

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Tesis de Magister

Método de seguimiento del máximo punto de potencia en sistemas fotovoltaicos utilizando diferencial por perturbación en la modulación.

Tesis para optar al grado/título de
Magister en Ciencias de la Ingeniería Electrónica

Alumno
Rodrigo Andrés González Botto

Guía de Tesis/Profesor Supervisor
Dr. Marcelo Pérez

Revisores/Comisión Co-Referente
Dr. Samir Kouro

Revisores/Evaluador Externo
Dr. Miguel López G
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Julio 2017, Valparaíso, Chile

*En memoria a los que ya no están conmigo mi abuela Carmen y mi gato
Kurochan.*

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas las personas que contribuyeron en esta tesis, compañeros, profesores, amigos y familia.

Agradecimiento especiales a Marcelo Pérez, Samir Kouro, Freddy Flores, Hugues Renaudineau, Matías Aguirre, Diana López, Nicolás Muller, Paz Castillo, Christian Rojas, Camilo Urqueta, Camila Catalán, Martín Serey, Gonzalo Carrasco, Miguel López, Rodrigo Lanas, Carmen González, Mayumi Kato, Nayadet Chamorro, Camila Estévez, Diego Landero, Angel González, Gloria Letelier y Matías Jofré.

RESUMEN

En los sistemas de energía fotovoltaicos, particularmente cuando los paneles se encuentran fijos, es necesaria la implementación de un algoritmo de seguimiento del máximo punto de potencia para maximizar la extracción de energía de los paneles ante variaciones en la irradiación o temperatura. Sin embargo, cuando las variaciones de irradiación son muy rápidas, estos algoritmos pueden generar referencias de potencia que en la práctica alejen al punto de operación del óptimo.

En este trabajo se propone un nuevo método de seguimiento del punto máximo de potencia en sistemas fotovoltaicos, basado en la modificación de la señal de modulación del convertidor de potencia, para lograr el seguimiento del punto de máxima potencia incluso ante rápidas perturbaciones. Además, se compara el método propuesto con cuatro métodos de seguimiento del punto máximo de potencia: Perturbar y Observar, Conductancia Incremental, Realimentación de la Potencia y Peso en Tres Puntos.

Cada uno de los métodos se implementa en simulaciones por medio del software MATLAB/Simulink. Los resultados obtenidos permiten comprobar que el método propuesto no presenta la falencia de los métodos estándar, presentando un correcto seguimiento ante cambios abruptos de irradiación. Además el método propuesto presenta una menor oscilación en estado estacionario.

De manera experimental se implementa Perturbar y Observar y el algoritmo propuesto. Para implementar el setup experimental se utiliza un convertidor de potencia Boost, el controlador dSPACE y la fuente programable Chroma Programmable DC Power Supply 62020H-150S, que emula el panel fotovoltaico. Cada método es sometido a distintas pruebas según el estándar prEN 5030. El método propuesto presenta un mejor seguimiento ante variaciones abruptas que Perturbar y Observar.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Métodos de seguimiento del máximo punto de potencia	2
1.1.1. Métodos Directos	2
1.1.2. Métodos Indirectos	3
1.1.3. Métodos Híbridos	4
1.2. Hipótesis	6
1.3. Objetivos	6
1.4. Alcances y Limitaciones	7
2. MÉTODOS DIRECTOS POR MUESTREO	8
2.1. Perturbar y Observar	8
2.2. Conductancia Incremental	10
2.3. Realimentación de la Potencia	12
2.4. Peso en Tres Puntos	13
2.5. Análisis de desempeño de métodos directos por muestreo.	14
3. DIFERENCIAL POR PERTURBACIÓN EN LA MODULACIÓN	18
3.1. Principio teórico	18
3.2. Comportamiento	19
3.3. Ventajas y Desventajas	22
4. RESULTADOS	24
4.1. Implementación	24
4.1.1. Sistema y Controlador	24
4.1.2. Algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia	27
4.1.2.1. Perturbar y Observar	27
4.1.2.2. Conductancia Incremental	28
4.1.2.3. Realimentación de la Potencia	29

4.1.2.4. Peso en Tres Puntos	30
4.1.2.5. Diferencial por Perturbación en la Modulación	31
4.2. Simulaciones	35
4.2.1. Perturbación y transiente	35
4.2.2. Prueba en estado estacionario	37
4.2.3. Pruebas dinámicas	40
4.3. Resultado experimentales	42
4.3.1. Perturbación	43
4.3.2. Pruebas en estado estacionario	47
4.3.3. Pruebas dinámicas	49
5. CONCLUSIONES	51
5.1. Conclusiones	51
5.1.1. Ventajas de la propuesta de investigación	51
5.1.2. Síntesis de la metodología empleada	51
5.1.3. Detalles técnicos de la investigación	51
5.1.4. Conclusión	52
5.2. Trabajo Futuro	52
A. CÓDIGO EN C	53
A.1. Método Diferencial por Perturbación en la Modulación	53
A.2. Método Método Perturbar y Observar	58
B. CÓDIGO EN MATLAB	61
B.1. Método Diferencial por Perturbación en la Modulación	61
B.2. Método Perturbar y Observar	62
B.3. Método Conductancia Incremental	63
B.4. Método Realimentación de la Potencia	64
B.5. Método Peso en Tres Puntos	65
B.6. Panel Fotovoltaico	67
BIBLIOGRAFÍA	68

Índice de figuras

1.1. Curvas de corriente y potencia.	2
1.2. Sistema fotovoltaico.	3
1.3. Clasificación de métodos.	4
1.4. Curva de potencia respecto al voltaje del panel fotovoltaico.	5
2.1. Movimiento en la curva de perturbar y observar.	9
2.2. Movimiento en la curva de inductancia incremental.	12
2.3. Diagrama de flujo Realimentación de la potencia.	13
2.4. Casos posibles en Peso en tres puntos.	14
2.5. Toma de decisión para un aumento de radiación, moviéndose hacia la izquierda.	16
2.6. Toma de decisión para un aumento de radiación, moviéndose hacia la derecha.	17
3.1. Movimiento en la curva de Diferencial por perturbación en la modulación.	19
3.2. Casos posibles en Diferencial por perturbación en la modulación.	20
3.3. Sin cambio de radiación	21
3.4. Cambio de radiación rápida.	21
3.5. Cambio de radiación lento.	22
4.1. Sistema fotovoltaico simulado.	25
4.2. Esquemático y lazo de control.	25
4.3. Diagrama de flujo Perturbar y Observar.	27
4.4. Diagrama de flujo Conductancia Incremental.	28
4.5. Diagrama de flujo Realimentación de la potencia.	29
4.6. Diagrama de flujo Peso en Tres Puntos.	30
4.7. Diagrama de flujo Lógica Peso en Tres Puntos.	31
4.8. Diagrama de flujo del método propuesto.	32
4.9. Diagrama de flujo del identificador de estado.	33
4.10. Diagrama de flujo del estado Bajo.	34
4.11. Diagrama de flujo del estado Alto.	35
4.12. Diagrama de flujo del Algoritmo.	36
4.13. Cambio en la portadora.	37
4.14. Perturbación al sistema en simulación.	38
4.15. Transitorio del voltaje del panel fotovoltaico.	39
4.16. Estado estacionario del método propuesto.	40
4.17. Comportamiento de cada método ante una variación.	41

4.18. Sistema experimental.	42
4.19. Perturbación del sistema en prueba experimental.	44
4.20. Perturbación del sistema en prueba experimental modificada.	45
4.21. Prueba en estado estacionario a ochocientos watts por metro cuadrado.	46
4.22. Prueba en estado estacionario a mil watts por metro cuadrado.	47
4.23. Prueba en estado estacionario.	48
4.24. Aumento de irradiación.	49
4.25. Disminución de irradiación.	50

Índice de tablas

4.1. Parámetros de simulación	26
4.2. Eficiencia en estado estacionario de los métodos	39
4.3. Eficiencia con dinámica de los métodos	42
4.4. Parámetros del sistema experimental	43
4.5. Eficiencia para irradiación constante de los métodos	48
4.6. Eficiencia para irradiación variable de los métodos	50

INTRODUCCIÓN

La demanda energética crece día a día, por lo cual se ha hecho necesario la utilización de nuevas fuentes de energía. La introducción de energías renovables, como por ejemplo la energía solar, es una tendencia cada vez más rentable gracias al avance de las tecnologías y su consecuente reducción de costos. Este tipo de energía es considerada una de las fuentes más fiables y prometedoras entre las energías renovables, debido a que ofrece varias ventajas tales como ausencia de contaminantes por hidrocarburos, larga vida útil, bajo mantenimiento, etc. [1].

En la actualidad, la tecnología fotovoltaica se enfrenta a dos grandes problemas, el alto costo de producción de las células solares y la baja eficiencia de conversión de energía. El alto costo de producción se ha reducido por medio de la producción en masa, el ingreso de nuevas tecnologías y metodologías de construcción [2]. Los módulos comerciales poseen una eficiencia entre 6 y 16 %, dependiendo de su tecnología [2], por lo cual se han desarrollado 2 técnicas principales para mejorar la eficiencia en una planta solar:

- La implementación de seguidores solares, los cuales consisten en equipos que agregan movimientos a los paneles fotovoltaicos para que estos sigan el cenit solar a lo largo del día [2].
- El uso de técnicas de control aplicadas a un convertidor de potencia, que fuerzan al módulo para operar en el punto de máxima potencia [2].

Debido a la relación no lineal que presenta la corriente versus el voltaje de un panel fotovoltaico, existe sólo un punto de máxima potencia global en la curva de potencia respecto al voltaje en el convertidor al panel solar. Además, el punto de máxima potencia varía debido a la energía que entrega el panel es dependiente de las condiciones atmosféricas, tal como temperatura e irradiación [1], como se puede ver en la figura 1.1.

Los métodos de seguimientos convencionales presentan problemas ante los cambios rápidos de irradiación, fallando en el seguimiento del máximo punto de potencia.

El sistema fotovoltaico de referencia que se utiliza en este trabajo se observa en la figura 1.2. Este consiste de un panel solar conectado a un convertidor dc/dc con su respectivo control de voltaje aplicando como referencia un método de seguimiento del máximo punto

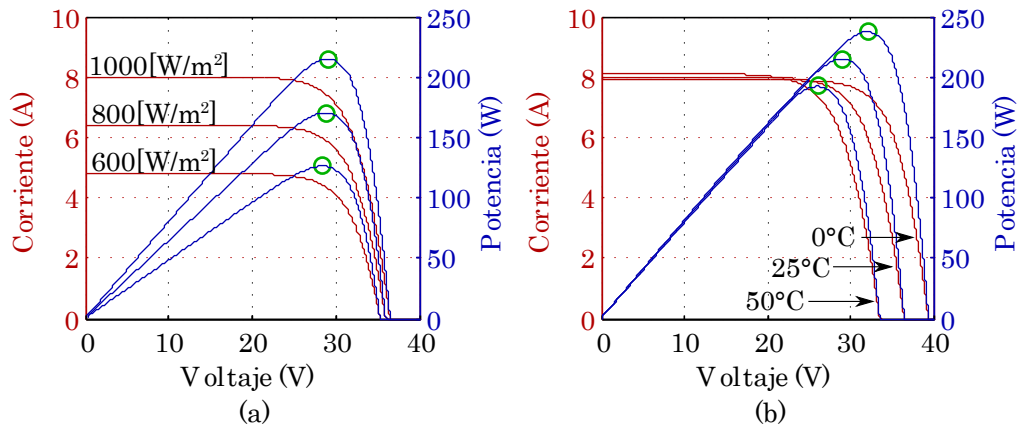


Figura 1.1: Curvas de corriente y potencia del panel fotovoltaico variando (a) radiación y (b) temperatura.

de potencia. Esto se conecta por medio de un enlace DC capacitivo a un convertidor dc/ac con su respectivo control de corriente para inyectar potencia a la red. Este trabajo se enfoca en el bloque de MPPT, desarrollando un algoritmo que permita obtener un seguimiento del máximo punto de potencia, incluso si las condiciones de irradiación cambia rápidamente.

1.1. Métodos de seguimiento del máximo punto de potencia

El seguimiento del punto máximo de potencia de una instalación fotovoltaica es fundamental, debido que al aplicar un voltaje erróneo en el panel fotovoltaico este puede disminuir drásticamente la potencia instantánea que este puede entregar [1]. Existen diversos tipos de métodos para hacer el seguimiento del máximo punto de potencia y estos varían en complejidad, cantidad de sensores necesarios, forma de realizar el seguimiento, información necesaria para funcionar, entre otros aspectos [3].

Por otra parte, existen múltiples formas de clasificar los métodos de seguimiento del punto máximo de potencia, entre ellos, cantidad de variables, el tipo de técnica que utilizan para rastrear, etc [1]. En este trabajo se clasifican por la forma de encontrar el máximo punto de potencia, de las cuales existen 3 grandes grupos: métodos directos, indirectos e híbridos como muestra la figura 1.3 [1,4].

1.1.1. Métodos Directos

Los métodos directos se basan en las mediciones realizadas al sistema para buscar el máximo punto de potencia [1]. Este conjunto de métodos realizan una búsqueda real del máximo punto de potencia y se asocian a la técnica escalando la colina, la cual consiste en variar periódicamente algún parámetro del sistema (voltaje, corriente, índice de modulación, etc.) y medir si se encuentra en la punto de máxima potencia [5]. Por lo cual, para este tipo de métodos, no es necesario conocer en detalle los parámetros de los paneles y esto es una gran ventaja ya que estos varían con el paso del tiempo [5].

Los métodos directos se pueden dividir en dos tipos: por muestreo y por modulación [6].

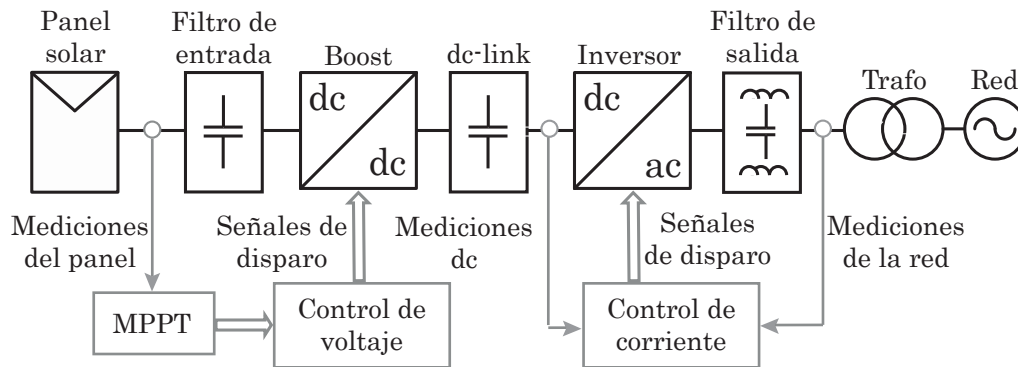


Figura 1.2: Sistema fotovoltaico.

1. Métodos directos por muestreo:

Consisten en realizar periodo a periodo un cálculo de la potencia y/o la pendiente de esta respecto al voltaje [6]. Dentro de estos métodos se encuentran Perturbar y Observar, Conductancia Incremental, Realimentación de la Potencia, Peso en Tres Puntos, entre otros.

2. Métodos directos por modulación:

Los métodos directos generan oscilaciones alrededor del máximo punto de potencia, debido a la naturaleza de su algoritmo [6]. Los métodos directos por modulación se basan en estas y generan sus propias oscilaciones en el panel para encontrar el máximo punto de potencia [6]. Por ejemplo, el método de oscilación forzada, que fuerza oscilaciones en el voltaje para tener oscilaciones en la potencia. Cuando este se ubica en el máximo punto de potencia las oscilaciones de la potencia que se generan tienen el doble de la frecuencia [6].

1.1.2. Métodos Indirectos

Los métodos indirectos calculan o estiman el punto máximo de potencia por medio de una base de datos curvas típicas del generador fotovoltaico para diferentes irradiancias y temperaturas, modelos del panel fotovoltaico y/o el del convertidor, razonamientos matemáticos, etc. Estos no saben exactamente cuál es el punto de máxima potencia [1, 6]. Debido a esto, los métodos indirectos normalmente poseen una menor eficiencia o son más complejos que los métodos directos [7]. Los métodos indirectos se dividen en cuatro: fraccionales, por temperatura, por la salida del convertidor y por el modelo del panel fotovoltaico [7].

1. Métodos indirectos fraccionales:

Los métodos indirectos fraccionales consisten en que, por medio de datos (voltaje del panel a circuito abierto, corriente a corto circuito, etc.) se estima el máximo punto de potencia [7]. Un ejemplo es Fraccional Voltaje de circuito abierto.

2. Métodos indirectos por temperatura:

Los métodos indirectos por temperatura se basan en la medición de la temperatura para el cálculo del máximo punto de potencia [7].

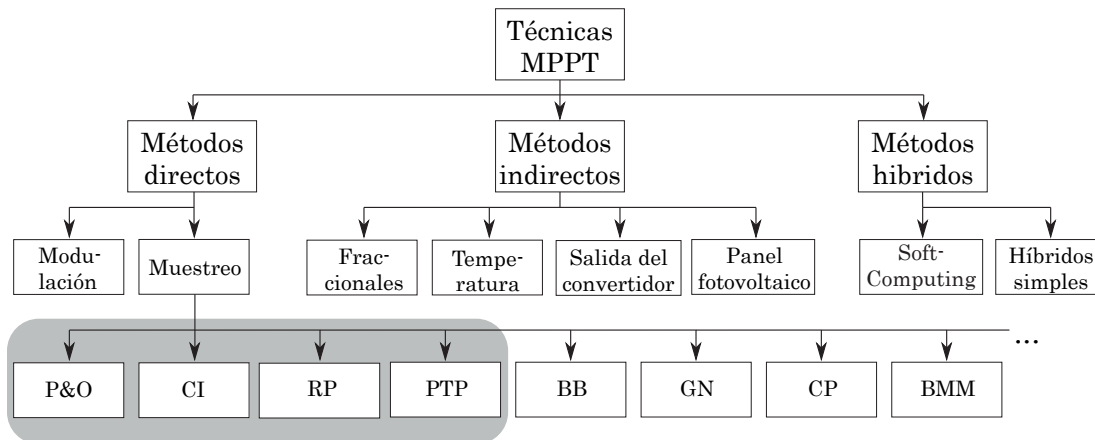


Figura 1.3: Clasificación de métodos de seguimiento del máximo punto de potencia.

3. Métodos indirectos por salida del convertidor:

Los métodos indirectos por salida del convertidor basan su cálculo del máximo punto de potencia en las mediciones obtenidas en la salida del convertidor (corriente y voltaje en la salida del convertidor) [7].

4. Métodos indirectos por modelo del panel fotovoltaico:

Los métodos indirectos por modelo del panel fotovoltaico utilizan como base para el cálculo del máximo punto de potencia la ecuación característica de los paneles fotovoltaicos [7].

1.1.3. Métodos Híbridos

Los métodos híbridos consisten en buscar el punto máximo de potencia de la manera directa y a la vez de forma indirecta [4]. Estos constan de dos partes, la primera parte consiste en calcular un valor constante del punto máximo de potencia según las condiciones ambientales del panel. Esta representa una respuesta rápida a las variables ambientales y se puede generar usando algún método indirecto. La segunda parte consiste en los intentos de realizar un seguimiento exacto del máximo punto de potencia, aplicando un seguimiento como en los métodos directos [4].

1. Métodos híbrido Soft-Computing:

Los métodos híbridos Soft-Computing consiste en encontrar el máximo punto de potencia por medio de estados y entradas no definidas o con información que no es concluyente [7]. “Soft-Computing es un término empleado en informática que engloba diversas técnicas empleadas para solucionar problemas que manejan información completa, con certidumbre y exactitud matemática compleja”. Por ejemplo sistemas difusos y redes neuronales [8,9].

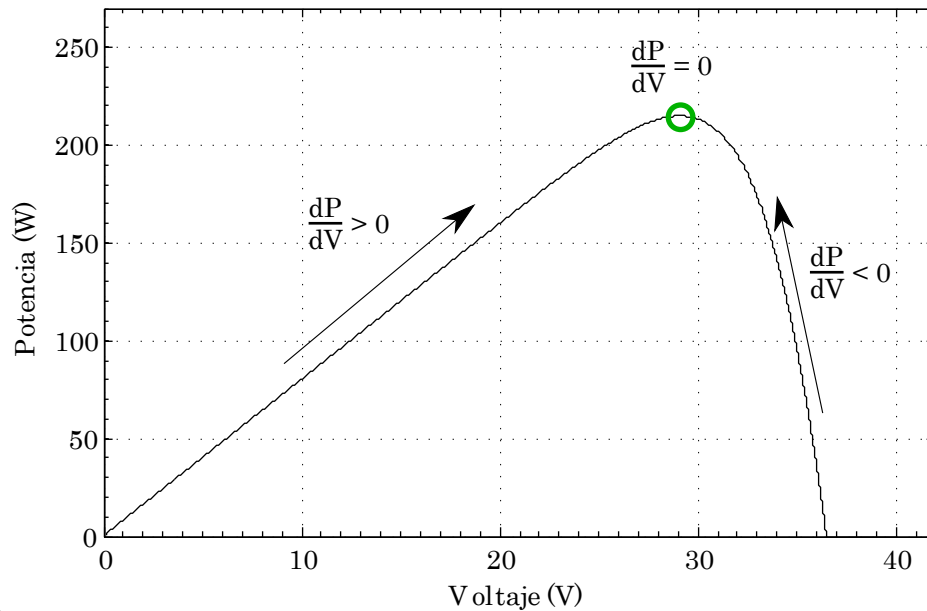


Figura 1.4: Curva de potencia respecto al voltaje del panel fotovoltaico.

2. Métodos híbridos simples:

Existen híbridos que no clasifican en Soft-Computing como el método basado en estados, ya que este consiste en obtener un modelo en variables de estados de las celdas fotovoltaicas y utilizar un controlador realimentado [7].

En este documento se propone un nuevo método de seguimiento del máximo punto de potencia y se compara su desempeño con otros cuatro métodos: Perturbar y Observar, Conductancia Incremental, Realimentación de la Potencia y Peso en Tres Puntos.

Se han seleccionado estos cuatro métodos, debido a la naturaleza de su seguimiento los clasifica como métodos directos de muestreo figura 1.3. Estos utilizan la técnica escalando la colina para llegar al punto de máxima potencia, la cual consiste en aplicar variaciones en alguna variable que permita escalar a la cima de la curva de potencia, como se observa en la figura 1.4. Además de presentar ventajas muy similares [1, 10], se programan de forma digital en un microprocesador, necesitando solo un sensor de corriente y uno de voltaje, no necesitan datos del panel y presentan una alta eficiencia [1, 3, 5]. Adicionalmente, se puede señalar, que estos métodos se encuentran ampliamente en convertidores PV industriales [1].

Los métodos antes señalados, son dependientes de parámetros tales como la magnitud de las variaciones de tiempo y voltajes. Estos parámetros pueden variar significativamente la potencia en los paneles fotovoltaicos, por lo cual es necesario analizar detalladamente cada uno de estos algoritmos en algunas de las condiciones más representativas, como por ejemplo, bruscos cambios de irradiación producidos por el sombreado de una nube sobre el panel, entre otras condiciones. Si se escogen parámetros inadecuados, podrían causar ineficiencia en el sistema, dejando una comparación poco objetiva entre los distintos algoritmos. Además, todos los métodos mencionados, debido a la naturaleza de su algoritmo, poseen una oscilación en estado estacionario en 3 puntos que afecta en la eficiencia del sistema, la cual tiene una relación directa con el tamaño de la variación que se aplica al voltaje del panel fotovoltaico.

En los métodos Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación de la Potencia, existe un problema en el seguimiento del máximo punto de potencia cuando el sistema se ve afectado por variaciones de radiación muy pronunciadas, ya que básicamente estos algoritmos toman la dirección equivocada y se alejan del máximo punto de potencia. Esto se debe que ninguno de ellos fue diseñado para cambios de la radiación, de tal forma que si en un instantes el sistema se encuentra a la derecha del máximo punto de potencia la variación lo moverá aún mas a la derecha, alejando al panel fotovoltaico de máximo punto de potencia.

En el método Peso en Tres Puntos no existe el problema mencionado anteriormente, pero este algoritmo es el más lento de los cuatro.

