

**“ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES
FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA
REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA
CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN”**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
“ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES
FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA
REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA
CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN”**

**AUTOR:
MARCELO GABRIEL MONTÚFAR CEPEDA**

**TUTOR:
WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS**

Quito, D.M. febrero 2021

Marcelo Gabriel Montúfar Cepeda

“ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES FOTVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN”

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2021
Ingeniería Eléctrica

Breve Reseña Histórica e información de contacto



Marcelo Gabriel Montúfar Cepeda (Y'1992) Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa “Emile Jaques Dalcroze” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la estrategia de control aplicado a inversores fotovoltaicos inteligentes para intercambio de potencia reactiva en Redes de Distribución. mmontufarc@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Wilson David Pavón Vallejos (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. wpavon@est.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

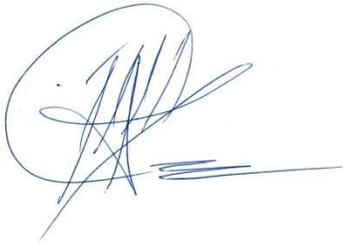
DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Wilson David Pavón Vallejos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN*” realizado por (Marcelo Gabriel Montúfar Cepeda), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero 2021



.....
Wilson David Pavón Vallejos

CI: 1719224311

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Marcelo Gabriel Montúfar Cepeda, con documento de identificación N° 1718197898, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: *“ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., febrero 2021



.....
Marcelo Gabriel Montúfar Cepeda

CI: 1718197898

1. ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico.....	3
2.1 Paneles Fotovoltaicos.....	3
2.2 Conversor DC/DC.....	4
2.3 Perturbar y observar (P&O)	4
2.4 Inversores Inteligentes	4
2.5 Control de Potencia Reactiva (Volt-Var).....	4
3. Planteamiento del Problema.....	5
4. Análisis de Resultados	10
4.1 Comportamiento de la Generación Fotovoltaica Basado en el Modelo Matemático	10
4.2 Comportamiento del Conversor DC	12
4.3 Comportamiento del Intercambio de Potencia Reactiva (Volt-Var).....	13
5. Conclusiones	17
6. Trabajos Futuros	18
7. Referencias.....	18
8. Estado del Arte.....	21

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategia de Control Aplicada a Inversores Fotovoltaicos.....	3
Figura 2. Etapas de la implementación fotovoltaica	5
Figura 3. Circuito de la célula fotoeléctrica	5
Figura 4. Control del MPPT en el Conversor DC.....	7
Figura 5. Diagrama de flujo MPPT.....	7
Figura 6. Diagrama de flujo (P&O)	8
Figura 7. Control Principal de Inversor	9
Figura 8. Control Interno Volt-Var	10
Figura 9. Curvas I-V del Array a Distinta Irradiancia	11
Figura 10. Curvas P-V del Array a Distinta Irradiancia	11
Figura 11. Curva I-V del Array a Distinta Temperatura.....	12
Figura 12. Curva P-V del Array a Distinta Temperatura	12
Figura 13. Curva I-V, P-V del Array de Módulos Fotovoltaicos.....	12
Figura 14. Estados Transitorios de los Módulos Fotovoltaicos	12
Figura 15. Estados Transitorios del Conversor DC	13
Figura 16. Estado Transitorio del Ciclo de Trabajo.....	13
Figura 17. Variación de la Carga Aplicada.....	14
Figura 18. Intercambio de Potencia Reactiva por Parte del Inversor.....	14
Figura 19. Estado del Lado de Baja del Transformador Con el Control (Volt-Var)	14
Figura 20. Estado del Lado de Baja del Transformador Sin el Control (Volt-Var).....	15
Figura 21. Potencia Activa e Intercambio de Potencia Reactiva por el Inversor.....	15
Figura 22. Forma de onda de voltaje y corriente del inversor, tipo capacitivo.....	15
Figura 23. Forma de onda de voltaje y corriente del inversor, tipo inductivo	16
Figura 24. Estado Transitorio del THD	16
Figura 25. THD Según la Carga.....	16
Figura 26. Forma de Onda del Voltaje ABC Según la Carga	16
Figura 27. Estado Transitorio de la Frecuencia	17
Figura 28. Frecuencia Específica Para la Carga.....	17
Figura 29. Resumen e Indicador de la Temática.....	24
Figura 30. Indicador de Formulación del Problema.....	25
Figura 31. Indicador de Solución	26

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de variables del modelo matemático del panel solar	6
Tabla 2. Descripción de Variables del Conversor DC	8
Tabla 3. Datos del Módulo Fotovoltaico.....	10
Tabla 4. Dimensión del Array Fotovoltaico.....	10
Tabla 5. Datos de la Generación Fotovoltaica según la Irradiancia.....	11
Tabla 6. Datos de la Generación Fotovoltaica según la Temperatura.....	11
Tabla 7. Datos de Entrada y Salida del Conversor.....	13
Tabla 8. Datos de Operación del Conversor	13
Tabla 9. Coeficientes Proporcional e Integral para MPPT	13
Tabla 10. Intervalos de Tiempo y Tipo de Carga Aplicada	14
Tabla 11. Angulo Según la Potencia Activa y Reactiva Teórica del Inversor	15
Tabla 12. Angulo Según la Potencia Activa y Reactiva Experimental del Inversor	15

“Estrategia De Control Aplicado A Inversores Fotovoltaicos Inteligentes Para Intercambio De Potencia Reactiva Por Medio Del Control Volt-Var Para Mejorar La Calidad De Voltaje En Redes De Distribución”

Resumen

Los sistemas de generación fotovoltaica toman una fuerte inclusión en las redes de distribución, su energía limpia y adaptabilidad, llaman mucho el interés, a pesar que los componentes electrónicos de estos sistemas sean fuentes de una deficiente calidad de voltaje.

El documento presenta las etapas previas al inversor, estas corresponden a: comportamiento de la generación fotovoltaica, operación de los paneles fotovoltaicos en (MPP) mediante el algoritmo (P&O), suplir un rizado de voltaje y corriente adecuado al inversor por parte del convertidor, una vez que se establecen las etapas previas, el inversor inteligente es capaz de entregar potencia activa, y mediante la estrategia de control que se aplica en el inversor inteligente, permite (entregar/absorber) potencia reactiva y mantener una calidad en el suministro de voltaje.

Se encuentra un comportamiento deficiente al no aplicar el control frente a las distintas cargas (Inductivo/Capacitiva), y una notoria diferencia al aplicar el control (Volt-Var), en el cual se observa que el problema de calidad de voltaje se soluciona.

Además la frecuencia del sistema presenta oscilaciones muy cercanas a la referencia ideal con un pequeño pico de desviación al cambio de carga y la distorsión armónica del sistema es ideal.

Palabras Clave: Control Volt-Var, Generación Fotovoltaica, Conversores DC, Inversores Inteligentes.

Abstract

Photovoltaic generation systems take a strong inclusion in distribution networks, their clean energy and adaptability, attract a lot of interest, despite the fact that the electronic components of these systems are sources of poor quality voltage.

The document presents the stages prior to the inverter, these correspond to: behavior of photovoltaic generation, operation of photovoltaic panels in (MPP) by means of the (P&O) algorithm, supplying a suitable voltage and current ripple to the inverter by the converter, once establishes the previous stages, the smart inverter is able to deliver active power, and through the control strategy applies in the smart inverter, it allows (deliver / absorb) reactive power and maintain a quality supply voltage.

There is a deficient behavior when not applying the control against the different loads (Inductive / Capacitive), and a noticeable difference when applying the control (Volt-Var), in which the voltage quality problem takes solution.

In addition, the frequency of the system shows oscillations very close to the ideal reference with a deviation peak to the load change and the harmonic distortion of the system is ideal.

Keywords: Volt-Var Control, Photovoltaic Generation, DC Converters, Smart Inverters.

1. Introducción

La inclusión de energía fotovoltaica toma un amplio campo debido a su facilidad de implementar en patios o en techos de domicilios y edificios, la viabilidad de proyectos de generación fotovoltaica en los techos, promete una mayor inclusión de las mismas para las redes de distribución [1][2].

La generación fotovoltaica, como una de las favoritas para adaptarlas en la red de distribución, se vuelven las tecnologías con mayor inclusión y resulta necesario solucionar los problemas asociados a la calidad de voltaje además la cantidad de inversores aumentan en la red, razón por la que se encuentra mayor cantidad de armónicos los cuales denotan un déficit en la calidad de voltaje que se entrega [3]. Se hace necesario determinar un nivel de inclusión eficaz a fin de prevenir problemas de calidad [4][5][6].

Los problemas de calidad de voltaje en las redes de distribución se presentan además debido a las distintas cargas que puede experimentarse en la red, es decir desvía el voltaje de su operación normal, es necesario proponer métodos que permitan solventar el problema, métodos que permitan regular las desviaciones del voltaje al (inyectar/absorber) potencia reactiva y garantizar que el método logre reducir las desviaciones de voltaje [7][8][9].

Al incluir mayor cantidad de inversores en la red de distribución, estos deben operar en sincronía con la red, esta se ve afectada debido a la creciente inclusión de inversores en la red y la presencia de generaciones renovables adyacentes, la frecuencia se vuelve difícil de administrar, es necesario cubrir estos problemas asociados a la frecuencia, los inversores deberían contar con controles que solucionen los inconvenientes antes mencionados [10].

De toda forma lo que se busca es mantener el voltaje en un límite adecuado

de operación, obtener la mínima presencia de armónicos en la red, encontrar estabilidad en la frecuencia, en general, una inclusión de generación fotovoltaica capaz de satisfacer las necesidades en la red de distribución.

Resulta necesario estrategias que permitan solventar problemas de calidad de voltaje, para esto las redes presentan bancos de condensadores, reguladores de voltaje, cambiadores de tomas de transformadores y compensadores estáticos los cuales conllevan costos, tanto de instalación como de mantenimiento, además de los costos, presentan respuestas lentas lo cual no es eficaz [11]. A razón de solucionar tales problemas se puede coordinar las estrategias antes mencionadas con el control volt-var y obtener un desempeño eficaz [12][13][14].

El desarrollo de estrategias aplicadas a inversores fotovoltaicos resulta muy tentador, ya que permite mejorar la calidad del voltaje al igual que dichas estrategias actúen automáticamente, de ahí viene el concepto de inversores inteligentes, con capacidad de conocer el estado de la red y mantenerlo en óptimas condiciones [15][16].

El intercambio de potencia reactiva como estrategia para satisfacer la calidad de voltaje en la red presenta desafíos, como la inclusión de generación fotovoltaica y la capacidad del inversor en entregar y absorber potencia reactiva, de esta manera, la operación del inversor presenta el efecto inductivo y capacitivo el cual tiene impacto sobre el voltaje de distribución [17].

En este documento por tanto es alentador desarrollar una estrategia de control que permita al inversor conocer el estado del sistema trifásico y mediante este, (absorber/entregar) potencia reactiva según la carga del sistema, la cual mantenga una calidad adecuada, en la figura 1 se muestra la inclusión de dicha estrategia en la red de distribución.

