \\ -(1-d)/L_2 \\ \frac{(1-d)R_{in}R_{MPP}C_{in}}{L_1C_{in}(R_{MPP} + R_{in})} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{C}(d) = \mathbf{C}_1(d) + \mathbf{C}_2(1 - d) = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0) \quad (14)$$

Los valores promedio $(\bar{x}, \bar{u}_{DC}, \bar{y}, \bar{d})$, se definen como los valores en estado estable o señales en DC (U_{DC}, X, Y, D) con perturbaciones o variaciones en AC ($\hat{u}_{dc}, \hat{x}, \hat{y}, \hat{d}$) debido a las variaciones en el condensador C_{DC} :

$$\bar{u}_{DC} = U_{DC} + \hat{u}_{dc} \quad (15)$$

$$\bar{x} = X + \hat{x} \quad (16)$$

$$\bar{y} = Y + \hat{y} \quad (17)$$

$$\bar{d} = D + \hat{d} \quad (18)$$

La metodología de [10] se aplica, específicamente al convertidor SEPIC, resultando las siguientes expresiones matemáticas:

Modelo en estado estable:

$$X = -A^{-1}bU_{DC} \quad (19)$$

$$Y = -CA^{-1}bU_{DC} \quad (20)$$

Modelo dinámico pequeña señal:

$$\hat{x} = A\hat{x} + b\hat{u}_{DC} + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)U_{DC}] \hat{d} \quad (21)$$

$$\hat{y} = c\hat{x} + (c_1 - c_2)X\hat{d} \quad (22)$$

Dónde:

$$A = A_1D + A_2(1 - D) \quad (23)$$

$$b = b_1D + b_2(1 - D) \quad (24)$$

$$c = c_1D + c_2(1 - D) \quad (25)$$

El modelo en estado estable para el convertidor SEPIC está dado por:

$$U_{in} = \frac{(1 - D)U_{DC}}{D} * \frac{R_{MPP}}{R_1 + R_{MPP} + R_2 \left(1 - 2D + \frac{D^2}{D^2}\right)} \quad (26)$$

Entre los valores de las resistencias de las inductancias sean más pequeños (R_1 y R_2), la ecuación que representa la tensión de salida (U_{in}) en función de la tensión de entrada (U_{DC}) se aproxima mediante:

$$U_{in} \approx \frac{(1 - D)U_{DC}}{D} \quad (27)$$

De la ecuación (22) se obtienen dos funciones de transferencia de interés:

$$G_u(s) = \frac{\hat{u}_{in}(s)}{\hat{u}_{DC}(s)} \quad \text{Para } \hat{d} = 0 \quad (28)$$

$$G_d(s) = \frac{\hat{u}_{in}(s)}{\hat{d}(s)} \quad \text{Para } \hat{u}_{DC} = 0 \quad (29)$$

La función de transferencia $G_u(s)$, representa los efectos en la tensión del panel fotovoltaico (\hat{u}_{in}), por causa de variaciones en la tensión del condensador de salida del convertidor SEPIC (\hat{u}_{DC}), y la función de transferencia $G_d(s)$, representa los efectos de la tensión del panel, en función de perturbaciones en el ciclo de trabajo \hat{d} .

2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR SEPIC.

Para dimensionar el convertidor se tiene en cuenta el rango máximo de operación, tal como se observa en la tabla 3. La metodología para dimensionar el convertidor SEPIC, se basa en [11]-[12]. Para llevarla a cabo, algunos valores fueron asumidos, tal como se presenta en la tabla 4.

Tabla 3. Rangos de operación del convertidor.

Rangos de operación del convertidor	
Potencia Máxima a irradiancia máxima. (P_{max})	1200 [W]
Máxima Corriente de entrada (I_{max}) a irradiancia máxima.	10.5 [A]
Máxima Tensión de entrada $(U_{in,max})$ a temperatura mínima.	155 [V]
Tensión de salida (U_{dc})	460 [V]

Tabla 4. Valores asumidos del convertidor SEPIC.

Valores asumidos para el dimensionamiento del convertidor.	
Frecuencia de conmutación (f_{sw})	14 [kHz]
Ciclo de trabajo máximo. (D_{max})	0.9
Corriente mínima del arreglo (I_{min})	1.7 [A]

La frecuencia de conmutación se asumió de 14 kHz, debido a que la ejecución del programa desarrollado tarda 70 [us].

El ciclo de trabajo máximo, se asumió de 0.9 y no un valor mayor, para evitar que el transistor se quede anclado y conduzca todo el tiempo.

La corriente mínima del arreglo se determina a radiación de $200 W/m^2$, no se consideran radiaciones menores, debido a que el diseño del convertidor, requiere que opere en modo continuo, es decir, la corriente del inductor de entrada nunca sea cero, situación que puede ocurrir entre la corriente de entrada sea más pequeña.

En la tabla 5 se presentan los parámetros (valores de los elementos) y las variables necesarias para determinar el dimensionamiento del convertidor.

Tabla 5. Dimensionamiento del convertidor SEPIC.

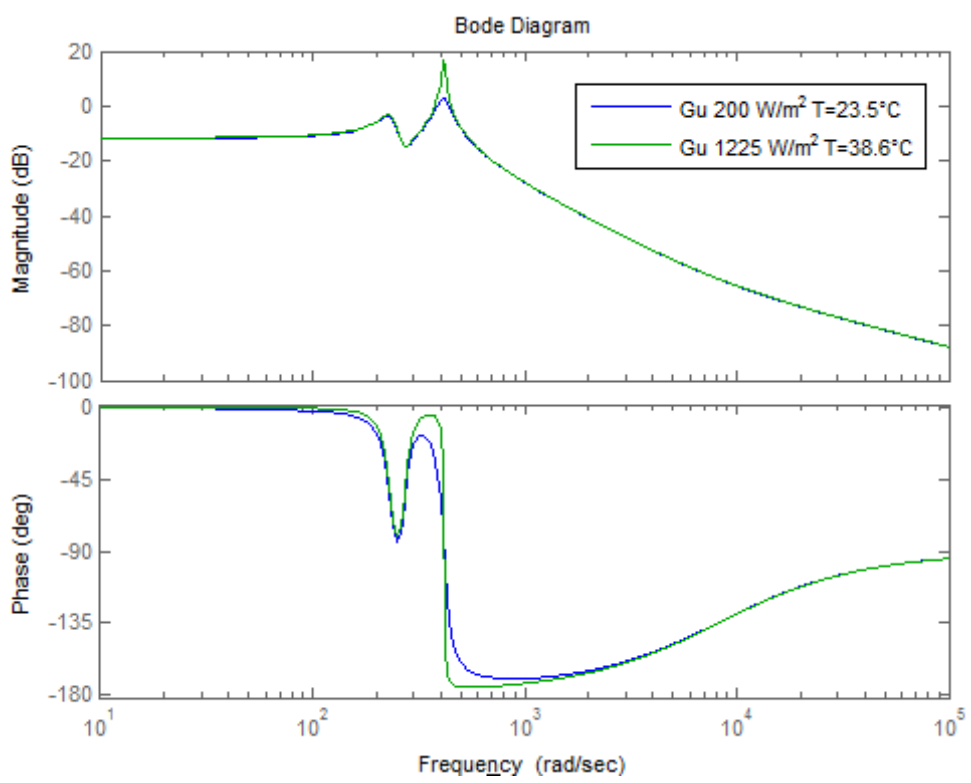
Parámetro	Variable	Ecuación	Valor	Referencia
	Rizo de corriente de la inductancia (Δi_l)	$\Delta i_l = I_{min} * 40\%$	0.68 [A]	
	Tensión mínima del panel	$U_{in_min} = U_{Dc} * \frac{1 - D_{max}}{D_{max}}$	50[V]	
Inductancias (L_1, L_2)		$(L_1, L_2) = \frac{U_{in_min}}{\Delta i_l * f_{sw}} * D_{max}$	5 [mH]	
	Corriente pico de La inductancia L_1 (I_{L1pico})	$I_{L1pico} = I_{max} + \left(\frac{I_{max} * 40\%}{2}\right)$	12.6 [A]	
	Corriente de salida máxima (I_{o_max})	$I_{o_max} \approx \frac{P_{max}}{U_{dc}}$	2.6 [A]	
	Corriente pico de La inductancia L_2 (I_{L2pico})	$I_{L2pico} = I_{o_max} + \left(\frac{I_{o_max} * 40\%}{2}\right)$	3.12 [A]	
Resistencia de la inductancia	Medida a 0 [Hz]		≈ 0.2 [Ω]	

Capacitancias (C_{in}, C_1, C_{dc})		$(C_1, C_{dc}) \approx \frac{I_{o_max} * D_{max}}{V_{rizo} * f_{sw}}$	$C_{in} = 1100\mu F$ $C_1 = 2200\mu F$ $C_{dc} = 1100\mu F$	Electrolítico Hoja de datos:[13]
Resistencias de cada capacitancia	(Basado en la hoja de datos).		$\approx 0.1 [\Omega]$	
	Corriente pico diodo (I_{D_pico})	$I_{D_pico} = I_{L1pico} + I_{L2pico}$	15.72 [A]	
Diodo	Tensión Inversa diodo (V_{D_inv})	$V_{D_inv} = U_{in_max} + U_{dc}$	515[V]	Diodos SCS251AM Hoja De datos: [14]
Transistor	Requerimientos iguales al diodo.			Transistor SKM50GAL123D Hoja De datos:[15].
Diodo de protección De los paneles.				SKR50/04 Hoja de datos:[16]

2.3 ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR CON LOS PARÁMETROS SELECCIONADOS.

La determinación de los parámetros permite analizar la función de transferencia $G_u(s)$, mencionada en la sección 2.1. En la figura 9 se observa el diagrama de bode de la función de transferencia para radiaciones de $200W/m^2$ y $1225 W/m^2$, a bajas frecuencias hay poca atenuación, en $400 rad/seg$ (63 Hz) hay aumento de señal hasta de 20 dB, lo cual indica, que si existen variaciones de baja frecuencia en la tensión de salida del convertidor, estas variaciones se reflejan en la tensión de los paneles fotovoltaicos; es por ello que se requiere diseñar un compensador.

Figura 9. Diagrama de bode de la función de transferencia Gu del convertidor SEPIC



3. SIMULACIÓN DEL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.

El convertidor DC-DC es controlado mediante un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (*Maximum power point tracking*) o MPPT, encargado de determinar el ciclo de trabajo del convertidor, necesario para garantizar la operación del generador en el punto en el cual entrega la máxima potencia.

La variedad de estos algoritmos es amplia, los más utilizados son: Perturbar y Observar [17]-[19], conductancia incremental [18], [23]-[24], algoritmos basados en lógica difusa [22], entre otros [20]-[21]. Estos algoritmos se pueden clasificar según el tiempo de cómputo, la convergencia al máximo global de potencia, el costo de implementación, el número de sensores utilizados. En [25] se compara diferentes estrategias para seguir el punto de máxima potencia, en la tabla 6, se observan algunos resultados obtenidos.

Cada técnica presenta sus ventajas e inconvenientes. La técnica de lógica difusa converge más rápido al punto de máxima potencia, sin embargo presenta alta complejidad de implementación y requiere de una sintonización periódica de las variables programadas. Las técnicas menos eficientes, son aquellas que presentan baja velocidad de convergencia, como el método de la tabla de consulta y ajuste de curvas. Las técnicas más flexibles corresponden a la técnica perturbar y observar y la técnica de conductancia incremental, dado que la velocidad de convergencia cambia dependiendo de la variación del paso del ciclo de trabajo, además presentan menor complejidad de implementación que la técnica de lógica difusa.

Tabla 6. Técnicas de uso frecuente para el seguimiento del punto de máxima potencia.

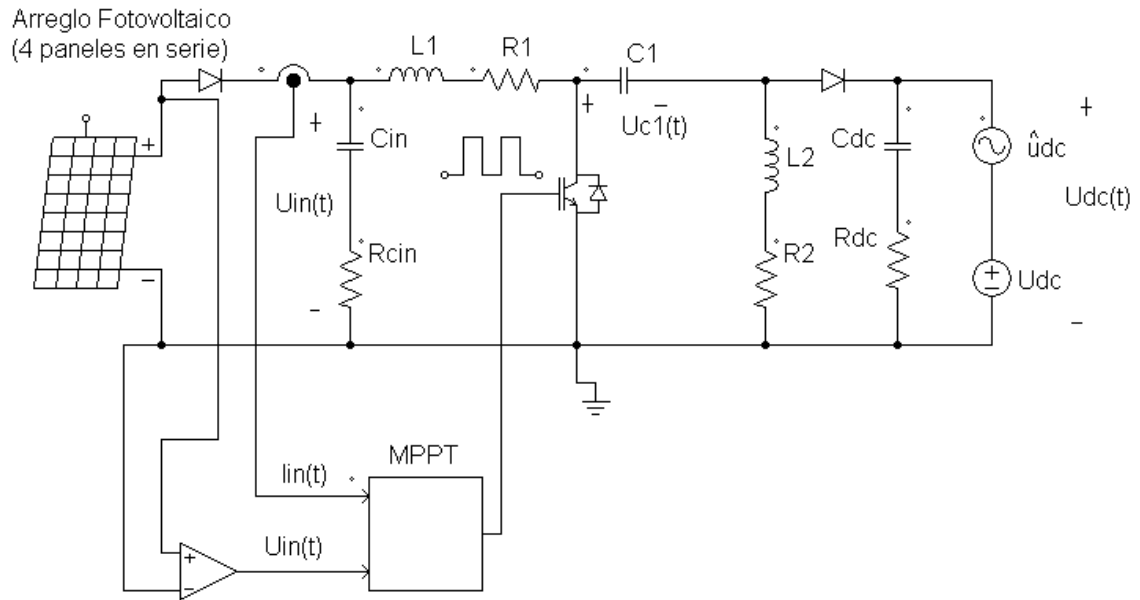
Técnica MPPT	Analógico o digital	Sintonización Periódica	Velocidad De convergencia	Complejidad de implementación	Sensores
Ajuste de Curva	Digital	Si	Baja	Simple	Tensión
Método de La tabla de consulta	Digital	Si	Baja	Simple	Tensión- Corriente
Fracción de Tensión de circuito abierto	Ambos	Si	Media	Baja	Tensión
Fracción de corriente de corto circuito	Ambos	Si	Media	Media	Corriente
Perturbar y Observar(P&O)	Ambos	No	Varia	Baja	Tensión- Corriente
Conductancia Incremental	Digital	No	Varia	Media	Tensión- Corriente
Lógica Difusa	Digital	Si	Rápida	Alta	Varia

En la figura 10 se presenta el convertidor SEPIC y la etapa de control utilizada para seguir el punto de máxima potencia de los paneles. La fuente $V_o(t)$ representa la tensión DC a la salida del convertidor y la fuente de alterna representa las perturbaciones debido a las siguientes etapas del sistema.