Existe un gran número de modificaciones posibles para los distintos métodos estudiados, como por ejemplo: variar el índice de modulación en lugar del voltaje [11, 12], evitar tomar una dirección incorrecta por los cambios de radiación con mediciones de corrientes [13, 14], utilizar paso variable [11, 14–16], implementación de algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia por medio de sistemas cableados [17], implementación de algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia en convertidores mas complejos (Push-Pull y SEPIC Converter) [18, 19], basados en el rizado del condensador [20], etc. Gran parte de estas modificaciones se puede implementar independiente del método que se utilice.

En este trabajo se propone un nuevo método de seguimiento del máximo punto de potencia basado en una perturbación rápida en la modulación para obtener puntos en la curva de potencia del panel fotovoltaico, donde éstos no sufren un cambio relevante ante las variaciones de la irradiación.

1.2. Hipótesis

Los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia directos pueden generar un seguimiento erróneo cuando la curva de potencia cambia rápidamente. Es posible evitar este comportamiento implementando un método de tres puntos, pero la respuesta dinámica se ve fuertemente deteriorada. Para lograr un correcto seguimiento del punto de máxima potencia y una respuesta dinámica adecuada, es posible generar una perturbación en el patrón de disparo del convertidor y a partir de las variaciones observadas en el voltaje y la potencia, calcular la variación de esta última, así como su dirección, de manera correcta, independientemente de los cambios en la curva de potencia. De esta forma, se puede obtener un método de seguimiento de máximo punto de potencia que permite seguir cambios bruscos de radiación, así como también obtener un mejor desempeño en estado estacionario, ya que produce una oscilación solo entre dos niveles.

1.3. Objetivos

Objetivo primario:

- El objetivo principal es diseñar una nueva metodología para mejorar la eficiencia del seguimiento del máximo punto de potencia.

Objetivos secundarios:

- Evaluar el desempeño de los métodos con cambios de radiación.
- Evaluar el desempeño del método propuesto de forma experimental.
- Comparar los distintos desempeños de cada método ante los distintos escenarios.

1.4. Alcances y Limitaciones

En este trabajo se propone un nuevo método de seguimiento del máximo punto de potencia basado en una perturbación rápida en la modulación. Sin embargo, no se considera ninguna modificación que dificulte comparar este método con los métodos convencionales, como por ejemplo: paso variable, eliminación de oscilaciones, detector de cambio de radiación, etc. Para efectos de comparación se probaran los siguientes métodos de seguimiento del máximo punto de potencia directos: Perturbar y Observar, Conductancia Incremental, Realimentación de la Potencia, Peso en Tres Puntos. Todo lo anterior se realiza por medio de simulaciones y en una plataforma experimental según el estándar prEN 5030 [21].

MÉTODOS DIRECTOS POR MUESTREO

En este capítulo se presentan los cuatro métodos directos por muestro mencionados en el capítulo anterior. En cada uno de los métodos se presentarán los siguientes puntos: descripción, principio fundamental, casos posibles y desventajas.

2.1. Perturbar y Observar

Perturbar y observar es un método iterativo de seguimiento del máximo punto de potencia [1, 3]. Este es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y facilidad al implementar [5, 10, 15]. Siendo el algoritmo más utilizado en sistemas fotovoltaicos comerciales [5], este método se basa en la característica de la potencia respecto al voltaje [1–3, 5, 10, 12, 15, 16, 18, 22], la pendiente de esta curva, al lado izquierdo del máximo punto de potencia es positiva y al lado derecho de este punto es negativa como se observa en la figura 1.4. Básicamente consiste en cálculo y la toma de decisión del signo de la pendiente; si este es positivo, aplica una perturbación positiva y para el caso de que este sea negativo se aplica una perturbación negativa [22].

En la literatura [1, 5, 10] existe una implementación típica. Esta consiste en medir la corriente y el voltaje en el panel, calcular la potencia en éste, obtener las diferencias entre la potencia actual y la potencia en un instantes anterior y de la misma manera para el voltaje. Según las diferencias mencionadas anteriormente, se tomar la decisión de aplicar una perturbación positiva (diferencias ambas positivas o ambas negativas), negativa (diferencias con signos contrarios) o no aplicar una perturbación (diferencia entre las potencias igual a cero). Sin embargo, existe un problema teórico en el algoritmo, debido a que éste no aplica una perturbación para que el sistema permanezca en el punto de máxima potencia, lo cual es correcto, pero la condición para llegar a ese estado no se puede cumplir. La comparación entre las potencias de un estado actual con el anterior debe ser equivalentes (para temperatura e irradiación constante), pero esto nunca se cumple. Solo existe un punto de máxima potencia en el sistema (ver figura 1.4), por lo cual esta condición es errónea para un sistema constante. En esta implementación se elimina ese estado y se conservan

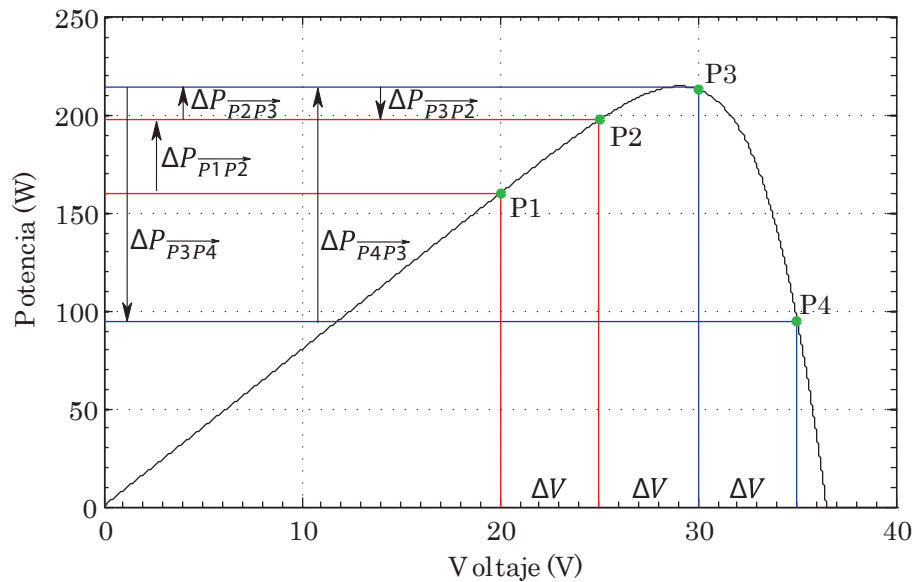


Figura 2.1: Movimiento en la curva de perturbar y observar.

los demás casos, obteniendo solo cuatro casos como muestra en algunos textos [1–3]. Los estados a considerar son:

- Caso 1: ΔP y ΔV mayores a cero. Se incrementa el voltaje.
- Caso 2: ΔP mayor a cero y ΔV menor a cero. Se disminuye el voltaje.
- Caso 3: ΔP menor a cero y ΔV mayor a cero. Se disminuye el voltaje.
- Caso 4: ΔP y ΔV menores a cero. Se incrementa el voltaje.

En la figura 2.1 se muestran los cuatro casos, donde ΔV es la variación de voltaje fija de 5V que se aplica al panel fotovoltaico (este valor de voltaje se escoge solo para una mejor visualización, ya que en un caso real esta amplitud es ineficiente) y los puntos P1 al P4, son los distintos puntos en la curva en que se mueve el panel fotovoltaico. Para el caso 1 se puede obtener cuando el sistema se encuentra en movimiento a la derecha en el instante anterior se aplicó un ΔV positivo, esto implica que el voltaje del instante actual es mayor que el instantes anterior y la potencia del instante actual debe ser mayor que la potencia del instante anterior. Por ejemplo, si en el instante actual el panel se encuentra en P2 y el tiempo anterior se encontraba en P1 este suma un ΔV trasladando al panel a P3 y esto se repite sucesivamente hasta alcanzar al punto P4, al moverse de P3 a P4 la potencia disminuye y como el movimiento es hacia la derecha se encuentra con el caso 3 aplicando un ΔV negativo devolviendo de P4 a P3. En ese instante la potencia aumenta volviendo a cumplir la condición anterior, pero el movimiento cambio, ahora se mueve hacia la izquierda encontrándose con el caso 2. Esto aplica un ΔV negativo moviéndose de P3 a P2, bajando la potencia y cumpliendo con la condiciones del caso 4, en donde en éste al haberse movido a la izquierda y al disminuir la potencia por este movimiento, se aplica un ΔV positivo

quedando en P3. El sistema se mantendrá oscilando constantemente entre P2, P3 y P4 si este mantiene sus condiciones ambientales constantes.

Los problemas que presenta Perturbar y Observar son los siguientes:

- Oscilaciones en el estado estacionario [1–3, 5, 10, 12, 15, 16, 22]. Estas se deben a la naturaleza del método, debido a que éste se mantiene siempre perturbando, incluso aunque encuentre el máximo punto de potencia, por lo cual no debe haber dos instantes consecutivos con el mismo valor de voltaje.
- Error al tomar una decisión cuando hay un cambio en la radiación o la temperatura [1–3, 5, 10, 12, 22]. Esto se debe que el método no está pensado en las transiciones de cambios de las curvas de potencias, por lo cual este se pierde en estos casos.
- Velocidad de seguimiento del punto máximo de potencia [1, 3, 12, 15, 16, 22]. Se define como la razón entre el tamaño de la perturbación y el tiempo entre iteración del método [23]. Al estar relacionada con el tamaño de la perturbación, si este crece la velocidad de seguimiento aumenta, pero a la vez las oscilaciones en estado estacionario aumentan.

2.2. Conductancia Incremental

De igual forma que Perturbar y Observar este método se basa en la derivada de la potencia respecto al voltaje, figura 1.4, pero este compara la conductancia instantánea respecto a la conductancia incremental y según como se comporten estas, se aplica una variación a la referencia de voltaje en el panel [1–3, 5, 18, 22]. A menudo se afirma en la literatura que Conductancia Incremental no presenta los mismos problemas que Perturbar y Observar, debido a la comparación entre las conductancias que este realiza, además de presentar una mejor respuesta del seguimiento del máximo punto de potencia [5] pero en la literatura se concluye que son métodos equivalentes [22], debido a las pruebas que se realizan según el estándar prEN 50530, donde sus eficiencias son muy parecidas. Al igual que el método anterior presenta las mismas ventajas y simpleza al implementar [1, 22]. Conductancia incremental es otro método que se utiliza ampliamente en la industria [1].

El principio fundamental de este método es la ecuación (2.1), la cual proviene de la derivada de la potencia respecto al voltaje [1–3, 5, 18, 22].

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv}i_{pv})}{dV_{pv}} \quad (2.1)$$

Donde P_{pv} es la potencia en el panel fotovoltaico, V_{pv} es el voltaje en el panel fotovoltaico y i_{pv} es la corriente en el panel fotovoltaico.

Al aplicar a 2.1 la propiedad de la derivada del producto se obtiene (2.2).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv}i_{pv})}{dV_{pv}} = i_{pv} + V_{pv} \frac{di_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.2)$$

Para el caso discreto (2.2) se escribe como (2.3).

$$\frac{\Delta P_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} = i_{pv}(k) + V_{pv}(k) \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \quad (2.3)$$

Donde $\Delta P_{pv}(k)$ es la diferencia entre la potencia en el instante k y la potencia en un instante anterior ($k-1$) en el panel fotovoltaico, $\Delta V_{pv}(k)$ es la diferencia entre el voltaje en el instante k y el voltaje en un instante anterior del panel fotovoltaico, $\Delta i_{pv}(k)$ es la diferencia entre la corriente en el instante k y la corriente en un instante anterior del panel fotovoltaico.

La curva de potencia respecto al voltaje se separa en tres segmentos como se observa en la figura 1.4, con derivada positiva (a la izquierda del punto máximo de potencia), derivada negativa (a la derecha del punto máximo de potencia) y derivada igual a cero (en el punto máximo de potencia). Al remplazar las condiciones de cada segmento en (2.3), obtenemos tres casos representados por (2.4), (2.5) y (2.6) respectivamente. En el caso que se cumplen las condiciones de (2.4) es necesario aplicar una perturbación positiva para acercarnos al punto de máxima potencia, las condiciones de (2.5) se debe una perturbación negativa y las condiciones de (2.6) no se debe aplicar una perturbación. Estos tres casos muestra la figura 1.4. Donde la derivada es menor a cero (2.4), mayor a cero (2.5) e igual a cero (2.6).

$$0 > \frac{\Delta P_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} = i_{pv}(k) + V_{pv}(k) \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \Rightarrow -\frac{i_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} > \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \quad (2.4)$$

$$0 < \frac{\Delta P_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} = i_{pv}(k) + V_{pv}(k) \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \Rightarrow -\frac{i_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} < \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \quad (2.5)$$

$$0 = \frac{\Delta P_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} = i_{pv}(k) + V_{pv}(k) \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \Rightarrow -\frac{i_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} = \frac{\Delta i_{pv}(k)}{\Delta V_{pv}(k)} \quad (2.6)$$

La figura 2.2 muestra dos de los casos, donde de igual forma que el ejemplo mostrado Perturbar y Observar se utiliza un ΔV fijo de 5V para visualizar mejor el funcionamiento, ya que este es ineficiente para la generación de energía y P1, P2 y P3 son los puntos que se mueven en la curva de corriente. El caso donde la pendiente es mayor a cero se observa que cuando el instante anterior el panel se encontraba en P1 y en el instante actual en P2 al calcular la conductancia instantánea de P2 versus la variación de esta en los dos puntos nombrados cumple con la condición de la ecuación (2.5) generando un ΔV positivo que lo mueve a P3. En el movimiento de P2 a P3 se cumple con la condición de la ecuación (2.4) el cual lo devuelve a P2 y de igual forma a P1 repitiendo el ciclo oscilante entre P1, P2 y P3 constantemente. Se hace un especial énfasis a P2, debido a que este a pesar de tener la misma conductancia se puede mover hacia la derecha o hacia la izquierda a diferencia de los otros dos puntos que siempre se mueven en una misma dirección, esto se debe a la variación de conductancia calculada con el punto anterior en que se encuentra el sistema. Al ser un ΔV fijo para todos los instantes la variación de conductancia esta dada por la variación de corriente y como se puede observar en la figura 2.2 la diferencia de corriente entre los puntos aumenta al encontrarse al lado izquierdo de P2 y disminuye cuando es encuentra a su lado derecho.

Los principales problemas de Conductancia Incremental son los siguientes:

- Oscilaciones en el estado estacionario [2,3,22], a pesar poder detectar el máximo punto de potencia, no logra llegar a él y se queda oscilando alrededor de este, esto se debe a que los escalones de voltajes son fijos. A pesar que en [1,5] se habla que el método de Conductancia Incremental soluciona este problema esto se contradice con [3,22].

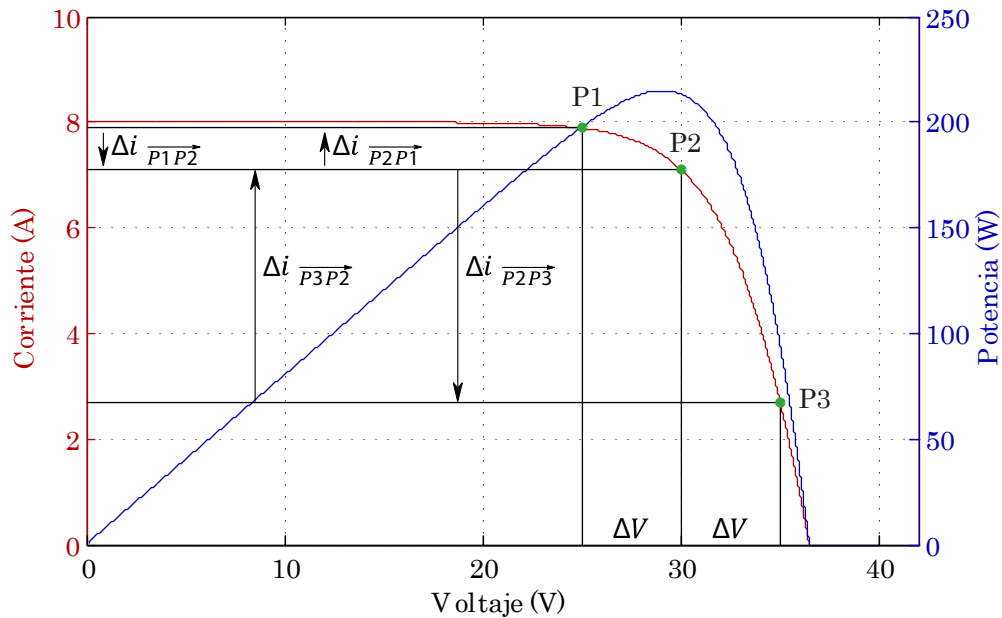


Figura 2.2: Movimiento en la curva de inductancia incremental.

- Error en tomar una decisión cuando cambia la irradiación o la temperatura [22]. Esto se debe a que el método no está pensado en las transiciones de los cambios de la curva de potencia.
- Velocidad de seguimiento del punto máximo de potencia [3,5,22], si se desea aumentar la velocidad de este es necesario aumentar el tamaño de la perturbación aumentando también el tamaño de la oscilación estacionaria.

2.3. Realimentación de la Potencia

Realimentación de la potencia es un método que utiliza un principio de funcionamiento bastante sencillo. Se aplica una variación en la dirección en la cual te permita “escalar” la curva de potencia, de lo contrario se cambia de dirección en la variación [1, 2, 5, 24]. El método debe cumplir con la condición que la función formada por la variable a optimizar y la variable a variar debe ser una curva con forma de colina sin óptimos locales, solo un óptimo global.

Este algoritmo compara periódicamente la potencia actual con la potencia anterior y de acuerdo al resultado obtenido en la comparación, se aplica una variación positiva en caso que la diferencia sea mayor que cero o negativa en caso que esta sea menor a cero [1,2,12,24].

En la figura 2.3, se muestra el funcionamiento de este método. Cuando la diferencia de potencia es positiva, como son los casos de P1 a P2, de P2 a P3 y de P4 a P3, se continúa agregando a la referencia un ΔV fijo de 5V en la misma dirección. Se utilizan 5V por un tema visual, ya que este es ineficiente para un uso práctico. Cuando la diferencia potencial es negativa, como son los casos de P3 a P4 y de P3 a P2, el sistema invierte su movimiento si se mueven hacia la derecha (flecha roja) comienzan a moverse hacia la izquierda (flecha azul) y viceversa.

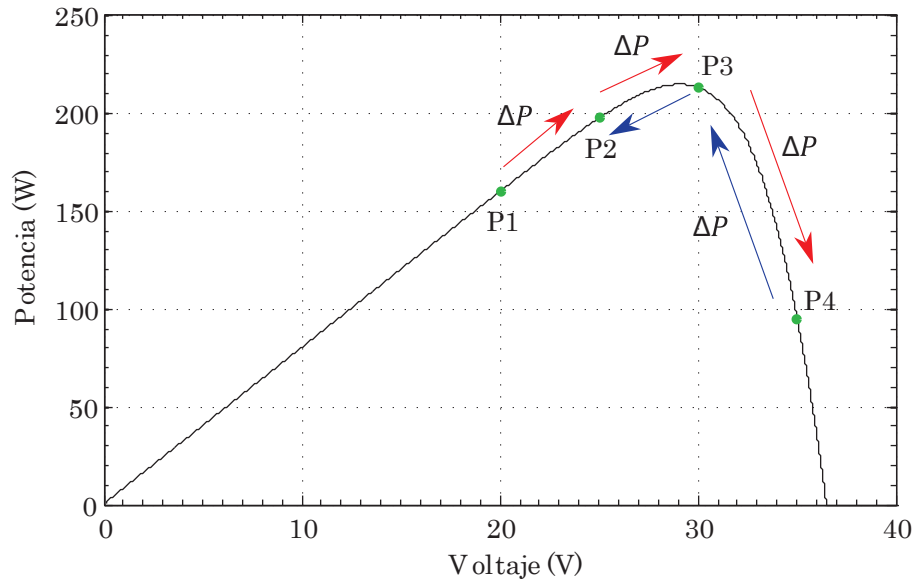


Figura 2.3: Diagrama de flujo Realimentación de la potencia.

Realimentación de la potencia se comporta de la misma manera que Perturbar y Observar [3, 12], por lo tanto sus problemas son idénticos.

Los principales problemas de Realimentación de la potencia son los siguientes:

- Oscilaciones en el estado estacionario [1–3, 5, 10, 12, 15, 16, 22]. Estas se deben a la naturaleza del método, debido a que este se mantiene siempre perturbando incluso aunque encuentre el máximo punto de potencia, por lo cual no debe haber dos instantes consecutivos con el mismo valor de voltaje.
- Error al tomar una decisión cuando hay un cambio en la radiación o la temperatura [1–3, 5, 10, 12, 22]. Esto se debe que el método no está pensado en las transiciones de cambios de las curvas de potencias por lo cual este se pierde en estos casos.
- Velocidad de seguimiento del punto máximo de potencia [1, 3, 12, 15, 16, 22]. Se define como la razón entre el tamaño de la perturbación y el tiempo entre iteración del método [23]. Al estar relacionada con el tamaño de la perturbación, si este crece la velocidad de seguimiento aumenta pero a la vez las oscilaciones en estado estacionario aumentan.

La principal diferencia de Realimentación de la potencia con Perturbar y Observar es que este no necesita una medición de voltaje para ejecutar el algoritmo. Aunque si es necesario para el cálculo de potencia.

2.4. Peso en Tres Puntos

Peso en Tres Puntos es una modificación del método perturbar y observar [5, 10]. Este método se basa en la comparación de tres puntos de potencia, a diferencia de perturbar y observar que solo se basa en la comparación de dos puntos [1, 5, 10]. Dependiendo del

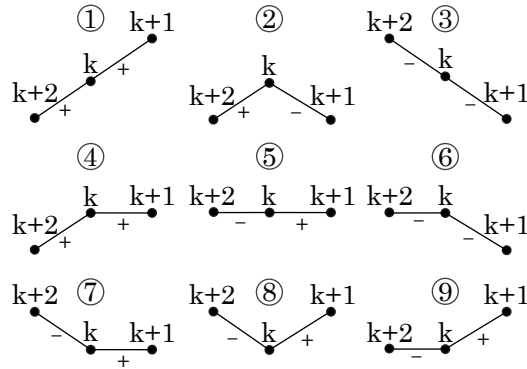


Figura 2.4: Casos posibles en Peso en tres puntos.

resultado de estas comparaciones el algoritmo toma la decisión de aumentar, disminuir o mantener el voltaje en el panel fotovoltaico [1, 5, 10]. Este método se mantiene oscilando en el voltaje actual ante variaciones rápidas de radiación [10].

Este se basa en la comparación de tres puntos de potencia [1, 5, 10]. El primer punto es la potencia actual en un instante k , el segundo punto es la potencia en un instante $k+1$ al aplicar una variación positiva y el tercer punto es la potencia en un instante $k+2$ al aplicar una variación negativa [1, 5, 10]. Según la comparación de estas 3 potencias, se toma la decisión de mantener el voltaje en el instante k , llevar el voltaje al instante $k+1$ o llevarlo al instante $k+2$.

En la figura 2.4 se muestran los nueve posibles casos de comparación entre las de potencias [5, 10] en donde una comparación puede tomar un signo $+$ o un signo $-$. En el caso que la potencia en el instante $k+1$ sea mayor o igual que el instante k , esta toma el signo $+$ y en el caso contrario toma el signo $-$. Para el caso de la comparación entre las potencias del instante k sea mayor que el instante $k+2$, esta comparación toma el signo $+$ y en el caso contrario toma el signo $-$. Para que el voltaje aumente es necesario que las dos comparaciones tengan signo $+$ y para que el voltaje disminuya las dos comparaciones deben tener signo $-$ y en el caso que las comparaciones tengan signo distintos el voltaje se mantiene, por lo tanto, existen 2 casos en donde el voltaje aumenta, 2 casos donde el voltaje disminuye y 5 cosas donde el voltaje se mantiene como muestra la figura 2.4.

Este método nace para resolver el problema del error en la toma de decisión cuando cambia la irradiación o la temperatura [5, 10], debido a que si este ve un aumento de potencia, tanto en el instante $k+1$ y $k+2$, éste se mantendrá y no divergirá en una dirección equivocada.

Sin embargo, la principal desventaja del método Peso en Tres Puntos que es más lento para encontrar el máximo punto de potencia si no existen variaciones de temperatura o irradiación [5, 10]. Además, presenta oscilaciones en estado estacionario y tener una velocidad de seguimiento máxima dada por el tamaño del escalón de voltaje y el tiempo de iteración [5, 10].