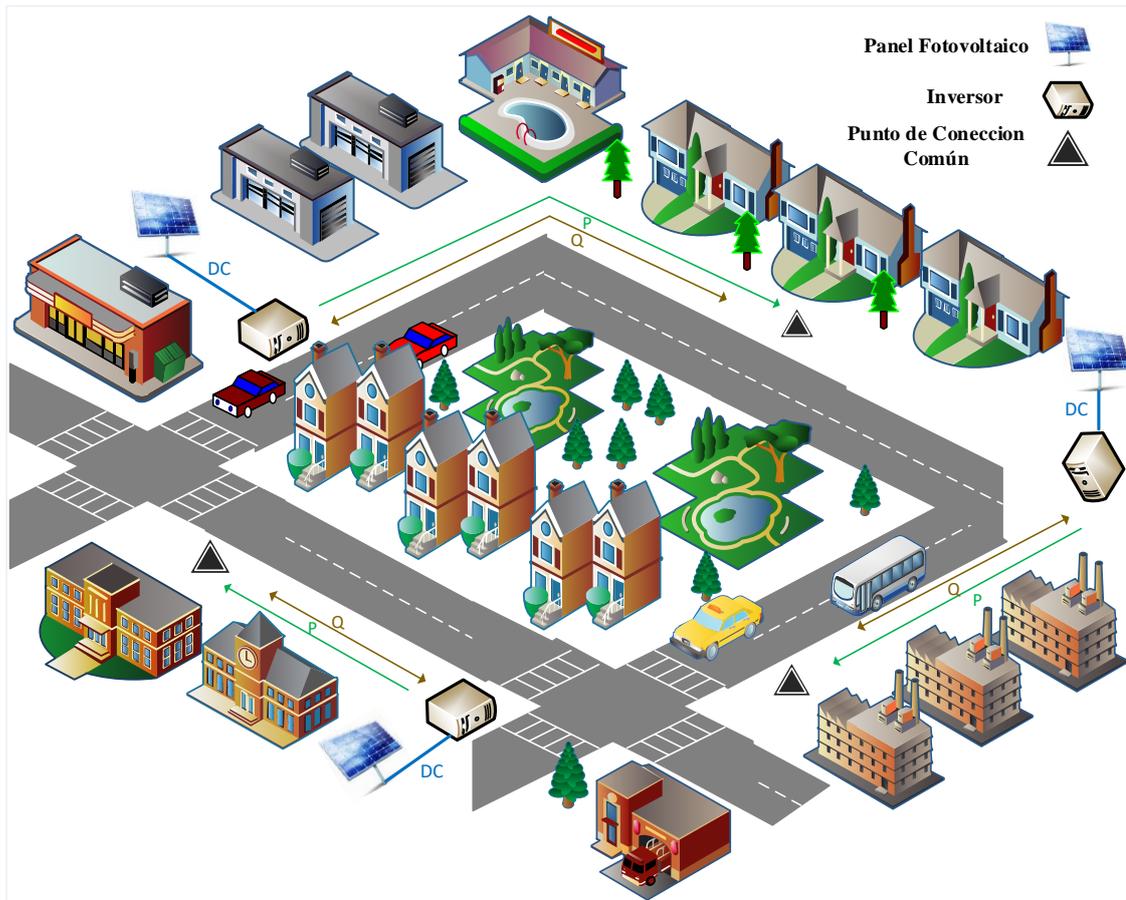


Figura 1. Estrategia de Control Aplicada a Inversores Fotovoltaicos.

2. Marco Teórico

En la sección 2 se aborda el caso de estudio que busca mejorar la calidad de voltaje en la red de distribución mediante la estrategia de control Volt-Var que se aplica a inversores inteligentes, los periféricos previos que se preparan son: la generación fotovoltaica y la conversión de voltaje en DC y el seguimiento del (MPP), finalmente el control Volt-Var que se aplica al inversor puede (entregar/absorber) potencia reactiva.

2.1 Paneles Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos se los utiliza mucho en el tiempo presente, debido a la energía limpia que entregan y facilidad de implementarlos, estos generan energía eléctrica en corriente directa debida al efecto fotoeléctrico en sus células por incidencia de luz, en [18] los autores estudian el material más importante de los

paneles que tienen una eficiente conversión de luz a corriente eléctrica y así obtener mayor generación de corriente.

Al obtener una eficiente conversión por el efecto fotoeléctrico, se busca conocer el comportamiento del panel en cuanto a voltaje, corriente y potencia, resulta de tal importancia conocer el comportamiento de las curvas (I-V) y (P-V) que los autores en [19] desarrollan un trazador de las curvas con la finalidad de extraer información del comportamiento para un array de paneles fotovoltaicos, después, se puede conocer cuál es la generación fotovoltaica dados por el clima donde se encuentre al array fotovoltaico.

Frente a diferentes climas la generación de energía fotovoltaica tiene un cambio, como se ve en [20], según la irradiancia aumente la generación aumenta y según la temperatura aumenta la generación disminuye, para poder predecir estos cambios de comportamiento dados por las condiciones climáticas se necesita un

modelo matemático que se ajuste al comportamiento del mismo como en [21],[22],[23] una vez que se formula el modelo matemático se desea que operen donde el producto del voltaje y corriente de los mismo sean el máximo, dicho punto se conoce como el máximo punto de potencia (MPP), al cual se le da seguimiento mediante el algoritmo Perturbar y Observar tal como en[24].

2.2 Conversor DC/DC

Los convertidores de corriente continua se los utiliza con el fin de establecer un voltaje de salida mayor al de entrada, se los usa típicamente para aplicaciones de generación fotovoltaica y son necesarios para adaptar el voltaje de la etapa presente a la siguiente como concluyen los autores en[25].

En el caso de estudio el convertidor se alimenta por paneles fotovoltaicos y se maneja mediante un interruptor electrónico con (PWM), mientras el ciclo de trabajo se encuentra en encendido, la bobina del convertidor almacena energía y cuando se encuentra apagado la bobina entrega energía, según este comportamiento el convertidor entrega un rizado de voltaje y corriente lo cual denota la eficiencia del mismo[26].

2.3 Perturbar y observar (P&O)

El algoritmo (P&O) es un proceso de continua observación y perturbación hasta que el punto de operación del array fotovoltaico converja en (MPP)[27],[28], es decir se recorre toda la curva (P-V) con pequeñas perturbaciones hasta converger, luego el algoritmo oscila en una referencia, la misma es un valor de referencia para modular el ancho de pulso que maneja el interruptor electrónico del convertidor, así cuando el algoritmo decide disminuir el ciclo, el voltaje del panel fotovoltaico aumenta y cuando lo aumenta, el voltaje del panel fotovoltaico disminuye hasta estabilizarse en su punto de operación[29].

2.4 Inversores Inteligentes

Los inversores inteligentes cumplen la función de convertir la corriente directa que se recibe por la generación fotovoltaica y transformarla en corriente alterna, para el consumo en la red de distribución [30].

Estos se aplican mucho en tecnologías de generación fotovoltaica donde se necesita adaptarlas a la red de distribución, además de contar con la capacidad de ajustar la potencia reactiva y controlar el nivel del voltaje en ciertas magnitudes [31].

La conversión (DC/AC) presente se da mediante la configuración 3 niveles mostrada en [32],[33], tal configuración promete obtener una mejor calidad de voltaje.

2.5 Control de Potencia Reactiva (Volt-Var)

El control que se desarrolla hace uso de dos modelos matemáticos matriciales para llevar del dominio de las variables de un sistema trifásico al dominio de un sistema de referencia estacionario bifásico que se denomina (Transformada de Clarke), y luego al dominio de un marco de referencia rotatorio sincrónico que se denomina (Transformada de Park)[9], tanto los voltajes y corrientes se los obtiene del sistema trifásico y se los lleva a las componentes (d,q) correspondientes al eje directo de cuadratura (dq0), dados por los modelos de las transformadas, además se necesita incluir el bloqueo de fase (PLL) que entrega una señal sincronizada en fase y frecuencia con su entrada, el inversor necesita todos estos componentes para operar sincrónicamente con la red [17], lo cual significa, tomar la misma frecuencia del sistema trifásico mediante (PLL) para que el inversor opere en sincronía del sistema trifásico y misma frecuencia[9].

Las variables del sistema que se representan en el dominio del marco de referencia rotatorio síncrono se las trata con el fin de realizar el control Volt-Var, una vez que se realiza la operación con

control Volt-Var se obtiene las variables E (d, q) las cuales se las transforma a un sistema de variables trifásicas mediante las transformadas inversas de Park y Clarke respectivamente, la nueva señal trifásica sirve como referencia para los pulsos de PWM que se aplican en el inversor.

3. Planteamiento del Problema

Para desarrollar la estrategia control con capacidad de mejorar la calidad del voltaje en la red de distribución es necesario establecer etapas previas, las cuales consisten en implementar paneles solares, establecer el convertidor DC y el inversor, como muestra la figura 2.

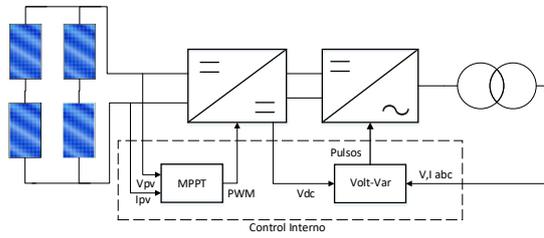


Figura 2. Etapas de la implementación fotovoltaica

En la primera etapa se implementan los módulos fotovoltaicos, los mismos entregan energía al conversor en función de la irradiancia que incide sobre la superficie de los paneles y la temperatura que se encuentran los mismos.

Para poder conocer cuanta energía están entregando los paneles, se formula el modelo matemático [21], dado por la ecuación (1) según la ley de corrientes de Kirchhoff, la misma que está en concordancia con la figura 3 como en [23], en donde se observa que la sumatoria de corrientes que salen del nodo es igual a la corriente fotogenerada, la cual es la única corriente que entra al nodo.

Más adelante, la ecuación (1) se ordena y toma los valores de (2), (3) y (8), tal como en (9), de forma que se puede conocer la corriente de salida del panel, las ecuaciones consideran las temperaturas en condiciones estándar de medición y la temperatura ambiente a la que se desea conocer su comportamiento.

La ecuación (3) depende directamente de (4), (5) y (7), las cuales representan el voltaje térmico, la corriente de saturación y el voltaje en los terminales del panel respectivamente.

La ecuación (5) representa la corriente de saturación para cualquier temperatura, y depende del valor en (6) que representa la corriente de saturación bajo condiciones de medición estándar.

La ecuación (8) representa las pérdidas de corriente por la resistencia paralelo y depende del valor en (7) que representa la variación del voltaje en los terminales del panel para distintas temperaturas.

$$I_{ph} = I + I_d + I_{sh} \quad (1)$$

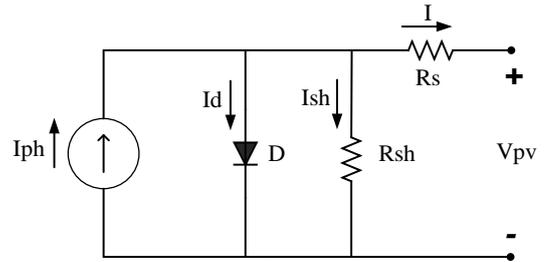


Figura 3. Circuito de la célula fotoeléctrica

$$I_{ph} = \frac{G I_{sc}}{1000} \left[1 + \left[\frac{\text{Alpha} I_{sc}}{100} \right] [T - T_{stc}] \right] \quad (2)$$

$$I_d = I_o \left[e^{\frac{V+I R_s}{n K T}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$V_t = \frac{n K T}{q} \quad (4)$$

$$I_o = I_{o(stc)} \left(\frac{T}{T_{stc}} \right)^{\frac{3}{n}} \left(\frac{-q V_g}{n K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{stc}} \right)} \right) \quad (5)$$

$$I_{o(stc)} = \frac{I_{sc(stc)}}{\left(e^{\left(\frac{V_{oc(stc)}}{N_{cs}} \frac{q}{nkT_{stc}} \right)} - 1 \right)} \quad (6)$$

$$V = V_{oc} \left[1 + \left[\frac{Beta_{voc}}{100} \right] [T - T_{stc}] \right] \quad (7)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (8)$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (9)$$

Se puede observar que (I) se encuentra tanto en (9) como en las ecuaciones de las que (9) depende, estas son (3) y (8), luego la ecuación (9) se la expresa como (10), se la lleva a términos de (11) y se obtiene la derivada de (11) dada por (12), finalmente se utiliza el método de Newton Raphson dado por (14) para que (10) converja.