El presente capítulo se describe el algoritmo de perturbar y observar clásico, la adición de una red de compensación y las ventajas que ello conlleva, posteriormente se propone un algoritmo que busca la máxima potencia bajo

condiciones de sombras parciales, los resultados de este nuevo algoritmo son validados en simulación en el software PSIM.

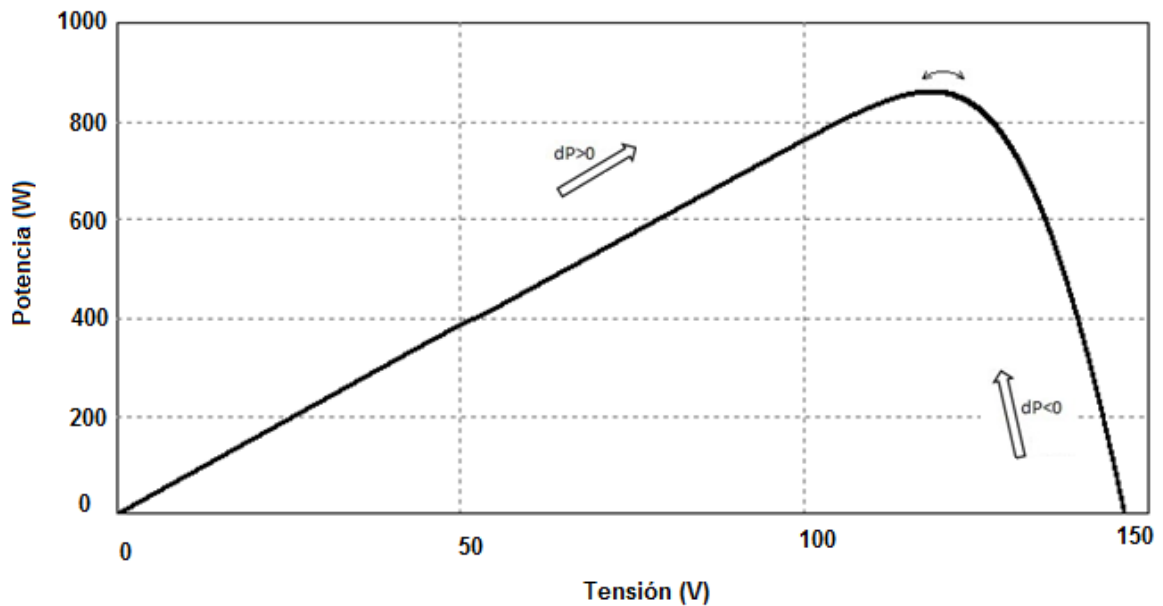
Figura 10. Esquemático del circuito considerando el algoritmo para la búsqueda de máxima potencia del arreglo fotovoltaico



3.1 ALGORITMO DE PERTURBAR Y OBSERVAR (P&O)

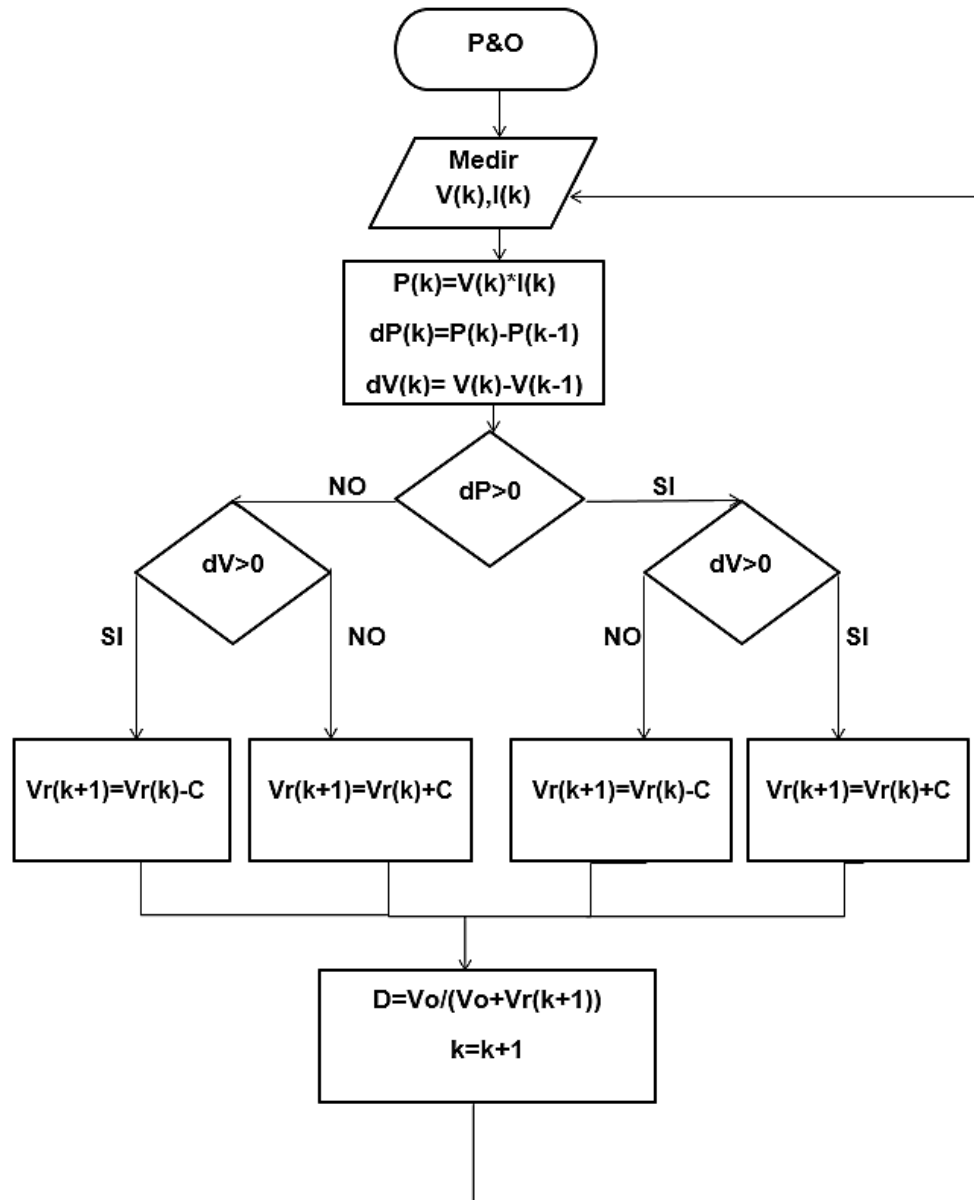
El algoritmo P&O consiste en perturbar periódicamente (aumentar o disminuir) el ciclo de trabajo (D) de un convertidor de potencia y posteriormente comparar la potencia actual del arreglo fotovoltaico $P(k)$, con la potencia en un instante anterior $P(k-1)$. Si la perturbación conduce a un aumento en la potencia del arreglo, la siguiente perturbación se hace en la misma dirección y si conduce a una disminución de la potencia, la perturbación se realiza en la dirección opuesta, tal como se observa en la Figura 11 [26].

Figura 11. Búsqueda del punto de máxima potencia mediante el algoritmo P&O.



En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la operación del algoritmo P&O, donde las variables $V(k)$, $I(k)$ y $P(k)$ representan la tensión, corriente y potencia a la salida del arreglo fotovoltaico en el instante de tiempo k , respectivamente; dP y dV representan la diferencia en la potencia y la diferencia en la tensión con base en el valor actual y el valor en el instante anterior del arreglo fotovoltaico. El algoritmo realiza comparaciones con respecto a dP y dV con el fin de determinar si se debe incrementar o disminuir la variable de control denominada tensión de referencia (V_r), donde su valor inicial corresponde al valor de la tensión de circuito abierto de los paneles fotovoltaicos. Esta variable se perturba (se aumenta o se disminuye) con el objetivo de variar el ciclo de trabajo (D), el cual a tensión constante en la salida produce un cambio en la tensión de entrada de los paneles fotovoltaicos. De esta manera se repite el procedimiento hasta que converge en el máximo de potencia.

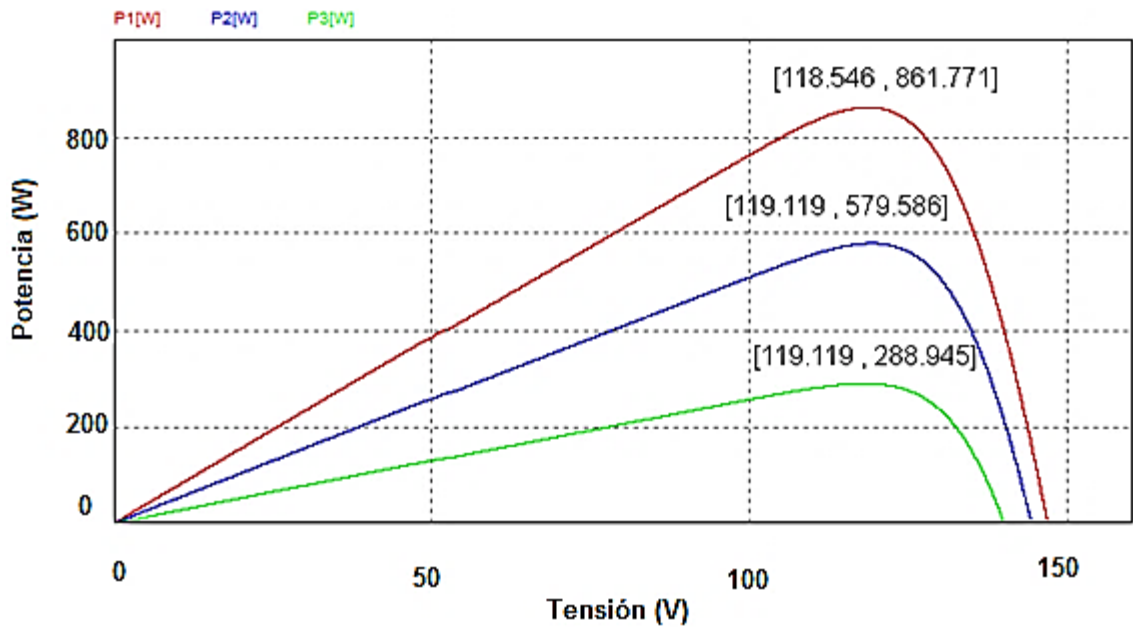
Figura 12. Diagrama de flujo de la técnica P&O.



En la figura 13, se observa la curva potencia-tensión de los 4 paneles conectados en serie a irradiancias de $300W/m^2$, $600W/m^2$, $900W/m^2$ y temperatura de $31^{\circ}C$.

Estas curvas resultan de interés para comparar si la máxima potencia entregada por los paneles mediante un algoritmo MPPT, corresponde al máximo global de potencia.

Figura 13. Curvas de Potencia de los paneles fotovoltaicos a 31°C , $P_3=300\text{ w/m}^2$, $P_2= 600\text{ w/m}^2$, $P_1= 900\text{ w/m}^2$.

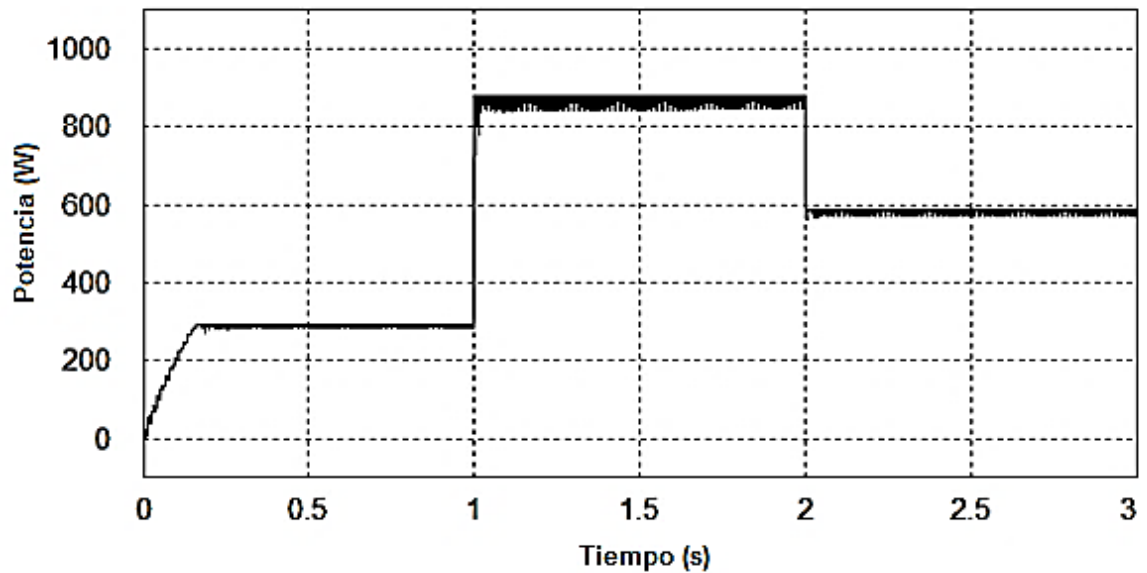


Para comprobar la búsqueda del punto de máxima potencia utilizando la técnica P&O, se supone una situación inicial a irradiancia de 300 W/m^2 , después de un segundo, la irradiancia cambia a 900 W/m^2 y un segundo más tarde la irradiancia cambia a 600 W/m^2 . Además, se consideran oscilaciones al doble de la frecuencia en la tensión de salida del SEPIC, es decir $v_o(t) = 460 + 20 \text{ sen}(240\pi t) [V]$.