2.5. Análisis de desempeño de métodos directos por muestreo.

La oscilación en 3 puntos es el estado estacionario de todos los métodos mencionados en este capítulo. Las razón entre las pérdidas ocasionadas por este fenómeno y la potencia disponible se pueden estimar con la ecuación [14].

$$\frac{P_r}{P_{mpp}} \approx \left(\frac{(\Delta v_{pv})_{RMS}}{v_{mpp}} \right)^2 \left(1 + \frac{v_{cell}}{2nkT/q} \right) \quad (2.7)$$

Donde P_r son las pérdidas ocasionadas por la oscilación en estado estacionario, P_{mpp} es la potencia en el máximo punto de potencia, $(\Delta v_{pv})_{RMS}$ es el valor eficaz de la oscilación, v_{mpp} es el voltaje en el máximo punto de potencia, v_{cell} es el voltaje en el punto de máxima potencia de cada célula fotovoltaica del panel, q es la carga del electrón, n es el factor del diodo, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en el panel.

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} V_e + \Delta V & \text{si } 0 < t \leq \lambda/4 \\ V_e & \text{si } \lambda/4 < t \leq \lambda/2 \\ V_e - \Delta V & \text{si } \lambda/2 < t \leq 3\lambda/4 \\ V_e & \text{si } 3\lambda/4 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

Un ciclo de oscilación en los métodos Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación de la potencia esta dado por (2.8) y en el caso de peso en tres puntos esta dada por (2.9)

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} V_e & \text{si } 0 < t \leq \lambda/3 \\ V_e + \Delta V & \text{si } \lambda/3 < t \leq 2\lambda/3 \\ V_e - \Delta V & \text{si } 2\lambda/3 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde V_e es la diferencia entre el voltaje de máximo punto de potencia con el voltaje medio del panel, λ es el periodo de la oscilación y ΔV es el tamaño de la perturbación que se aplica al panel.

Al definir V_e con la ecuación (2.10) y se pueden reescribir las ecuaciones (2.8) y (2.9) como (2.11) y (2.12) respectivamente.

$$V_e = b\Delta V \quad (2.10)$$

Donde b es un numero que varia entre $-0,5$ y $0,5$ debido que V_e esta acotado por estos extremos.

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} (b+1)\Delta V & \text{si } 0 < t \leq \lambda/4 \\ b\Delta V & \text{si } \lambda/4 < t \leq \lambda/2 \\ (b-1)\Delta V & \text{si } \lambda/2 < t \leq 3\lambda/4 \\ b\Delta V & \text{si } 3\lambda/4 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} b\Delta V & \text{si } 0 < t \leq \lambda/3 \\ (b+1)\Delta V & \text{si } \lambda/3 < t \leq 2\lambda/3 \\ (b-1)\Delta V & \text{si } 2\lambda/3 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (2.12)$$

Al calcular el valor eficaz de (2.11) y (2.12) se obtiene (2.13) y (2.14) respectivamente.

$$(\Delta v_{pv})_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} \Delta v(t)^2 dt} = \Delta V \sqrt{b^2 + \frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$(\Delta v_{pv})_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} \Delta v(t)^2 dt} = \Delta V \sqrt{b^2 + \frac{2}{3}} \quad (2.14)$$

Al someter a los paneles a las mismas condiciones estacionarias, las pérdidas solo se diferencian por el valor eficaz, el cual peso en tres puntos presenta un mayor valor al mantener los b iguales en los distintos métodos, ya que Peso en Tres Puntos tiene mayores pérdidas en estado estacionario para las mismas condiciones.

En la figura 2.5 muestra como un cambio de radiación puede desorientar a los métodos Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación de la Potencia pero no al método Peso en Tres Puntos, pero en la figura 2.6 muestra como Peso en Tres Puntos toma una decisión errónea y los otros métodos se dirigen al máximo puntos de potencia tal como se describe a continuación.

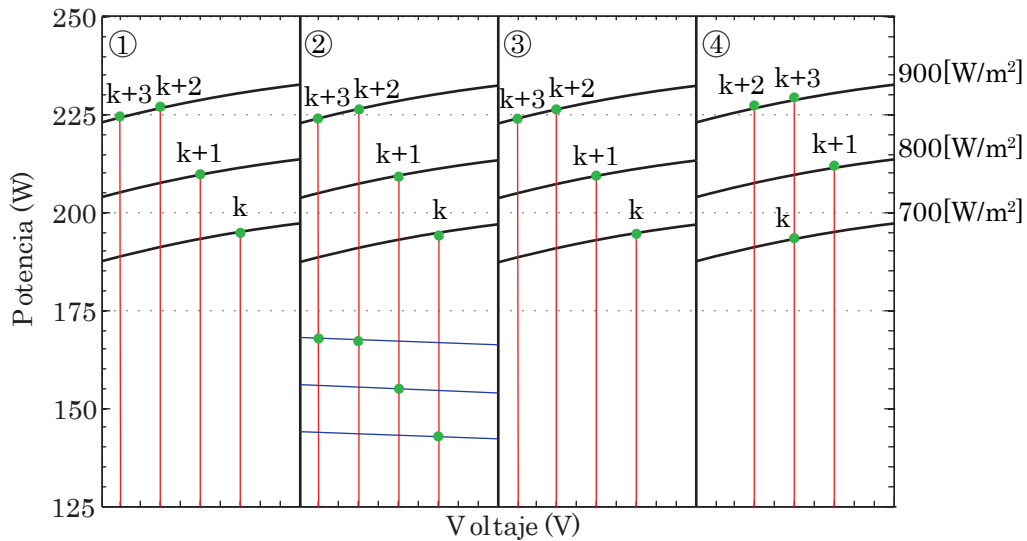


Figura 2.5: Toma de decisión para un aumento de radiación, moviéndose hacia la izquierda. Donde ① es Perturbar y Observar, ② es Conductancia Incremental, ③ es Realimentación de la potencia y ④ es Peso en Tres Puntos.

Para los casos de Perturbar y Observar y Realimentación de la Potencia vistos en la figura 2.5 al detectar que hay un aumento de potencia positivo aplican un escalón en la misma dirección por eso siguen en el mismo camino a pesar que el punto de máxima potencia se encuentra en el otro sentido. Para el caso de Conductancia Incremental, éste detecta una gran variación de corriente a medida que se va aplicando un escalón negativo de voltaje, siendo esta mayor que la conductancia instantánea. Esto hace creer al seguimiento que el sistema se encuentra al lado derecho del máximo punto de potencia, aplicando otro escalón

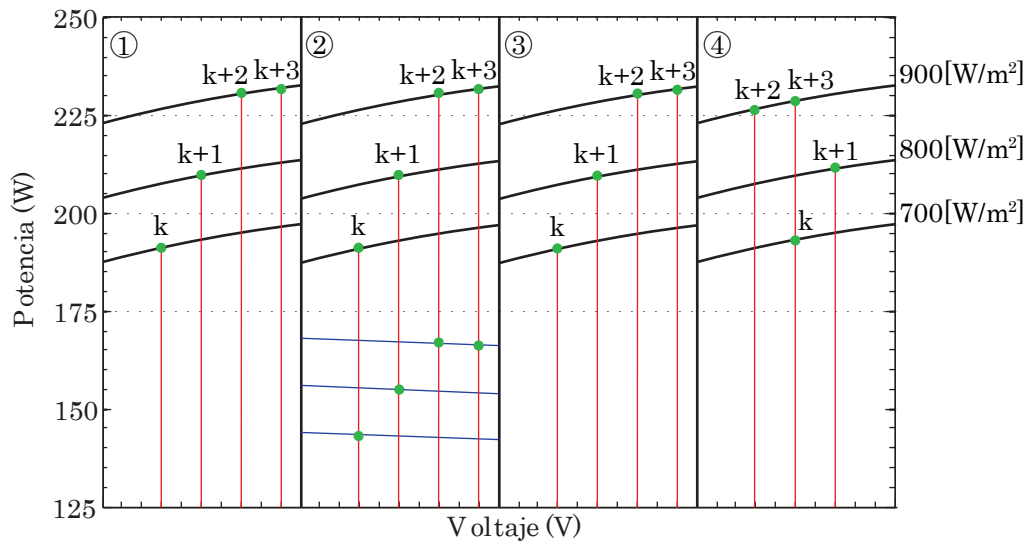


Figura 2.6: Toma de decisión para un aumento de radiación, moviéndose hacia la derecha. Donde ① es Perturbar y Observar, ② es Conductancia Incremental, ③ es Realimentación de la potencia y ④ es Peso en Tres Puntos.

negativo llevando al sistema en sentido contrario del máximo punto de potencia. Pero en cambio Peso en Tres Puntos al presentar el caso 8 de la figura 2.1 toma la decisión de mantenerse en el mismo punto sin que este se pierda pero tampoco acercándolo al máximo punto de potencia.

Para los casos vistos en la figura 2.6, los tres primeros métodos toman la decisión correcta que los lleva al máximo punto de potencia a diferencia del Peso en Tres Puntos, que al encontrarse con el mismo caso que en la figura 2.5, se mantiene sin que este se mueva al máximo punto de potencia.

DIFERENCIAL POR PERTURBACIÓN EN LA MODULACIÓN

Este método es propuesto para mejorar las deficiencias de los métodos actuales como la oscilación de 3 puntos fijos y tomar una dirección incorrecta para llegar al máximo punto de potencia ante una variación rápida de radiación.

3.1. Principio teórico

Al igual que todos los métodos directos por muestreo, éste se basa en la curva de potencia mostrada en la figura 1.4 y utiliza el fundamento de diferencias finitas para estimar la derivada y tomar una decisión. El principio fundamental de este método son las ecuaciones (3.1) y (3.2) que representan el cálculo de la derivada hacia adelante y hacia atrás respectivamente.

$$\frac{dP_{PV1}}{dV_{PV}} \approx \frac{P(V_{PV} + \delta v) - P(V_{PV})}{\delta v} \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_{PV2}}{dV_{PV}} \approx \frac{P(V_{PV}) - P(V_{PV} - \delta v)}{\delta v} \quad (3.2)$$

Este método calcula las derivadas al aplicar pequeños escalones al panel fotovoltaico, calculando así una aproximación a una derivada diferencial en un punto, sin que el sistema se vea muy afectado por el cálculo de esta. Se calculan dos derivadas para que la decisión tomada por el método sea más precisa para cambios ambientales. Una vez obtenido el valor de cada deriva, éstas se comparan para estimar las variaciones de las condiciones ambientales y decidir la dirección de la perturbación siguiente.

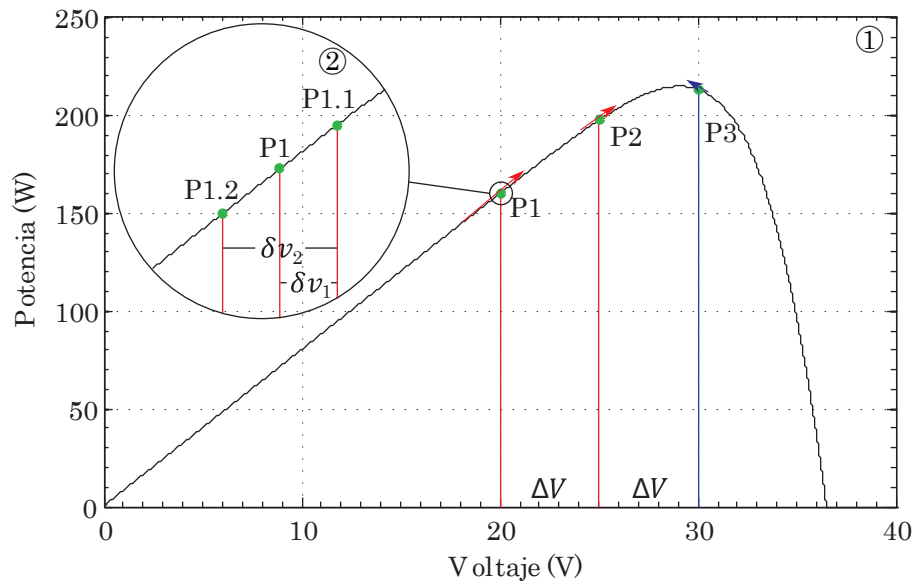


Figura 3.1: Movimiento en la curva de Diferencial por perturbación en la modulación.

En la práctica no es necesario un cálculo exacto de la derivada, solo es necesario saber si ésta es positiva, negativa o nula. Por lo cual se puede ignorar el valor del voltaje y solo tomar las diferencias entre las potencias para decidir el siguiente cambio de voltaje en el sistema, así como se muestra en ② en la figura 3.1, haciendo recordar que estas variaciones son muy pequeñas para que el sistema no se vea muy afectado por la obtención de datos para el cálculo de éstas como se ve en ① de la misma figura. Al realizar esto, se obtiene 9 casos posibles al igual que Peso en Tres Puntos, pero en este caso al ser la derivada el principio fundamental del método las comparaciones se realiza con el punto de mayor voltaje a diferencia con Peso en Tres Puntos que realiza una comparación fija respecto al punto de voltaje medio. En la figura 3.2 se pueden ver los distintos casos que presenta el método.

En la figura 3.2, para representar si la derivada es positiva toma el valor de 1, si es nula toma el valor de 0 y si es negativa toma el valor de -1 . La decisión de la siguiente actuación está dada por la suma de estos valores, si esta es mayor a cero se aplica un escalón positivo, si es igual a cero no se aplica un escalón y si es menor que cero se aplica un escalón negativo. Se obtienen tres casos para mantenerse en el mismo punto, tres casos para moverse a la derecha y tres casos para moverse a la izquierda, a diferencia del método Peso en Tres Puntos que tiene cinco, dos y dos respectivamente. Otra diferencia respecto a Peso en Tres Puntos, esta en la comparación de las potencias. En el método propuesto se incorpora el neutro en cambio Peso en Tres Puntos no tiene neutro en su comparación solo presenta más o menos.

3.2. Comportamiento

Para condiciones ambientales constantes existen tres casos, como se ha visto en los métodos anteriores, la derivada de la potencia respecto al voltaje igual a cero, mayor a cero o menor a cero. Debido a la naturaleza de este método en los periodos transitorios este

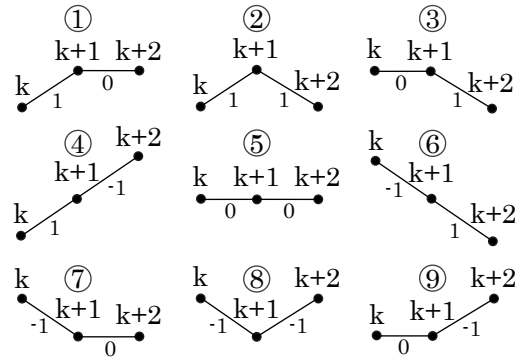


Figura 3.2: Casos posibles en Diferencial por perturbación en la modulación.

se comporta de manera similar los métodos Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación de la Potencia. La principal diferencia está en el estado estacionario donde éste, en vez de oscilar en 3 puntos, solo oscila en 2 una vez que se haya asentado.

En la figura 3.1 se muestra el movimiento del método a lo largo de la curva de potencia para encontrar el máximo punto de potencia. Donde se comienza en P1, se realiza el respectivo algoritmo para estimar la derivada en el punto. Este se mueve al sistema a P2 y de igual forma a P3. En este punto se detecta que la derivada cambia, moviendo al sistema a P2 y así comienza oscilar entre P2 y P3. En ① no se puede observar las variaciones de voltajes que se realizan en el punto debido a que estas deben ser pequeñas para que el sistema se vea lo menos afectado posible.

Tal como se dijo anteriormente, se estiman dos derivadas debido a las condiciones ambientales pueden ser cambiantes. Si las condiciones ambientales fueran fijas, bastaría solo una derivada para tomar la decisión de en qué sentido se aplica la siguiente variación. Al estimar cada derivada con la diferencia de potencia que hay entre referencia de voltaje distintas, se puede tomar la decisión correcta para una cierta cantidad de casos como se muestra la figura 3.3. Existen otros casos muy puntuales donde el método no puede tomar la decisión correcta, como una irradiación que cambia de aumentar a disminuir o viceversa entre un instante a otro mientras se aplican las pequeñas variaciones de voltaje, pero estos casos son muy poco probables que sucedan.

El sistema con el algoritmo propuesto es sometido a cinco condiciones distintas de operación: radiación constante, aumento de radiación lenta, aumento de radiación rápida, disminución de radiación lenta y disminución de radiación rápida. No se incluyen condiciones de operación donde hay más de un cambio de radiación, ya que a la velocidad del método es improbable que existan dos cambios de radiación en un tiempo tan corto. Estas condiciones se observan en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5. Estas figuras son representativas, no son simulaciones del método.

En la figura 3.3 se muestran tres casos, primero pendiente positiva, segundo pendiente nula y tercero pendiente negativa, en donde el método no presenta ninguna dificultad en el seguimiento de la máxima potencia ante estos casos.

En la figura 3.4 se muestran cuatro casos, el primero cuando la radiación cae rápidamente al lado izquierdo del máximo punto de potencia, el segundo cuando la radiación aumenta rápidamente al lado izquierdo del máximo punto de potencia, tercero cuando la radiación cae rápidamente al lado derecho del máximo punto de potencia y el cuarto cuando la radiación

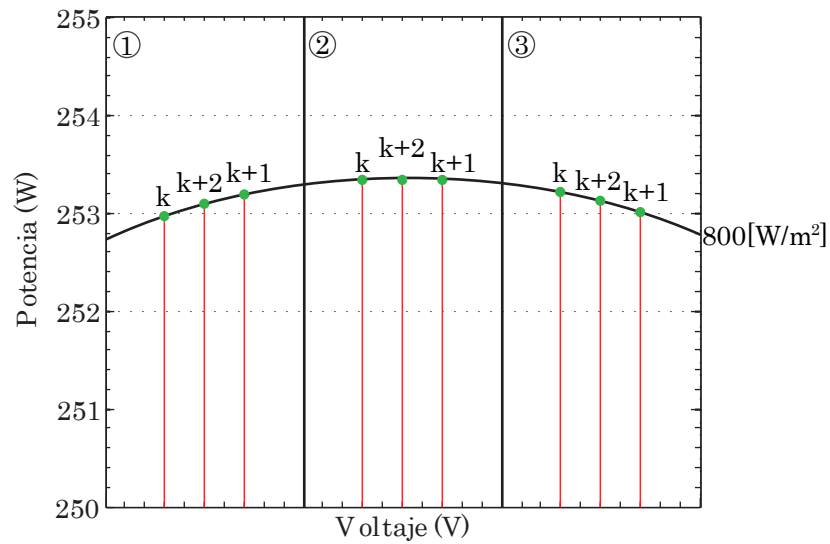


Figura 3.3: Sin cambio de radiación .

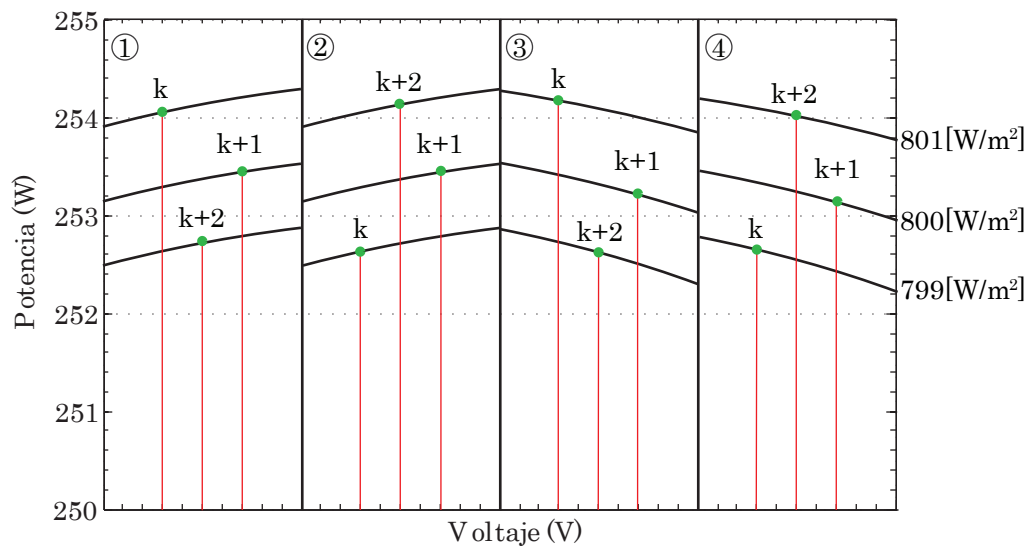


Figura 3.4: Cambio de radiación rápida.

aumenta rápidamente al lado derecho del máximo punto de potencia.

En la figura 3.5 se muestran cuatro casos, el primero la radiación cae lentamente al lado izquierdo del máximo punto de potencia, el segundo la radiación aumenta lentamente al lado izquierdo del máximo punto de potencia, tercero la radiación cae lentamente al lado derecho del máximo punto de potencia y cuarto la radiación aumenta lentamente al lado derecho del máximo punto de potencia.

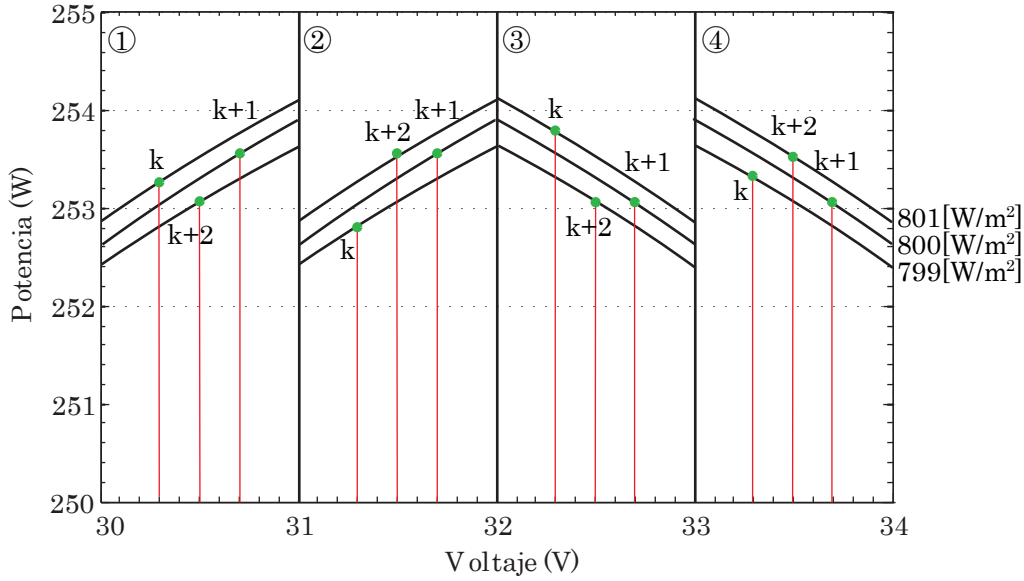


Figura 3.5: Cambio de radiación lento.

Para obtener los puntos en la curva es necesario perturbar la modulación del convertidor. Existen diversas formas para realizar esto, pero se verá con mayor detalle en el siguiente capítulo.

3.3. Ventajas y Desventajas

El método propuesto presenta claras ventajas en comparación a los métodos anteriores en estado estacionario. Se utiliza la ecuación (2.7) para comprobar si efectivamente esto se cumple matemáticamente, donde un ciclo de oscilación del método está dado por la ecuación (3.3).

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} V_e + \Delta V/2 & \text{si } 0 < t \leq \lambda/2 \\ V_e - \Delta V/2 & \text{si } \lambda/2 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (3.3)$$

Utilizando (2.10) se obtiene (3.4).

$$\Delta v_{pv}(t) = \begin{cases} (b + 1/2)\Delta V & \text{si } 0 < t \leq \lambda/2 \\ (b - 1/2)\Delta V & \text{si } \lambda/2 < t \leq \lambda \end{cases} \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.5) se calcula el valor eficaz de la oscilación obteniendo un valor constante menor que los otros dos calculados en (2.13) y (2.14). Esto representa menores pérdidas para iguales condiciones en estado estacionario.

$$(\Delta v_{pv})_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} \Delta v(t)^2 dt} = \Delta V \sqrt{b^2 + \frac{1}{4}} \quad (3.5)$$

El método Diferencial por Perturbación en la Modulación propuesto, posee una mejor calidad de control ante variaciones ambientales bruscas, ya que frente a aumentos y disminuciones continuas de cambio de radiación, nunca se mueve en el sentido contrario al punto de máxima potencia.