Para el método de Newton Raphson, (a) representa una iteración anterior de ($a + 1$), (I_a) representa la condición inicial dada por (13)

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{V + IR_s}{N_{cs} V_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (10)$$

$$f(I) = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{V + IR_s}{N_{cs} V_t}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I \quad (11)$$

$$d(f(I)) = -\frac{I_o R_s}{N_{cs} V_t} \left[e^{\frac{V + IR_s}{N_{cs} V_t}} \right] - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 \quad (12)$$

$$I_a = I_{sc} \quad (13)$$

$$I_{a+1} = I_a - \frac{f(I)}{d(f(I))} \quad (14)$$

Tabla 1. Descripción de variables del modelo matemático del panel solar

Variable	Descripción
I_{ph} (A)	Corriente Fotogenerada
I (A)	Corriente del Panel Fotovoltaico
I_d (A)	Corriente del diodo
I_{sh} (A)	Corriente de pérdida de la resistencia paralelo
I_{sc} (A)	Corriente de Corto Circuito
I_o (A)	Corriente de Saturación Inversa
$I_{o(stc)}$ (A)	Corriente de Saturación Inversa en condiciones de medición estándar
V (V)	Voltaje del módulo
V_t (V)	Voltaje Térmico
V_{oc} (V)	Voltaje de Circuito Abierto
$V_{oc(stc)}$ (V)	Voltaje de Circuito Abierto en condiciones de medición estándar
V_g (eV)	Banda Prohibida
G ($\frac{W}{m^2}$)	Irradiancia
$Alpha_{Isc}$ ($\frac{\%}{^\circ C}$)	Coefficiente de Temperatura
$Beta_{voc}$ ($\frac{\%}{^\circ C}$)	Coefficiente de Temperatura
n	Factor de Idealidad
K ($\frac{J}{K}$)	Constante de Boltzman
q (C)	Carga del Electrón
T ($^\circ C$)	Temperatura
T_{STC} ($^\circ C$)	Temperatura en condiciones Estándar
N_{cs}	Número de células serie del modulo
N_s	Número de módulos serie del Array
N_p	Número de módulos paralelo del Array
R_s (Ω)	Resistencia Serie
R_{sh} (Ω)	Resistencia Paralelo

Una vez que se conoce el comportamiento de los paneles dados por las curvas I-V y P-V, es necesario garantizar que los paneles operen en el máximo punto de potencia (MPP).

Las figuras 4 y 5 se detallan las etapas del control que se realiza para que los paneles operen en (MPP).

En la figura 4 se observa la configuración que se utiliza en el convertor, la técnica perturbar y observar que se utiliza, y la generación de PWM que se aplica al interruptor electrónico.

La continua perturbación y observación de (P&O) permite recorrer la curva (P-V), de forma que se puede obtener información del punto donde los paneles están operando.

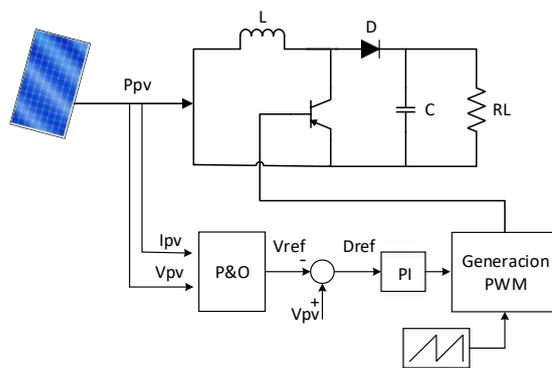


Figura 4. Control del MPPT en el Convertor DC.

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles, se puede observar que después de Perturbar y Observar se está encontrando una referencia para la generación del PWM.

Seguido de esto, el ciclo de trabajo varia, cuando el ciclo de trabajo aumenta quiere decir que el voltaje en donde se encuentran trabajando los paneles debe disminuir hasta encontrar (MPP), y por el contrario cuando el ciclo de trabajo disminuye el voltaje en donde se encuentran trabajando los paneles debe aumentar hasta encontrar (MPP).

El objetivo final es estabilizar el punto de operación del voltaje de los paneles en (MPP) variando el ciclo de trabajo.

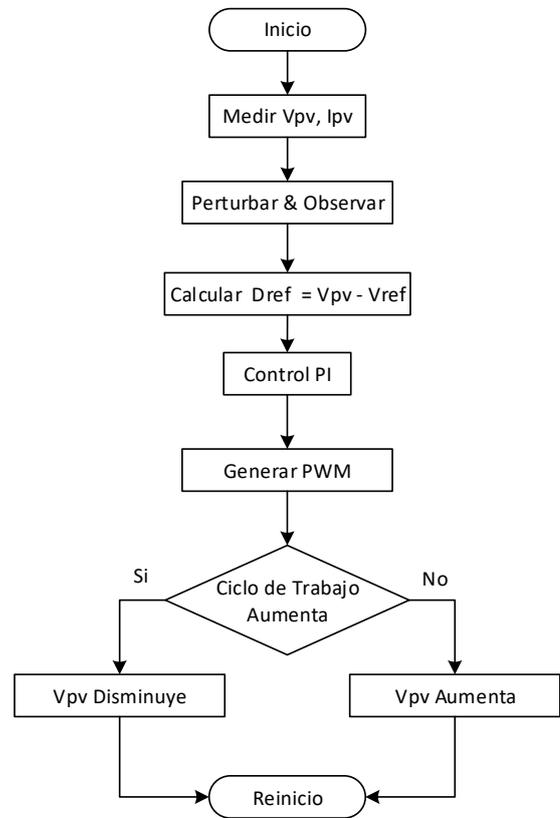


Figura 5. Diagrama de flujo MPPT

En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo donde se aumenta el voltaje de referencia según se evalúa la expresión dada por (4), o según el caso disminuir el voltaje de referencia.

El algoritmo se basa en la siguiente expresión dada por (4)

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (4)$$

Lo cual consiste en recorrer la curva (P-V), hasta encontrar el punto de voltaje donde la derivada de su potencia es cero, entonces el algoritmo está operando en el punto de voltaje para el máximo punto de potencia, caso contrario se toman

decisiones para aumentar o disminuir el voltaje de referencia.

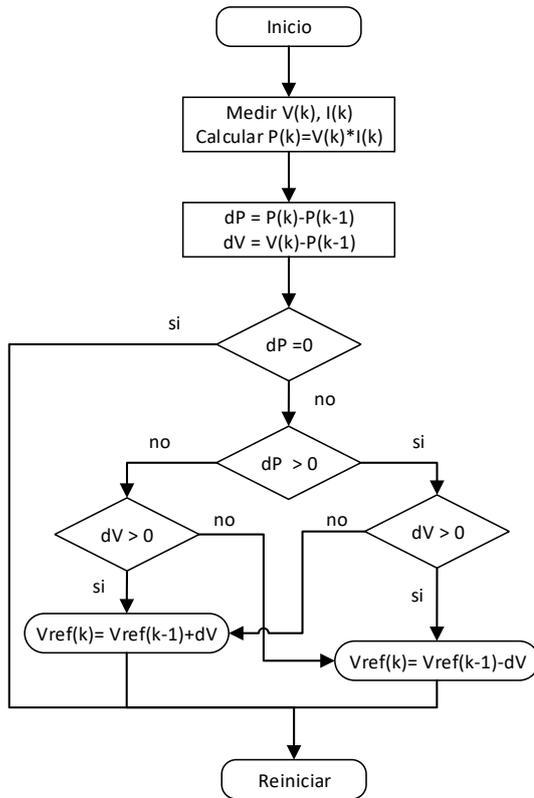


Figura 6. Diagrama de flujo (P&O)

Una vez que se alcanza el punto de voltaje donde los paneles entregan su máxima potencia se desea establecer los parámetros del convertidor.

Mientras se realizan las conmutaciones por medio del PWM, cuando el interruptor electrónico está en estado (encendido) la bobina está almacenando energía y cuando el interruptor electrónico está en estado (apagado) la bobina está entregando energía, estas conmutaciones entregan un rizado de voltaje y corriente dados por la capacitancia e inductancia respectivamente, además el ciclo de trabajo está en función del voltaje de entrada y de salida.

Las expresiones dadas por (5), (6) y (7) permiten dimensionar los parámetros para un adecuado desempeño del convertidor.

$$D = 100 \left[1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \right] \quad (5)$$

$$L = \frac{V_{in} [V_{out} - V_{in}]}{F_{sw} * \Delta i * V_{out}} \quad (6)$$

$$C = \frac{I_{out} [V_{out} - V_{in}]}{F_{sw} * \Delta v * V_{out}} \quad (7)$$

Tabla 2. Descripción de Variables del Convertor DC

Variable	Descripción
D (%)	Ciclo de Trabajo
V_{in} (V)	Voltaje de entrada del convertidor
V_{out} (V)	Voltaje de salida del convertidor
Δi (A)	Rizado de Corriente
Δv (V)	Rizado de Voltaje
F_{sw} (Hz)	Frecuencia del convertidor

Una vez que el convertidor DC entrega un rizado de voltaje y corriente adecuado, el inversor está preparado para entregar potencia activa al sistema, para poder (Absorber/Entregar) potencia reactiva al sistema, se necesita transformar las variables del dominio de un sistema trifásico al dominio de un marco de referencia rotatorio sincrónico, luego realizar el control Volt/Var, y seguido de esto regresar al dominio de un sistema trifásico de referencia el cual se aplica a la generación de PWM y finalmente los pulsos de (PWM) al inversor.

A continuación, las transformadas de Clarke y Park llevan las variables del dominio de un sistema trifásico según (7), (8), (9) al dominio de un marco de referencia estacionario bifásico (Transformada de Clarke) dado por (10) y posteriormente al dominio de un marco de referencia rotatorio sincrónico (Transformada de Park) dado por (11), donde sus matrices están dadas según (12) y (13) respectivamente.

$$V_a = V_p \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$V_b = V_p \text{Cos}(wt) \quad (8)$$

$$V_c = V_p \text{Cos}(wt) \quad (9)$$

$$[f_{V_{\alpha\beta 0}}] = [T_{\alpha\beta 0}][f_{V_{abc}}] \quad (10)$$

$$[f_{V_{dq0}}] = [T_{dq0}(\theta_d)][f_{V_{\alpha\beta 0}}] \quad (11)$$

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[T_{dq0}(\theta_d)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_d & -\sin(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

El proceso inverso de las transformadas se obtiene mediante las transformadas inversas de Clarke y Park, las mismas están dadas por las ecuaciones (17) y (18).

$$[f_{V_{abc}}] = [T_{dq0}(\theta_d)]^{-1}[f_{V_{\alpha\beta 0}}] \quad (17)$$

$$[f_{V_{\alpha\beta 0}}] = [T_{\alpha\beta 0}]^{-1}[f_{V_{dq0}}] \quad (18)$$

Donde sus matrices inversas son (19) y (20).

$$[T_{\alpha\beta 0}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[T_{dq0}(\theta_d)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

En base a las transformadas directas de Clarke y Park es posible obtener las

componentes (dq0) del sistema y realizar el control Volt-Var [17], y además, regresar a un sistema trifásico de referencia mediante las transformadas inversas.

En la figura 7 se observa dicho proceso, donde se toman V_{abc} e I_{abc} (p.u.) para llevarlas a V_{dq0} e I_{dq0} , posteriormente realizar el control Volt-Var, y luego la componente E_{dq0} llevarla al dominio del sistema trifásico de referencia para la generación de PWM, finalmente aplicarla al inversor.

El bloqueo de fase se muestra como (PLL), el cual da la frecuencia angular al sistema trifásico que se obtiene ya que el inversor debe operar en la misma frecuencia del sistema.