La potencia entregada por el generador fotovoltaico mediante la técnica P&O para las diferentes irradiancias, en diferentes intervalos de tiempo, se aprecia en la

figura 14, el adecuado seguimiento, se verifica con las curvas características de potencia de los 4 paneles conectados en serie, tal como se observa en la figura 13.

Figura 14. Búsqueda de potencia mediante P&O: $(0 < t < 1s)$ $300W/m^2$, $(1 \leq t < 2s)$ $900W/m^2$, $(2 \leq t < 3s)$ $600W/m^2$



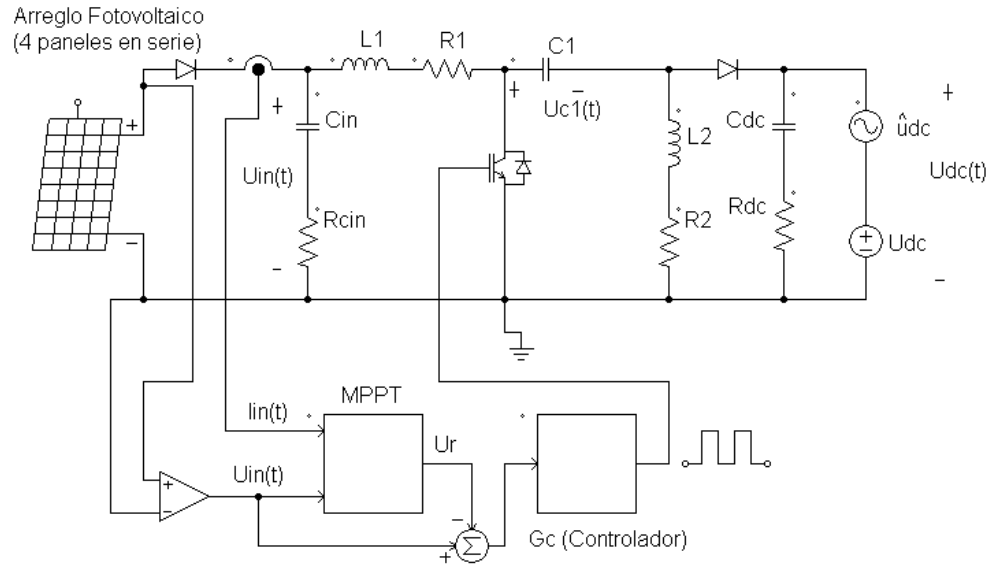
3.2 ALGORITMO P&O CON RED DE COMPENSACIÓN

La tensión del condensador a la salida del convertidor SEPIC puede presentar oscilaciones principalmente al doble de la frecuencia de la red, debido a la interacción del sistema fotovoltaico con la red de distribución.

En [9] y [27] se propone adicionar un compensador (G_C) a la técnica P&O para disminuir las variaciones de la tensión del arreglo fotovoltaico. En la figura 15 se observa que el controlador G_C actúa sobre la diferencia entre la tensión de los

paneles y la tensión de referencia U_r , la cual es determinada mediante el algoritmo P&O.

Figura 15. Esquemático para la búsqueda de máxima potencia con red de compensación.

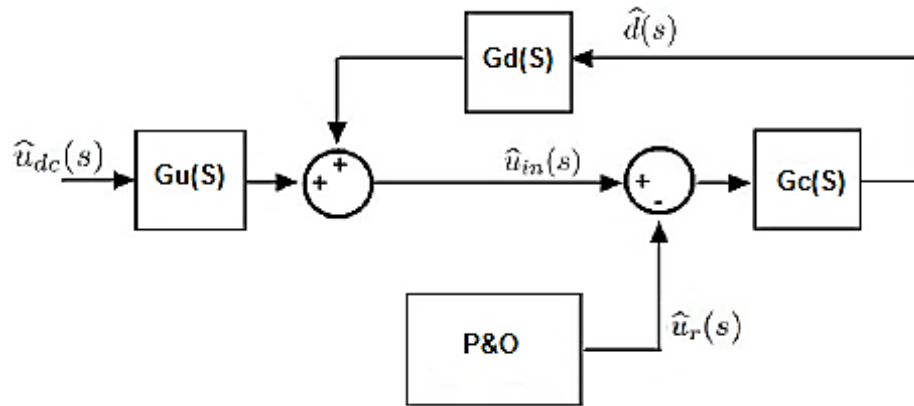


El modelo a pequeña señal del diagrama de la figura 15, se observa en la figura 16, donde la función de transferencia $G_u(s)$ representa los efectos en la tensión del panel fotovoltaico (\hat{u}_{in}), por causa de variaciones en la tensión del condensador de salida del convertidor SEPIC (\hat{u}_{dc}) y la función de transferencia $G_d(s)$ representa los efectos de la tensión del panel en función de perturbaciones en el ciclo de trabajo. Partiendo del modelo dinámico a pequeña señal de la ecuación (21), las variaciones en la tensión del arreglo fotovoltaico se pueden expresar mediante la siguiente expresión [9]:

$$\hat{u}_{in} = G_u(s)\hat{u}_{dc} + G_d(s)\hat{d}(s) \quad (30)$$

La función de controlador $G_c(s)$ es disminuir las oscilaciones de la tensión del arreglo fotovoltaico debido a oscilaciones de la tensión de salida del convertidor SEPIC.

Figura 16. Modelo a pequeña señal de la red de compensación.



La función de transferencia en lazo cerrado $G_{LC}(s)$, relaciona la tensión de salida del convertidor SEPIC $\hat{u}_{dc}(s)$ con la tensión de los paneles $\hat{u}_{in}(s)$ y está dada por:

$$G_{LC}(s) = \frac{\hat{u}_{in}(s)}{\hat{u}_{DC}(s)} = \frac{G_u(s)}{1 - G_d(s)G_c(s)} \quad (31)$$

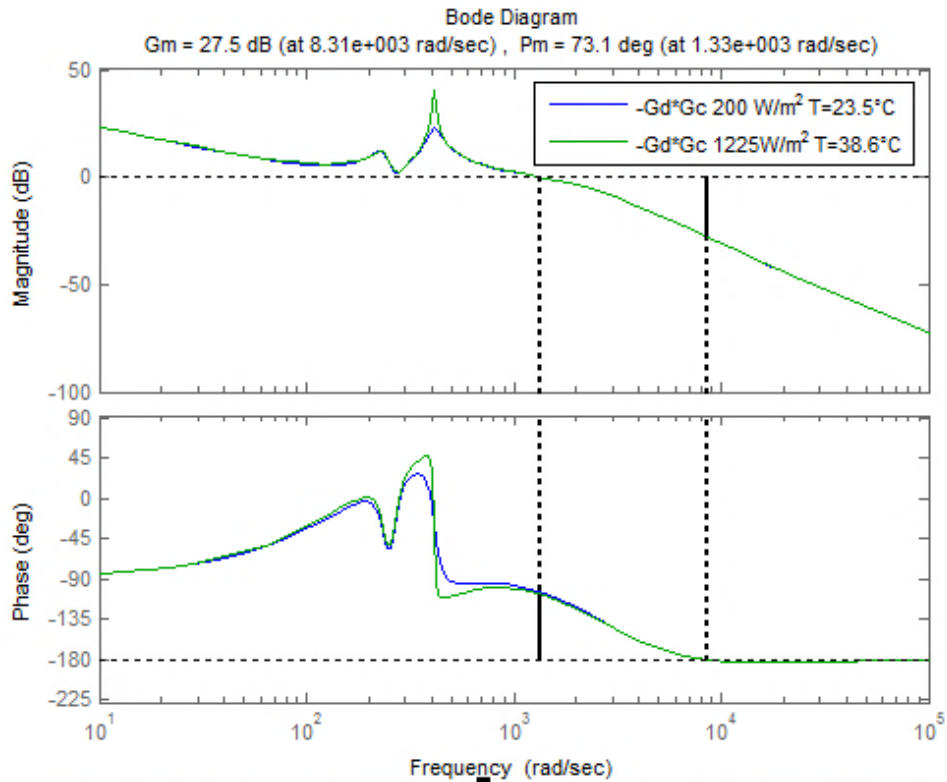
El compensador $G_c(s)$ se diseña tal que $G_{LC}(s)$ presente poca ganancia a las bajas frecuencias. Un criterio práctico consiste en diseñar $G_c(s)$ dado que el producto $-G_d(s)G_c(s)$ presente por lo menos un margen de ganancia de 10dB y por lo menos un margen de fase de 60°.

El controlador diseñado está compuesto por la siguiente función de transferencia.

$$G_c(s) = 200 * \frac{(s + 250)^3}{s * (s + 2500)^3} \quad (32)$$

En la figura 17 se observa el diagrama de bode de la función de transferencia en lazo abierto $-G_d(s)G_c(s)$, para irradiancias de $200W/m^2$ a $23.5^\circ C$ y $1225W/m^2$ a $38.6^\circ C$. Se aprecia un margen de ganancia de $27.5 dB$ y 73.1° de margen de fase.

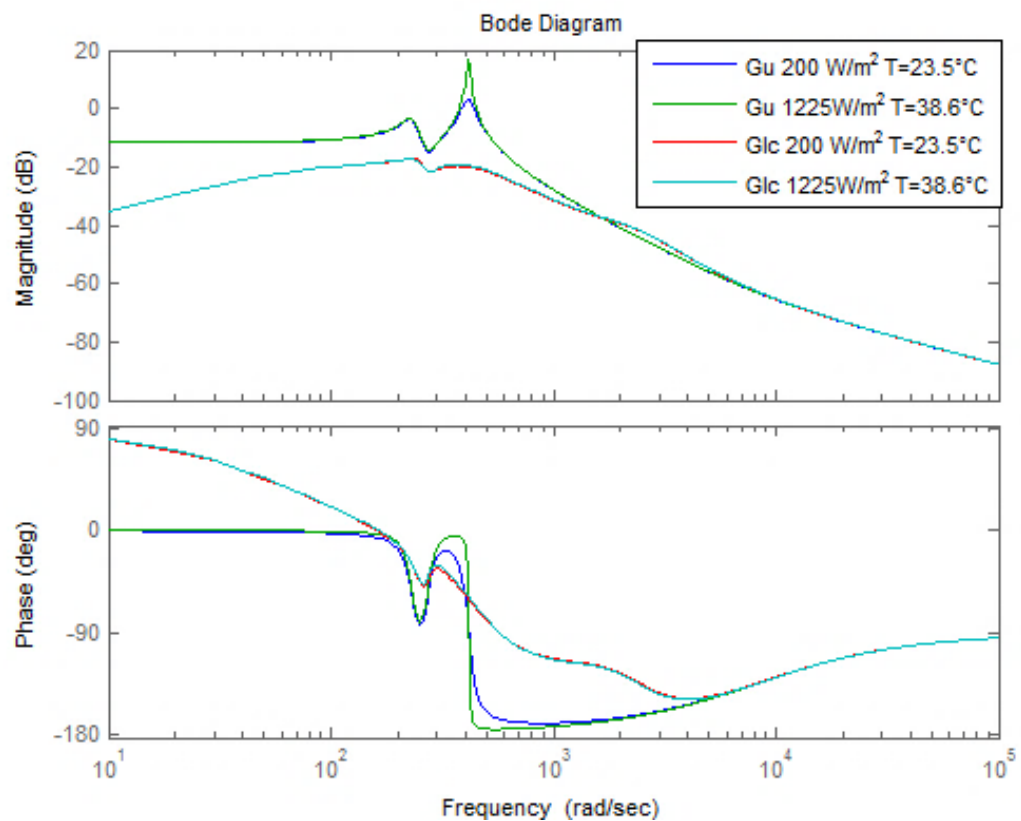
Figura 17. Diagrama de bode de la función de transferencia de lazo abierto $-G_d * G_c$



En la figura 18 se aprecia el diagrama de bode para $G_u(s)$ y $G_{LC}(s)$ a irradiancias de $200W/m^2$ a $23.5^\circ C$ y $1225W/m^2$ a $38.6^\circ C$. A frecuencias menores a $270 [Hz]$ ($1700 rad/sec$) existe menor magnitud en la función de transferencia de lazo cerrado $G_{LC}(s)$ respecto a $G_u(s)$, en este sentido se reducen las posibles oscilaciones presentadas en los paneles fotovoltaicos.

Mediante PSIM se simuló la red de compensación y se realizó la búsqueda de máxima potencia para el mismo caso de la técnica perturbar y observar (P&O) sin red de compensación. También, se consideraron las oscilaciones al doble de la frecuencia en la tensión de salida del SEPIC, es decir $v_o(t) = 460 + 20 \text{ sen}(240\pi t)$ [V].