El método propuesto presenta otra ventaja al tomar las decisiones por medio de las estimaciones de la derivada. Las diferencias se hacen siempre teniendo en cuenta $k + 1$ en lugar de k obteniendo así, un buen seguimiento en el caso mostrado en la figura 3.5. El método Peso en Tres puntos se mantendría en el lugar debido a que los puntos extremos (mayor y menor voltaje) presentan una mayor potencia que el punto del medio (caso 8 figura 2.4).

Este método se clasifica en la categoría de métodos directos por muestreo, por lo cual posee todas las ventajas y desventajas de este conjunto: solo requiere dos sensores uno de voltaje y otro corriente para funcionar, no son necesario datos del panel, sigue de forma real el máximo punto de potencia, etc.

Las desventajas que presenta el método son :

- Presenta una base teórica mas compleja en relación a los demás métodos mencionados y una mayor dificultad en el computo al implementar.
- Ante cambios zigzagueantes de irradiación en el momento de la perturbación, el método propuesto puede tomar una mala decisión alejándose del máximo punto de potencia.
- Es susceptible al ruido de medición, pero esto se puede mejorar al agrandar el tiempo la perturbación que se aplica a la modulación.

RESULTADOS

4.1. Implementación

4.1.1. Sistema y Controlador

El sistema a simular se observa en la figura 4.1. Este es una aproximación del sistema mostrado en la figura 1.2 donde se reemplaza con una fuente DC todo el circuito del lado derecho del convertidor Boost, utilizando el supuesto que la estrategia de control y el dimensionamiento del condensador del dc-link son adecuados para mantener el voltaje de este punto con pequeñas variaciones. Este se puede aproximar por una fuente DC de un valor que se fija por el punto de operación en cual trabaja el convertidor.

El esquemático del sistema y el lazo de control se muestra en la figura 4.2. Al hacer una relación entre la figura 4.1 y la figura anterior, el modulo solar se representa como una fuente de corriente, la cual depende del valor del voltaje aplicado al panel, la temperatura y la radiación. El filtro de entrada es representado por el condensador C y se encarga de regular las variaciones del voltaje que se aplican al panel, si éste es muy pequeño, el panel sería sometido a variaciones grandes y rápidas del voltaje en todo momento pero si es muy grande vuelve lenta la dinámica del sistema. El convertidor Boost se presenta por el conjunto de componente la inductancia L , el IGBT S y el diodo, éste se encarga de elevar el voltaje a un valor deseado. Finalmente el enlace DC se representa por un fuente de voltaje continua de valor V_x .

El lazo de control control que se observa en figura 4.2, representa a los bloque MPPT y control de voltaje. Este se divide en tres partes: el algoritmo que permite seguir el máximo punto de potencia, un lazo en cascada y la modulación. El algoritmo de seguimiento del máximo punto de potencia entrega una referencia del voltaje para el lazo en cascada, el cual entrega una señal de referencia para la modulación. Para el caso de Diferencial por Perturbación en la Modulación el algoritmo MPPT entrega además una señal directa la modulación para realizar la perturbación en éste.

El lazo en cascada se descompone en dos lazos de control consecutivos del tipo PI, un lazo de corriente y otro de voltaje, los cuales realizan el control la corriente en el inductor L y el control del voltaje en el condensador C respectivamente. El lazo de control de corriente se diseña de forma tal que la velocidad de control sea aproximadamente diez veces más

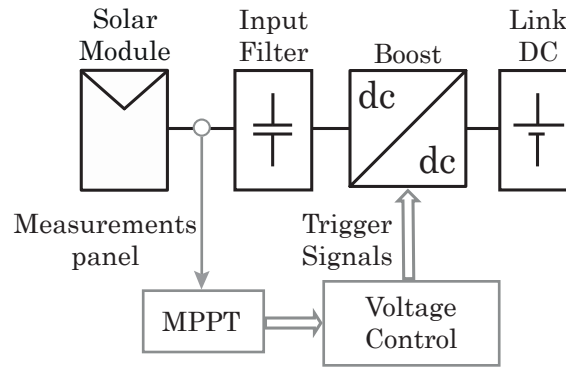


Figura 4.1: Sistema fotovoltaico simulado.

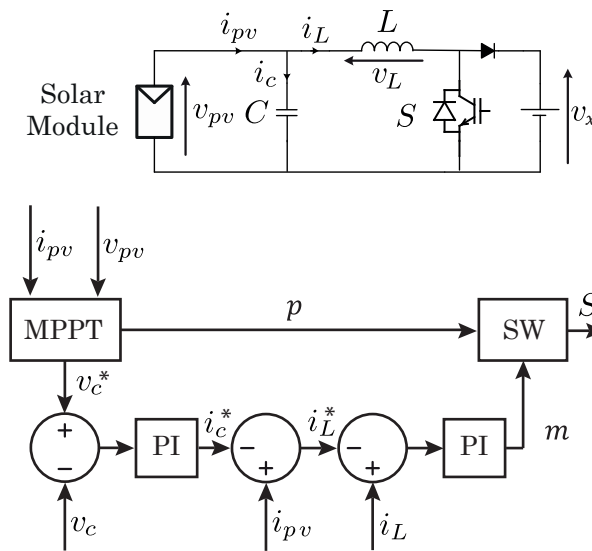


Figura 4.2: Esquemático y lazo de control.

rápida que la del lazo de control de voltaje. El propósito de esto, es lograr que las dinámica del control de corriente no interfieran en el control del voltaje.

Para poder realizar el control se debe tener claro a la frecuencia que trabaja cada división del sistema. La señal portadora de la modulación debe tener una mayor frecuencia que el controlador de corriente, al menos unas veinte veces mas rápido. El control de voltaje debe ser unas diez veces más lento, que el control de corriente y, de igual forma, la frecuencia del cambio de referencia en el algoritmo del seguimiento del máximo punto de potencia debe ser más lento que la velocidad del controlador de voltaje. En la tabla 4.1 se muestran los valores utilizados en la simulación.

Para simular el sistema se utiliza el programa matlab/simulink. En este se utiliza el bloque Embedded MATLAB Function para programar los distintos algoritmos de seguimiento de del máximo punto de potencia y el panel fotovoltaico.

Tabla 4.1: Parámetros de simulación

Variable	Magnitud
C	1500uF
L	50mH
V_x	70V
Kp_c	0.243
Ki_c	127.93
Kp_v	0.0906
Ki_v	18.1228
F_{port}	10KHz
$F_{c.c}$	500Hz
$F_{c.v}$	50Hz
F_{MPPT}	1Hz

El modelo del panel se basa en la ecuación (4.1) vista en [25]. El código de del modelo del panel se encuentra en el apéndice B.6.

$$i_{pv} = i_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(v_{pv} + i_{pv}R_s)}{nKT} \right)} - 1 \right] - \frac{v_{pv} + i_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (4.1)$$

Donde i_{ph} es la fotocorriente de la celda [mA/cm^2], I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo [A/cm^2], R_s es la resistencia parásita en serie [Ω], n es el factor de calidad del diodo, K constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta [K], R_{sh} es la resistencia parásita en paralelo [Ω].

El convertidor boost, el filtro de entrada y el enlace DC se modela con diversos bloques del programa matlab/simulink, que representan las ecuaciones dinámicas de éstos. El convertidor boost contiene elementos no lineales como diodos e interruptores, esto hace que el modelo de la planta sea no lineal.

Para calcular los valores de las constantes proporcionales e integrales de los controladores PI de corriente y voltaje, se utilizan las plantas de las ecuaciones (4.2) y (4.3) respectivamente [7].

La ecuación (4.2) representa la función de transferencia linealizada en un punto de operación debido a que ésta es no lineal [7]. Para modelar matemáticamente el convertidor boost, se reemplaza la fuente continua con una carga RC, para obtener un modelo más real de éste.

$$\Delta H(s) = \frac{V_{xo}}{L} \frac{s + \frac{V_{xo} + R_o I_{lo}(1-D)}{R_o C_o V_{xo}}}{s^2 + \frac{1}{R_o C_o} s + \frac{(1-D)^2}{LC_o}} \quad (4.2)$$

Donde V_{xo} y I_{lo} son el voltaje y la corriente, respectivamente, en el punto de operación del sistema, D es el índice de modulación en el punto de operación, R_o es la resistencia de carga, C_o es el capacitor de carga y $H(s)$ y $G(s)$ son las funciones de transferencia del sistema linealizado para el control de corriente y el control de voltaje respectivamente.

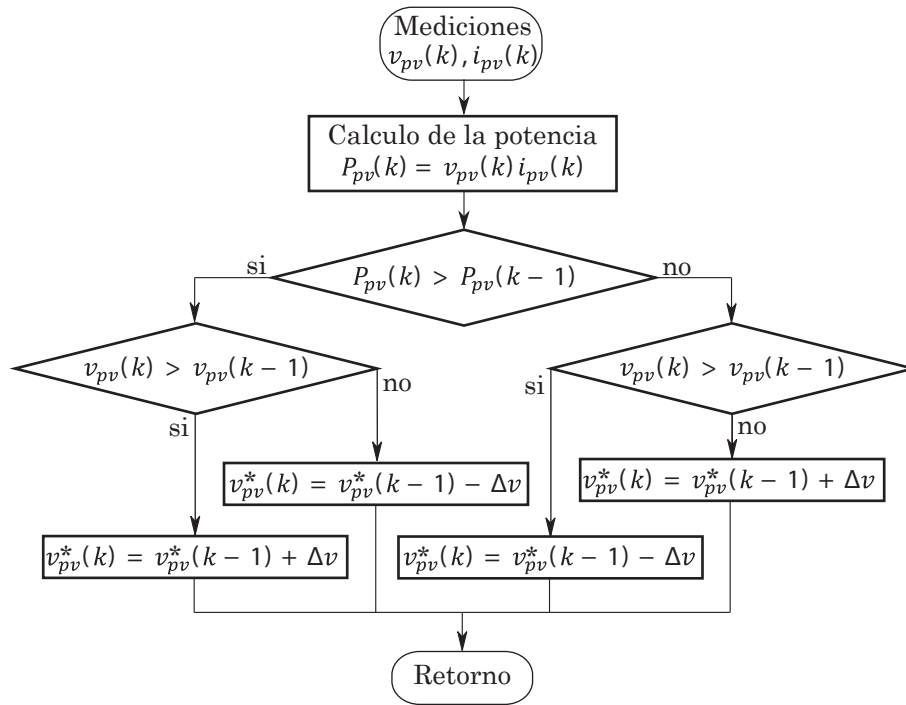


Figura 4.3: Diagrama de flujo Perturbar y Observar.

(4.3) es la función de transferencia del condensador C .

$$\Delta G(s) = \frac{1}{Cs} \quad (4.3)$$

Para obtener los valores de los controladores PI se utiliza el comando “sisotool” en el programa matlab. Los valores se muestran en la tabla 4.1

4.1.2. Algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia

4.1.2.1. Perturbar y Observar

Basado en los cuatro casos vistos en el capítulo 2, se desarrolla el diagrama de flujo que se aprecia en la figura 4.3. Este se ejecuta de manera secuencial cada cierto intervalo de tiempo designado por el programador. Primero se toman las mediciones de voltaje y corriente del panel, luego se calcula la potencia y ésta se compara con la potencia del instante anterior. Dependiendo de esta comparación, se puede tomar el camino de la rama derecha o la rama izquierda del diagrama de flujo. En cada una de estas ramas se debe comparar el voltaje actual con el voltaje anterior y dependiendo de la rama del diagrama de flujo en que se encuentre y el resultado de esta comparación, se define el voltaje de referencia para el panel fotovoltaico. El código se encuentra en los apéndices B.2 (simulaciones) y A.2 (experimental).

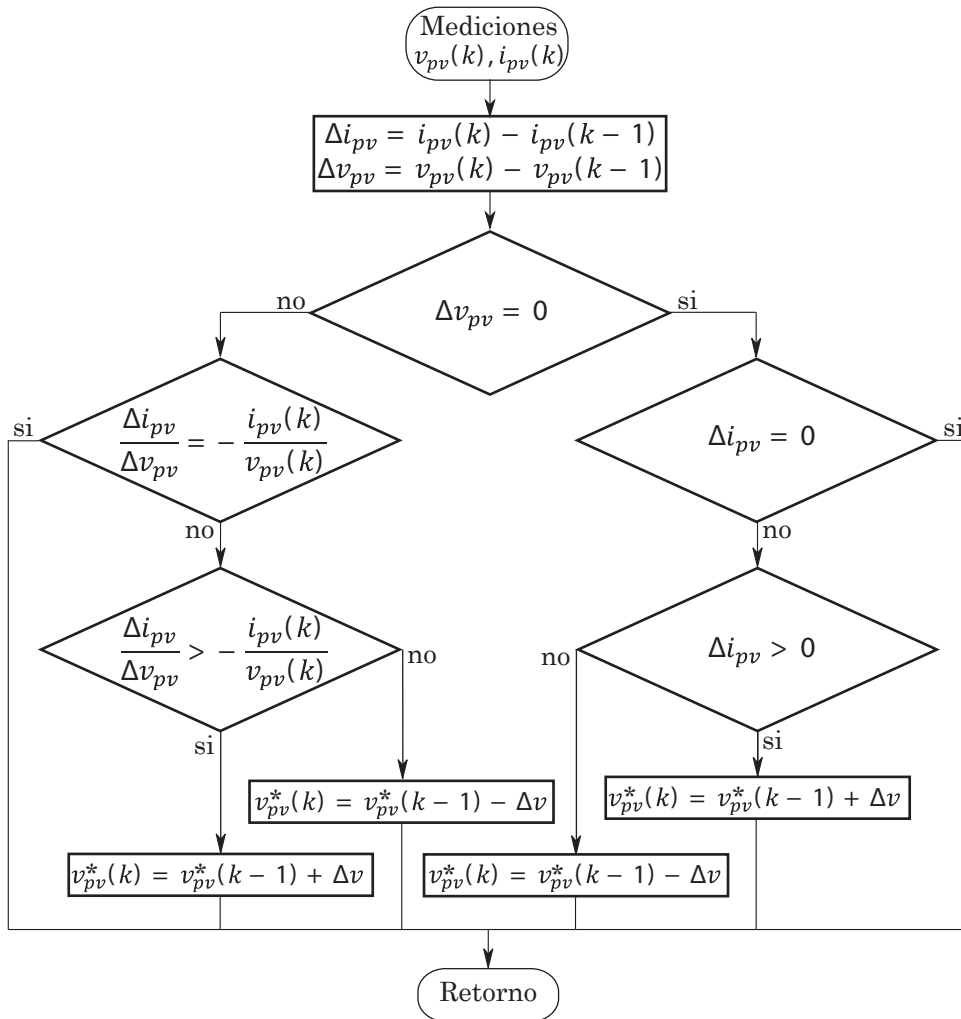


Figura 4.4: Diagrama de flujo Conductancia Incremental.

4.1.2.2. Conductancia Incremental

La forma de implementar Conductancia Incremental esta definida por las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 vista en el capítulo 2. En la figura 4.4 se observa el diagrama de flujo implementado para desarrollar el método. Este diagrama se presenta en varias publicaciones y es recorrido de manera secuencial [1-3, 5, 18, 22], donde lo primero que se realiza es la medición de la corriente y el voltaje en el panel fotovoltaico, luego se calculan la diferencias de corriente y voltaje entre la actual medición y la muestra anterior. En este punto el diagrama se separa en dos ramas dependiendo si la diferencia de voltaje es igual a cero o distinta a cero. Si ésta es igual a cero, es decir, que el voltaje del instante anterior es igual al actual, esto solo se puede cumplir si el sistema se encontraba en el máximo punto de potencia. Entonces es necesario saber si la diferencia de corriente es igual a cero ya que si esto se cumple, significa que la irradiación no ha cambiado de un instante a otro y el sistema aún se encuentra en el

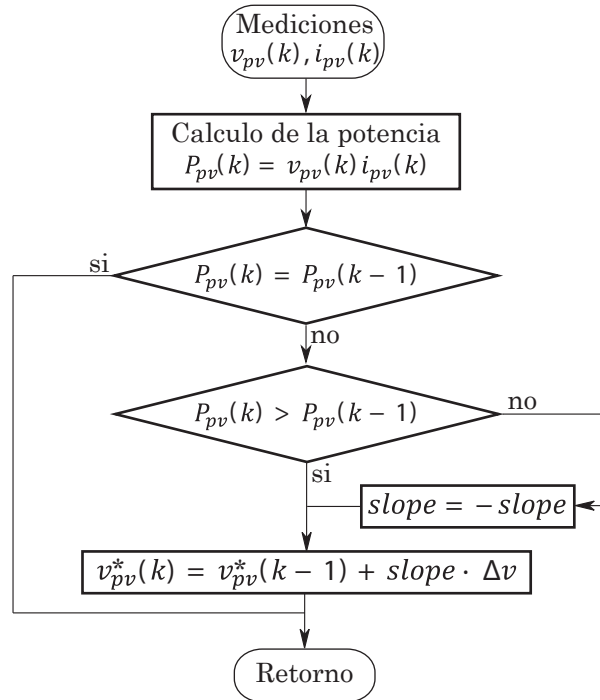


Figura 4.5: Diagrama de flujo Realimentación de la potencia.

máximo punto de potencia, por lo cual no es necesario aplicar una perturbación al sistema. En el caso que la corriente sea distinta a cero es necesario saber si esta aumento o disminuyo ya que si esta aumenta el máximo punto de potencia se mueve hacia la derecha, y si esta disminuye, se mueve a la izquierda como se ve en la figura 1.1 del capítulo 1.

Para el caso donde la diferencia de voltaje es distinta a cero se pregunta si se cumple las ecuaciones 2.6 o 2.5. Si se cumple la ecuación 2.6 el sistema se encuentra en el máximo punto de potencia y no se aplica perturbación, si se cumple la ecuación 2.5 el sistema se encuentra al lado izquierdo del máximo punto de potencia y se aplica una perturbación positiva. En el caso que no se cumpla ninguna de las dos condiciones rige la condición de la ecuación 2.4, el sistema se encuentra en el lado derecho del máximo punto de potencia y aplica una perturbación negativa. El código se encuentra en el apéndice B.3.

4.1.2.3. Realimentación de la Potencia

La estrategia para implementar Realimentación de la potencia se encuentra en la literatura [1, 2, 12, 24], esta utiliza la técnica de escalar la colina explicada en el capítulo 2. El diagrama de flujo del método que se observa en la figura 4.5 [1, 2, 12, 24]. Al igual que todos los métodos comienza con la medición del voltaje y corriente, luego el calculo de la potencia. Ésta se compara con la potencia del instante anterior, si esta potencia es igual no aplica perturbación y termina el algoritmo. Pero si estas son distintas, se evalúa si la potencia actual es mayor o menor que la potencia anterior. Si esta es mayor se aplica la misma perturbación pero si esta es menor se cambia el signo de la perturbación. El código se encuentra en el apéndice B.4.

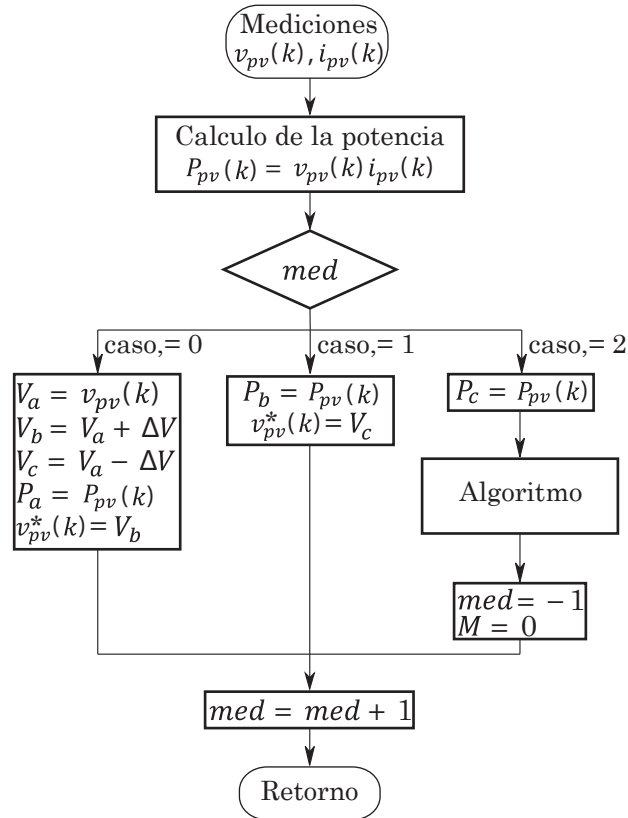


Figura 4.6: Diagrama de flujo Peso en Tres Puntos.

4.1.2.4. Peso en Tres Puntos

La forma de implementar Peso en Tres Puntos es más compleja que los otros métodos ya nombrados, debido a que este presenta tres instantes de tiempo a diferencia de los otros métodos que solo toman dos. Para realizar esto se incorpora el contador med para detectar cada instante de tiempo.

El diagrama de flujo propuesto se observa en la figura 4.6. En éste se comienza con la medición del voltaje y de la corriente, luego se calcula la potencia y se revisa el estado del contador para decidir cual de los tres casos se debe aplicar. En el caso que el contador sea igual a cero, se definen los voltajes que se aplicaran en cada instante, se guarda la potencia y se cambia la referencia de voltaje. Para el caso que el contador es igual a uno, en éste solo se guarda la potencia y se cambia la referencia. Y finalmente para el caso donde el contador es igual a dos, se guarda la potencia, se realiza la lógica del método y se reinicia el contador. Como ultimo el contador se incrementa.

El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 4.7. Este algoritmo compara la potencia P_b y P_a , obtenida para los casos donde el contador vale 1 o 0 respectivamente. Si $P_b > P_a$, M incrementa en uno, en caso contrario, disminuye uno. A continuación se compara P_a con P_c . Si $P_a > P_c$, M aumenta en uno, de lo contrario, disminuye uno. Luego se revisa el valor de M . Si este tiene el valor de 2, la referencia crece, si este tiene el valor de

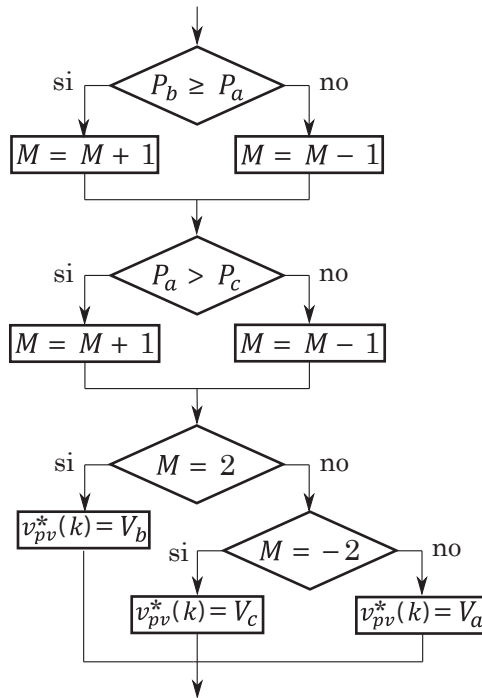


Figura 4.7: Diagrama de flujo Lógica Peso en Tres Puntos.

-2, disminuye. Para cualquier otro valor se mantiene. El código se encuentra en el apéndice B.5.

4.1.2.5. Diferencial por Perturbación en la Modulación

El diagrama de flujo de Diferencial por perturbación en la modulación, al igual que todos los demás métodos, comienza con las mediciones de voltaje y corriente. Este se basa en estados, por lo cual, cuenta con un contador *Port*, un bloque identificador de estado y cuatro estados (Bajo, Alto, Control PI y Algoritmo). Esto se observa en la figura 4.8

El diagrama de flujo del bloque identificador de estado se muestra en la figura 4.9. Este consiste en una serie de condiciones temporales. Dependiendo de la cuenta del contador se define el estado en que se encuentra el sistema. En orden temporal se organizan como: control PI, Perturbación y algoritmo del método. La Perturbación se compone de dos casos Bajo y Alto, que representa el estado del semiconductor durante la perturbación.

Para aplicar una perturbación adecuada es necesario conocer el funcionamiento del convertidor. El convertidor es del tipo elevador de un solo semiconductor. Si el semiconductor está en alto, la corriente por la inductancia aumenta y si éste se encuentra en bajo, la corriente por la inductancia disminuye.