Se puede observar que I_d^* se toma del control que se realiza al tomar el voltaje DC.

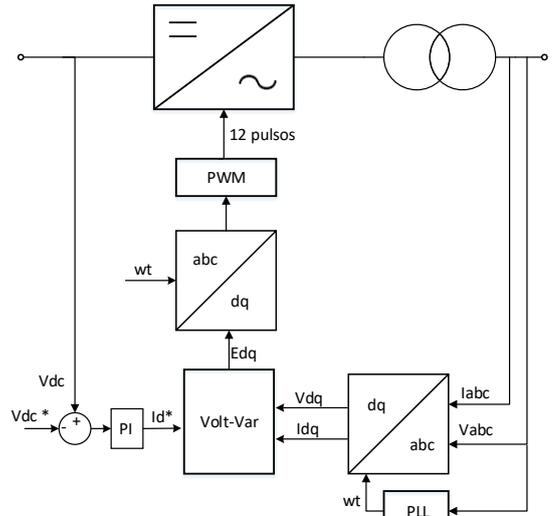


Figura 7. Control Principal de Inversor

En la figura 8 se muestra el control Volt-Var que se realiza en la etapa (Volt-Var) de la figura 7, las mismas que se pueden describir según (21) y (22).

$$E_d = V_d + I_d R - I_q L + dI_d \quad (21)$$

$$E_q = V_q + I_d L + I_q R + dI_q \quad (22)$$

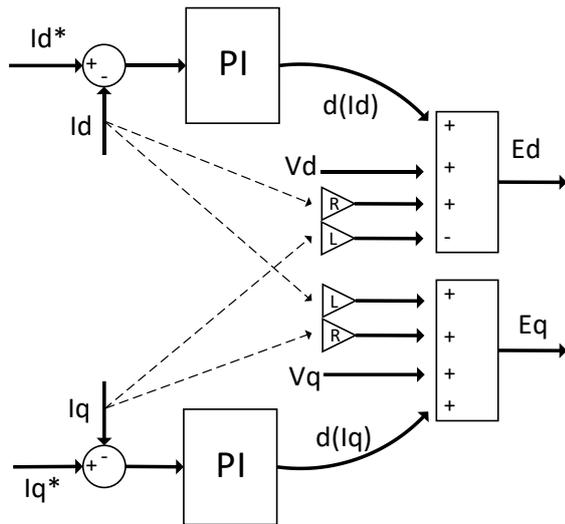


Figura 8. Control Interno Volt-Var

Finalmente la potencia activa y potencia reactiva pueden ser descritas como (23) y (24).

$$p = E_d I_d + E_q I_q \quad (23)$$

$$q = -E_d I_q + E_q I_d \quad (24)$$

A nivel del punto de conexión común, el inversor entrega potencia activa, y (Absorbe/Entrega) potencia reactiva según la carga que se aplica, lo cual implica un desfase entre el voltaje y la corriente, el desfase se da según la ecuación (25).

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{P^2}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \right) \quad (25)$$

4. Análisis de Resultados

La calidad del voltaje de la red de distribución abarca aspectos como la frecuencia, distorsión armónica y suministro de voltaje, de modo que el inversor debe tener la capacidad de satisfacer estos aspectos.

El inversor inteligente es capaz de realizar un intercambio de potencia reactiva mediante el control Volt/Var en respuesta a diferentes cargas ingresadas (Inductivo/Capacitiva).

Para el análisis de resultados se divide en tres secciones, en la primera etapa del

comportamiento de la generación fotovoltaica basado en el modelo matemático se implementan módulos fotovoltaicos en serie y paralelo bajo distintos casos de temperatura e irradiancia, estos se ajustan al modelo matemático propuesto, en la segunda etapa del comportamiento de conversor DC, se implementa el conversor DC/DC, con el fin de dar seguimiento al máximo punto de potencia de los módulos fotovoltaicos y en la tercera etapa del comportamiento del control Volt-Var se implementa el inversor capaz de (absorber/entregar) potencia reactiva según la carga aplicada como lo detalla la tabla 10.

4.1 Comportamiento de la Generación Fotovoltaica Basado en el Modelo Matemático

En la presente sección se muestra los datos sobre el comportamiento de la generación fotovoltaica a distintas temperaturas e irradiancias, datos del módulo que se utiliza y cantidad de módulos serie y paralelo del array fotovoltaico.

La tabla 3 detalla los datos del módulo fotovoltaico (SunPower SPR-305-WHT-D), obtenidos del Software MatLab.

Tabla 3. Datos del Módulo Fotovoltaico

	(V)	(I)	(%/°C)
Voc	64.2	-	-
Vmp	54.7	-	-
Isc	-	5.96	-
Imp	-	5.58	-
Alpha	-	-	0.06174
Beta	-	-	-0.2726

La tabla 4 detalla la dimensión del Array fotovoltaico compuesto por módulos conectados en serie y paralelo.

Tabla 4. Dimensión del Array Fotovoltaico

Ns	Np
5	66

La tabla 5 detalla los valores de voltaje, corriente y potencia de las figuras 9 y 10, los mismos puntos se especifican en las figuras 9 y 10, estos valores corresponden a los parámetros de voltaje, corriente y potencia donde la generación es máxima.

Tabla 5. Datos de la Generación Fotovoltaica según la Irradiancia

P	Irradiancia ($\frac{W}{m^2}$)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmp (KW)
1	1000	273.5	368.11	100.7
2	750	272.5	275.05	74.98
3	500	270.1	181.7	49.10
4	250	264.8	91.2	24.15

Las figuras 9 y 10 se realizan con 25°C y cambios de irradiancia.

En la figura 9 se muestra aumentos en el eje de la corriente ya que está relacionado directamente al aumento de la irradiancia, además en el eje del voltaje se puede ver que el punto de voltaje donde la potencia es máxima cambia para distintas irradiancias pero en valores ligeros, en la tabla 5 se puede encontrar dichos valores.

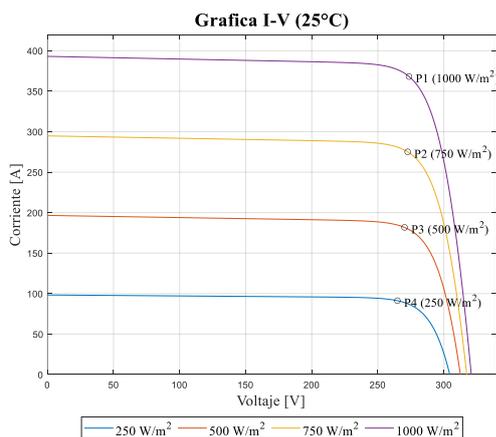


Figura 9. Curvas I-V del Array a Distinta Irradiancia

En la figura 10 se puede observar que el punto de máxima potencia aumenta significativamente a causa de la irradiancia, en el eje del voltaje al igual que en la figura 9 los cambios de voltaje son ligeros.

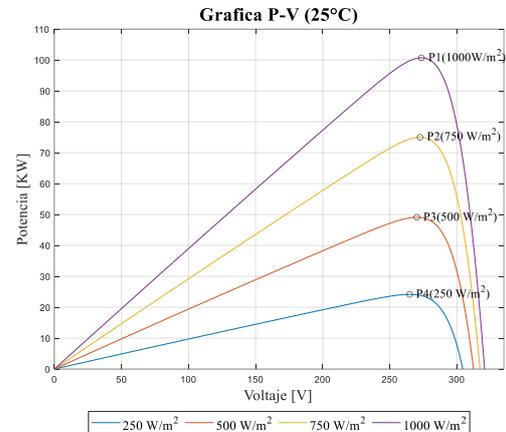


Figura 10. Curvas P-V del Array a Distinta Irradiancia

La tabla 6 detalla los valores de voltaje, corriente y potencia de las figuras 11 y 12, los mismos puntos se los muestra en las figuras 11 y 12.

Tabla 6. Datos de la Generación Fotovoltaica según la Temperatura

P	Temperatura (°C)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmp (KW)
1	75	229.02	374.7	85.83
2	50	251.23	371.7	93.39
3	25	273.57	368.1	100.7
4	0	296	363.9	107.7

Las figuras 11 y 12 se realizan con 1000(W/m²) y cambios de temperatura.

En la figura 11 se muestra aumentos en el eje del voltaje, debido a que la temperatura influye directamente sobre el voltaje de circuito abierto, lo que muestra que el voltaje tiene el mayor impacto en cuanto al punto de máxima potencia.

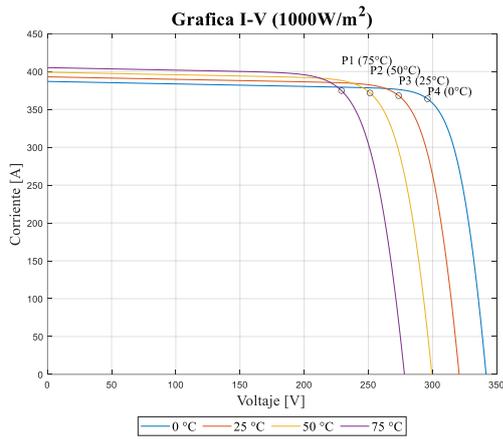


Figura 11. Curva I-V del Array a Distinta Temperatura

En la figura 12 se muestra que en el eje de la potencia se presentan cambios aunque no tan grandes como en la figura 10, dichos cambios son debidos a que la temperatura tiene poco impacto en la corriente y mayor impacto en el voltaje

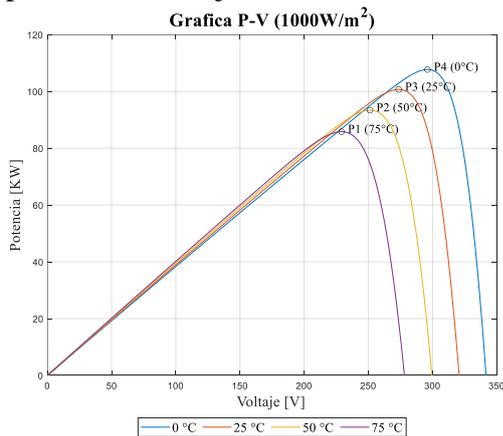


Figura 12. Curva P-V del Array a Distinta Temperatura

En la figura 13 observa las curvas (I-V) y (P-V) del Array Fotovoltaico, se puede apreciar que (V_{mp}) se especifica con una línea entre cortada para el máximo punto de potencia de la curva, tanto para (P-V) como para (I-V), en el eje (y) izquierdo de la figura se muestra el comportamiento de la corriente para el voltaje dado por el eje (x), en el eje (y) de la derecha se muestra el comportamiento de la potencia para el voltaje dado por el eje (x), la potencia tiene su máximo valor en (V_{mp}).

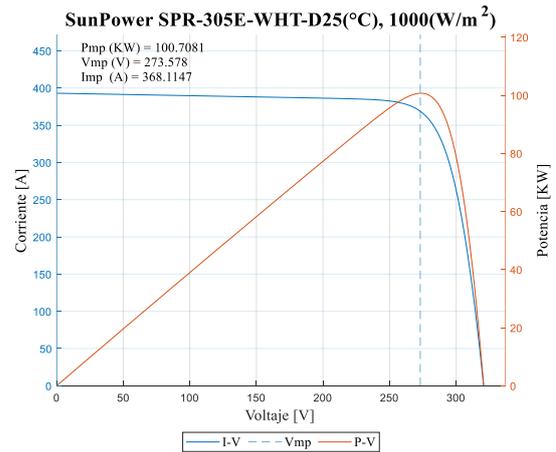


Figura 13. Curva I-V, P-V del Array de Módulos Fotovoltaicos

4.2 Comportamiento del Conversor DC

En la presente sección se muestra datos sobre el comportamiento a la salida y entrada del conversor, así como datos de operación interna del mismo.