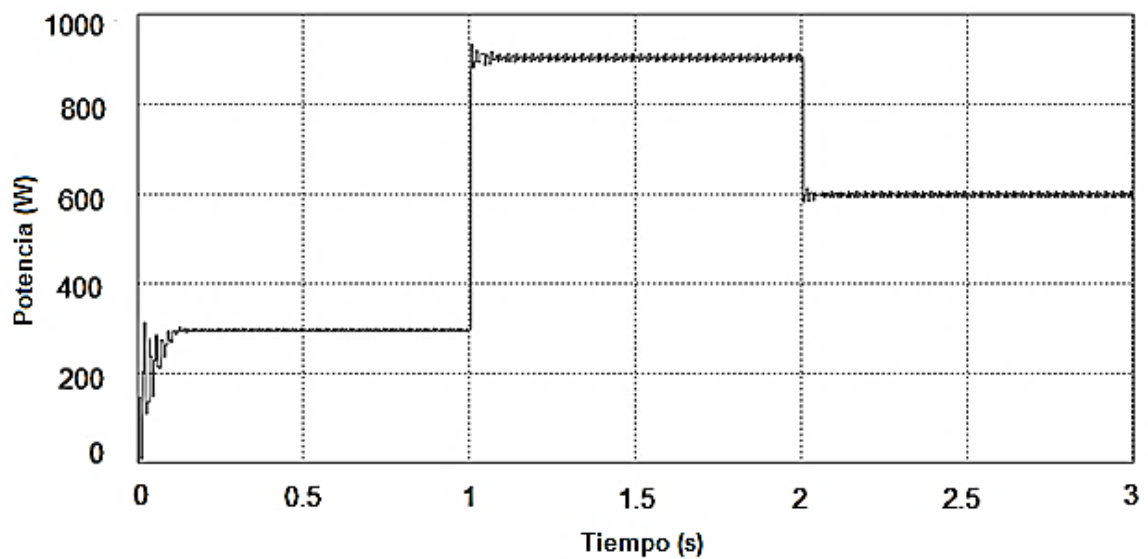
Figura 18 Diagrama de bode de la función de transferencia $G_{lc}(s)$ y de $G_u(s)$.



En la figura 19 se observa la potencia entregada por el generador fotovoltaico para el mismo caso de irradiancias y temperaturas de la técnica P&O sin red de compensación, se aprecia menores oscilaciones en la búsqueda de máxima

potencia respecto a la técnica clásica sin red de compensación (comparar figura 19 con figura 14), la disminución de la oscilaciones en la entrega de potencia, presentan una relación directa con la reducción de las variaciones de la tensión en el panel, como se aprecia en la figura 19.

Figura 19. Búsqueda de potencia mediante P&O con red de compensación: $(0 < t < 1s) 300W/m^2, (1 \leq t < 2s) 900W/m^2, (2 \leq t < 3s) 600W/m^2$



3.3 MÉTODO PROPUESTO: OBSERVAR, COMPARAR Y PERTURBAR (OC&P)

La incidencia de condiciones no uniformes de irradiancia en los paneles fotovoltaicos, genera máximos locales y globales de potencia en la curva potencia-tensión del arreglo fotovoltaico. Bajo estas condiciones, los algoritmos MPPT tradicionales convergen hacia un máximo local. Para contrarrestar este problema, varias soluciones se han propuesto [28], [29]. Resultado del presente trabajo de

investigación, se propone un algoritmo (Método de Observar, Comparar y Perturbar - OC&P) que mantiene la sencillez computacional de un algoritmo clásico como perturbar y observar, pero tiene la capacidad de encontrar el máximo global sin importar que existan máximos locales.

El algoritmo OC&P realiza en primera instancia, un proceso de comparación de la potencia generada por los paneles a diferentes tensiones de referencia (V_r), para encontrar la región de la curva en donde se encuentra el máximo global de potencia. Posteriormente, se aplica la técnica P&O tradicional, tomando un punto inicial en la región previamente determinada. En este sentido, se reducen el número de iteraciones necesarias para el seguimiento del máximo global a comparación de la técnica POC [29], ya que la técnica P&O solo se aplica en la región de la curva donde se encuentra el máximo global.

La selección de las tensiones de referencia y la medición de potencia en estos puntos de operación, se realiza mediante la técnica de Tensión Constante (TC). Esta técnica se basa en la suposición que la tensión del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia, varía ligeramente con la irradiancia. En este sentido, al realizar la comparación previa, se supone que las tensiones del arreglo fotovoltaico en los máximos locales y máximo global de potencia permanecen aproximadamente constantes.

En la figura 20 se presenta un diagrama de flujo del algoritmo OC&P. Este algoritmo opera a partir de los siguientes 7 pasos:

1. Se determinan la tensión de circuito abierto (V_{ocp}) correspondiente al modelo de panel solar a utilizar mediante la hoja de datos del fabricante. Esta hoja de datos da las especificaciones técnicas del panel, generalmente a condiciones estándar de irradiancia (1000 W/m^2) y temperatura (25°C). El valor de la tensión de circuito abierto del arreglo fotovoltaico (V_{oc}) se estima según la ecuación (33), donde (n) corresponde al número de paneles solares del arreglo conectados en

serie. Una opción más precisa consiste en realizar la medición de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) del arreglo fotovoltaico al inicializar el algoritmo.

$$V_{oc} = n * V_{ocp} \quad (33)$$

2. Se estima el valor aproximado del máximo de potencia más cercano a la tensión de circuito abierto del arreglo fotovoltaico (V_{mppoc}), la cual varía entre 0.7 y 0.8 veces la tensión de circuito abierto [30]. Este valor puede ser seleccionado utilizando también la información en la hoja de datos del fabricante.

3. Se determinan las tensiones de referencia, siguiendo la ecuación (34). La variable (n), corresponde al número de paneles conectados en serie en el caso de que haya un diodo de libre paso por panel. Si existen más de un diodo de libre paso por panel, la variable (n) corresponde al número de paneles multiplicado por los diodos de libre paso de cada panel según la configuración de éstos.

$$Vr_{(i)} = \frac{i * V_{mppoc}}{n} \text{ para } i = 1, 2 \dots n \quad (34)$$

4. Se determina la potencia entregada por el arreglo fotovoltaico en las diferentes tensiones de referencia mediante la técnica de Tensión Constante (TC). En este caso, se aplica al convertidor SEPIC; el ciclo de trabajo (D) correspondiente a la relación entre la tensión de salida (V_o) y la tensión de referencia (V_r), siguiendo la ecuación (35). El valor de la potencia entregada por el arreglo fotovoltaico se determina cuando se alcanza el estado estable para cada una de las tensiones de referencia. Partiendo de lo anterior, si el arreglo fotovoltaico cuenta con n paneles conectados en serie, es necesario evaluar mínimo n puntos de la curva potencia-tensión.

$$D_i = \frac{V_o}{Vr_{(i)} + V_o} \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots n. \quad (35)$$

5. Se comparan los valores de potencia determinados en el numeral anterior y se selecciona aquel punto en el cual la potencia es mayor.

6. Se inicia el algoritmo P&O tradicional tomando como tensión de referencia inicial, la correspondiente al máximo punto de potencia comparado, lo que va a permitir que el algoritmo converja al máximo global de potencia.

7. Se reinicia el algoritmo cuando ocurre un cambio drástico en la potencia ($|dP| > dP_m$) en donde se encuentra operando el arreglo fotovoltaico.

En la Figura 21, se observa de manera gráfica, cómo funciona el algoritmo OC&P aplicado a un arreglo fotovoltaico con tres paneles conectados en serie, bajo condiciones de sombras parciales. Tal como se mencionó, el algoritmo compara diferentes puntos de potencia, e inicia la búsqueda mediante el algoritmo P&O a la tensión de referencia con el valor de mayor potencia comparado.

Con el fin de evaluar el desempeño del algoritmo propuesto, se simuló mediante PSIM condiciones no uniformes de irradiación y temperatura en arreglos de paneles fotovoltaicos conectados en serie.

El desempeño del algoritmo es evaluado en los siguientes casos:

Caso 1: Se considera la conexión en serie de 4 paneles, los cuales forman el generador fotovoltaico. Las condiciones de irradiación y temperatura de cada uno de los paneles, se presentan en la tabla 7 para dos intervalos de tiempo considerados $0 \leq t \leq 1$ [s] y $1 < t \leq 2$ [s]. Según se observa, el intervalo comprendido entre $0 \leq t \leq 1$ [s] representa unas condiciones de alta irradiación y alta temperatura en los paneles fotovoltaicos. En este intervalo, la curva presenta 3 máximos locales y un máximo global; el cual está situado cerca a la tensión de circuito abierto (ver figura 22). Por otro lado, el intervalo comprendido entre $1 < t \leq 2$ [s] representa condiciones de baja uniformidad de irradiación en los diferentes paneles del arreglo, en donde se considera una posible sombra parcial en dos de los paneles. En este caso se presenta también 3 máximos locales y 1 máximo global (ver figura 22).

Figura 20. Diagrama de flujo de la técnica OC&P

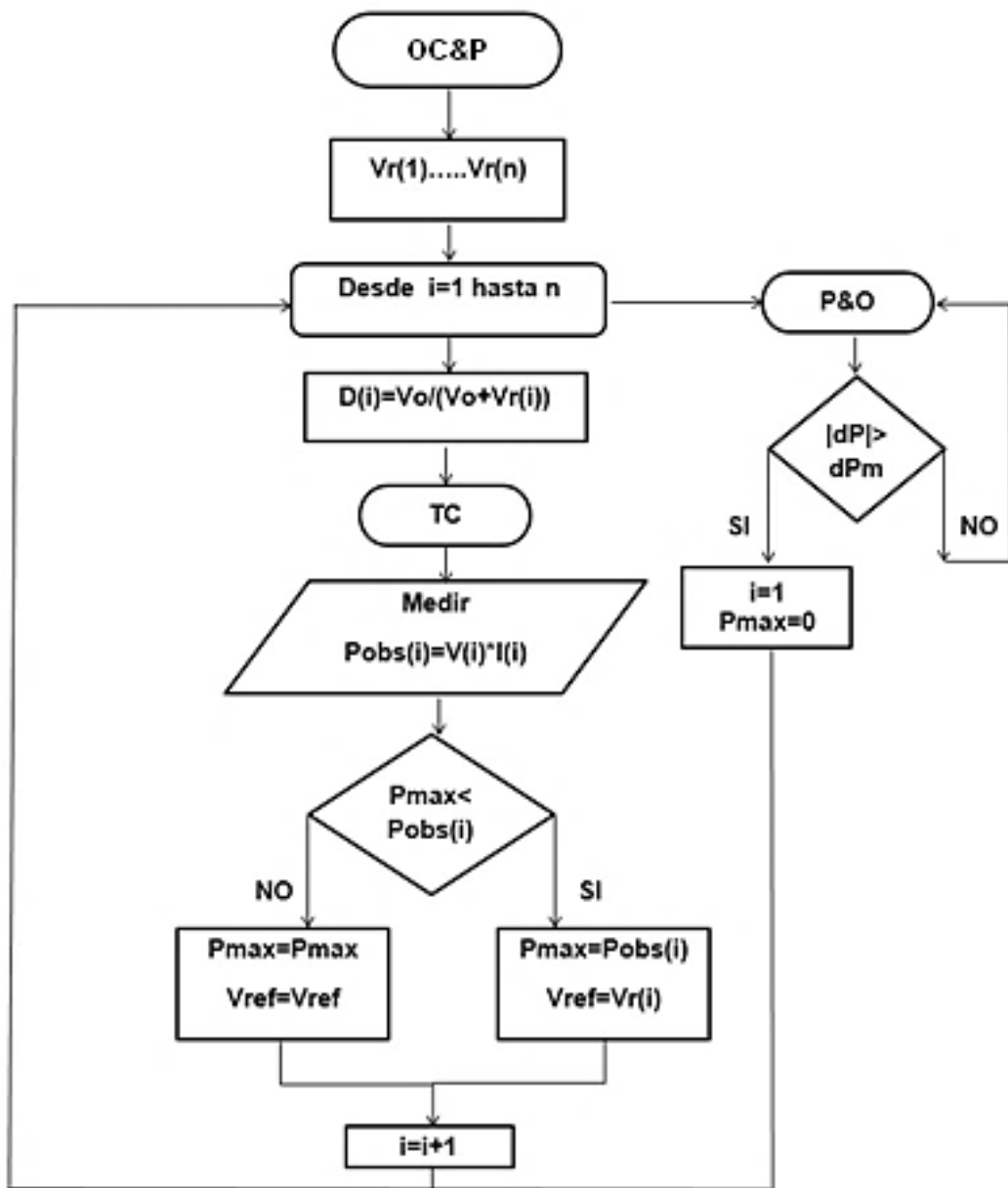


Figura 21. Búsqueda del máximo punto de potencia mediante el algoritmo OC&P, para un arreglo de tres paneles solares conectados en serie bajo condiciones de sombras parciales.