El voltaje del panel fotovoltaico está dado por la integración de la corriente del condensador C que se ve en la figura 4.2. Esta varía en forma inversamente proporcional con respecto a la corriente de la inductancia, por lo cual, para poder generar una perturbación donde el voltaje aumente y vuelva al mismo punto, es necesario que la integral de la corriente de C tenga un área negativa igual a su área positiva. Esto se logra con una señal par

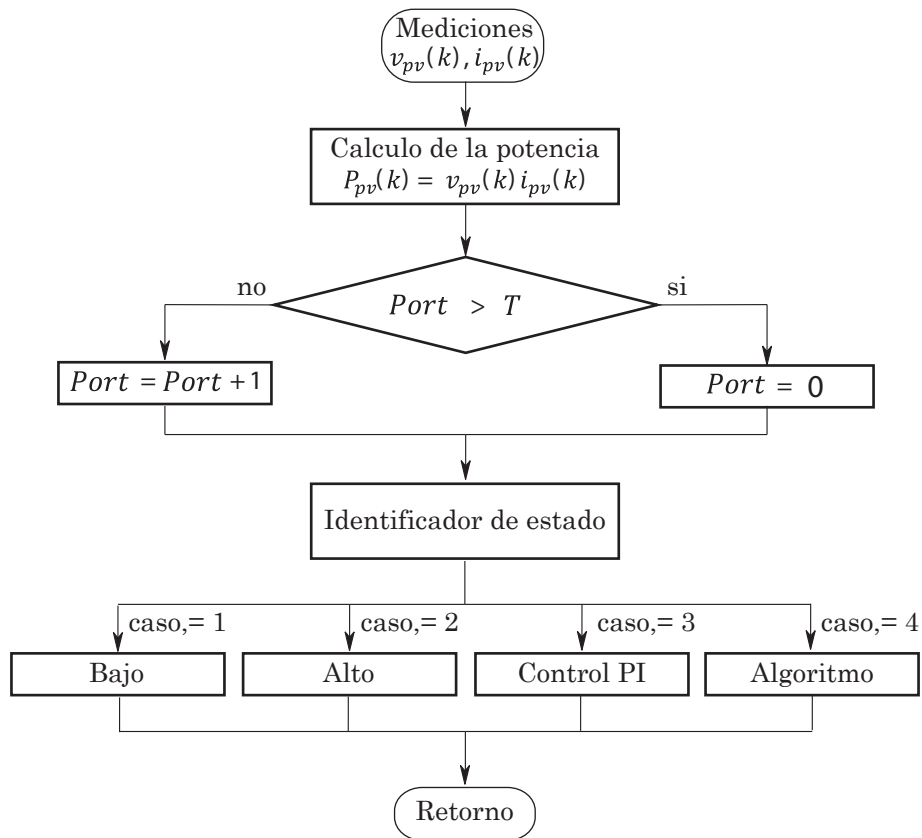


Figura 4.8: Diagrama de flujo del método propuesto.

en el disparo del semiconductor, provocando que el voltaje del condensador disminuya, aumente y vuelva a disminuir. El tiempo de duración de la perturbación está relacionado con la magnitud de ésta, por ejemplo, mientras mayor sea el tiempo de perturbación, mayor será el tamaño de la perturbación. El tiempo en que permanece en cada estado durante la perturbación tiene una relación directa con el índice de modulación, esto genera que la perturbación vuelva al mismo punto para que el sistema a lazo cerrado se vea afectado lo menos posible.

Esta perturbación se puede implementar de dos formas, creando una señal de largo necesario o haciendo un cambio de portadora a triangular con la frecuencia adecuada para general el tamaño de la perturbación necesario. Debido a todo esto en el diagrama de flujo del identificador de estado en la parte de la perturbación el valor de Z cambia de 1, 2 y 1 respectivamente (Bajo, Alto y Bajo). Donde Z representa una variable que identifica el estado en que se encuentra el sistema. Esta puede tomar el valor de 1, 2, 3 y 4.

El diagrama de flujo del estado Bajo se muestra en la figura 4.10. Este consiste en guardar la primera medición de potencia, por medio de la condición si $P_1 = 0$ guarda el valor de la potencia actual en P_1 . Al asignar a esta variable un valor distinto de 0, la condición no se vuelve a cumplir y se guarda solo el primer valor de la potencia. De igual forma se guarda el valor del índice de modulación y se calcula los tiempos de los estados de la perturbación

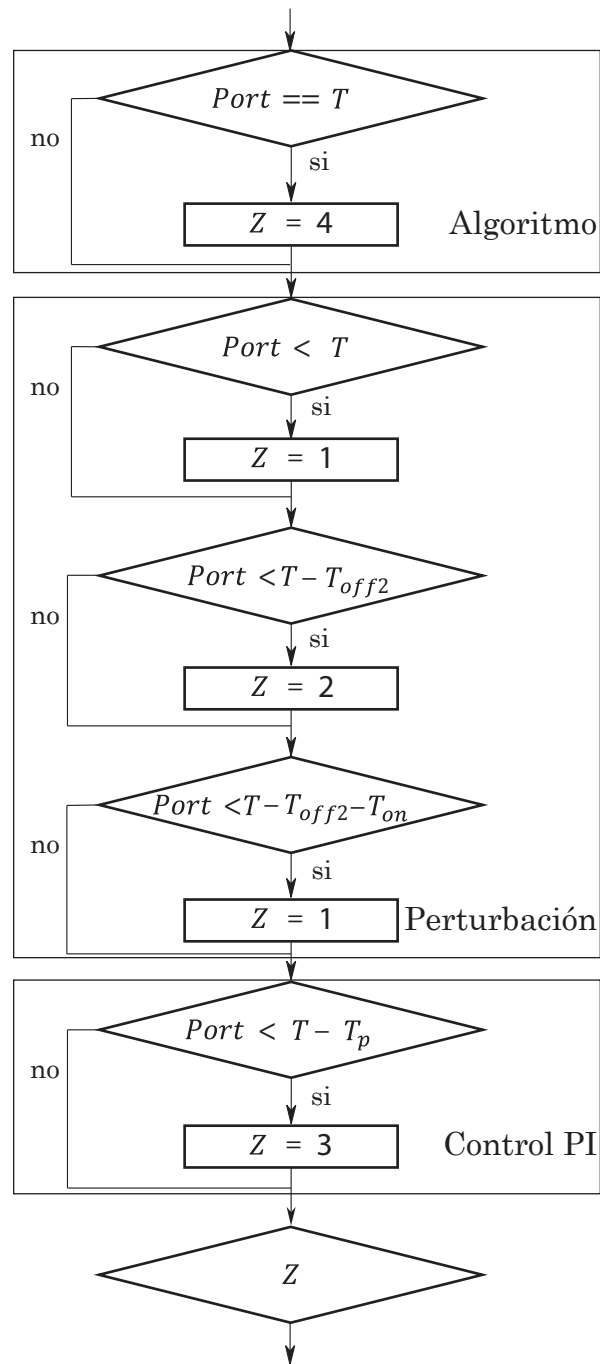


Figura 4.9: Diagrama de flujo del identificador de estado.

según este valor. El diagrama de flujo posee un detector del máximo punto de voltaje, por medio de la condición, si $V_{max} < v_{pv}(k)$ guarda la potencia y el voltaje en ese instante.

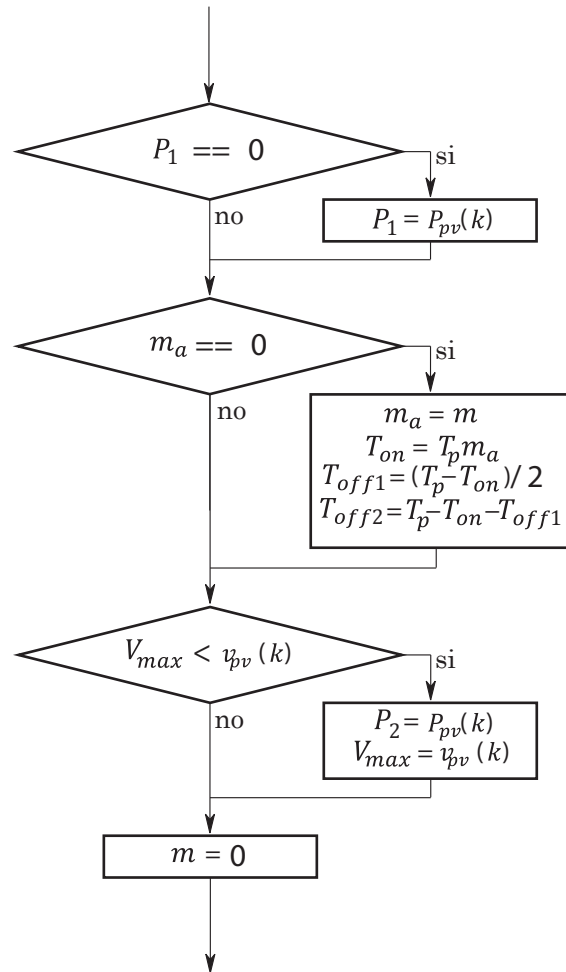


Figura 4.10: Diagrama de flujo del estado Bajo.

Esto se realiza cada instante de muestreo, por lo cual, los últimos valores que queden en las variables serán, el máximo valor de voltaje durante la perturbación y la potencia en ese punto. Finalmente este asigna el índice de modulación igual a 0 para que el estado del semiconductor sea bajo.

El diagrama de flujo del estado Alto se muestra en la figura 4.11. Este tiene dos parte, el detector del máximo punto de voltaje, explicado en el párrafo anterior y la asignación del índice de modulación igual a 1 para que el estado del semiconductor sea alto.

El diagrama de flujo del Algoritmo se muestra en la figura 4.12. Este se basa en la figura 3.2, donde se compara la potencia de los tres puntos medidos, al inicio de la perturbación, en máximo punto de voltaje y final de la perturbación. Estas son guardadas en las variables P_1 , P_2 y P_3 respectivamente.

El diagrama de flujo del Algoritmo comienza guardando la potencia, para obtener el tercer punto de comparación. Se compara las potencias P_2 con P_1 , si $P_2 > P_1$ incremente el valor de M en una unidad. Luego, se compara si $P_2 = P_1$, si esto se cumple el valor de M se

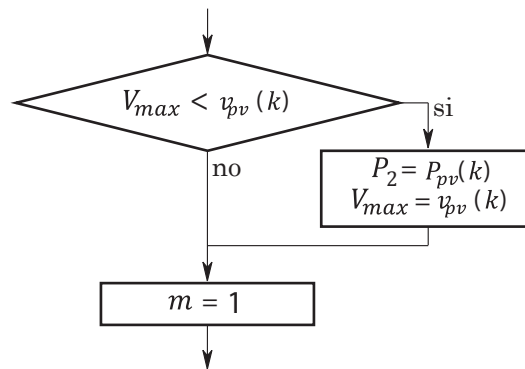


Figura 4.11: Diagrama de flujo del estado Alto.

mantiene, en caso contrario M disminuye en una unidad. Esto se repite con las potencias P_2 y P_3 . Una vez realizadas las comparaciones de las potencias se verifica, si $M > 0$ aumenta la referencia, si $M = 0$ la referencia se mantiene y para otro caso la referencia disminuye. El código se encuentra en los apéndices B.1 (simulaciones) y A.1 (experimental).

Para calcular las eficiencia de cada método se utiliza el voltaje y corriente obtenido del panel fotovoltaico.

4.2. Simulaciones

Tal como se dijo en la sección Sistema y Controlador, para simular se utiliza el programa matlab/simulink version 7.10.0.499(R2010a). En esta sección se mostrarán los resultados del método propuesto en este trabajo y la comparación con los distintos métodos propuestos previamente.

4.2.1. Perturbación y transiente

Se propone dos formas de realizar la perturbación, un cambio de portadora o un cambio en el índice de modulación. Para las simulaciones se utiliza el cambio de portadora como se muestra en la figura 4.13. Al momento de la interrupción se conserva el índice de modulación para lograr el patrón de bajo, alto y bajo en el disparo. Según la frecuencia de la señal triangular, será el tamaño de la perturbación.

En la figura 4.13 se observa que la Portadora no llega hasta el valor de uno. Esto se debe al tiempo de muestreo es diez veces mas rápido que la portadora y al contar la décima unidad, se muestra de la portadora regresa a cero. Si la portadora tuviera cien muestras esta llegaría a noventa y nueve centésimos de unidad y luego volvería a cero.

En la figura 4.14 se muestra la perturbación realizada entre los tiempos $t = 2(ms)$ y $t = 4(ms)$. En ésta se observa la reacción del sistema ante la perturbación realizada (bajo, alto y bajo). Los resultados de la corriente, voltaje y potencia son conforme según las predicciones hechas en los capítulos anteriores. La corriente por la inductancia L disminuye cuando disparo se encuentra en bajo y aumenta cuando Disparo se encuentra en alto.

La señal de Disparo pasa de bajo a alto y vuelve a bajo según lo propuesto. Esto provoca que el voltaje suba y vuelva al mismo punto antes de la perturbación. Así, el control de lazo cerrado del sistema se ve afectado lo menos posible por la perturbación.

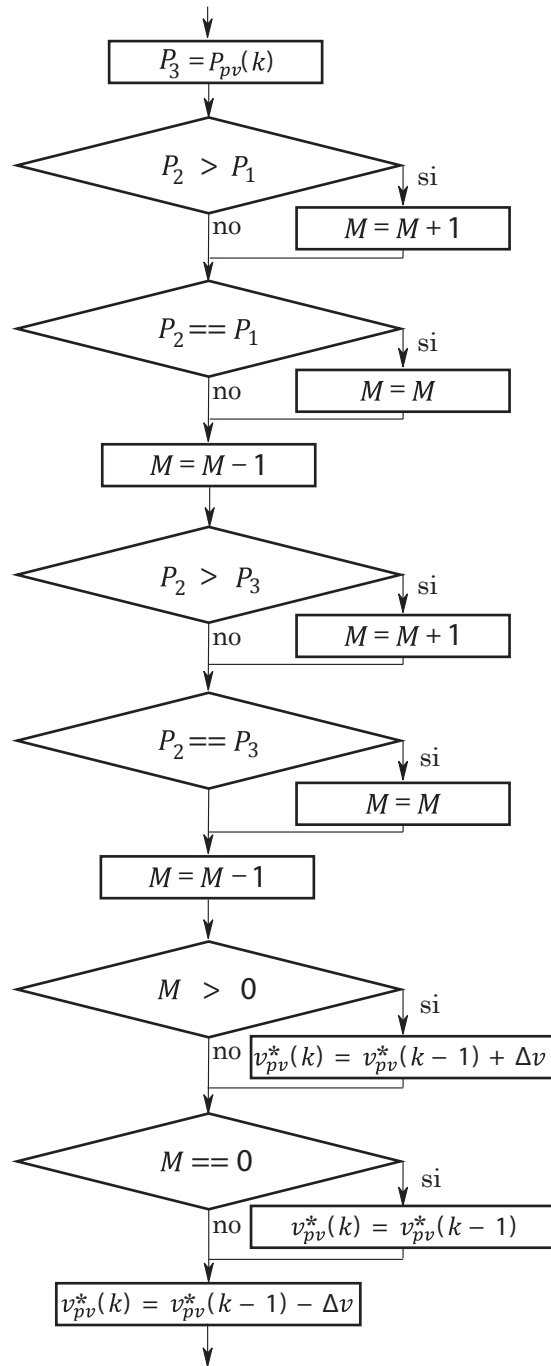


Figura 4.12: Diagrama de flujo del Algoritmo.

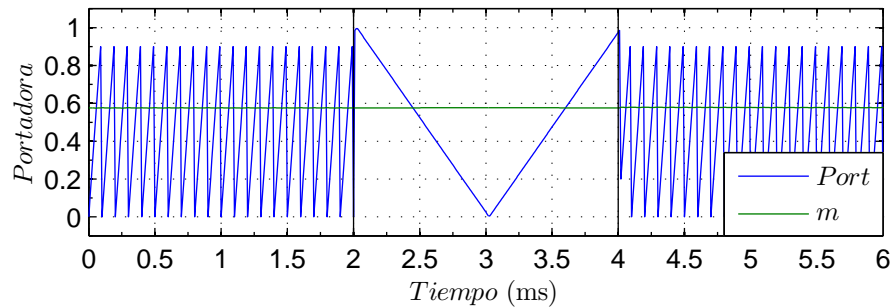


Figura 4.13: Cambio en la portadora.

En el caso mostrado en la figura 4.14, al aumentar el voltaje, la potencia cae. Esto quiere decir que el sistema se encuentra al lado derecho del máximo punto de potencia, por lo cual es necesario que la referencia del voltaje baje tal cual como se muestra en la figura 4.14 en el instante $t = 4(ms)$.

Figura 4.15 muestra el comportamiento del sistema ante un cambio de referencia. La respuesta del sistema ante el cambio de referencia es estable y se demora ciento cincuenta milisegundos en llegar al estado estacionario. Esto es más lento que la perturbación que dura dos milisegundos. Para este caso la perturbación es de cien milivoltios aproximadamente, alrededor del diez por ciento del cambio de referencia, pero este puede tomar el tamaño deseado dependiendo del tiempo de duración de la perturbación. Al disminuir el tiempo de ésta, la magnitud disminuye y al aumentar el tiempo, la magnitud aumenta.

En ambas figuras 4.14 y 4.15 se puede observar un cambio brusco en la referencia de corriente. Esto se debe al cambio de referencia de voltaje esta relacionado directamente con éste. Al ser el lazo de corriente más rápido que el lazo de voltaje este llega rápidamente al estado estacionario.

Debido a la simetría de la perturbación, el máximo punto de voltaje ocurre justo en la mitad de ésta, pero para evitar las variaciones y ruidos que contiene un sistema real se opta por un barrido de mediciones como se ve en los diagramas de flujo de las figuras 4.10 y 4.11.

4.2.2. Prueba en estado estacionario

Esta prueba consiste en aplicar una irradiación constante de mil watts por metro cuadrado para observar el comportamiento del sistema en estado estacionario.

En la figura 4.16 muestra el estado estacionario el sistema. En éste se confirma la oscilación es dos puntos alrededor del máximo punto de potencia y que el control a lazo cerrado no se ve alterado por la perturbación. Este presenta un overshoot controlado y error estacionario cero, según lo descrito en los capítulos anteriores.

El tiempo entre una perturbación y otra, la magnitud de ésta y la diferencia entre las referencias son de un segundo, aproximadamente cien milivoltios y es de un voltio respectivamente. Estos parámetros son definidos por usuario y la optimización de éstos es compleja debido a que dependen de factores aleatorios del entorno.

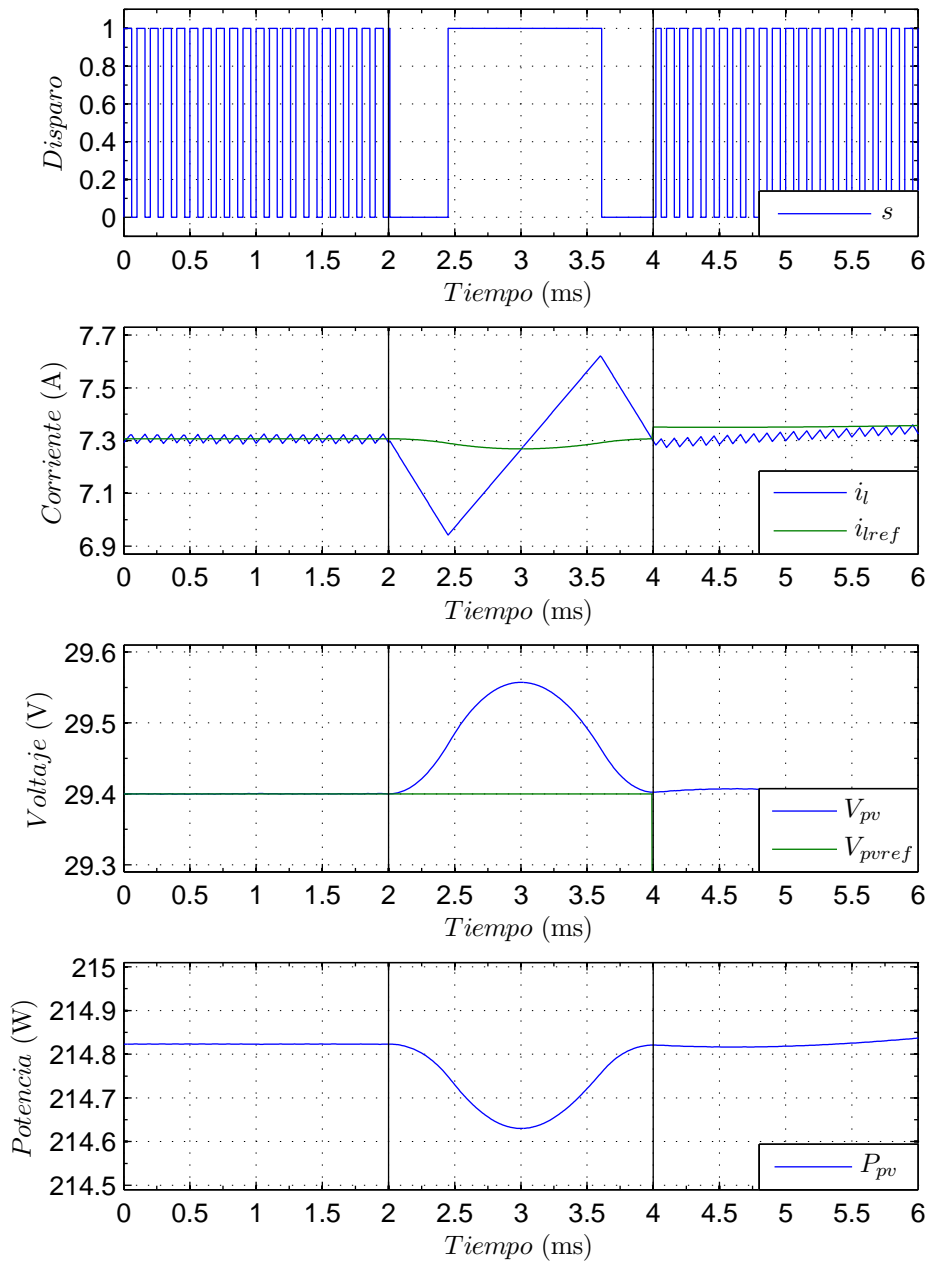


Figura 4.14: Perturbación al sistema en simulación.

En la tabla 4.2 muestra las distintas eficiencia de todos los métodos, vistos anteriormente, y se puede apreciar que el método propuesto posee una mejor eficiencia que los otros métodos.

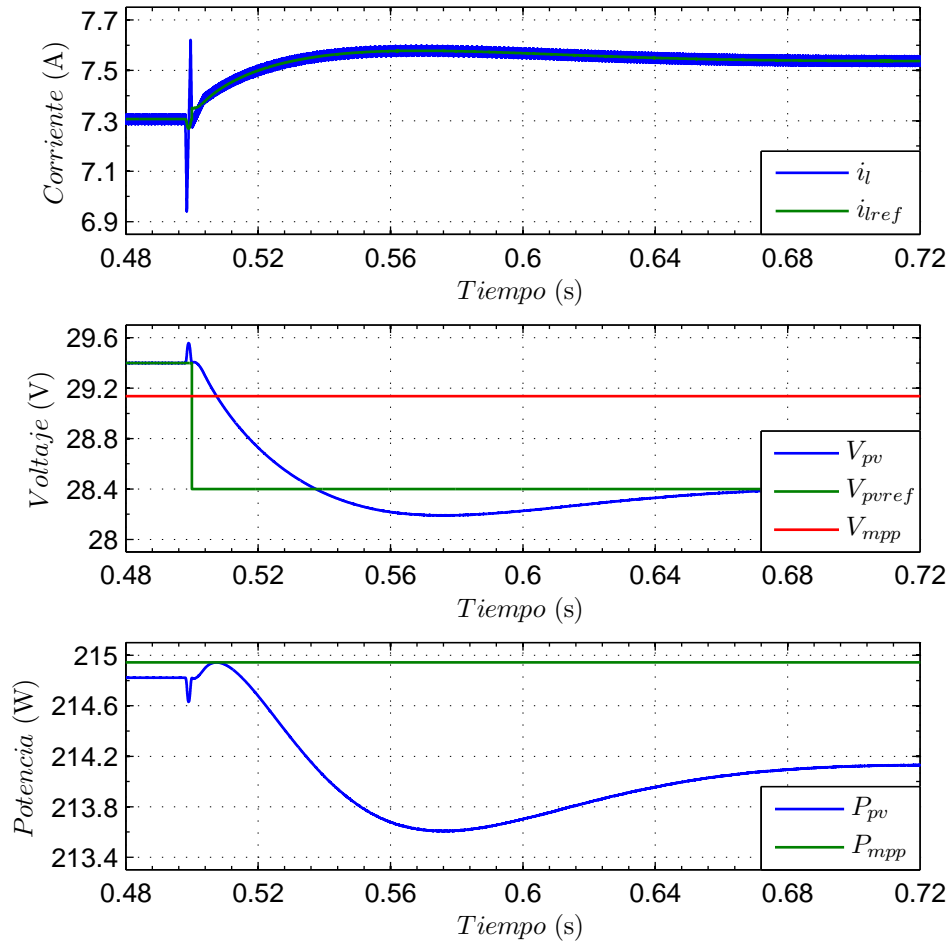


Figura 4.15: Transitorio del voltaje del panel fotovoltaico.