En la Figura 14 se muestra los estados transitorios tomados a la entrada del conversor DC, estos están comparados con la referencia ideal que deben tomar los valores de voltaje, corriente y potencia, se observa que alcanzan con facilidad la referencia ideal.

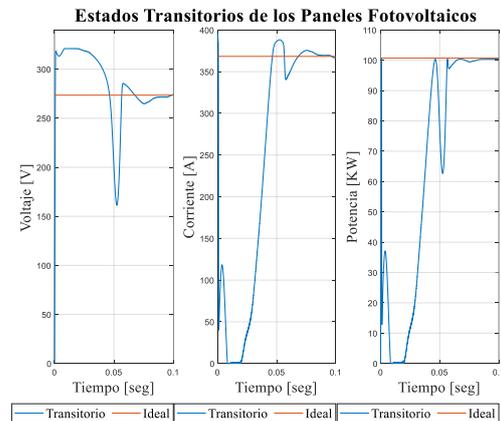


Figura 14. Estados Transitorios de los Módulos Fotovoltaicos

En la figura 15 se muestra los estados transitorios tomados a la salida del conversor DC, el voltaje muestra oscilaciones hasta

llegar a la referencia ideal, la misma que es mayor al voltaje tomado a la entrada del convertor, en el eje de la corriente se observa un pequeño espacio donde no hay corriente, lo cual corresponde a que la generación fotovoltaica no está operando en (MPP), después la misma toma el valor correspondiente de (MPP).

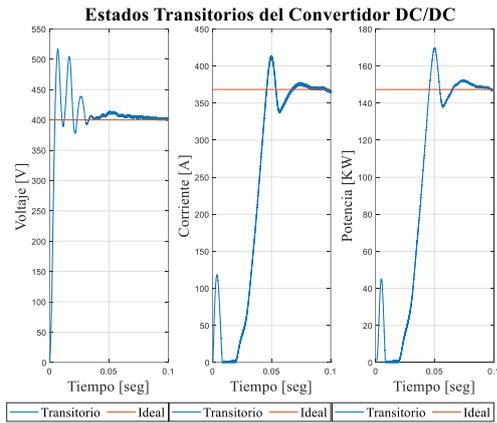


Figura 15. Estados Transitorios del Convertor DC

En la tabla 7 se muestra el voltaje y corriente de (entrada/salida) del convertor acorde a las figuras 14 y 15.

Tabla 7. Datos de Entrada y Salida del Convertor

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)
273	368	400	368

En la tabla 8 se muestra el ciclo de trabajo, inductancia y capacitancia del convertor, además el porcentaje de rizado de (Voltaje/Corriente) con el que opera el convertor y la frecuencia de conmutación.

Tabla 8. Datos de Operación del Convertor

D (%)	L (mH)	C (uF)	Δv (%)	Δi (%)	f_{sw} (KHz)
31.7	5	3227	1.8	0.94	5

En la tabla 9 detalla los datos del controlador PI.

Tabla 9. Coeficientes Proporcional e Integral para MPPT

Kp	Ki
0.0001	0.32

En la figura 16 se aprecia que el porcentaje del ciclo de trabajo va en aumento rápidamente, en el eje de porcentaje se muestra el valor aproximado donde esta toma estabilidad acorde con la tabla 8.



Figura 16. Estado Transitorio del Ciclo de Trabajo

4.3 Comportamiento del Intercambio de Potencia Reactiva (Volt-Var)

En la presente sección se muestra el comportamiento del intercambio de potencia reactiva según la carga que se aplica, datos sobre el ángulo de desfase entre voltaje y corriente en el inversor y el comportamiento de la distorsión armónica y la frecuencia.

En la figura 17 se muestra la variación de cargas aplicadas (Inductivo/Capacitiva) en el punto de conexión común, se observa que en el primer intervalo de tiempo en el eje de potencia reactiva la carga absorbe, mientras que para el segundo intervalo la carga entrega.

La potencia activa es la misma para el tipo de carga.

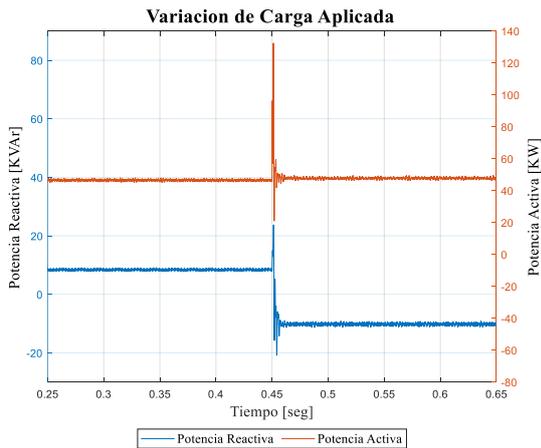


Figura 17. Variación de la Carga Aplicada

En la tabla 10 se muestra los tiempos para la variación de carga aplicada, el primer intervalo de tiempo se presenta una carga inductiva, en el segundo intervalo de tiempo se encuentra una carga capacitiva.

Tabla 10. Intervalos de Tiempo y Tipo de Carga Aplicada

Tiempo	Tipo de Carga	de KW	KVAr
0.25 – 0.45	Inductiva	50	10
0.45 – 0.65	Capacitiva	50	10

En la figura 18 se muestra el intercambio de potencia reactiva que realiza el inversor, en el eje de la potencia reactiva para el primer intervalo de tiempo el inversor está absorbiendo potencia reactiva y su magnitud es muy cercana a 10 (KVAR), mientras que para el segundo intervalo de tiempo el inversor está entregando potencia reactiva y su magnitud es muy cercana a 8.5 (KVAR), al momento que el inversor absorbe o entrega potencia reactiva se observa en el eje de voltaje que se mantiene estable y sin cambios para ambos intervalos de tiempo.

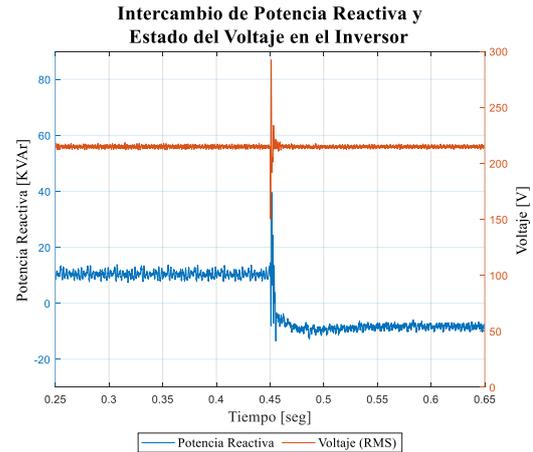


Figura 18. Intercambio de Potencia Reactiva por Parte del Inversor

En las figuras 19 y 20 se muestra el comportamiento de la potencia reactiva y el voltaje en el lado de baja del transformador, tanto con el control Volt-Var como sin el control Volt-Var.

En la figura 19 (Con el control Volt-Var) se observa que en el eje de la potencia reactiva del lado de baja del transformador, no entrega ni absorbe a diferencia de la figura 20, la misma se mantiene cercana a cero, y en el eje del voltaje no se encuentra un cambio en su magnitud.

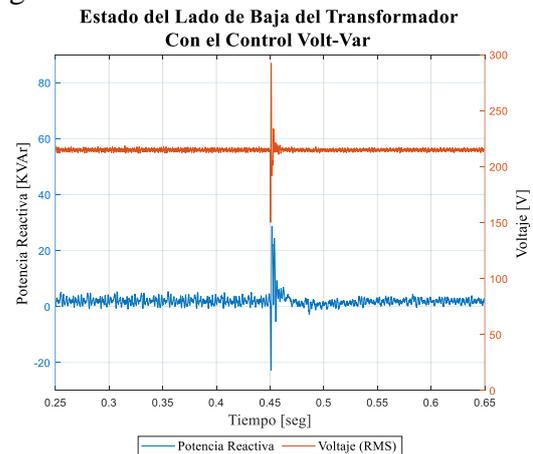


Figura 19. Estado del Lado de Baja del Transformador Con el Control (Volt-Var)

En la figura 20 (Sin el control Volt-Var) se observa que, en el eje de la potencia reactiva del lado de baja del transformador, para el primer intervalo de tiempo, está entregando potencia reactiva y el eje del voltaje presenta una disminución de 4 (V) en su magnitud, mientras que en el segundo intervalo de tiempo, el eje de la potencia reactiva está absorbiendo y en el eje del voltaje, este es mayor en 4 (V) al del primer intervalo de tiempo.



Figura 20. Estado del Lado de Baja del Transformador Sin el Control (Volt-Var)

En la figura 21 se muestra la potencia activa y reactiva que entrega el Inversor, en el eje (y) izquierdo se observa la potencia reactiva y en el eje (y) derecho se observa la potencia activa del inversor.

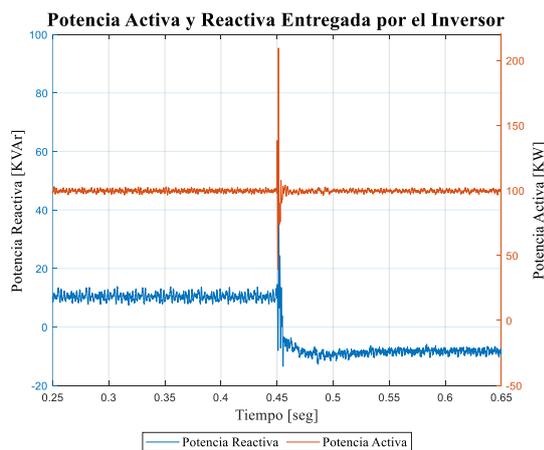


Figura 21. Potencia Activa e Intercambio de Potencia Reactiva por el Inversor

La tabla 11 muestra la potencia activa y reactiva que se desea que el inversor entregue, y el ángulo de cada uno.

Tabla 11. Angulo Según la Potencia Activa y Reactiva Teórica del Inversor

Tipo	Potencia Activa (KW)	Potencia Reactiva (KVAr)	Angulo (°)
Inductivo	100.7	10	5.67
Capacitiva	100.7	10	5.67

La tabla 12 muestra la potencia activa y reactiva experimental que se encuentra en el inversor según la carga que se aplica, y el ángulo de cada uno, en base a la figura 21, además en concordancia con las figuras 22 y 23.

Tabla 12. Angulo Según la Potencia Activa y Reactiva Experimental del Inversor

Tipo	Potencia Activa (KW)	Potencia Reactiva (KVAr)	Angulo (°)
Inductivo	99.5	10	5.73
Capacitiva	99.5	-8.5	4.88

En la figura 22 se muestra la corriente adelantada respecto al voltaje, típico de una carga capacitiva, la misma se muestra en (p.u.) con el fin de mostrar el ángulo entre el voltaje y la corriente.

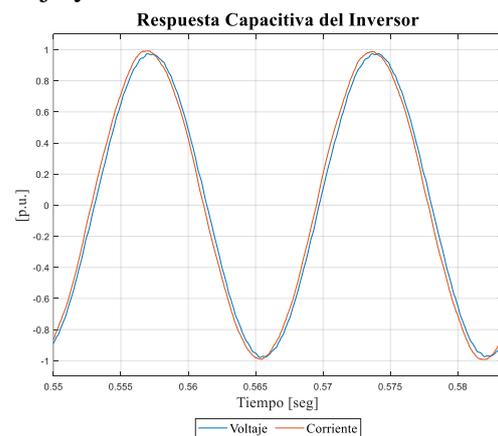


Figura 22. Forma de onda de voltaje y corriente del inversor, tipo capacitivo

En la figura 23 se muestra la corriente retrasada respecto al voltaje, típico de una carga inductiva, la misma se muestra en (p.u.) con el fin de mostrar el ángulo entre el voltaje y la corriente.