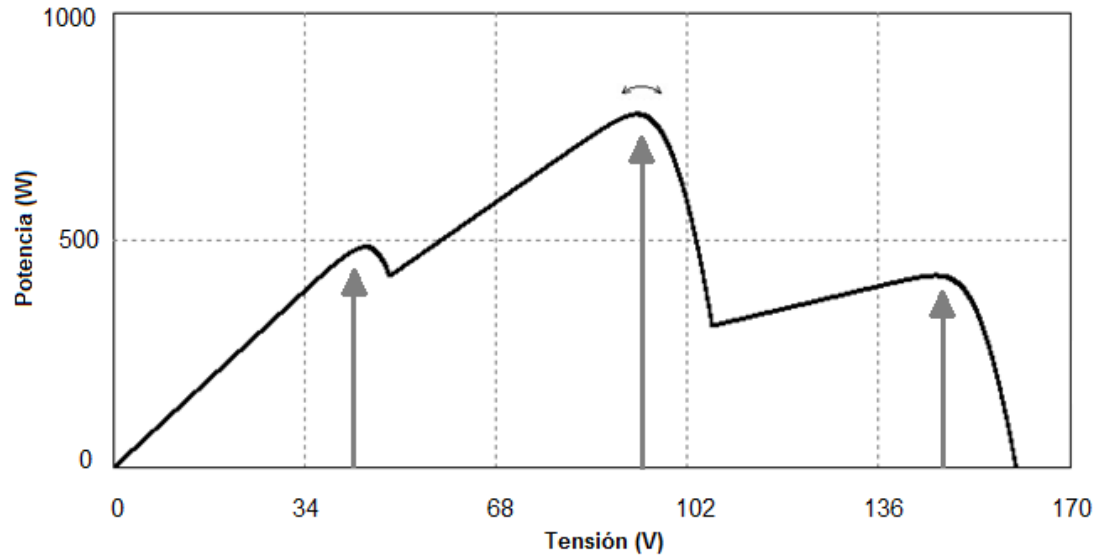
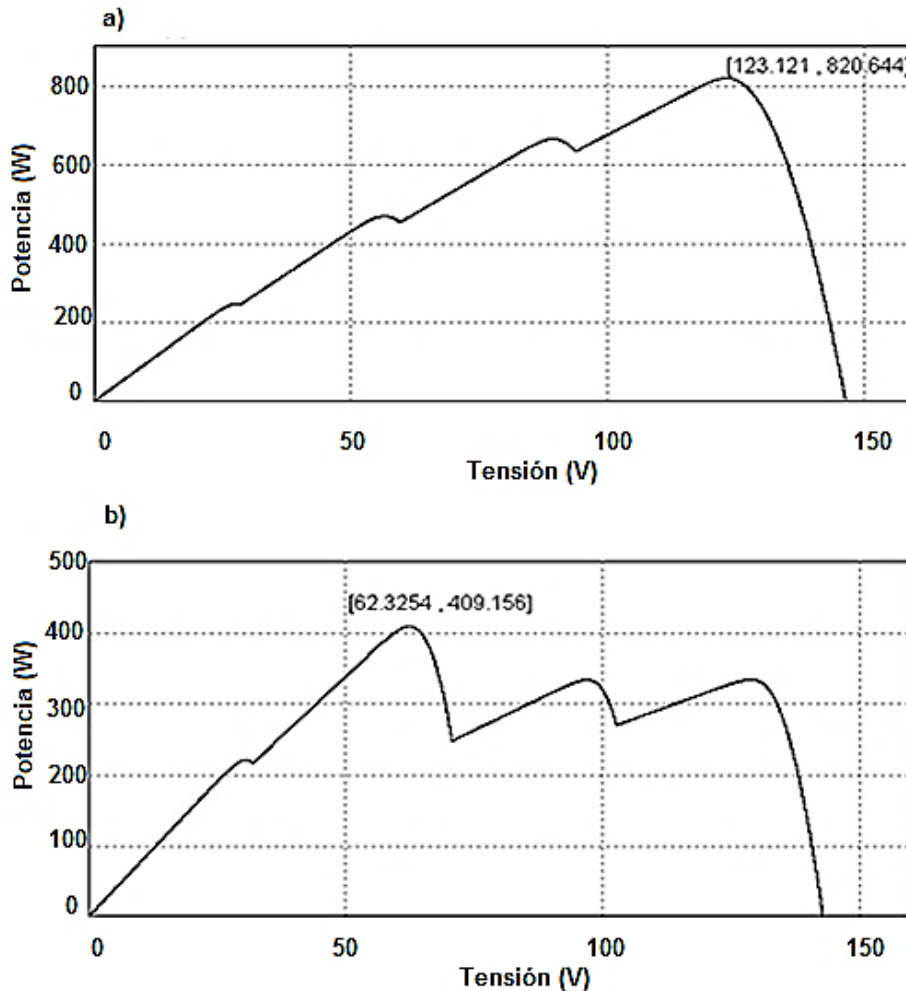


Tabla 7. Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos.

Intervalo de tiempo	Panel	CASO 1		CASO 2	
		Irradiancia W/m ²	Temperatura °C	Irradiancia W/m ²	Temperatura °C
0 ≤ t ≤ 1 [s]	1	1100	38	350	15
	2	1000	35	400	12
	3	900	30	450	10
	4	800	28	500	9
1 < t ≤ 2 [s]	1	400	38	900	15
	2	300	35	950	12
	3	900	30	450	10
	4	800	28	500	9

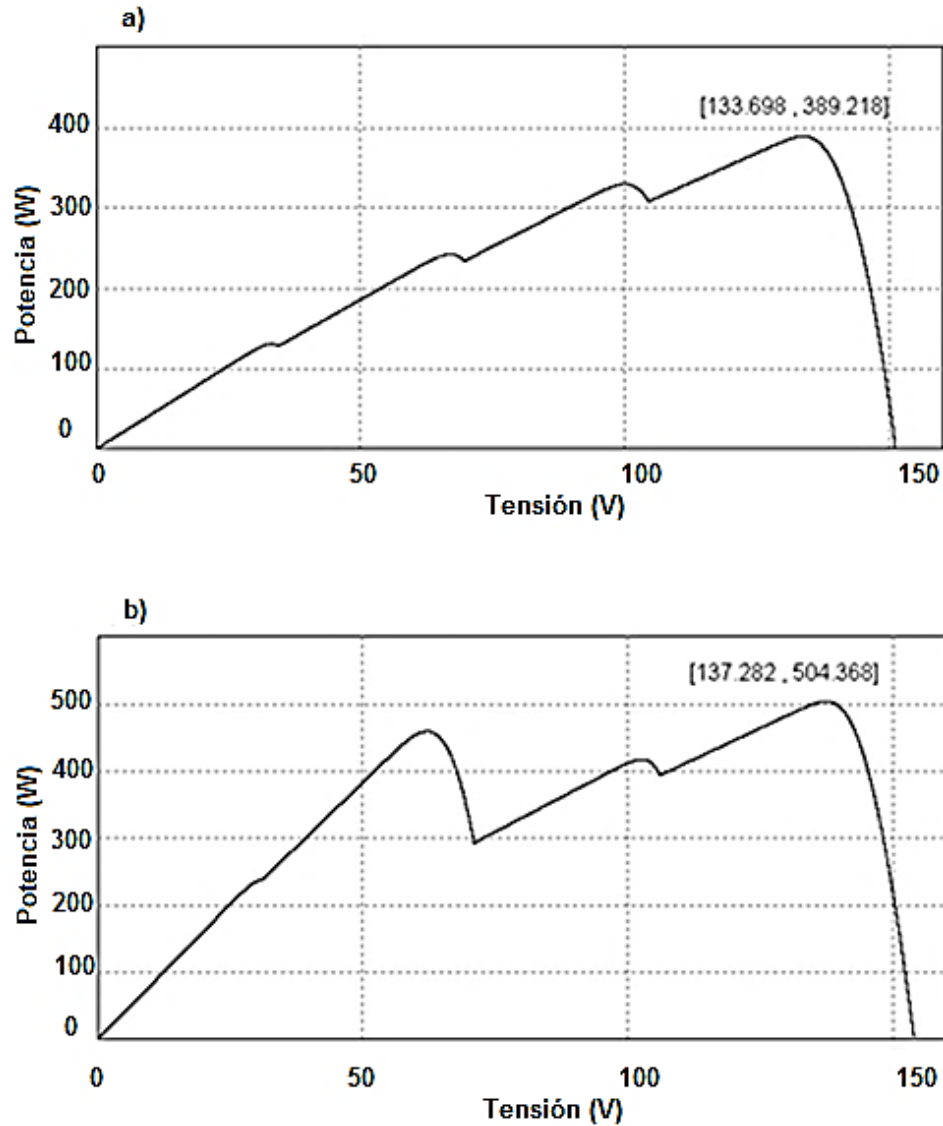
Figura 22.Caso 1: Curvas características de Potencia-Tensión para el generador fotovoltaico en los intervalos de tiempo: a.) $0 \leq t \leq 1$ [s]. b.) $1 < t \leq 2$ [s]



Caso 2: Se consideran 4 paneles conectados en serie, los cuales forman el generador fotovoltaico. Las condiciones de irradiancia y temperatura para cada uno de los paneles se presentan en la tabla 7, para dos intervalos de tiempo considerados $0 \leq t \leq 1$ [s] y $1 < t \leq 2$ [s]. Según se observa, el intervalo comprendido entre $0 \leq t \leq 1$ [s] representa unas condiciones de baja irradiancia y baja temperatura en los paneles, mientras el intervalo comprendido entre $1 < t \leq 2$

[s], representa condiciones de baja uniformidad de irradiancia, en donde se considera una posible sombra parcial en dos de los paneles, la curva potencia-tensión para los dos instantes de tiempo se aprecian en la figura 23.

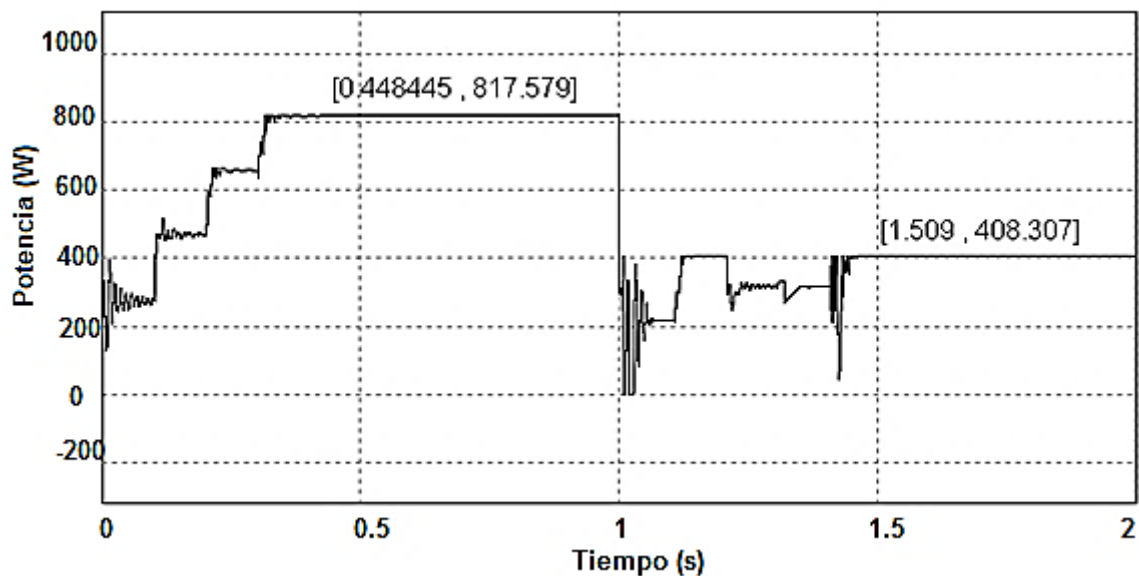
Figura 23 Caso 2: Curvas características de Potencia-Tensión para el generador fotovoltaico en los intervalos de tiempo: a.) $0 \leq t \leq 1$ [s]. b.) $1 < t \leq 2$ [s]



3.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MÉTODO POPUESTO: OBSERVAR, COMPARAR Y PERTURBAR (OC&P)

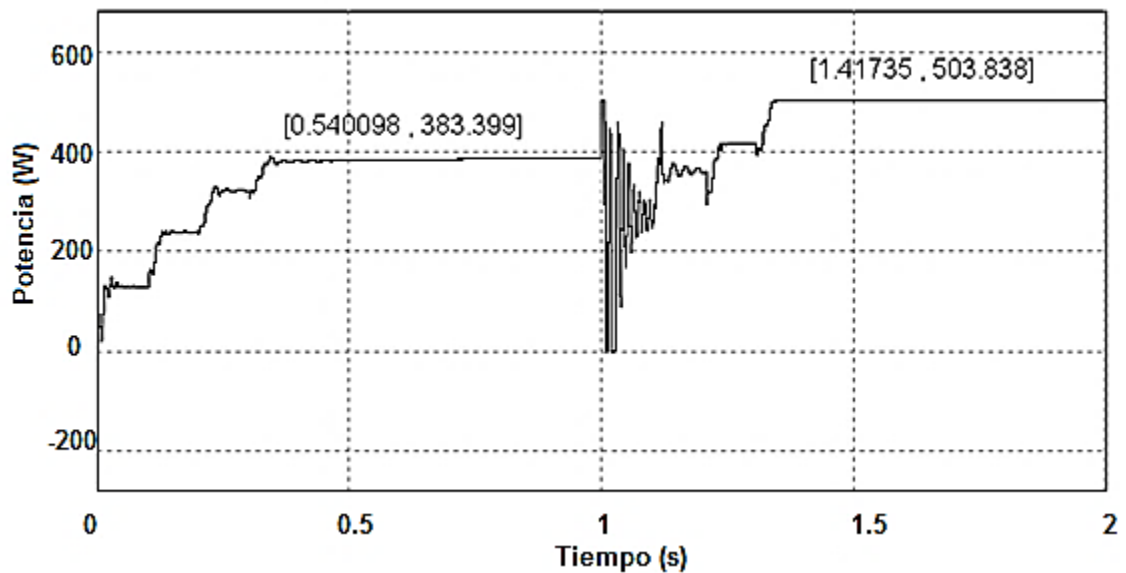
Caso 1: El algoritmo OC&P propuesto en este trabajo de investigación y verificado mediante simulación en PSIM, inicialmente determina los valores de potencia generada para las diferentes tensiones de referencia (en este caso 4 puntos de comparación) y posteriormente inicia la técnica P&O clásica tomando como punto de partida la tensión de referencia que presenta mayor potencia generada. En este sentido, la técnica OC&P en estado estable, converge alrededor de los dos máximos globales, 817W y 408W (ver Figura 24 y comparar con figura 22), en los dos intervalos de tiempo considerados. El tiempo que demora el algoritmo en alcanzar el máximo global de potencia, corresponde a 0.4 segundos, tal como se observa en la figura 24.

Figura 24. Caso 1: Seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica OC&P



Caso 2: En la figura 25 se presenta la potencia generada por el arreglo fotovoltaico mediante la técnica OC&P, la cual converge en estado estable alrededor de los dos máximos globales 383 [W] y 503[W] (comparar figura 25 con figura 23) en los intervalos de tiempo considerados. De igual manera la técnica converge al máximo de potencia en 0.4 [s].

Figura 25 Caso 2: Seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica OC&P



Se observa como en ambos casos de simulación, la técnica OC&P realiza la búsqueda del punto de máxima potencia a diferentes condiciones de irradiancia y temperatura en condiciones de sombras parciales.