Tabla 4.2: Eficiencia en estado estacionario de los métodos

Método	Eficiencia (%)
Diferencial por Perturbación en la Modulación	99.9270
Perturbar y Observar	99.8956
Conductancia Incremental	99.8956
Realimentación de la potencia	99.8956
Peso en Tres Puntos	99.8658

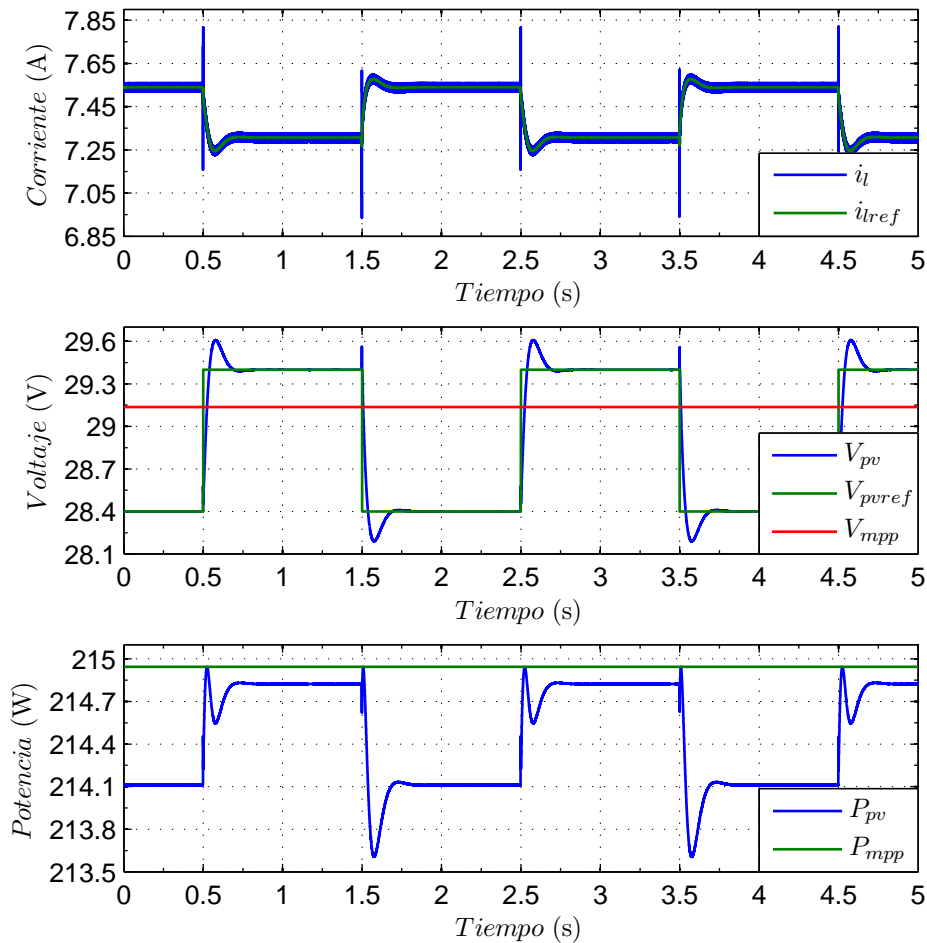


Figura 4.16: Estado estacionario del método propuesto.

4.2.3. Pruebas dinámicas

Las pruebas consisten en cambios de radiación de mil watts por metro cuadrado a quinientos watts por metro cuadrado y viceversa. En figura 4.17 se pueden observar los resultados al disminuir y aumentar la irradiación con cada uno de los métodos nombrados y explicados en los capítulos dos y tres. En ésta se muestra tres gráficos de voltaje respecto al tiempo. En el primero se observa una disminución de irradiación de cien watt metro cuadrados por segundo. En el segundo y tercer gráfico muestra el aumento de irradiación por el mismo valor. Los dos últimos gráficos se diferencian por la partida que tienen los métodos representados por la línea verde. El segundo gráfico comienza descendiendo y el tercer gráfico comienza ascendiendo.

En el primer gráfico de la figura 4.17 se observa que no hay una amplia diferencia

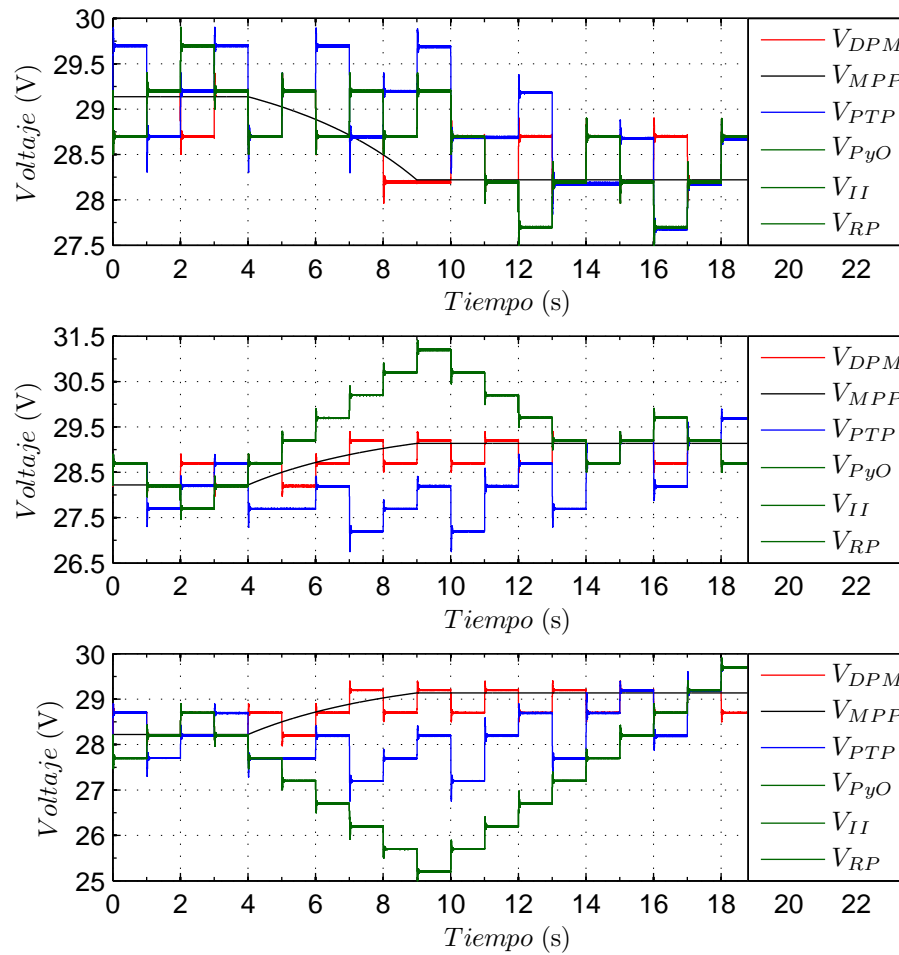


Figura 4.17: Comportamiento de cada método ante una variación.

entre un método y otro. Esto se debe a la reacción de cada método ante una disminución de irradiación. Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación de la potencia oscilan en dos puntos alrededor del último punto antes que el cambio de irradiación ocurra. Peso en Tres Puntos ante variación rápida, no varía su referencia. El método propuesto sigue sin problemas al voltaje de máximo punto de potencia.

En el segundo y tercer gráfico se observa que las señales representadas por la línea verde se alejan del máximo punto de potencia. Esto se debe al brusco cambio de potencia que se produce ante el cambio de irradiación. En los métodos Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y Realimentación, al detectar un aumento en la potencia, el aumento de la referencia continúa en el mismo sentido. Al igual que el primer gráfico, Peso en Tres Puntos no cambia su referencia ante variaciones rápidas de irradiación y el método propuesto sigue sin problemas el máximo punto de potencia.

Tabla 4.3: Eficiencia con dinámica de los métodos

Método	Eficiencia (%)
Diferencial por Perturbación en la Modulación	99.9459
Perturbar y Observar	97.9158
Conductancia Incremental	97.9158
Realimentación de la potencia	97.9158
Peso en Tres Puntos	99.3855

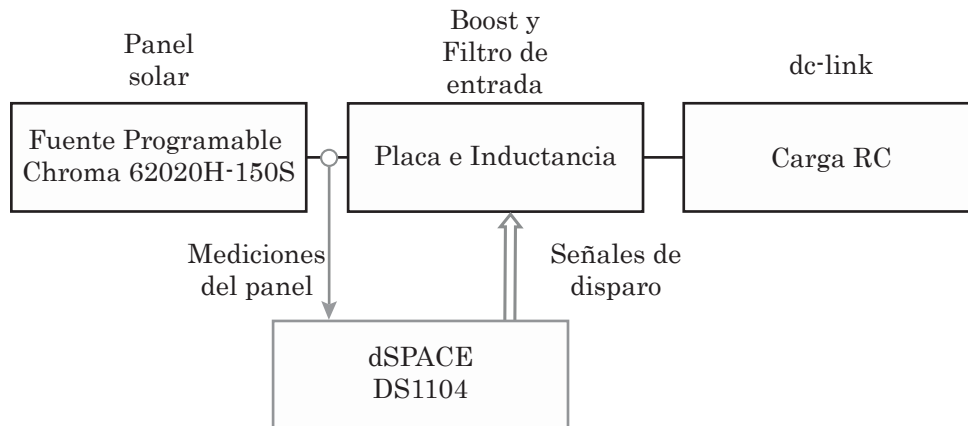


Figura 4.18: Sistema experimental.

El error en los métodos provoca una disminución en la eficiencia que tiene cada métodos, independiente si éste va hacia arriba o hacia abajo, pero un error creciente presenta una mayor perdida que un error decreciente. Esto se debe a la curva de potencia de un panel fotovoltaico es más pronunciada al lado derecho del máximo punto de potencia.

En la tabla 4.3 se observa las eficiencia de los métodos para el caso en la figura 4.17. En este se observa que el método propuesto posee una mayor eficiencia que los demás métodos, seguido por Peso en Tres Puntos. Esto se debe que Peso en Tres Puntos no cambia su referencia al haber grandes cambios de radiación.

4.3. Resultado experimentales

Para obtener los resultados experimentales se utiliza el sistema mostrado en la figura 4.18 y los valores de la componentes se muestran en la tabla 4.4.

En la implementación del convertidor Boost se ocupa un convertidor trifasico [26], se utiliza una de las fases para armar el convertir elevador, visto en la sección de sistema y control. Para esto se dejan operando los dos semiconductores con lógica negada, obteniendo la cualidad de ser un convertidor elevador bidireccional. El hecho que el convertidor sea bidireccional, no afecta el funcionamiento del sistema.

El panel fotovoltaico se emula con la fuente de alimentación de corriente continua programable Chroma 62020H-150S. Esta posee un programa dedicado para hacer lectura de eficiencia, energía, corriente, voltaje, etc. Se emula el panel fotovoltaico PS215M-20/U que posee una corriente de corto circuito de aproximadamente ocho ampere y, debido a esto, solo

Tabla 4.4: Parámetros del sistema experimental

Variable	Magnitud
C_x	1100uF
R_x	20 Ω
C	1500uF
L	50mH
V_x	70V
Kp_c	0.22
Ki_c	10
Kp_v	0.2
Ki_v	0.5
F_{port}	10KHz
$F_{c.c}$	500Hz
$F_{c.v}$	50Hz
F_{MPPT}	1Hz

se puede emular un panel en paralelo, ya que el convertidor tiene la limitante de soportar corriente de hasta diez ampere. El panel posee un voltaje de máximo punto de potencia de veintinueve voltios y una potencia de doscientos quince watts.

Para el control se utiliza la plataforma dSPACE DS1104. Esta permite dos formas para crear la señal al semiconductor, creando la señal por código o utilizando el hardware integrado. Al crear esta señal por código, el procesamiento de calculo es elevado y no se supera una portadora mayor de dos kilohertz. Al utilizar las distintas interrupciones se logra mejorar el tiempo de calculo pero no se puede superar los cinco kilohertz, por lo cual se opta por utilizar el hardware integrado de esta plataforma que permite llegar fácilmente a los diez kilohertz con una tasa de muestreo de doscientas muestras por portadora, a diferencia del otro caso que no superaba las diez muestras por portadora. Esto afecta en la precision en que cambia el voltaje, debido a que una portadora con diez muestras solo puede tomar diez valores distintos de voltaje, a diferencia de una portadora con doscientos muestras puede tomar doscientos valores distintos de voltaje. La desventaja de utilizar esta herramienta es que no permite una variación en la portadora, por lo cual, se cambia la manera de aplicar la perturbación, de utilizar una modificación en la portadora, a modificar el indice de modulación.

Los valores de los controles PI de corriente y voltaje se obtienen de manera empírica. El sistema presenta una alta variabilidad ante los cambios del punto de operación, por lo cual, éstos se ajustan a los valores que trabajen de forma adecuado entre los rangos deseados.

4.3.1. Perturbación

El hardware integrado de la dSPACE posee un retardo en la señal generada para el semiconductor. Este retardo se compensa por medio de código haciendo un desplazamiento en los tiempos que se genera la perturbación. La perturbación se puede observar en la figura 4.19. Esta tiene la duración de de cinco milisegundos, marcando tres puntos en esta: el comienzo de la perturbación, el punto máximo de voltaje y el final de la perturbación. Estos son los tres puntos de comparación que utiliza el algoritmo para tomar las decisiones.

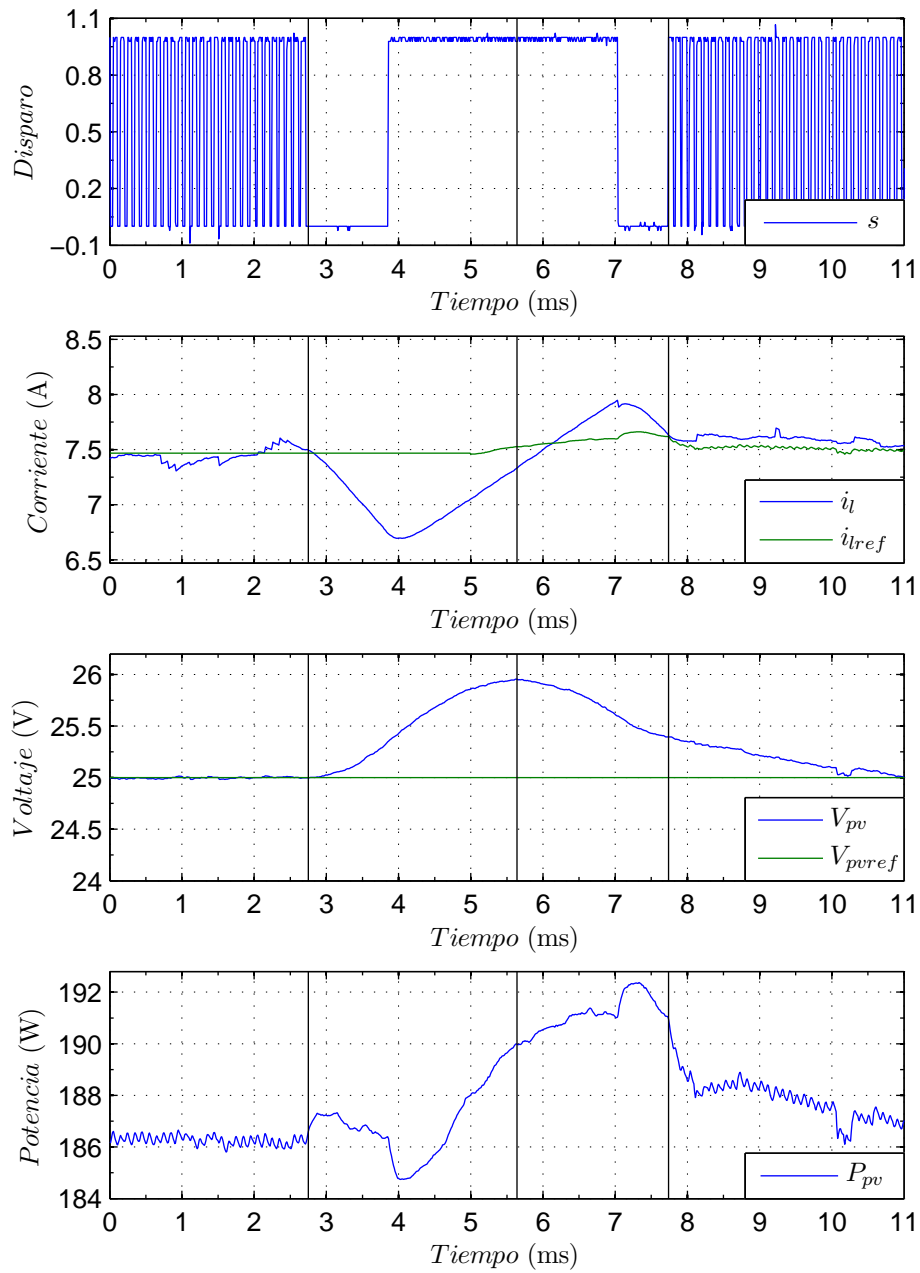


Figura 4.19: Perturbación del sistema en prueba experimental.

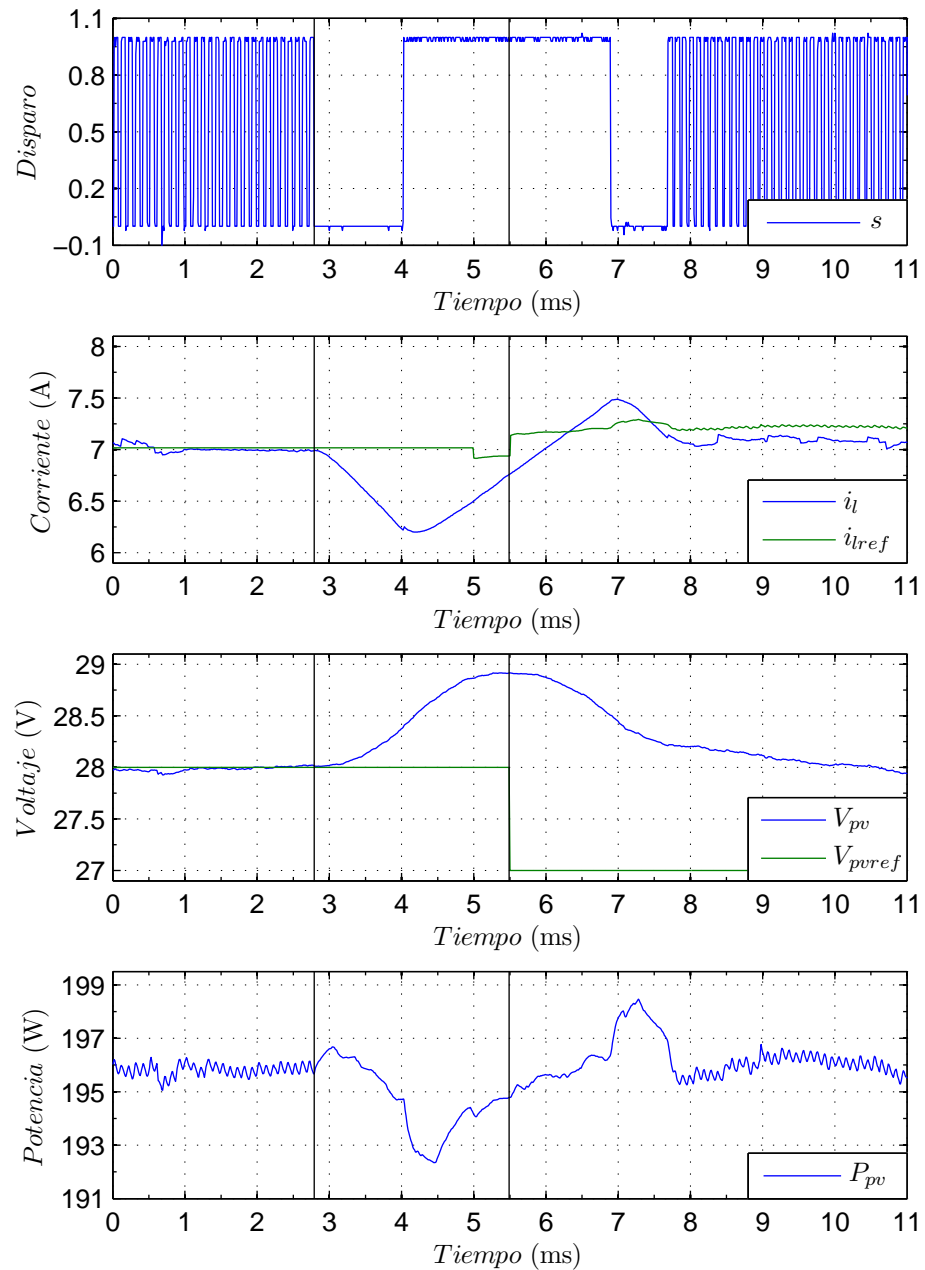


Figura 4.20: Perturbación del sistema en prueba experimental modificada.

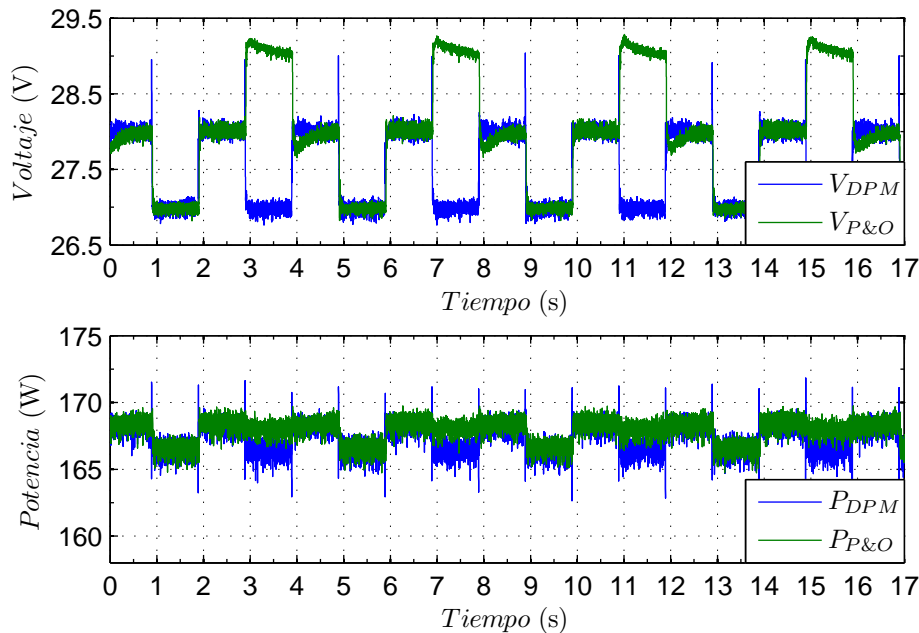


Figura 4.21: Prueba en estado estacionario a ochocientos watts por metro cuadrado.

Con la perturbación que se realiza en la figura 4.19 no se obtienen los resultados deseados. Esto se debe a que el emulador fotovoltaico presenta transientes indeseados que no concuerdan con el modelo de una panel fotovoltaico. Este efecto se puede observar en el gráfico de la potencia mostrada en la figura 4.19. En ésta se emulan las condiciones nominales del panel fotovoltaico y, según estas condiciones, si el voltaje del panel se encuentra a 25 voltios, este se ubicaría al lado izquierdo del máximo punto de potencia. Al aumentar el voltaje, la potencia debe que aumentar según los visto en las curvas mostradas en la figura 1.1, pero esto no se cumple al observar el gráfico de la potencia de la perturbación realizada. En este se aprecia que existe una caída de potencia en el primer instante, la curva de potencia no es simétrica y el máximo de potencia no se encuentra en el máximo de voltaje como se espera en un panel fotovoltaico.

Para atenuar el efector de este transitorio indeseado se aplica una modificación en el tiempo en que se aplica el algoritmo. Se modifica la segunda y tercera medición para que estas sean siempre iguales, debida a que es la tercer medición, la es más afectada por este transitorio. Los efectos de este cambio se observan en la figura 4.20, donde se observa que la potencia aumenta, debido a que el voltaje se encuentra mas cerca al máximo punto de potencia. Debido a este transitorio indeseado, el método trabaja un nivel por debajo del óptimo que este puede alcanzar.