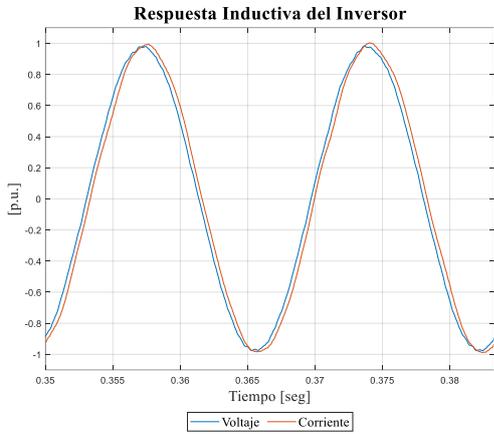


Figura 23. Forma de onda de voltaje y corriente del inversor, tipo inductivo

En la figura 24 se muestra la distorsión armónica total transitoria del sistema, se observa cómo se estabilizan conjuntamente los voltajes (Va, Vb y Vc), alcanzando en el eje de porcentaje valores muy cercanos al 0.79%.

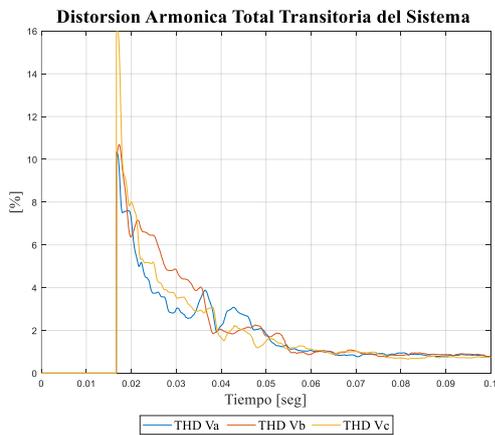


Figura 24. Estado Transitorio del THD

En la figura 25 se muestra la distorsión armónica del sistema, en el primer intervalo de tiempo corresponde a una carga inductiva, mientras que el segundo intervalo de tiempo

corresponde a una carga capacitiva, se observa el aumento de la distorsión al momento del cambio de carga, además se observa una ligera disminución del 0.79% al 0.60% con la carga capacitiva.

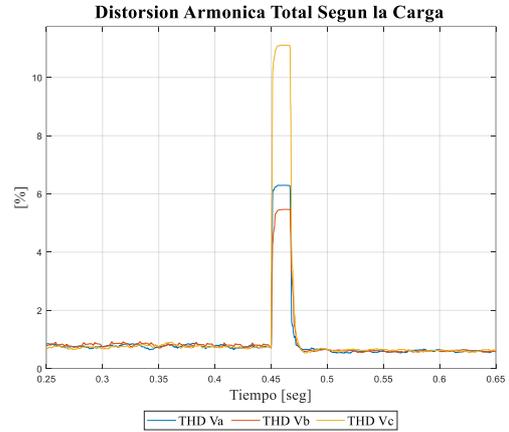


Figura 25. THD Según la Carga

En la figura 26 se muestra la forma de onda del voltaje ABC, la figura especifica el tipo de carga (Inductivo/Capacitiva), se observan tanto en los valles y crestas de las sinusoidales trifásicas mínimas distorsiones.

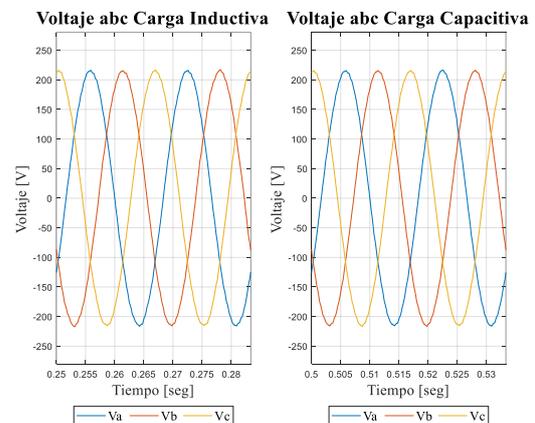


Figura 26. Forma de Onda del Voltaje ABC Según la Carga

En las figuras 27 y 28 se muestra el comportamiento de la frecuencia transitoria del sistema y la frecuencia para cada tipo de carga.

La figura 27 muestra que la frecuencia en estado transitorio, esta desviada de su referencia ideal, al final termina tomado mucha cercanía a la misma.

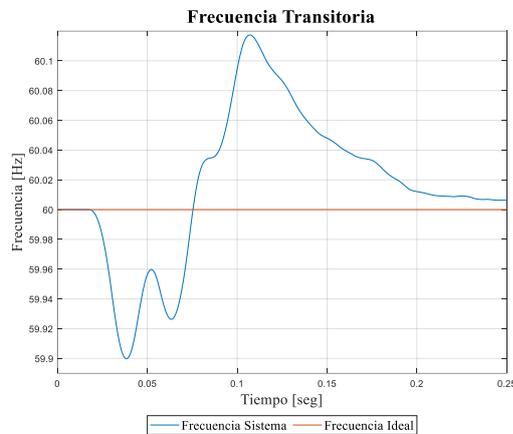


Figura 27. Estado Transitorio de la Frecuencia

La figura 28 muestra la frecuencia para ambos tipos de cargas, cuando la carga es inductiva se puede ver que oscila en su referencia ideal con mucha cercanía, en el eje de la frecuencia se puede observar las mínimas desviaciones que esta tiene.

Cuando la carga cambia a capacitiva se observa un pico de desviación que puede deberse al cambio de carga, después las oscilaciones son muy cercanas a lo ideal, en el eje de la frecuencia se puede observar las mínimas desviaciones que esta tiene.

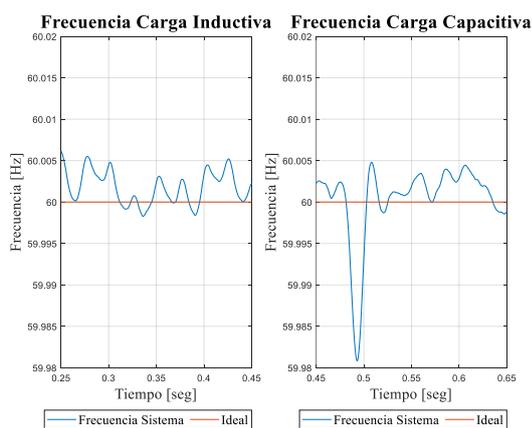


Figura 28. Frecuencia Específica Para la Carga

5. Conclusiones

La generación fotovoltaica presenta un comportamiento diferente bajo distintas condiciones de temperatura e irradiancia, en cuanto a irradiancia esta tiene mayor impacto en la potencia, con $1000 \left(\frac{W}{m^2}\right)$ se encuentran 100.7 (KW) y con $250 \left(\frac{W}{m^2}\right)$ se encuentran 24.15 (KW), la potencia se reduce al 23.98%, es decir en 76.02% lo cual tiene amplia diferencia para (P_{mp}), pero en cuanto a temperatura la diferencia de potencia generada es menor, con $0 (^{\circ}C)$ se encuentran 107.7 (KW) y con $75 (^{\circ}C)$ se tienen 85.83 (KW), la potencia se reduce al 79.69%, es decir en 20.3% lo cual no tiene amplia diferencia para (P_{mp}), en las tablas 5 y 6 se detallan los datos en cuanto a (P_{mp}), (V_{mp}) e (I_{mp}),.

En el Conversor DC se hace uso de filtros de amortiguación RC, los cuales minimizan las oscilaciones de voltaje a la salida del conversor, además el algoritmo (P&O) tiene una respuesta bastante rápida de entre (70 y 80 ms) en alcanzar el ciclo de trabajo para el conversor, además en el control PI, al aumentar su parte integral a diferencia de la proporcional se obtiene una mayor pendiente a momento de alcanzar la máxima potencia, para K_i se toma un valor de (0.32) y para K_p de (0.0001), en cuanto al rizado que se logra en el conversor se tienen valores de 1.8 (%) y 0.94 (%) para rizado de voltaje y corriente respectivamente..

La estrategia de control Volt-Var, presenta un eficiente desempeño, al momento de aplicar la carga inductiva de 10KVAR en el punto de conexión común se encuentra que el inversor absorbe alrededor de 10 (KVAR), mientras que al aplicar la carga capacitiva de 10KVAR se encuentra que el inversor entrega alrededor de 8.5 (KVAR), además sin aplicar el intercambio de potencia por parte del inversor se encuentra que el voltaje en el lado de baja del transformador tiene una diferencia de 4(V) con las distintas cargas, en cuanto a

la presencia de armónicos, estos se encuentran en valores muy cercanos al 0.79%, su operación es eficiente, la frecuencia presenta desviaciones máximas de 60.005 (Hz) para la carga inductiva, además en la carga capacitiva hay un pico de desviación máxima de 59.982 (Hz) lo cual corresponde al cambio de carga.

6. Trabajos Futuros

La estrategia control Volt-Var que se analiza en este artículo, debido a su eficaz desempeño, abre las posibilidades de realizar un futuro despliegue en redes de distribución, y tomando en cuenta los eventos climáticos donde la irradiancia es mínima, implementar bancos de baterías con la finalidad de entregar la energía que no se suministra por los paneles fotovoltaicos.

7. Referencias

- [1] R. Singh, "Approximate rooftop solar PV potential of Indian cities for high-level renewable power scenario planning," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 42, no. April, p. 100850, 2020.
- [2] W. Pavon, E. Inga, and S. Simani, "Optimal distribution network planning applying heuristic algorithms considering allocation of PV rooftop generation," *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020.
- [3] K. A. W. Horowitz, A. Jain, F. Ding, B. Mather, and B. Palmintier, "A techno-economic comparison of traditional upgrades, volt-var controls, and coordinated distributed energy resource management systems for integration of distributed photovoltaic resources," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 123, no. May, p. 106222, 2020.
- [4] M. Jafari, T. O. Olowu, and A. I. Sarwat, "Optimal Smart Inverters Volt-VAR Curve Selection with a Multi-Objective Volt-VAR Optimization using Evolutionary Algorithm Approach," *2018 North Am. Power Symp. NAPS 2018*, pp. 9–14, 2019.
- [5] S. Mohan, S. Hasan, Y. Gebremariam, and R. K. Varma, "Increasing Hosting Capacity of PV Solar Systems using Smart Inverter Volt-Var Control," *2018 20th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2018*, 2018.
- [6] I. Cagri, E. Karatepe, and M. Boztepe, "Electrical Power and Energy Systems Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, no. December 2019, p. 105780, 2020.
- [7] C. Li, V. R. Disfani, H. V. Haghi, and J. Kleissl, "Coordination of OLTC and smart inverters for optimal voltage regulation of unbalanced distribution networks ☆," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 187, no. April, p. 106498, 2020.
- [8] I. Abdelmotteleb, T. Gomez, and J. P. Chaves-Avila, "Benefits of PV inverter volt-var control on distribution network operation," *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, 2017.
- [9] S. S. Rangarajan, E. R. Collins, and J. C. Fox, "Efficacy of a Smart Photovoltaic inverter as a virtual detuner for mitigating Network Harmonic Resonance in Distribution Systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 171, no. February, pp. 175–184, 2019.
- [10] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose, and Y. Chen, "Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters," *Appl. Energy*, vol. 258, no. April 2019, p. 114000, 2020.
- [11] V. Sarfi and H. Livani, "Optimal Volt/VAR control in distribution