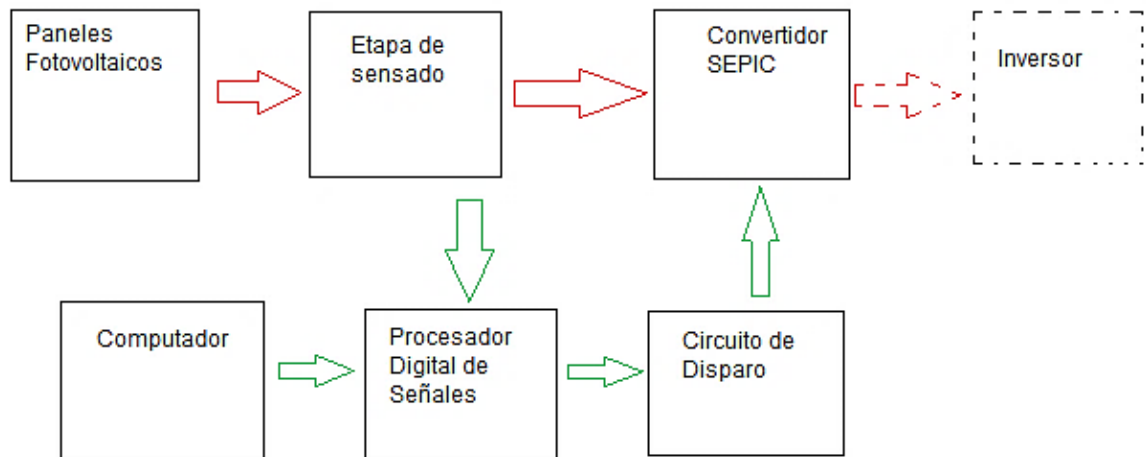
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se describen los componentes del prototipo experimental implementado y se presentan los resultados experimentales al utilizar tanto la técnica P&O clásica, como la técnica P&O con la red de compensación diseñada e implementada.

4.1 PROTOTIPO EXPERIMENTAL

En la figura 26 se observa el diagrama de bloques del sistema implementado. Los bloques en línea continua corresponden al prototipo experimental en este proyecto, las flechas en rojo corresponden al flujo de potencia y las flechas en verde indican las señales de control. A continuación se realiza una descripción de cada uno de ellos.

Figura 26. Diagrama de bloques del sistema implementado (en línea continua).



4.1.1 Paneles Fotovoltaicos: En este trabajo se consideraron, el uso de 4 paneles conectados en serie, dos de referencia KD240GH-2PB marca KYOCERA y dos de referencia UPM250P marca UPSOLAR (ver figura 27). Las características eléctricas para los dos tipos de paneles se presentan en la tabla 8, información más específica de las referencias se encuentra en [31]-[32].

Figura 27. Paneles instalados en el parque tecnológico de Guatiguará



Tabla 8. Características eléctricas del sistema fotovoltaico

	UPSOLAR	KYOCERA
Potencia Máxima	250 W	240 W
Tensión de Circuito Abierto	38.2 V	36.9 V
Corriente de corto Circuito	8.45 A	8.59 A
Tensión en el máximo punto de potencia	30.9 V	29.8 V
Corriente en el máximo punto de potencia.	8.1 A	8.06 A

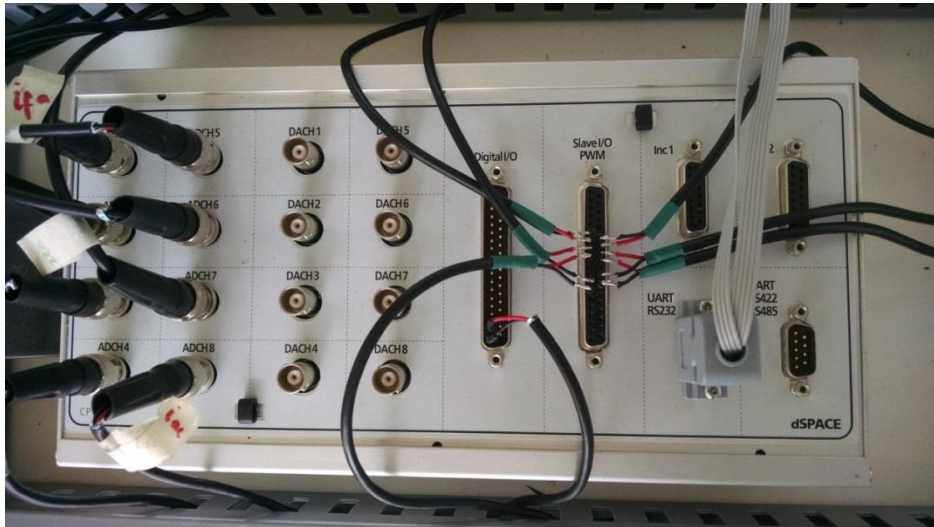
4.1.2 Etapa de sensado: Esta etapa es la encargada de tomar las mediciones de las señales de tensión y corriente de los paneles fotovoltaicos, las cuales son adecuadas a los niveles de tensión y potencia del procesador digital de señales y fue basada en diseños previos [33], [34]. Más detalles de esta etapa, se presentan en el anexo A.

4.1.3 Procesador Digital de Señales: Una vez tomadas las mediciones mediante la etapa de sensado, la información es captada por la tarjeta de control dSPACE 1104 [35]. Las principales especificaciones de esta tarjeta son:

- Posee un procesador MPC8240 a 250 MHz de frecuencia y 64 bits punto flotante.
- Se conecta al computador mediante la ranura tipo PCI^2 de 32 bits.
- El ADC posee 8 canales con rango de tensión a la entrada de $\pm 10V$ y un error de *offset* de $\pm 5mV$.
- Posee 10 salidas PWM con rangos entre 0 y 5 V cuya frecuencia máxima es 10 MHz.
- La comunicación serial se puede realizar mediante RS232, RS422 y RS485.
- El acceso a los periféricos de la dSPACE, se realiza mediante el panel de conexión presentado en la figura 28.

4.1.4 Computador: El computador debe tener instalado MATLAB con la interfaz de tiempo real (RTI) y dSPACE ControlDesk, debido a que dichos programas son requeridos para programar el procesador digital de señales, además debe tener una ranura tipo PCI.

Figura 28. Panel de conexión de la dSPACE.



4.1.5 Circuito de disparo: El circuito de disparo recibe la señal PWM del procesador de señales y conmuta el transistor del convertidor SEPIC. Una descripción de esta etapa se presenta en el anexo B.

4.1.6 Convertidor SEPIC: Se determina la curva de eficiencia del convertidor al variar la tensión de entrada y el ciclo de trabajo del SEPIC, manteniendo la tensión de salida constante a 460 [V].

En la figura 29, se observa la curva de eficiencia para diferentes cargas. Se aprecia que a un ciclo de trabajo menor a 0.4 o mayor a 0.8 se presentan los menores rangos de eficiencia del convertidor SEPIC. Las eficiencias más altas se presentan en un rango del ciclo de trabajo entre 0.5 y 0.66. En la figura 30, se aprecia el prototipo experimental.

Figura 29. Eficiencia del convertidor SEPIC para diferentes cargas a diferentes ciclos de trabajo.

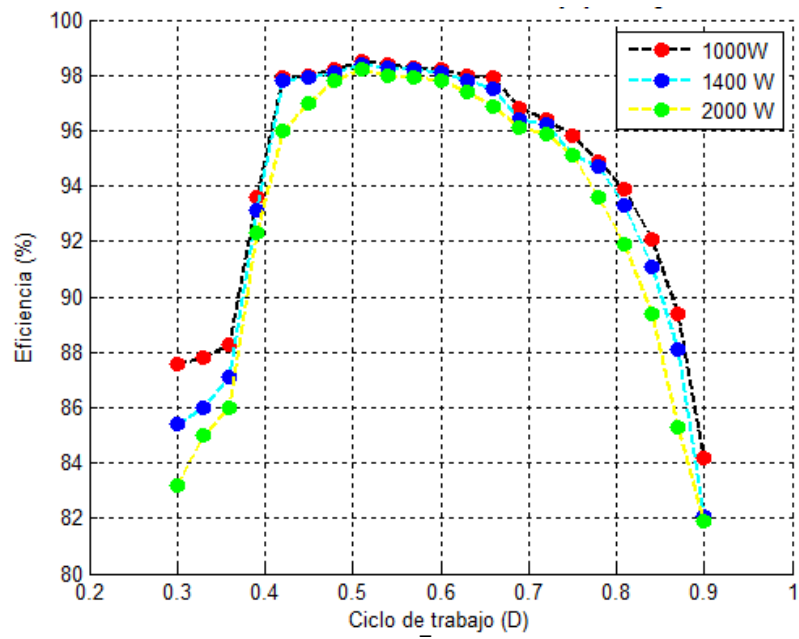


Figura 30 Convertidor SEPIC experimental.



4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ALGORITMO P&O CLÁSICO.

En la presente sección tiene como objetivo comparar la potencia entregada entre el prototipo experimental y los resultados de simulación, a irradiancia de 600 W/m^2 y 27°C mediante la técnica P&O clásica.

En la figura 31 se observa la potencia entregada por el sistema fotovoltaico mediante el software de simulación PSIM, para ello, se ingresó en el software, información de las hojas de datos de los fabricantes. En la figura 32, se aprecia la potencia entregada por el prototipo experimental, al comparar ambas figuras, la potencia entregada es superior a 500 [W] , tal como se espera a irradiancia de 600 W/m^2 . En el prototipo experimental, se observan picos en la señal debido a la conmutación del transistor. También se observa la oscilación, debido a la ausencia de la red de compensación en la técnica P&O.

Figura 31 Potencia entregada de la técnica P&O mediante simulación.

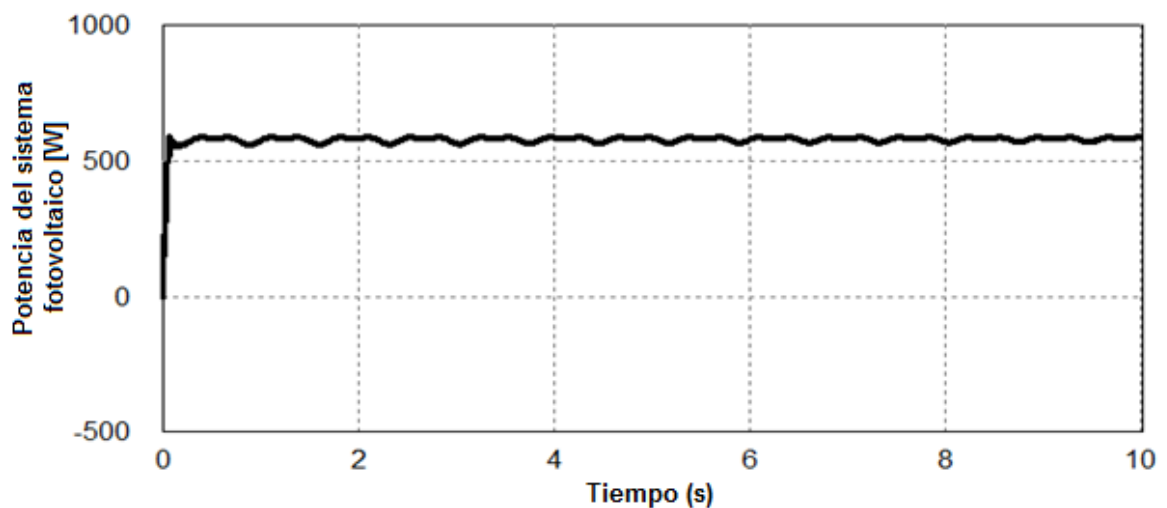
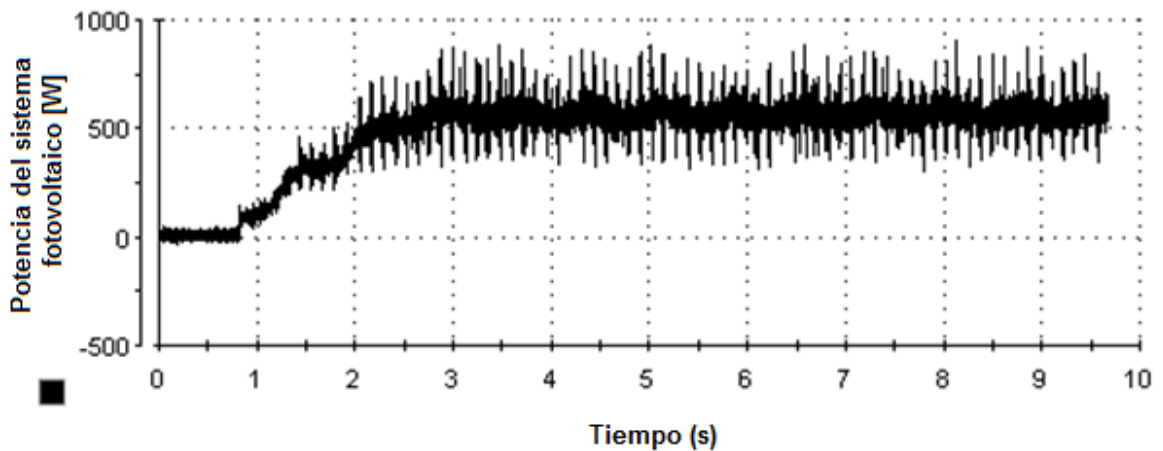


Figura 32 Potencia entregada de la técnica P&O del prototipo experimental.



4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TÉCNICA P&O CLÁSICA Y LA TÉCNICA P&O CON RED DE COMPENSACIÓN.

En la presente sección, se observa la utilidad de adicionar una red de compensación. En el caso de estudio; se implementó la técnica clásica P&O y la técnica P&O con red de compensación, el sistema fotovoltaico presenta irradiancia de $300 \text{ W}/\text{m}^2$ y 27°C .

En la figura 33, se presenta las oscilaciones de la tensión de salida del prototipo experimental, para cada uno, de los dos capacitores conectados en serie. En el caso de estudio, la tensión de los paneles (figura 34) presenta las mismas bajas frecuencias de la tensión de salida del convertidor mediante P&O (figura 33).