Se modifica manualmente el tiempo de duración del ultimo tramo del estado Bajo para que el voltaje vuelva al mismo punto antes de la perturbación. Esto también se realiza para las simulaciones pero es más notorio en el caso experimental. En las simulaciones se cambia la fase de la señal portadora modificada.

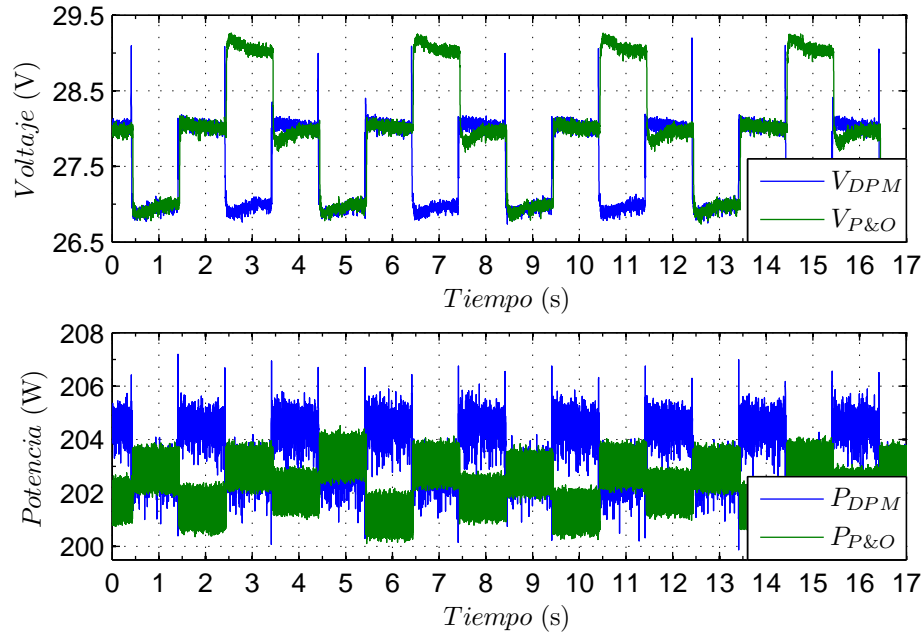


Figura 4.22: Prueba en estado estacionario a mil watts por metro cuadrado.

4.3.2. Pruebas en estado estacionario

Para las pruebas en estado estacionario se utiliza el programa Chroma Solar Array Simulation Soft Panel que trae por defecto el emulador fotovoltaico. Este calcula la eficiencia de los algoritmos de seguimiento del máximo punto de potencia para una prueba programable. Dentro del programa se utiliza la opción de Dynamic MPPT Test Panel, que permite crear pruebas de tiempo ajustable con o sin variación de irradiación. Para este caso se utiliza un tiempo de once minutos, un minuto para las dinámicas del seguimiento y diez minutos para el calculo de la eficiencia del método en estado estacionario. Se utilizan distintos valores de irradiación para realizar distintas pruebas en estado estacionario.

Los resultados de las pruebas se encuentran en la tabla 4.5. También se realizan pruebas con irradiaciones menores a ochocientos watts por metro cuadrado, pero el método propuesto en este trabajo no presenta seguimiento del máximo punto de potencia, por lo cual, no se agregaron en la tabla. Esto se debe al transitorio no deseado del emulador fotovoltaico aumenta en duración cuando se disminuye la potencia.

En las figuras 4.21 y 4.22 se observa diecisiete segundos de la prueba experimental. En éstas se compara Perturbar y Observar con el método propuesto a ochocientos y mil watts por metro cuadrado, respectivamente. Perturbar y Observar presenta variaciones de tres niveles de voltaje, mientras que el método propuesto, se mueve en dos niveles tal como se propone. El método propuesto se mueven entre los voltajes 28V y 27V incluso cuando 29V presenta una mayor potencia que 27V. Esto se debe, a la perturbación generada es muy grande para el escalón de voltaje en que se mueve de un nivel a otro, produciendo que este

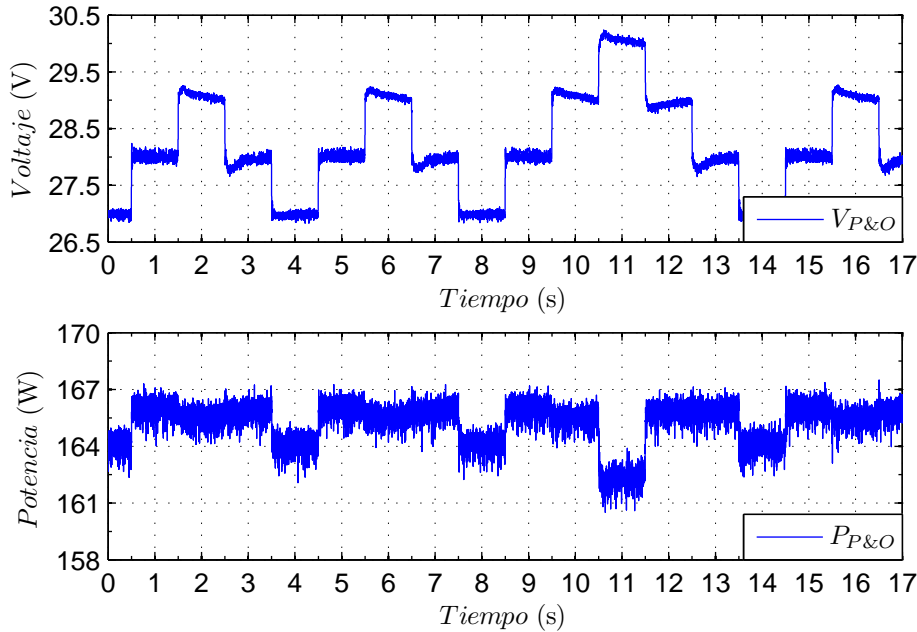


Figura 4.23: Prueba en estado estacionario.

Tabla 4.5: Eficiencia para irradiación constante de los métodos

Metodo	1000W/m ²	900W/m ²	800W/m ²
Eficiencia DPM	99.62	99.55	99.49
Eficiencia P&O	99.62	99.56	99.51

se mueva en un nivel de menor al deseado. En la figura 4.21, se observa que la potencia del método propuesto es menor en un instantes esto debe a lo descrito anteriormente ya que el método se mueve un nivel mas abajo que el esperado, mientras que en la figura 4.22 no se observa claramente cual posee una mayor eficiencia. Esto resultados concuerdan con la tabla 4.5, la cual muestra la eficiencia obtenida frente a los distintos niveles de irradiación.

Existen instantes donde los ambos métodos se mueven a un nivel distinto a los que oscila habitualmente, por lo cual, los métodos se alejan del máximo punto de potencia. Esto se debe a ruidos en las mediciones que provocan malas decisiones en los algoritmo. El método propuesto muestra ser más propensa a estos errores. Esto se debe al transitorio indeseado del emulador fotovotaico, que disminuye las variaciones de potencia, volviendo al sistema más propenso a errores por ruidos de medición. Mientras mayor sean las diferencias de las variables, menor será la posibilidad que el ruido de medición produzca un cambio de signo en ésta, debido a que los algoritmos trabajan con los signos de la variación.

En la figura 4.23 muestra como Perturbar y Observar toma una decisión que se aleja del máximo punto de potencia en el segundo once. Esto provoca una mayor caída de potencia, respecto a los demás niveles. Para reducir este fenómeno se aumenta el tamaño del escalón

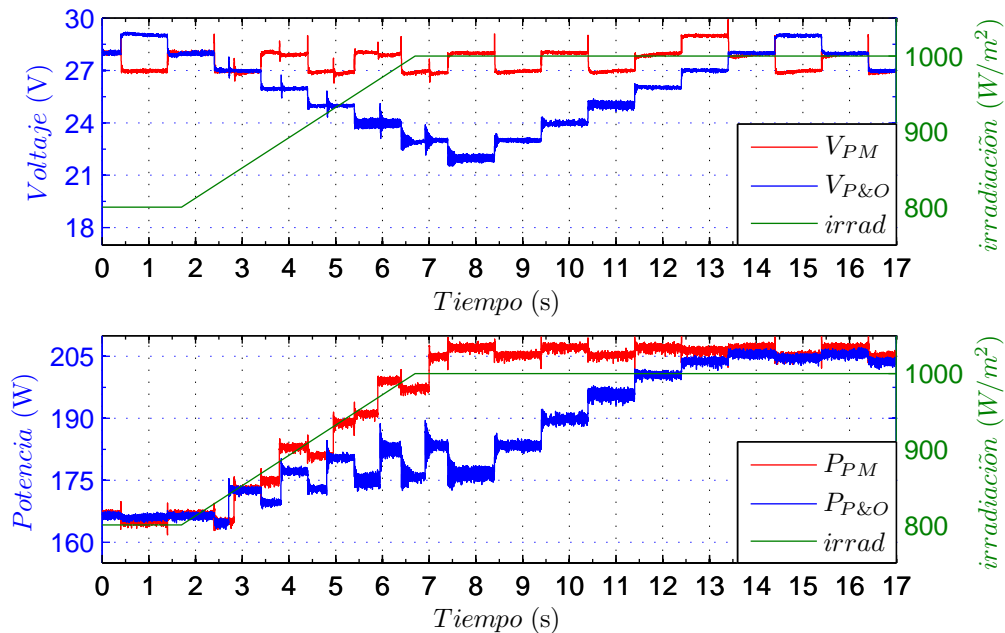


Figura 4.24: Aumento de irradiación.

de voltaje respecto un nivel y otro.

4.3.3. Pruebas dinámicas

Para las pruebas dinámicas se utiliza el programa Chroma Solar Array Simulation Soft en la opción Dynamic MPPT Test Panel. Se configura una prueba de once minutos, un minuto para las dinámicas del seguimiento y diez minutos de variaciones de irradiación. Esta varía de forma periódica con una duración de treinta segundos, diez segundos con ochocientos watts por metro cuadrado constante, cinco segundos en subir de este punto hasta mil watts por metro cuadrado, diez segundos con mil watts por metro cuadrado y cinco segundos en volver a ochocientos watts por metro cuadrado. Esta variación se repite veinte veces en los diez minutos.

En la figura 4.24 se observa un cambio de irradiación de ochocientos a mil watts por metro cuadrado. Donde el voltaje de referencia del método Perturbar y Observar cae a medida que aumenta la potencia, en cambio el método propuesto se mantiene oscilando en los dos puntos. Debido a que el cambio de irradiación no es suficiente para que el sistema cambie de punto de operación. En esta prueba se puede observar que el método propuesto siempre tiene una mayor potencia que Perturbar y Observar mientras la irradiación aumenta.

En la figura 4.25 se observa un cambio de irradiación de mil a ochocientos watts por metro cuadrado. Donde el voltaje de Perturbar y Observar queda oscilando en dos puntos en el intervalo donde la irradiación está variando. El método propuesto siempre oscila en dos puntos por lo cual no se ve afectado por el cambio de irradiación.

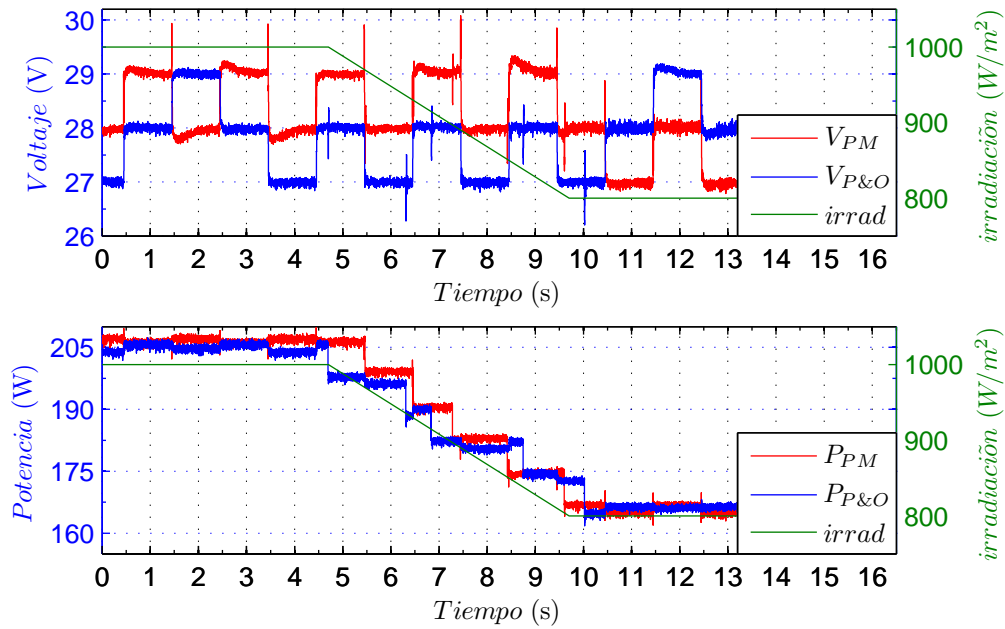


Figura 4.25: Disminución de irradiación.

Tabla 4.6: Eficiencia para irradiación variable de los métodos

Metodo	Eficiencia
DPM	99.57
P&O	98.50

En la tabla 4.6 se muestra la eficiencia promedio de los métodos a lo largo del experimento realizado, la eficiencia del método propuesto no varía significativamente. En cambio la eficiencia del método Perturbar y Observar disminuye más del uno por ciento ante cambios de irradiación. Esto se ve reflejado en la figura 4.24 donde es más notorio el efecto del cambio de irradiación en ambos métodos.

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Ventajas de la propuesta de investigación

En este trabajo se propone un nuevo método de seguimiento del máximo punto de potencia para sistemas fotovoltaicos, el cual presenta una mejor eficiencia tanto para irradiación constante, como para cambios abruptos de irradiación. El algoritmo propuesto es simple, debido a que no requiere un alto procesamiento de cálculo o un gran conocimiento científico para poder aplicarlo. Además, éste es sencillo de implementar ya que utiliza el control convencional para su funcionamiento.

5.1.2. Síntesis de la metodología empleada

La metodología que se utiliza en este trabajo, consiste en presentar los fundamentos teóricos para demostrar el funcionamiento del algoritmo, mostrando sus ventajas y desventajas. Además, éste se implementa y se compara por medio de simulaciones con los siguientes algoritmos: Perturbar y Observar, Inductancia Incremental, Realimentación de la Potencia y Peso en Tres Puntos. Finalmente, se implementa de manera experimental y se compara con el algoritmo Perturbar y Observar.

5.1.3. Detalles técnicos de la investigación

Las simulaciones de este trabajo se implementan en el programa matlab/simulink. Este simulador se basa en bloques que permiten una simple integración entre las distintas partes del sistema.

El panel fotovoltaico se emula con la fuente de alimentación de corriente continua programable Chroma 62020H-150S. El convertidor boost se arma en base a un convertidor trifásico diseñado en la Universidad Técnica Federico Santa María [26]. El control experimental del trabajo se programa en lenguaje C y se implementa en la plataforma dSPACE DS1104. Los valores de los controladores PI del sistema se calculan de forma empírica.

5.1.4. Conclusión

El método propuesto tiene un mejor seguimiento del máximo punto de potencia ante cambios bruscos de irradiación, que los demás métodos vistos en este trabajo, debido a que éste presenta una mejor eficiencia comparado con los otros algoritmos, hasta de un 3% en los escenarios simulados y un 1% en las pruebas experimentales. Esto se debe a las rápidas perturbaciones realizadas al sistema que permiten desprestigiar los cambios de irradiación que sufre el panel fotovoltaico.

En un escenario de irradiación constante, las simulaciones del método propuesto presentan una mayor eficiencia de hasta 0,06%, pero en el caso experimental, éste presenta una eficiencia más baja de 0,02%. Esto ocurre porque el método propuesto oscila un nivel más abajo del máximo punto de potencia, debido al transitorio indeseado que posee la fuente DC.

Con este trabajo se realizó una publicación en la conferencia IEEE CPEPOWERENG 2017 [27].

5.2. Trabajo Futuro

Para trabajo futuro el método propuesto es una gran base para implementar todo tipo de modificaciones, como por ejemplo: paso variable, emplear en algoritmos híbridos, entre otros. Además, este algoritmo permite experimentar cambios en la forma y tamaño de la perturbación, por ejemplo se logra hacer un barrido segmentado de la curva de potencia, y así encontrar el máximo punto de potencia de una manera más exacta, entre otras posibles modificaciones que se pueden realizar.

Apéndice A

CÓDIGO EN C

A.1. Método Diferencial por Perturbación en la Modulación

```
1 #include <Brtenv.h>
2 #include <io1104.h>
3 #include <math.h>
4
5 #define TIEMPO_MUESTREO0    5e-6
6 #define TIEMPO_MUESTREO1    10e-6
7 #define FREC_MUESTREO      200000
8 #define FREC_PORT          2000
9 #define ACTIVO              0X00000001
10 #define DESACTIVO          0X00000000
11 #define MUESTRAS_POR_PORT  (FREC_MUESTREO / FREC_PORT)
12 #define LIM_VOLT_CARGA     150.0f
13 #define periodo            1e-4
14 #define FREC_FILTRO        5000
15 #define pi                  3.14159265358979323846
16 #define eme                 (FREC_FILTRO * TIEMPO_MUESTREO1 / 2)
17 #define cons                (TIEMPO_MUESTREO1 / 2)
18 // 32-bit integer
19 Int32 cuenta = 100000;
20 Int32 Portadora = 0;
21 Int32 estado = 1;
22 Int16 task_id = 0;
23 Int16 index = -1;
24 Float64 m = 0.6;
25
26 Int32 S;
27 Float64 Vpv;
28 Float64 Vpv_ = 0;
29 Float64 Vpvfil = 0;
30 Float64 Ipv;
31 Float64 Ipv_ = 0;
32 Float64 Ipvfil = 0;
33 Float64 Il;
34 Float64 Il_ = 0;
35 Float64 Ilfil = 0;
```

```

36 Float64 Vc;
37 Float64 Vc_ = 0;
38 Float64 Vcfil = 0;
39 Float64 Kp_v = 0.2;
40 Float64 Ki_v = 0.5;
41 Float64 errorv;
42 Float64 errorv_ = 0;
43 Float64 Icref;
44 Float64 Ilref;
45 Float64 Kp_c = 0.22;
46 Float64 Ki_c = 10;
47 Float64 errori;
48 Float64 errori_ = 0;
49 Float64 mref = 0;
50 Float64 sat_c = 1;
51 Float64 sat_v = 1;
52 Float64 asd = 1;
53 Float64 t_m0;
54 Float64 t_m1;
55
56 //MPPT
57 Float64 Vref = 29;
58 Float64 Vmax;
59 Float64 P;
60 Float64 P_ = 0;
61 Float64 P_ant = 0;
62 Float64 P1;
63 Float64 P2;
64 Float64 P3;
65 Float64 Pla;
66 Float64 P2a;
67 Float64 P3a;
68 Float64 ma;
69 Int32 a = 50;
70 Int32 b = 30;
71 Int32 z;
72 Int32 Non;
73 Int32 Noff1;
74 Int32 Noff2;
75 Int32 inter = 500;
76 Float64 delta=1;
77 Int32 M = 0;
78
79 // Functions
80 inline int comparacion(Float64 indice)
81 {
82     return (indice*cuenta > Portadora);
83 }
84
85 inline int limite(Float64 medicion)
86 {
87     return (medicion <= LIM.VOLT.CARGA);
88 }
89
90
91 void interupcion_portadora(void)
92 {
93     //activacion controldesk
94     host_service(1, 0);
95     //RTLIB.SRT_ISR_BEGIN();

```

```

96  RTLIB_TIC_START();
97  //CODIGO PORTADORA DIENTE CIERRA
98  Portadora = (Portadora >= cuenta) ? 0 : Portadora + 1;
99  //COMPARACION PORTADORA INDICE DE MODULACION Y LIMITACION EN LA SALIDA
100 S = (limite(Vc)) ? comparacion(m) : 0;
101 //DISPARO
102 (S) ? ds1104_bit_io_write(ACTIVO) : ds1104_bit_io_write(DESACTIVO);
103
104
105  t_m0 = RTLIB_TIC_READ();
106 }
107
108 void interrupcion_lectura(void)
109 {
110  //activacion controldesk
111  host_service(1, 0);
112  RTLIB_TIC_START();
113  //INICIANDO ADC
114  ds1104_adc_start(DS1104_ADC2 | DS1104_ADC3 | DS1104_ADC4 | DS1104_ADC5);
115  //LEYENDO ADC
116  Vpv = ds1104_adc_read_ch(5)*200;
117  Vpvfil = (eme * (Vpv + Vpv_) - (eme - 1.0f) * Vpvfil) / (eme+1.0f);
118  Vpv_ = Vpv;
119  Ipv = ds1104_adc_read_ch(6)*100;
120  Ipvfil = (eme * (Ipv + Ipv_) - (eme - 1.0f) * Ipvfil) / (eme+1.0f);
121  Ipv_ = Ipv;
122  Vc = ds1104_adc_read_ch(7)*500;
123  Vcfil = (eme * (Vc + Vc_) - (eme - 1.0f) * Vcfil) / (eme+1.0f);
124  Vc_ = Vc;
125  Il = ds1104_adc_read_ch(8)*100;
126  Ilfil = (eme * (Il + Il_) - (eme - 1.0f) * Ilfil) / (eme+1.0f);
127  Il_ = Il;
128  P=Vpvfil*Ipvfil;
129  //ENTREDA PI VOLTAJE MPPT
130  Portadora = (Portadora > cuenta+1) ? 0 : Portadora + 1;
131  //interrupcion
132  if (Portadora == cuenta)
133  {
134    z=4;
135  }
136  if (Portadora < cuenta)
137  {
138    z=3;
139  }
140  if (Portadora < (cuenta-a))
141  {
142    z=1;
143  }
144  if (Portadora < (cuenta-a-Noff2))
145  {
146    z=2;
147  }
148  if (Portadora < (cuenta-a-Noff2-Non))
149  {
150    z=1;
151  }
152  if (Portadora < (cuenta-a-inter))
153  {
154    z=3;
155  }

```

```

156 switch(z)
157 {
158     case 1:
159         if ((P1a == 0) && (Portadora >= (cuenta-inter)))
160         {
161             P1a = P;
162         }
163         if (ma == 0)
164         {
165             ma = (m<1) ? m : 1;
166             Non = inter * ma;
167             Non = floor(Non);
168             Noff1 = floor(0.5*(inter-Non))+b;
169             Noff2 = inter - Non - Noff1;
170         }
171         if (Vmax < Vpvfil)
172         {
173             Vmax = Vpvfil;
174             P2a = P;
175         }
176         m = 0;
177         break;
178     case 2:
179         if ((P1a == 0) && (Portadora >= (cuenta-inter)))
180         {
181             P1a = P;
182         }
183         if (ma == 0)
184         {
185             ma=m;
186             Non = inter * ma;
187             Non = floor(Non);
188             Noff1 = floor(0.5*(inter-Non))+b;
189             Noff2 = inter - Non - Noff1;
190         }
191         if (Vmax < Vpvfil)
192         {
193             Vmax = Vpvfil;
194             P2a = P;
195         }
196         m = 1;
197         break;
198     case 3:
199         errorv = Vref - Vpvfil;
200         //PI Voltaje
201         Icref = Kp_v * (errorv - errorv_) + (cons * Ki_v) * (errorv + errorv_
) * sat_v + Icref;
202         errorv_ = errorv;
203         Icref = (Icref <= 1.0f) ? ((-1.0f <= Icref) ? Icref : -1.0f) : 1.0f;
204         //SATURACION
205         sat_v = (-1.0f <= Icref) && (Icref <= 1.0f);
206         Ilref = Ipvfil - Icref;
207         //ENTREDA PI CORRIENTE
208         errori = Ilref - Ilfil;
209         //PI CORRIENTE
210         mref = Kp_c * (errori - errori_) + (cons * Ki_c) * (errori + errori_)
* sat_c + mref;
211         errori_ = errori;
212         mref = (mref <= 1.0f) ? ((-1.0f <= mref) ? mref : -1.0f) : 1.0f;
213         //SATURACION