- systems with prosumer DERs,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 188, no. June, 2020.
- [12] X. Xu, J. Li, Z. Xu, J. Zhao, and C. Sing, “Enhancing photovoltaic hosting capacity — A stochastic approach to optimal planning of static var compensator devices in distribution networks,” vol. 238, no. January, pp. 952–962, 2019.
- [13] L. Jiang and K. M. Smedley, “Volt/VAR Control with DERs, LTCs, and Switched Capacitors: Case Study with a Commercial Distribution System,” *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 1330–1334, 2019.
- [14] Q. Long, J. Wang, D. Lubkeman, N. Lu, and P. Chen, “Volt-Var Optimization of Distribution Systems for Coordinating Utility Voltage Control with Smart Inverters,” *2019 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2019*, pp. 0–4, 2019.
- [15] A. P. C. de Mello, L. L. Pfitscher, and D. P. Bernardon, “Coordinated Volt/VAr control for real-time operation of smart distribution grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 233–242, 2017.
- [16] J. E. Sarmiento, E. M. Carreno, and A. C. Zambroni de Souza, “Modeling inverters with volt-var functions in grid-connected mode and droop control method in islanded mode,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 155, pp. 265–273, 2018.
- [17] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose, and S. Sepasi, “Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study,” *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 145–157, 2018.
- [18] M. F. Al-Kuhaili, “Photoelectric properties of highly conductive samarium-doped cadmium telluride thin films for photovoltaic applications,” *Sol. Energy*, vol. 213, no. August 2020, pp. 163–171, 2021.
- [19] Z. Chen, Y. Lin, L. Wu, S. Cheng, and P. Lin, “Development of a capacitor charging based quick I-V curve tracer with automatic parameter extraction for photovoltaic arrays,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 226, no. June, p. 113521, 2020.
- [20] M. Alshawaf, R. Poudineh, and N. S. Alhajeri, “Solar PV in Kuwait: The effect of ambient temperature and sandstorms on output variability and uncertainty,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, no. August, p. 110346, 2020.
- [21] H. Ibrahim and N. Anani, “Variations of PV module parameters with irradiance and temperature,” *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 276–285, 2017.
- [22] M. Seapan, Y. Hishikawa, M. Yoshita, and K. Okajima, “Temperature and irradiance dependences of the current and voltage at maximum power of crystalline silicon PV devices,” *Sol. Energy*, vol. 204, no. May, pp. 459–465, 2020.
- [23] K. Ding, X. Bian, H. Liu, and T. Peng, “A MATLAB-simulink-based PV module model and its application under conditions of nonuniform irradiance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 864–872, 2012.
- [24] V. R. Kota and M. N. Bhukya, “A novel linear tangents based P&O scheme for MPPT of a PV system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. January, pp. 257–267, 2017.
- [25] H. Allouache, A. Zegaoui, M. Arab, B. Belmadani, and M. Aillerie, “Distributed Photovoltaic Architecture for HVDC-bus Feeding with a Simple Evaluation of Optimal Tracking,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 507–

- 517, 2015.
- [26] L. Zhang, Z. Wang, S. Li, S. Ding, and H. Du, "Universal finite-time observer based second-order sliding mode control for DC-DC buck converters with only output voltage measurement," *J. Franklin Inst.*, vol. 357, no. 16, pp. 11863–11879, 2020.
- [27] A. I. M. Ali, M. A. Sayed, and E. E. M. Mohamed, "Modified efficient perturb and observe maximum power point tracking technique for grid-tied PV system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, no. December 2017, pp. 192–202, 2018.
- [28] Z. M. Ali, N. Vu Quynh, S. Dadfar, and H. Nakamura, "Variable step size perturb and observe MPPT controller by applying θ -modified krill herd algorithm-sliding mode controller under partially shaded conditions," *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122243, 2020.
- [29] A. Raj, S. R. Arya, and J. Gupta, "Solar PV array-based DC–DC converter with MPPT for low power applications," *Renew. Energy Focus*, vol. 34, no. September, pp. 109–119, 2020.
- [30] W. D. P. Vallejos, "Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control," *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. - Lat. Am. ISGT Lat. Am. 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [31] I. Kim and R. G. Harley, "The transient-state effect of the reactive power control of photovoltaic systems on a distribution network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, no. January, pp. 630–637, 2018.
- [32] G. Yang, J. Yin, Z. Huang, and Y. Zhang, "A method to improve the reliability of three-level inverter based on equivalent input disturbance and repetitive control combinations," *Microelectron. Reliab.*, vol. 114, no. May, p. 113837, 2020.
- [33] A. S. Pabbewar and M. Kowsalya, "Three Level Neutral Point Clamped Inverter Using Space Vector Modulation with Proportional Resonant Controller," *Energy Procedia*, vol. 103, no. April, pp. 286–291, 2016.

8. Estado del Arte

ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADO A INVERSORES FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES PARA INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA POR MEDIO DEL CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN																	
ITEM	DATOS		TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	GENERACION DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	SEGUIMINETO DE MAXIMO PUNTO DE POTENCIA A PANELES FOTOVOLTAICOS	ESTRATEGIA DE CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE	MODELAMIENTO MATEMATICO PARA GENERACION FOTOVOLTAICA	SEGUIMIENTO DEL MAXIMO PUNTO DE POTENCIA	ESPECIFICACION DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	RESTRICCIONES DE IRRADIANCIA INCIDENTE Y TEMPERATURA AMBIENTE	RESTRICCIONES DE RIZADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN CONVERTIDORES	RESTRICCIONES EN INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA	MODELO MATEMATICO BASAD EN TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMOS SEGUIDORES PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	MODELOS DE TRANSFORMCION DE VARIABLES PARA CONTROL DE INVERSORES	MODELO MATEMATICO PARA PANELES FOTOVOLTAICOS BASADOS EN LA TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMO PERTURBAR Y OBSERVAR PARA SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	ESTRATEGIA DE CONTROL VOT-VAR APLICADA A INVERSORES FOTOVOLTAICOS
1	2020	Approximate rooftop solar PV potential of Indian cities for high-level renewable power scenario planning	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
2	2020	Optimal distribution network planning applying heuristic algorithms considering allocation of PV rooftop generation	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
3	2020	A techno-economic comparison of traditional upgrades, volt-var controls, and coordinated distributed energy resource management systems for integration of distributed photovoltaic resources	●	□	●	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●	□	●
4	2018	Optimal Smart Inverters Volt-VAR Curve Selection with a Multi-Objective Volt-VAR Optimization using Evolutionary Algorithm Approach	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	●
5	2018	Increasing Hosting Capacity of PV Solar Systems using Smart Inverter Volt-Var Control	●	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●
6	2020	Electrical Power and Energy Systems Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
7	2020	Coordination of OLTC and smart inverters for optimal voltage regulation of unbalanced distribution networks	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	●
8	2017	Benefits of PV inverter volt-var control on distribution network operation	●	□	□	□	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	●
9	2019	Efficacy of a Smart Photovoltaic inverter as a virtual detuner for mitigating Network Harmonic Resonance in Distribution Systems	□	□	●	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●

ITEM	DATOS		TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	GENERACION DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	SEGUIMIENTO DE MAXIMO PUNTO DE POTENCIA A PANELES FOTOVOLTAICOS	ESTRATEGIA DE CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE	MODELAMIENTO MATEMATICO PARA GENERACION FOTOVOLTAICA	SEGUIMIENTO DEL MAXIMO PUNTO DE POTENCIA	ESPECIFICACION DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	RESTRICCIONES DE IRRADIANCIA INCIDENTE Y TEMPERATURA AMBIENTE	RESTRICCIONES DE RIZADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN CONVERTIDORES	RESTRICCIONES EN INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA	MODELO MATEMATICO BASAD EN TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMOS SEGUIDORES PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	MODELOS DE TRANSFORMCION DE VARIABLES PARA CONTROL DE INVERSORES	MODELO MATEMATICO PARA PANELES FOTOVOLTAICOS BASADOS EN LA TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMO PERTURBAR Y OBSERVAR PARA SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	ESTRATEGIA DE CONTROL VOT-VAR APLICADA A INVERSORES FOTOVOLTAICOS
10	2019	Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters	●	●	●	□	□	□	□	□	□	□	●	●	□	●	●
11	2020	Optimal Volt/VAR control in distribution systems with prosumer DERs	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
12	2019	Enhancing photovoltaic hosting capacity — A stochastic approach to optimal planning of static var compensator devices in distribution networks	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
13	2019	Volt/VAR Control with DERs, LTCs, and Switched Capacitors: Case Study with a Commercial Distribution System	●	□	●	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	□	●
14	2019	Volt-Var Optimization of Distribution Systems for Coordinating Utility Voltage Control with Smart Inverters	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	●	□	□	●
15	2017	Coordinated Volt/VAr control for real-time operation of smart distribution grids	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
16	2018	Modeling inverters with volt-var functions in grid-connected mode and droop control method in islanded mode	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	●
17	2018	Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study	●	●	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●
18	2020	Photoelectric properties of highly conductive samarium-doped cadmium telluride thin films for photovoltaic applications	□	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●	□	□
19	2020	Development of a capacitor charging based quick I-V curve tracer with automatic parameter extraction for photovoltaic arrays	□	●	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□
20	2020	Solar PV in Kuwait: The effect of ambient temperature and sandstorms on output variability and uncertainty	□	□	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□
21	2017	Variations of PV module parameters with irradiance and temperature	●	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●	□	□

ITEM	DATOS		TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	GENERACION DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	SEGUIMINETO DE MAXIMO PUNTO DE POTENCIA A PANELES FOTOVOLTAICOS	ESTRATEGIA DE CONTROL VOLT-VAR PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VOLTAJE	MODELAMIENTO MATEMATICO PARA GENERACION FOTOVOLTAICA	SEGUIMIENTO DEL MAXIMO PUNTO DE POTENCIA	ESPECIFICACION DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	RESTRICCIONES DE IRRADIANCIA INCIDENTE Y TEMPERATURA AMBIENTE	RESTRICCIONES DE RIZADOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN CONVERSORES	RESTRICCIONES EN INTERCAMBIO DE POTENCIA REACTIVA	MODELO MATEMATICO BASAD EN TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMOS SEGUIDORES PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	MODELOS DE TRANSFORMCION DE VARIABLES PARA CONTROL DE INVERSORES	MODELO MATEMATICO PARA PANELES FOTOVOLTAICOS BASADOS EN LA TEMPERATURA E IRRADIANCIA	ALGORITMO PERTURBAR Y OBSERVAR PARA SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MAXIMA POTENCIA	ESTRATEGIA DE CONTROL VOT-VAR APLICADA A INVERSORES FOTOVOLTAICOS
22	2020	Temperature and irradiance dependences of the current and voltage at maximum power of crystalline silicon PV devices	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□
23		A MATLAB-simulink-based PV module model and its application under conditions of nonuniform irradiance	●	●	□	●	●	□	●	□	□	●	●	□	●	●	□
24	2017	A novel linear tangents based P&O scheme for MPPT of a PV system	●	●	□	●	□	□	●	□	□	●	●	□	●	●	□
25	2015	Distributed Photovoltaic Architecture for HVDC-bus Feeding with a Simple Evaluation of Optimal Tracking	□	●	□	□	●	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□
26	2020	Universal finite-time observer based second-order sliding mode control for DC-DC buck converters with only output voltage measurement	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□
27	2018	Modified efficient perturb and observe maximum power point tracking technique for grid-tied PV system	●	●	●	●	●	●	●	□	□	●	●	●	●	●	●
28	2020	Variable step size perturb and observe MPPT controller by applying 0-modified krill herd algorithm-sliding mode controller under partially shaded conditions	●	●	●	●	●	●	●	□	□	●	●	●	●	●	●
29	2020	Solar PV array-based DC-DC converter with MPPT for low power applications	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●	□	□	●	□
30	2017	Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control	□	●	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
31	2018	The transient-state effect of the reactive power control of photovoltaic systems on a distribution network	●	□	●	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●
32	2020	A method to improve the reliability of three-level inverter based on equivalent input disturbance and repetitive control combinations	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
33	2016	Three Level Neutral Point Clamped Inverter Using Space Vector Modulation with Proportional Resonant Controller	●	●	●	□	□	●	□	□	□	□	□	●	□	□	●
			19	12	17	9	4	7	7	3	6	9	6	9	9	6	15