Figura 33. Tensiones de salida del convertidor SEPIC. (Cada capacitor en serie 230[V])

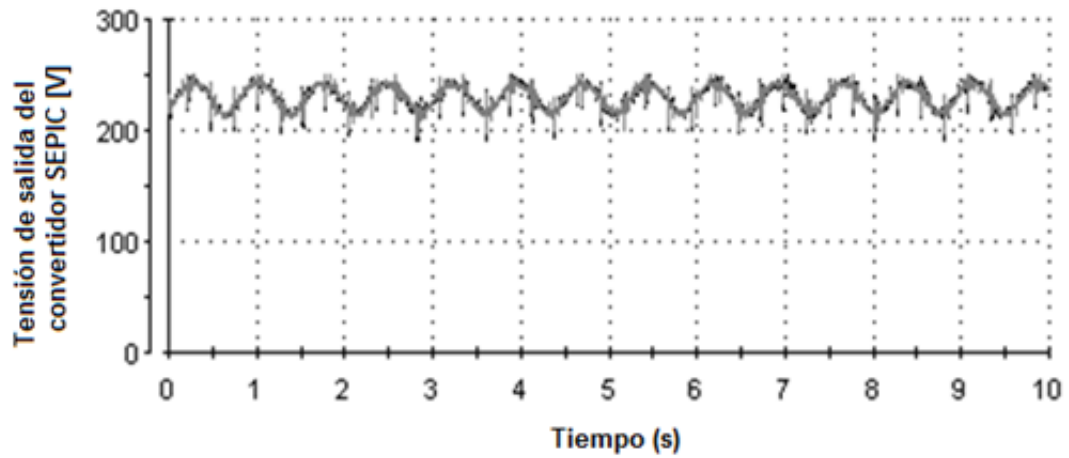
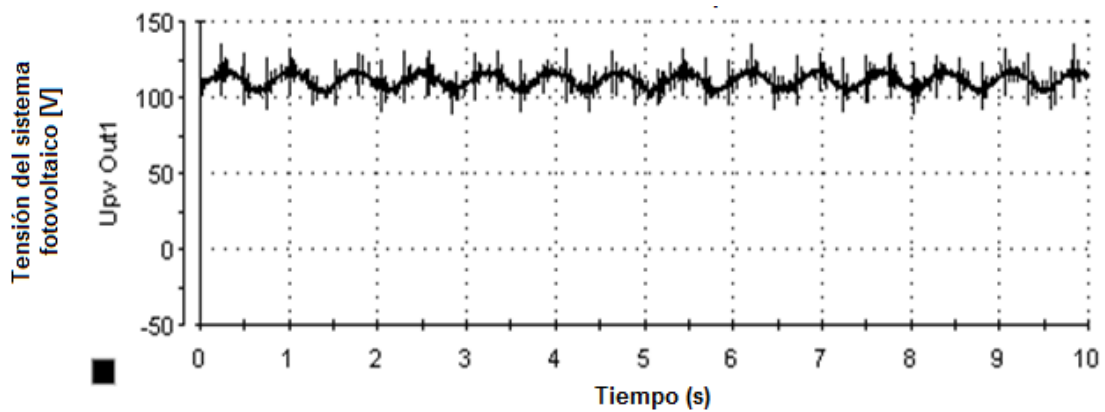
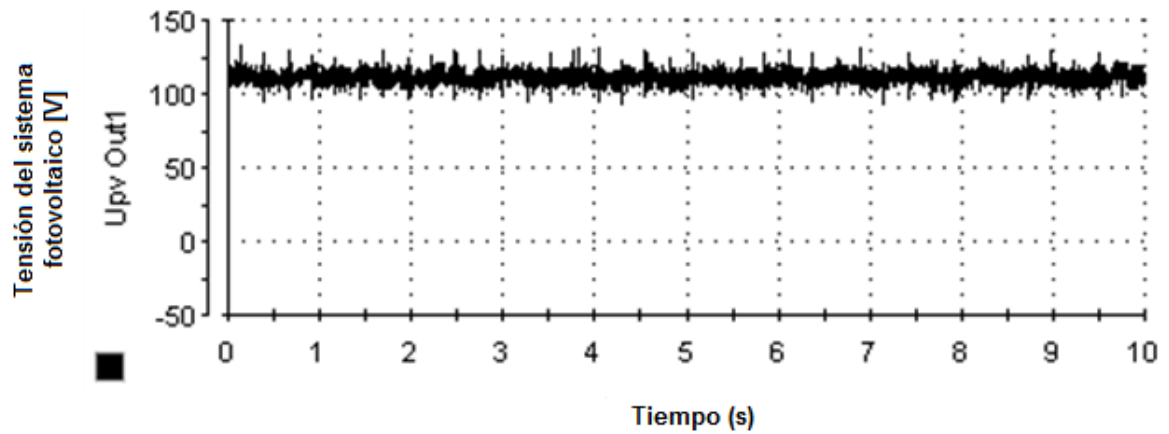


Figura 34. Tensión del sistema fotovoltaico mediante P&O sin red de compensación.



Adicionar una red de compensación a la técnica P&O, atenúa las oscilaciones de baja frecuencia, tal como se aprecia en la figura 35. Sin embargo, el beneficio de atenuar las oscilaciones, se aprecia en la entrega de potencia al sistema.

Figura 35. Tensión del sistema fotovoltaico mediante P&O con red de compensación.



La entrega de potencia mediante la técnica P&O sin red de compensación, es oscilatoria y se presenta en la figura 36. En cambio, la entrega de potencia con red de compensación no presenta esas oscilaciones de baja frecuencia (ver figura 37), la línea roja de las dos figuras, facilita la comparación de ambas y permite apreciar como la técnica P&O con red de compensación entrega mayor potencia al sistema experimental.

Figura 36. Potencia del sistema fotovoltaico mediante P&O sin red de compensación.

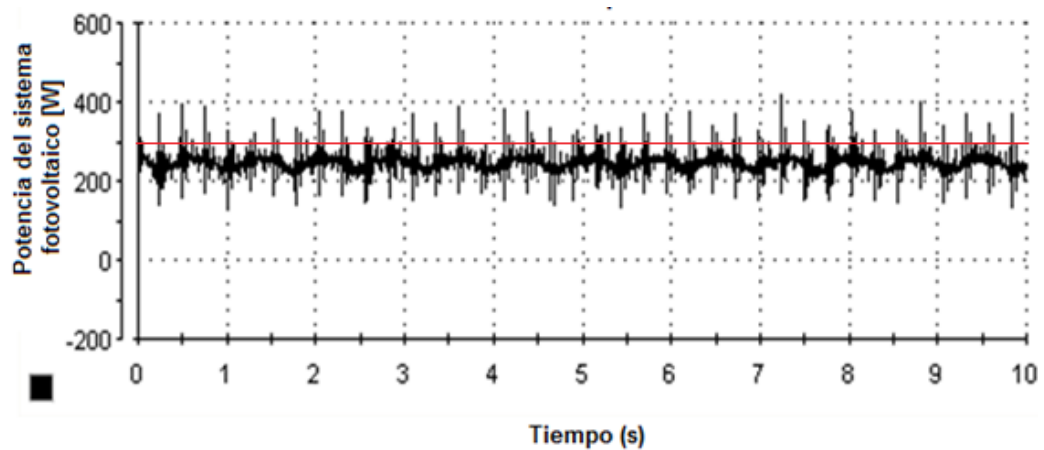
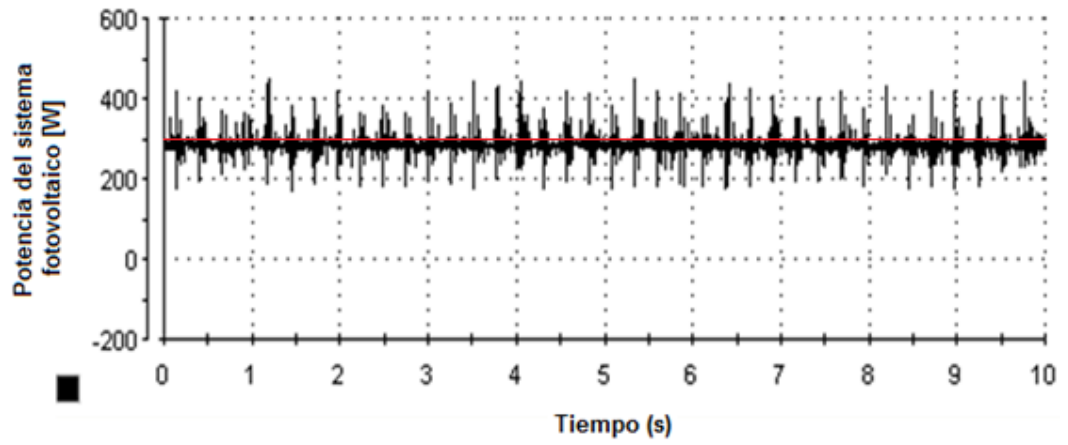


Figura 37. Potencia del sistema fotovoltaico mediante P&O con red de compensación.



5. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se analizó, simuló e implementó la etapa de conversión DC-DC de un sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución. La etapa de conversión implementada, está conformada por cuatro sistemas principales: circuito de disparo, convertidor SEPIC, sistema de medición y sistema de control. El sistema de control considerado en esta tesis, se enfocó en garantizar la operación del generador fotovoltaico en el punto de máxima potencia mediante el uso de algoritmos MPPT.

Entre las conclusiones y aportes que se realizaron a lo largo de la ejecución de la tesis, se destacan las siguientes:

- En un sistema integrado a la red, las variaciones del capacitor de salida del convertidor DC-DC pueden generar oscilaciones de tensión en los paneles del sistema fotovoltaico, ocasionando menor eficiencia. Una solución, consiste en adicionar una red de compensación al algoritmo encargado de seguir la máxima potencia de los paneles.
- La presencia de sombras parciales en un arreglo de paneles fotovoltaicos, genera máximos locales y máximos globales en las curvas potencia-tensión de los paneles. La búsqueda de máxima potencia mediante técnicas clásicas como P&O convergen en máximos locales. Como parte de esta investigación se propuso un nuevo algoritmo, que permite encontrar el máximo global bajo condiciones de sombras parciales.
- Como parte del presente trabajo de investigación, se implementó un prototipo funcional (convertidor SEPIC), con el circuito de disparo y el sistema de medición, el cual hace parte de la etapa de un sistema interconectado a la red

y se encuentra en el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará.

5.1. PUBLICACIÓN REALIZADA

Revista: Ingeniería y Universidad. Artículo aceptado para publicación en el volumen

20-2 del año 2016.

Categoría: Publindex (A2), Scopus (Q4).

Título: *A new Algorithm for photovoltaic Systems under Partially Shaded Conditions.*

5.2. TRABAJOS CO-DIRIGIDOS.

Título: modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica p&o - mppt (perturb and observe maximum power point tracking).

- Tesis aprobada. 2016. UIS.

Título: Implementación de un Prototipo para la Caracterización de Paneles Fotovoltaicos.

- Tesis laureada. 2016. UIS.

CITAS

- [1] ESTACIÓN METEOROLÓGICA UPB PIEDECUESTA, <https://espanol.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=ISANTAND30#history/s20150619/e20150626/mweek>, disponible en diciembre de 2015.
- [2] Coelho F, F Concer, D Martins, A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking, Brazilian Power Electronics Conference, 2009.
- [3] M.H. Taghvaei, M.A.M. Radzi, S.M. Moosavain, Hashim Hizam, M. Hamiruce Marhaban, A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 17, January 2013, Pages 216-227
- [4] S Chiang, H Shieh, M Chen, Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, November 2009.
- [5] N Abd Rahim, A Khateb, J Selvaraj, M Uddin, Fuzzy Logic Controller Based SEPIC Converter of Maximum Power Point Tracking, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. pp, no. 99, February 2014.
- [6] J Dunia, M Bakari, M Mwinyiwiwa, Performance Comparison between ĆUK and SEPIC Converters for Maximum Power Point Tracking Using Incremental Conductance Technique in Solar Power Applications, International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering Vol:7 No:12, 2013

- [7] G spagnuolo, E Mamarelis, G Petrone, Design of a Sliding-Mode-Controlled SEPIC for PV MPPT Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, July 2014.
- [8] A Kashiap , R Ahmadi, J Kimball, Input Voltage Control of SEPIC for Maximum Power Point Tracking, IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013.
- [9] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, y M. Vitelli, A technique for improving p&o mppt performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 56, no. 11, Nov 2009.
- [10] R. Middlebrook y S. Cuk, A general unified approach to modelling switching-converter power stages, Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE, pp. June 1976.
- [11] Texas Instruments, Application Report, AN-1484 Designing a SEPIC converter, Revised April 2013.
- [12] Texas Instruments, Power Management, Jeff Falin, Designing DC/DC Converters Based on SEPIC Topology, 2008.
- [13] <http://www.farnell.com/datasheets/102474.pdf>, Hoja de datos del capacitor electrolítico de acople de 2200uf y 450V, disponible en diciembre de 2015.
- [14] <http://www.farnell.com/datasheets/1907655.pdf>, Hoja de datos diodo de potencia SCS251AM , disponible en diciembre de 2015.
- [15] http://www.datasheetlib.com/datasheet/773429/skm50gal123d_semikron.html, Hoja de datos del transistor SKM50GAL123D de SEMIKRON, disponible en diciembre de 2015.
- [16] http://www.paulswan.me/arcade/datasheets/SKN_2_F_50.pdf, Hoja de datos SEMIKRON SKR50/04, disponible en diciembre de 2015.