```

```

214     sat.c = (-1.0f <= mref) && (mref <= 1.0f);
215     //SUMA DEL PUNTO OPERACION
216     m=mref + 0.579f;
217     break;
218 case 4:
219     if ((P1a == 0) && (Portadora >= (cuenta-inter)))
220     {
221         P1a = P;
222     }
223     if (ma == 0)
224     {
225         ma=m;
226         Non = inter * ma;
227         Non = floor(Non);
228         Noff1 = floor(0.5*(inter-Non))+b;
229         Noff2 = inter - Non - Noff1;
230     }
231     if (Vmax < Vpvfil)
232     {
233         Vmax = Vpvfil;
234         P2a = P;
235     }
236     P3a = P;
237     if (P2a > P1a) {M = M + 1;}
238     else if (P2a == P1a) {M = M;}
239     else {M = M - 1;}
240     if (P2a > P3a) {M = M + 1;}
241     else if (P2a == P3a) {M = M;}
242     else {M = M - 1;}
243     if (M > 0) {Vref=Vref + delta;}
244     else if (M == 0) {Vref = Vref;}
245     else {Vref = Vref - delta;}
246     Portadora = 0;
247     Vmax = 0;
248     P1=P1a;
249     P2=P2a;
250     P3=P3a;
251     P1a = 0;
252     P2a = 0;
253     P3a = 0;
254     m = ma;
255     ma = 0;
256     M = 0;
257     break;
258 }
259 z=0;
260 m = (limite(Vcfil)) ? m : 0 ;
261 ds1104_slave_dsp_pwm_duty_write(task_id , index , m);
262 t_m1 = RTLIB_TIC_READ();
263 }
264 // Main [replace for some interruption vector , triggered by a HW timer]
265 int main(void)
266 {
267     // Inicializacion de la dspace la comunicacon con el DSP
268     ds1104_init();
269     ds1104_slave_dsp_communication_init();
270     // Inicializacion de bit_io
271     ds1104_bit_io_init(DS1104.DIO0.OUT | DS1104.DIO2.OUT);
272     // Inicializacion de la PWM

```

```

273 | ds1104_slave_dsp_pwm_init(task_id , periodo , m, SLVDSP1104.PWM.MODE_ASYM,
      | SLVDSP1104.PWM.POL_HIGH, SLVDSP1104.PWM.CH1_MSK);
274 | ds1104_slave_dsp_pwm_start(task_id , SLVDSP1104.PWM.CH1_MSK);
275 | ds1104_slave_dsp_pwm_duty_write_register(task_id , &index , 1);
276 | // INTERRUPCION
277 | RTLIB_SRT_START(TIEMPO_MUESTREO1, interuccion_lectura); // es el timer0
278 |     while(1){
279 |         RTLIB_BACKGROUND_SERVICE();
280 |     }
281 | }

```

A.2. Método Método Perturbar y Observar

```

1 | #include <Brtenv.h>
2 | #include <io1104.h>
3 | #include <math.h>
4 |
5 | #define TIEMPO_MUESTREO0    5e-6
6 | #define TIEMPO_MUESTREO1    10e-6
7 | #define FREC_MUESTREO      200000
8 | #define FREC_PORT          2000
9 | #define ACTIVO              0X00000001
10 | #define DESACTIVO           0X00000000
11 | #define MUESTRAS_POR_PORT   (FREC_MUESTREO / FREC_PORT)
12 | #define LIM_VOLT_CARGA      150.0f
13 | #define periodo             1e-4
14 | #define FREC_FILTRO         5000
15 | #define pi                   3.14159265358979323846
16 | #define eme                  (FREC_FILTRO * TIEMPO_MUESTREO1 / 2)
17 | #define cons                  (TIEMPO_MUESTREO1 / 2)
18 | // 32-bit integer
19 | Int32 cuenta = 100000;
20 | Int32 Portadora = 0;
21 | Int32 estado = 1;
22 | Int16 task_id = 0;
23 | Int16 index = -1;
24 | Float64 m = 0.6;
25 |
26 | Int32 S;
27 | Float64 Vpv;
28 | Float64 Vpv_ = 0;
29 | Float64 Vpvfil = 0;
30 | Float64 Ipv;
31 | Float64 Ipv_ = 0;
32 | Float64 Ipvfil = 0;
33 | Float64 Il;
34 | Float64 Il_ = 0;
35 | Float64 Ilfil = 0;
36 | Float64 Vc;
37 | Float64 Vc_ = 0;
38 | Float64 Vcfil = 0;
39 | Float64 Kp_v = 0.2;
40 | Float64 Ki_v = 0.5;
41 | Float64 errorv;
42 | Float64 errorv_ = 0;
43 | Float64 Icref;
44 | Float64 Ilref;

```

```

45 Float64 Kp_c = 0.22;
46 Float64 Ki_c = 10;
47 Float64 errori;
48 Float64 errori_ = 0;
49 Float64 mref = 0;
50 Float64 sat_c = 1;
51 Float64 sat_v = 1;
52 Float64 asd = 1;
53 Float64 t_m0;
54 Float64 t_m1;
55
56 //MPPT
57 Float64 P_=0;
58 Float64 V_=0;
59 Float64 Vref = 29;
60 Float64 Vref_ = 29;
61 Float64 P;
62 Float64 P1;
63 Float64 delta=1;
64
65 // Functions
66 inline int comparacion(Float64 indice)
67 {
68     return (indice*cuenta > Portadora);
69 }
70
71 inline int limite(Float64 medicion)
72 {
73     return (medicion <= LIM.VOLT.CARGA);
74 }
75
76 void interupcion_lectura(void)
77 {
78     //activacion controldesk
79     host_service(1, 0);
80     RTLIB_TIC_START();
81     //INICIANDO ADC
82     ds1104_adc_start(DS1104_ADC2 | DS1104_ADC3 | DS1104_ADC4 | DS1104_ADC5);
83     //LEYENDO ADC
84     Vpv = ds1104_adc_read_ch(5)*200;
85     Vpvfil = (eme * (Vpv + Vpv_) - (eme - 1.0f) * Vpvfil) / (eme+1.0f);
86     Vpv_ = Vpv;
87     Ipv = ds1104_adc_read_ch(6)*100;
88     Ipvfil = (eme * (Ipv + Ipv_) - (eme - 1.0f) * Ipvfil) / (eme+1.0f);
89     Ipv_ = Ipv;
90     Vc = ds1104_adc_read_ch(7)*500;
91     Vcfil = (eme * (Vc + Vc_) - (eme - 1.0f) * Vcfil) / (eme+1.0f);
92     Vc_ = Vc;
93     Il = ds1104_adc_read_ch(8)*100;
94     Ilfil = (eme * (Il + Il_) - (eme - 1.0f) * Ilfil) / (eme+1.0f);
95     Il_ = Il;
96     P1=Vpvfil*Ipvfil;
97     //ENTREDA PI VOLTAJE MPPT
98     Portadora = (Portadora > cuenta) ? 0 : Portadora + 1;
99     if (Portadora == cuenta)
100     {
101         P = Vpvfil * Ipvfil;
102         if (P > P_)
103         {
104             if (Vpvfil > V_) Vref=Vref_ + delta;

```

```

105     else          Vref=Vref_ - delta;
106     }
107     else
108     {
109     if (Vpvfil > V_) Vref=Vref_ - delta;
110     else          Vref=Vref_ + delta;
111     }
112     Portadora = 0;
113     Vref_ = Vref;
114     V_ = Vpvfil;
115     P_ = P;
116     }
117     errorv = Vref - Vpvfil;
118     //PI Voltaje
119     Icref = Kp_v * (errorv - errorv_) + (cons * Ki_v) * (errorv + errorv_) *
        sat_v + Icref;
120     errorv_ = errorv;
121     Icref = (Icref <= 1.0f) ? ((-1.0f <= Icref) ? Icref : -1.0f) : 1.0f;
122     //SATURACION
123     sat_v = (-1.0f <= Icref) && (Icref <= 1.0f);
124     Ilref = Ipvfil - Icref;
125     //ENTREDA PI CORRIENTE
126     errori = Ilref - Ilfil;
127     //PI CORRIENTE
128     mref = Kp_c * (errori - errori_) + (cons * Ki_c) * (errori + errori_) *
        sat_c + mref;
129     errori_ = errori;
130     mref = (mref <= 1.0f) ? ((-1.0f <= mref) ? mref : -1.0f) : 1.0f;
131     //SATURACION
132     sat_c = (-1.0f <= mref) && (mref <= 1.0f);
133     //SUMA DEL PUNTO OPERACION
134     m=mref + 0.579f;
135
136     m = (limite(Vcfil)) ? m : 0 ;
137     ds1104_slave_dsp_pwm_duty_write(task_id , index , m);
138     t_m1 = RTLIB_TIC_READ();
139 }
140 // Main [replace for some interruption vector, triggered by a HW timer]
141 int main(void)
142 {
143 // Inicializacion de la dspace la comunicacon con el DSP
144     ds1104_init();
145     ds1104_slave_dsp_communication_init();
146 // Inicializacion de bit_io
147     ds1104_bit_io_init(DS1104_DIO0_OUT | DS1104_DIO2_OUT);
148 // Inicializacion de la PWM
149     ds1104_slave_dsp_pwm_init(task_id , periodo , m, SLVDSP1104_PWM_MODE_ASYM,
        SLVDSP1104_PWM_POL_HIGH, SLVDSP1104_PWM_CH1_MSK);
150     ds1104_slave_dsp_pwm_start(task_id , SLVDSP1104_PWM_CH1_MSK);
151     ds1104_slave_dsp_pwm_duty_write_register(task_id , &index , 1);
152 // INTERRUPCION
153     RTLIB_SRT_START(TIEMPO_MUESTREO1, interupcion_lectura); // es el timer0
154     while(1)
155     {
156         RTLIB_BACKGROUND_SERVICE();
157     }
158 }
159 }

```

Apéndice B

CÓDIGO EN MATLAB

B.1. Método Diferencial por Perturbación en la Modulación

```
1 function Vpvref = MPPTDFS(V1,I1 ,k1 ,k2 ,m)
2
3 delta=k1; %Voc=30.17 InMod=0.01% delta=30.17*0.0130.17*1%/100/100=0.3017
4 step=k2; %00000/100000 = 1 s de actualización del MPPT
5
6 persistent cont M Vref P2 P3 P1 e p v1
7
8 if isempty(cont) %inicializando variables a utilizar
9     cont=0;
10    M=0;
11    Vref=29.2;
12    P1=0;
13    P2=0;
14    P3=0;
15    v1=zeros(1,20);
16    p=zeros(1,20);
17    e=0;
18 end
19
20 if V1<0.00001
21     V=0;
22 else V=V1;
23 end
24 if I1<0.000001
25     I=0;
26 else I=I1 ;
27 end
28
29 if (m==1)
30     if P1==0
31         P1=V*I ;
32     end
33     e=e+1;
34     v1(e)=V;
35     p(e)=V*I ;
```

```

36 end
37
38 if (cont==step)
39     [~,b]=max(v1);
40     P2=p(b);
41     P3=p(end);
42     if P2>P1         M=M+1;
43     elseif P2==P1   M=M;
44     else             M=M-1;
45     end
46     if P2>P3         M=M+1;
47     elseif P2==P3   M=M;
48     else             M=M-1;
49     end
50     if (M>0)
51         Vref=Vref+delta;    %Seteo voltaje a Vb (aumenta)
52     elseif M==0
53         Vref=Vref;
54     else
55         Vref=Vref-delta;
56     end
57     M=0;
58     cont=0;
59     P1=0;
60     P2=0;
61     P3=0;
62     e=0;
63 end
64 if (Vref<0)
65     Vref=0;
66 end
67 Vpvref=Vref;
68 cont=cont+1;

```

B.2. Método Perturbar y Observar

```

1 function Vpvref = MPPTandO(V1, I1, k1, k2)
2
3 delta=k1;    %Woc=30.17 InMod=0.01% delta=30.17*0.0130.17*1%/100/100=0.3017
4 step=k2;    %100000/100000 = 1 s de actualización del MPPT
5
6 persistent cont p_ant v_ant vref vref_ant
7
8 if isempty(cont) %inicializando variables a utilizar
9     cont=0;
10    p_ant=0;
11    v_ant=30;
12    vref=29.2;
13    vref_ant=29.2;
14 end
15 %inicio algoritmo
16 if V1<0.00001
17     V=0;
18 else V=V1;
19 end
20 if I1<0.000001
21     I=0;

```

```

22 else I=I1;
23 end
24
25 if (cont==step)
26     P=V*I;
27     if P>p_ant
28         if V>v_ant    vref=vref_ant+delta;
29         else          vref=vref_ant-delta;
30         end
31     else
32         if V>v_ant    vref=vref_ant-delta;
33         else          vref=vref_ant+delta;
34         end
35     end
36     if ((I==0)&(V>0)),
37         vref=vref_ant-delta;
38     end
39     if ((I==0)&(V==0)),
40         vref=vref_ant;
41     end
42     cont=0;
43     vref_ant=vref;
44     v_ant=V;
45     p_ant=P;
46     end
47 if (vref<0)
48     vref=0;
49 end
50 cont=cont+1;
51 Vpvref=vref;

```

B.3. Método Conductancia Incremental

```

1 function Vpvref = MPPTInC(V1,I1 ,k1 ,k2)
2
3 delta=k1; %Voc=30.17 InMod=0.01% delta=30.17*0.0130.17*1%/100/100=0.3017
4 step=k2; %100000/100000 = 1 s de actualización del MPPT
5
6 persistent cont v_ant vref vref_ant i_ant
7
8 if isempty(cont) %inicializando variables a utilizar
9     cont=0;
10    v_ant=30;
11    i_ant=0;
12    vref=29.2;
13    vref_ant=29.2;
14 end
15 if V1<0.00001
16     V=0;
17 else V=V1;
18 end
19 if I1<0.000001
20     I=0;
21 else I=I1;
22 end
23
24 di=I-i_ant;

```

```

25 dv=V-v_ant;
26
27 if (cont==step)
28     if (dv==0)
29         if (di==0)           vref=vref_ant;
30             else
31                 if di>0       vref=vref_ant+delta;
32                     else       vref=vref_ant-delta;
33                         end
34             end
35     else
36         if (di/dv==I/V)       vref=vref_ant;
37             else
38                 if di/dv>I/V  vref=vref_ant+delta;
39                     else       vref=vref_ant-delta;
40                         end
41             end
42     end
43     if ((I==0)&(V>0)),
44         vref=vref_ant-delta;
45     end
46     cont=0;
47     vref_ant=vref;
48     v_ant=V;
49     i_ant=I;
50 end
51 if (vref<0)
52     vref=0;
53 end
54 cont=cont+1;
55 Vpvref=vref;

```

B.4. Método Realimentación de la Potencia

```

1 function Vpvref = MPPTHC(V1, I1, k1, k2)
2
3 delta=k1; %Voc=30.17 InMod=0.01% delta=30.17*0.0130.17*1%/100/100=0.3017
4 step=k2; %100000/100000 = 1 s de actualización del MPPT
5
6 persistent cont vref vref_ant slope P_ant
7
8 if isempty(cont) %inicializando variables a utilizar
9     cont=0;
10    vref=29.2;
11    vref_ant=29.2;
12    P_ant=1000;
13    slope=1;
14 end
15 if V1<0.00001
16    V=0;
17 else V=V1;
18 end
19 if I1<0.000001
20    I=0;
21 else I=I1;
22 end
23 if (cont==step)

```

```

24 P=V*I;
25 if (P==P_ant)   vref=vref_ant;
26 else
27     if P>P_ant   vref=vref_ant+delta*slope;
28     else
29         slope=slope*(-1);
30         vref=vref_ant+delta*slope;
31     end
32 end
33 if ((I>0)&(V==0)),
34     vref=vref_ant+delta;
35 end
36 if ((I==0)&(V>0)),
37     vref=vref_ant-delta;
38 end
39 if ((I==0)&(V==0)),
40     vref=vref_ant;
41 end
42 vref_ant=vref;
43 P_ant=P;
44 cont=0;
45 end
46 if (vref<0)
47     vref=0;
48 end
49 cont=cont+1;
50 Vpvref=vref;

```

B.5. Método Peso en Tres Puntos

```

1 function Vpvref = MPPTIPW(V1,I1,k1,k2)
2 %IPW compara las tres últimas mediciones de potencia
3 %el algoritmo toma la decisión en 9 diferentes estados que se forman.
4 delta=k1; %Woc=30.17 InMod=0.01% delta=30.17*0.0130.17*1%/100/100=0.3017
5 step=k2; %100000/100000 = 1 s de actualización del MPPT
6
7 persistent cont med M Vref Va Vb Vc Pb Pc Pa
8
9 if isempty(cont) %inicializando variables a utilizar
10     cont=0;
11     med=0;
12     M=0;
13     Vref=29.2;
14     Va=0;
15     Vb=0;
16     Vc=0;
17     Pb=0;
18     Pc=0;
19     Pa=0;
20 end
21 %Inicio algoritmo IPW (Mejor algoritmo)
22
23 if V1<0.00001
24     V=0;
25 else V=V1;
26 end
27 if I1<0.000001

```

```

28     I=0;
29 else I=I1;
30 end
31
32 if (cont==step)
33     P=V*I;                                %Medición Potencia en cada ciclo
34     if med==0
35         Va=V;
36         Pa=P;                                %Potencia Pa (Potencia Inicial)
37         Vb=Va+delta;                        %seteando Vb
38         Vc=Va-delta;
39         Vref=Vb;                            %Próxima pertubación Vb
40
41     elseif med==1
42         Pb=P;                                %potencia perturbación Pb
43         Vref=Vc;                            %Próxima Perturbación Vc
44
45     elseif med==2;
46         Pc=P;                                %Potencia Perturbación Pc
47         if Pb>=Pa    M=M+1;
48         else        M=M-1;
49         end
50         if Pa>Pc    M=M+1;
51         else        M=M-1;
52         end
53         if (M==2)   Vref=Vb;    %Seteo voltaje a Vb (aumenta)
54         else
55             if (M==--2) Vref=Vc;    %Seteo a voltaje Vc (Disminuye)
56             else        Vref=Va;    %Seteo a voltaje Va (Se mantiene)
57             end
58         end
59         M=0;
60         med=-1;                            %Inicialización de la medición
61     end
62     med=med+1;
63     cont=0;
64     if ((I>0)&(V==0)),
65         Vref=V+delta+delta;
66         med=0;
67     end
68     if ((I==0)&(V>0)),
69         Vref=V-delta;
70         med=0;
71     end
72     if ((I==0)&(V==0)),
73         Vref=V;
74         med=0;
75     end
76 end
77 if (Vref<0)
78     Vref=0;
79 end
80 Vpvref=Vref;
81 PA=Pa;
82 PB=Pb;
83 PC=Pc;
84 cont=cont+1;

```

B.6. Panel Fotovoltaico

```

1 function I = panel(G,T,V)
2
3 %Physical Parameters
4 n = 1.52;
5 k = 1.38e-23;
6 q = 1.60e-19;
7 Vg = 1.12;
8 Tconst = 298;
9
10 %Model Variables
11 %double Io, Xv, Rs, Il, Ilt, Iot, Vc, Tmodel, dVdI, I, Ia;
12 %int j;
13
14 %Module Parameters
15 Nc = 60;
16 Voc = 36.5/Nc;
17 Isc = 8.0;
18 dVdI = -0.48 / Nc;
19
20 %PV Model
21 Tmodel = T + 273;
22 Io = Isc / (exp((q*Voc)/(n*k*Tconst))-1);
23 Xv = Io*(q/(n*k*Tconst))*exp((q*Voc)/(n*k*Tconst));
24 Rs = -dVdI - 1/Xv;
25
26 %Find input references
27 Il = G*Isc/1000;
28 Ilt = Il * (1 + 0.00053*(Tmodel - Tconst));
29 Iot = Io*((Tmodel/Tconst)^(3/n))*exp((-q*Vg)/(n*k))*(1/Tmodel - 1/Tconst);
30
31 %Find Current
32 Vc = V / Nc;
33 I = 4;
34 for j = 0:25;
35     Ia = I - (((Ilt - I - (Iot*(exp((q*(Vc+I*Rs))/(n*k*Tmodel))-1)))) / (-1
36     - (Iot*(exp((q*(Vc+I*Rs))/(n*k*Tmodel))-1)*((Rs*q)/(n*k*Tmodel))));
37     I = Ia;
38     if I<=0
39         I = 0;
40     end
41 end
42 if V<0
43     I=0;
44 end

```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Bhatnagar and R. Nema, “Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 224–241, 2013.
- [2] C. Jaen, C. Moyano, X. Santacruz, J. Pou, and A. Arias, “Overview of maximum power point tracking control techniques used in photovoltaic systems,” in *Electronics, Circuits and Systems, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1099–1102.
- [3] T. ESRAM, P. L. Chapman *et al.*, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion EC*, vol. 22, no. 2, p. 439, 2007.
- [4] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, “Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433–443, 2013.
- [5] N. Onat, “Recent developments in maximum power point tracking technologies for photovoltaic systems,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2010, 2010.
- [6] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Solar energy materials and solar cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, 2006.
- [7] A. Medina, “Comparación de métodos de control de búsqueda del máximo punto de potencia (maximum power point tracking) en sistemas fotovoltaicos,” Ph.D. dissertation, Universidad Técnica Federico Santa María, 2014.
- [8] M. Jamil and M. Ehtesham, “Optimizing pv system performance considering the impacts of non-uniform irradiance and partial shading,” in *Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [9] N. Nambiar, R. S. Palackal, K. Greeshma, and A. Chitra, “Pv fed mli with ann based mppt,” in *Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 0293–0300.
- [10] J. Jiang, T. Huang, Y. Hsiao, and C. Chen, “Maximum power tracking for photovoltaic power systems,” *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 8, no. 2, p. 147, 2005.

- [11] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size inc mppt method for pv systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, 2008.
- [12] W. Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing mppt method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, vol. 3. Ieee, 2004, pp. 1957–1963.
- [13] M. Killi and S. Samanta, "Modified perturb and observe mppt algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 9, pp. 5549–5559, 2015.
- [14] F. Paz and M. Ordonez, "Zero oscillation and irradiance slope tracking for photovoltaic mppt," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 11, pp. 6138–6147, 2014.
- [15] Q. Mei, M. Shan, L. Liu, and J. M. Guerrero, "A novel improved variable step-size incremental-resistance mppt method for pv systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 6, pp. 2427–2434, 2011.
- [16] A. Pandey, N. Dasgupta, and A. K. Mukerjee, "Design issues in implementing mppt for improved tracking and dynamic performance," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*. IEEE, 2006, pp. 4387–4391.
- [17] S. Maity and P. K. Sahu, "Modeling and analysis of a fast and robust module-integrated analog photovoltaic mpp tracker," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 1, pp. 280–291, 2016.
- [18] K. A. Mustafa, A. Ahmad, M. U. Aziz, and A. Yousaf, "Implementation and performance analysis of two mppt algorithms based on push-pull converter," in *Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 2015*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [19] M. T. Ullah and M. H. Uddin, "Design, hardware implementation and performance analysis of conventional sepic converter for photovoltaic system applications," in *2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET)*. IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [20] F. Paz and M. Ordonez, "High-performance solar mppt using switching ripple identification based on a lock-in amplifier," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3595–3604, June 2016.
- [21] R. Bründlinger, N. Henze, H. Häberlin, B. Burger, A. Bergmann, and F. Baumgartner, "pren 50530—the new european standard for performance characterisation of pv inverters," in *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf*, 2009, pp. 3105–3109.
- [22] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the perturb-and-observe and incremental conductance mppt methods for pv systems," *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 3, no. 3, pp. 1070–1078, 2013.
- [23] H. Schmidt, B. Burger, U. Bussemas, and S. Elies, "How fast does an mpp tracker really need to be?" *Proc. of 24th EuPVSEC*, pp. 3273–3276, 2009.

- [24] O. Khan, W. Xiao, and H. H. Zeineldin, "Gallium-nitride-based submodule integrated converters for high-efficiency distributed maximum power point tracking pv applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 966–975, Feb 2016.
- [25] E. Romero-Cadaval, G. Spagnuolo, L. G. Franquelo, C. A. Ramos-Paja, T. Suntio, and W. M. Xiao, "Grid-connected photovoltaic generation plants: Components and operation," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 6–20, Sept 2013.
- [26] P. Chavez, "Diseño de un convertidor AC-AC para inversores multinivel," Ph.D. dissertation, Universidad Técnica Federico Santa María, 2004.
- [27] R. A. Gonzalez, M. A. Perez, H. Renaudineau, and F. Flores-Bahamonde, "Fast maximum power point tracking algorithm based on switching signals modification," in *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, April 2017, pp. 448–453.