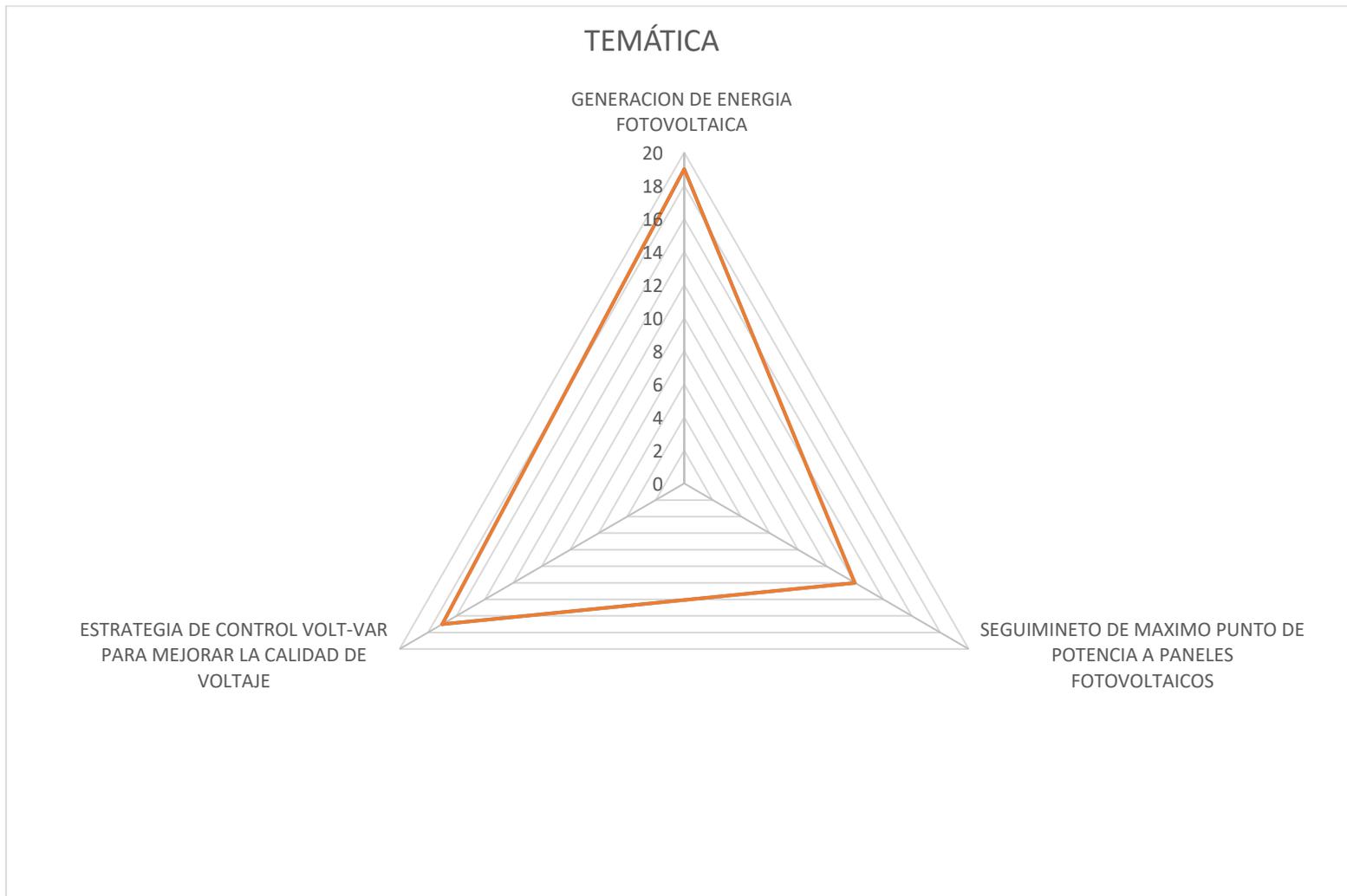


Figura 29. Resumen e Indicador de la Temática

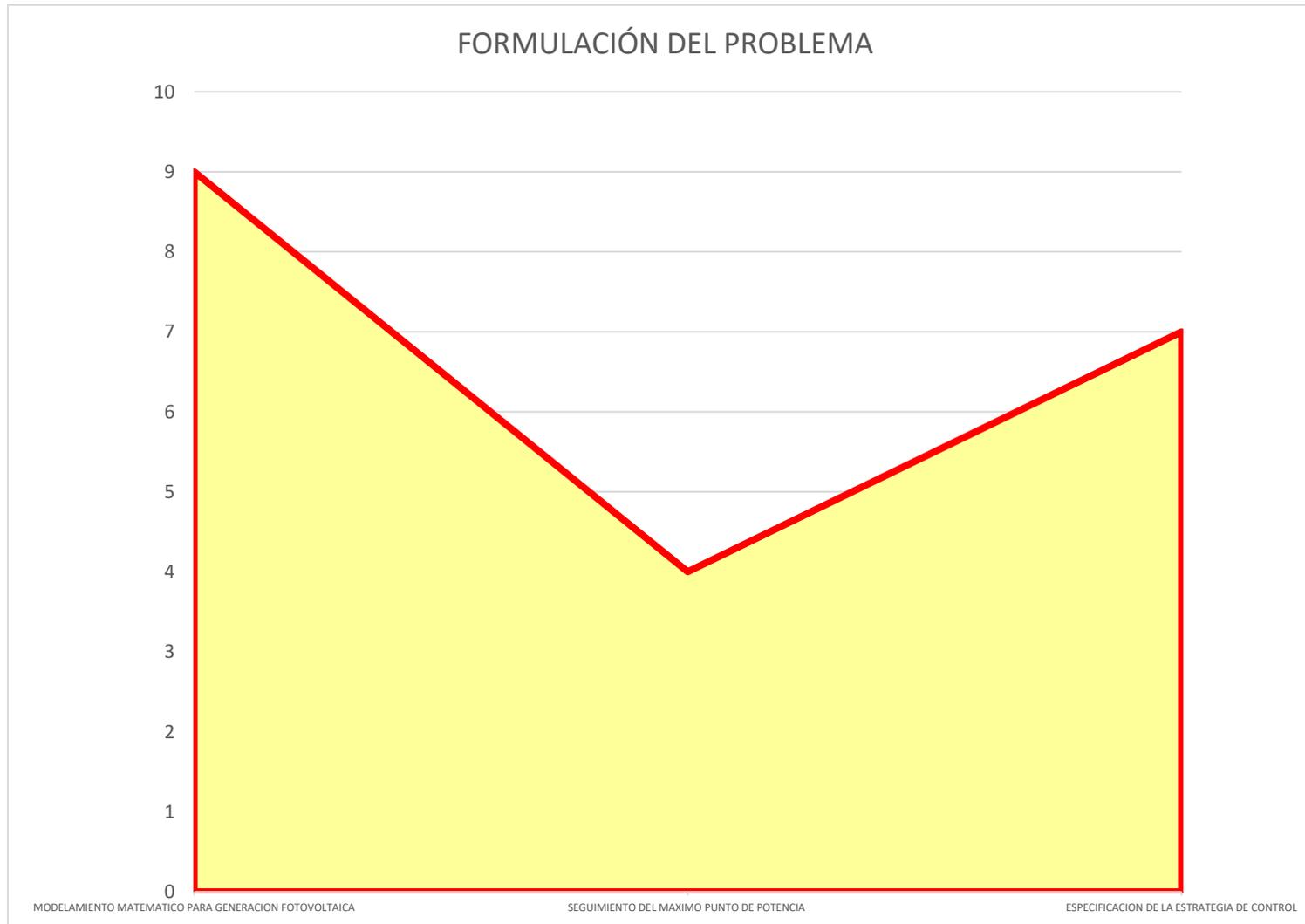


Figura 30. Indicador de Formulación del Problema

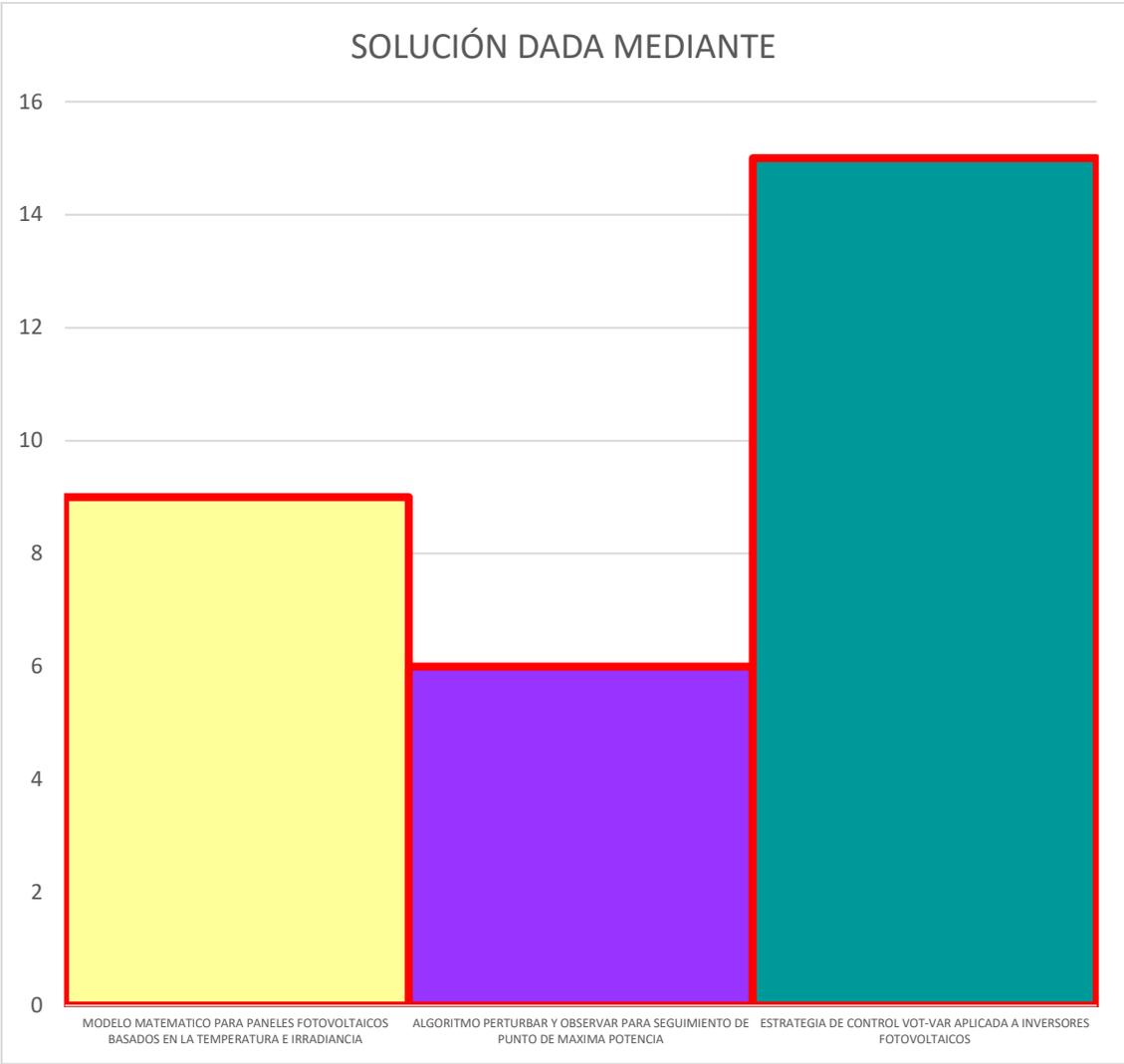


Figura 31. Indicador de Solución