- [17] L Hassaine , Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores, Aplicación de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, Tesis de doctorado , Universidad Carlos III de Madrid,2010.
- [18] A Carbonell, Convertidor CC/CC Elevador con Seguidor del Punto de Máxima Potencia mediante un Procesador Digital de Señal, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de pregrado, 2009.
- [19] N Femia et al, Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method, Power Electronics IEEE Transactions on Volume 20, 2005.
- [20] T Eram, L Chapman, Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaics Arrays Using Ripple Correlation Control, Power Electronics IEEE Transactions on Volume 21, 2006.
- [21]N Diaz, J Hernandez, O Duarte, Fuzzy Maximum Power Point Tracking Techniques applied to a Grid Connected Photovoltaic System. Fuzzy Controllers, Theory and Applications, 2008.
- [22] Nelson Diaz, Johann Hernández and Oscar Duarte (2011). Fuzzy Maximum Power Point Tracking Techniques Applied to a Grid-Connected Photovoltaic System, Fuzzy Controllers, Theory and Applications, Dr. Lucian Grigorie (Ed.), ISBN: 978-953-307-543-3, InTech, DOI: 10.5772/13879. Available from: <http://www.intechopen.com/books/fuzzy-controllers-theory-and-applications/fuzzy-maximum-power-point-tracking-techniques-applied-to-a-grid-connected-photovoltaic-system>
- [23] T Eram et al, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume:22, pages:433-449, 2007.

- [24] B Montes, Análisis del seguimiento del Punto de Máxima Potencia de Inversores Fotovoltaicos de Conexión a Red, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de Pregrado, 2009.
- [25] S Agarwal, M Jamil, A Comparison of Photovoltaic Maximum Power Point Techniques, Annual IEEE India Conference, 2015.
- [26] J.J. Nedumgatt et al, "Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems –Modeling and Simulation," in 2011 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-6, 2011
- [27] M. Mantilla, G. Quiñones, C. Castellanos, J. Petit, y G. Ordonez, Analysis of maximum power point tracking algorithms in dc-dc boost converters for grid-tied photovoltaic systems, Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, Oct 2014.
- [28] A. Sayal. "MPPT Techniques for Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions," in 2012 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp. 1-6, 2012
- [29] R. Alonso, P. Ibañez, V. Martinez, E. Ramon, A. Sanz. "An innovative Perturb, Observe and Check Algorithm for Partially Shaded PV Systems," in 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-8, 2009.
- [30] Nelson Diaz, Johann Hernández and Oscar Duarte (2011). Fuzzy Maximum Power Point Tracking Techniques Applied to a Grid-Connected Photovoltaic System, Fuzzy Controllers, Theory and Applications, Dr. Lucian Grigorie (Ed.), ISBN: 978-953-307-543-3, InTech, DOI: 10.5772/13879. Available from: <http://www.intechopen.com/books/fuzzy-controllers-theory-and-applications/fuzzy-maximum-power-point-tracking-techniques-applied-to-a-grid-connected-photovoltaic-system>

[31] <http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5125.pdf>, Especificaciones del panel solar KYOCERA, disponible en diciembre de 2015.

[32] <http://www.eco-distributing.com/assets/images/Data%20Sheets/Upsolar%20poly%2060%20cells.pdf>, Especificaciones del panel solar UPSOLAR, disponible en diciembre de 2015.

[33] Y. Carrascal, J. Gamarra. “Implementación de un Convertidor CD/CD para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia de Generadores Fotovoltaicos”, Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado, 2014.

[34] V. Meneses, J. Almeyda. “Sistema de Adquisición y Adecuación de Señales Eléctricas para el Control y Monitorización del Módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON”, Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado, 2014.

[35] DS1104 R&D Controller Board, “Hardware Installation and Configuration”, For Release 5.2 also valid for Release 6.3, Dspace®, December 2006.

[36] <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf> “Hoja de datos del sensor de Tensión LV25-P”, disponible en línea en Enero 2016.

[37] <http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf> “Hoja de datos del sensor de corriente LA25-NP”, disponible en enero de 2016.

[38] <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0161EN>, “Hoja de datos del HCPL3120”, disponible en enero de 2016.

[39] <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skyper-32-r-l6100239>, “Hoja de datos del SKYPER 32R”, disponible en línea en enero de 2016.

BIBLIOGRAFÍA

ABDRAHIM N, KHATEB A, SELVARAJ J, UDDIN M, Fuzzy Logic Controller Based SEPIC Converter of Maximum Power Point Tracking , IEEE Transactions on Industry Applications, vol. pp, no. 99, February 2014.

AGARWAL S, JAMIL M, A Comparison of Photovoltaic Maximum Power Point Techniques, Annual IEEE India Conference, 2015.

CARBONELL A, Convertidor CC/CC Elevador con Seguidor del Punto de Máxima Potencia mediante un Procesador Digital de Señal, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de pregrado, 2009.

CARRASCAL Y, GAMARRA J. "Implementación de un Convertidor CD/CD para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia de Generadores Fotovoltaicos", Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado, 2014.

CHIANG S, SHIEH H, CHEN M, Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, November 2009.

COELHO F, CONCER F, MARTINS D, A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking, Brazilian Power Electronics Conference, 2009.

DIAZ N, HERNANDEZ J, DUARTE O, Fuzzy Maximum Power Point Tracking Techniques applied to a Grid Connected Photovoltaic System. Fuzzy Controllers, Theory and Applications, 2008.

DUNIA J, BAKARI M, MWINYIWIWA M, Performance Comparison between ĆUK and SEPIC Converters for Maximum Power Point Tracking Using Incremental

Conductance Technique in Solar Power Applications, International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering Vol:7 No:12, 2013

ESRAM T, CHAPMAN L, Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaics Arrays Using Ripple Correlation Control, Power Electronics IEEE Transactions on Volume 21, 2006.

ESRAM T, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume:22, pages:433-449, 2007.

FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, VITELLI M, A technique for improving p&o mppt performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 56, no. 11, Nov 2009.

FEMIA N, Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method, Power Electronics IEEE Transactions on Volume 20, 2005.

HASSAINE L , Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores, Aplicación de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red, Tesis de doctorado , Universidad Carlos III de Madrid,2010.

IBAÑEZ P, MARTINEZ V, RAMON V, SANZ A. "An innovative Perturb, Observe and Check Algorithm for Partially Shaded PV Systems," in 13th European Conference on Power Electronics and Applications,pp. 1-8,2009.

KASHIAP A , AHMADI R, KIMBALL J, Input Voltage Control of SEPIC for Maximum Power Point Tracking, IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013.

MANTILLA M, QUIÑONES G, CASTELLANOS C, PETIT J, ORDOÑEZ G, Analysis of maximum power point tracking algorithms in dc-dc boost converters for

grid-tied photovoltaic systems, Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, Oct 2014.

MENESES V, ALMEYDA J. “Sistema de Adquisición y Adecuación de Señales Eléctricas para el Control y Monitorización del Módulo SEMITEACH-IGBT de SEMIKRON”, Universidad Industrial de Santander, Tesis de Grado, 2014.

MIDDLEBROOK R, CUK S, A general unified approach to modelling switching-converter power stages, Power Electronics Specialists Conference, 1976 IEEE, pp. June 1976.

MONTES B, Análisis del seguimiento del Punto de Máxima Potencia de Inversores Fotovoltaicos de Conexión a Red, Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de Pregrado, 2009.

NEDUMGATT J, “Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems – Modeling and Simulation,” in 2011 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-6, 2011.

SAYAL A. “MPPT Techniques for Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions,” in 2012 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp. 1-6, 2012.

SPAGNUOLO G, MAMARELIS E, PETRONE G, Design of a Sliding-Mode-Controlled SEPIC for PV MPPT Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, July 2014.

TAGHVAEE M, RADZI M, MOOSAVAIN S, HASHIM H, M. Hamiruce Marhaban, A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 17, January 2013, Pages 216-227

ANEXOS

Etapa de medición

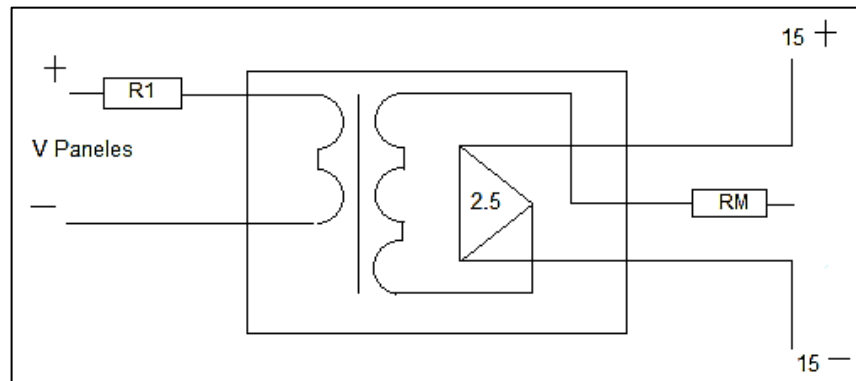
Esta etapa hace referencia a la medición de las señales de tensión y corriente de los paneles fotovoltaicos. La etapa realiza la adecuación de las señales medidas para su posterior lectura por medio de la tarjeta dSPACE 1104, además de proporcionar aislamiento galvánico entre la etapa de potencia y la etapa de medición. El diseño del circuito se basa en trabajos previos realizados [33], [34].

Sensor de Tensión: El sensor utilizado corresponde a la referencia LV 25-P de LEM® [36], a continuación se exponen algunas características:

- Alimentación: ± 15 [V] o ± 12 [V].
- Amplio rango de medición: de 10 a 500 [V]
- Presenta aislamiento galvánico.
- Muy buena linealidad: (error $< 0.2\%$)
- Excelente precisión: (Medición $\pm 0.9\%$)
- Alta inmunidad a interferencias externas.

En la siguiente figura se observa el diagrama de conexión del sensor, Los valores de la resistencia de entrada (R_1) y la resistencia de salida se dimensionan según el rango de tensión de entrada medida y el rango de tensión de salida deseado.

Figura 38 Diagrama de conexión del sensor LV 25-P



La expresión que define la relación entre la corriente de la entrada (I_{in}) y la salida (I_{out}) del sensor, está dada por:

$$I_{out} = 2.5 * I_{in}$$

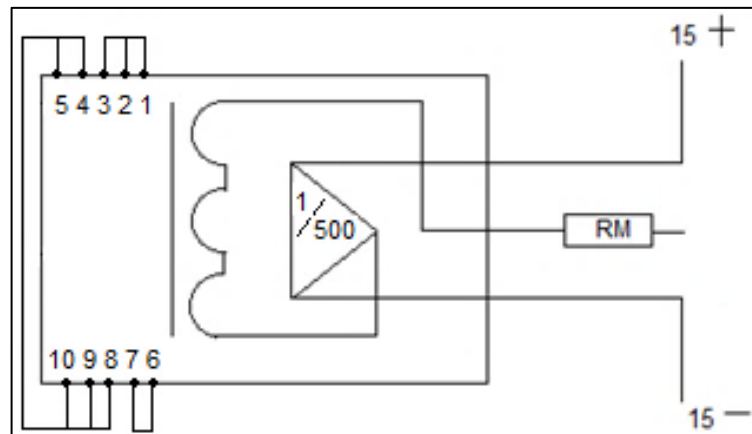
En la aplicación de esta tesis, R_1 presenta un valor de 25 [K Ω], la máxima tensión de entrada corresponde a 250 [V], por lo tanto la potencia disipada es de 2.5 [W].

A.1.2 Sensor de Corriente: El sensor de corriente corresponde a la referencia LA25-NP de LEM® [37], a continuación algunas características:

- Alimentación: ± 15 [V].
- Rango de medición: Corrientes máximas de: 5[A], 6[A], 8[A], 12[A] y 25[A].
- Presenta aislamiento galvánico.
- Muy buena linealidad: (error $< 0.2\%$)
- Excelente precisión: (Medición $\pm 0.5\%$)
- Alta inmunidad a interferencias externas.

En figura 39 se observa el diagrama de conexión del sensor, los pines de entrada están configurados para que la corriente máxima sea de 12 [A].

Figura 39. Diagrama de conexión para el sensor LA 25-NP

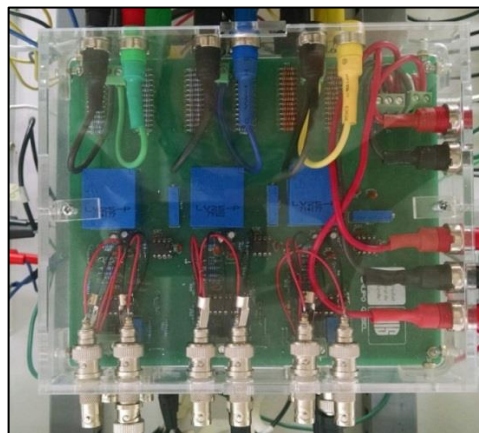


La expresión que define la relación entre la corriente de la entrada (I_{in}) y la salida (I_{out}) está dada por:

$$I_{out} = (1/500) * I_{in}$$

En la siguiente figura se observa el circuito impreso de la etapa de medición.

Figura 40. Circuito Impreso de la etapa de medición



Circuito de disparo

El circuito de disparo, hace referencia al conjunto de los elementos, que permiten adecuar la señal de conmutación de salida de la dSPACE a los niveles requeridos por el transistor de potencia. Está compuesto por 2 etapas: la etapa de adecuación y la etapa de conmutación.

La etapa de adecuación está compuesto por el circuito integrado HCPL3120 [38] y su principal misión consiste en tomar la señal de 0 a 5[V] y obtener en su salida una señal de 0 a 13[V]. A continuación se mencionan algunas de sus características:

- Aislamiento óptico entre la etapa de control y la etapa de potencia.
- Amplio rango de alimentación entre 15 y 30 [V]
- Máxima frecuencia de conmutación 500 [ns]

La segunda etapa está compuesta por la tarjeta de conmutación SKYPER 32R [39], del mismo fabricante del transistor en uso (SEMIKRON). A continuación, se exponen algunas de sus características:

- Tensión de encendido a la salida: 15 [V]
- Tensión de apagado a la salida: -7 [V]
- Corriente pico de salida: 15 [A]
- Presenta protección de sobre-tensiones y protección de corto circuito
- Máxima frecuencia de conmutación 50 KHz.

Figura 41. Tarjeta de conmutación.

