



Institución Universitaria

SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONTROL LINEAL Y NO LINEAL DE UN CONVERTIDOR DC-DC PARA UN SISTEMA PV.

Juan Diego Vélez Sánchez

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Maestría en Automatización y Control Industrial

Medellín

2015

SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONTROL LINEAL Y NO LINEAL DE UN
CONVERTIDOR DC-DC PARA UN SISTEMA PV.

JUAN DIEGO VÉLEZ SÁNCHEZ

Tesis presentada para optar al título de:

Magister en Automatización y Control Industrial

Directora:

MSc. Paula Andrea Ortiz Valencia

Línea de Investigación:

Grupo de Investigación en Integración de Soluciones con TICs.

Grupo de Investigación GIT

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Maestría en Automatización y Control Industrial

Medellín

2015

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, a mi esposa y demás personas que me han apoyado y acompañado en mi crecimiento personal, profesional y espiritual por los diversos ciclos de mi vida.

A mi padre ya fallecido le agradezco todo su apoyo, educación, carácter y principios bien inculcados con amor y sabiduría hasta el día de su partida.

A mis queridos hijos que son ahora un nuevo aliciente para mi vida, los valoro y quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la posibilidad de hacer posible esta terminación de trabajo de grado, brindándome salud y la posibilidad mental y económica para lograrlo.

Agradezco a mi directora de proyecto quien me aportó su sabiduría, apoyo, empuje y por sobre todo la paciencia para la elaboración final de este trabajo.

Agradezco a la institución dado que nos dio la oportunidad de hacer el estudio, nos apoyó con sus maestros, asesores, recursos y funcionarios para el logro y desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	8
RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1 Revisión a la literatura de los algoritmos de máxima potencia (MPPT).....	16
2.2 Revisión de literatura a sistemas de control en modos deslizantes	18
3. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	21
3.1 Modelo del panel fotovoltaico.....	21
3.2 Modelo del convertor DC-DC tipo Boost.....	26
3.3 Algoritmo MPPT.....	30
3.3.1 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O).....	30
3.3.2 Algoritmo Conductancia Incremental (IC)	31
4. DISEÑO DEL CONTROLADOR CONVENCIONAL PID.....	36
5. DISEÑO DEL CONTROLADOR EN MODOS DESLIZANTES.....	42
5.1 Introducción al Control por modos deslizantes	42
5.1 Aplicación del control en modos deslizante al PV	46
6. COMPARACIÓN DEL CONTROL CONVENCIONAL VS EL CONTROL EN MODOS DESLIZANTES	51
CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de un sistema fotovoltaico	21
Figura 2. Circuito eléctrico equivalente para una celda fotovoltaica	22
Figura 3. Respuesta I-V para un $S=1000\text{W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$	25
Figura 4. Respuesta P-V para un $S=1000\text{W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$	25
Figura 5. Modelos simplificados alrededor del MPP	26
Figura 6. Convertidor Boost sin pérdidas	27
Figura 7. Sistema con $u=1$	28
Figura 7a. Sistema con $u=0$	28
Figura 7b. Respuesta de Bode	30
Figura 8. Algoritmo P&O	31
Figura 9. Algoritmo IC	32
Figura 10. Respuesta P&O sin perturbaciones en la carga	33
Figura 11. Respuesta P&O con perturbaciones en la carga	33
Figura 12. Respuesta IC sin perturbaciones en la carga	34
Figura 13. Respuesta IC con perturbaciones en la carga	34
Figura 14. Análisis de estabilidad en lazo cerrado	38
Figura 15. Respuesta del sistema linealizado	38
Figura 16. Estructura del sistema	39
Figura 17. Montaje en Simulink	39
Figura 18. Implementación en PSIM	40
Figura 19. Respuesta del PVM para un controlador PID	41
Figura 20. Control equivalente	45
Figura 21. Estrategia de control propuesta	46
Figura 22. Modelo de pequeña señal	48
Figura 23. Control en modos deslizantes	49
Figura 24. Diagrama de bloques del sistema	50
Figura 25. Respuesta del PVM para un controlador en modos deslizantes	51
Figura 26. Comparación entre el control PID y Modos deslizantes para voltaje	52
Figura 27. Comparación entre el control PID y Modos deslizantes para Potencia	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características eléctricas del panel fotovoltaico FV9512	23
Tabla 2. Valores obtenidos en simulación mediante Matlab.....	24

RESUMEN

Con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas de generación basados en paneles fotovoltaicos, este trabajo presenta el modelo de dos de los sistemas fotovoltaicos (FV) más usados, uno lineal y el otro no lineal, teniendo en cuenta la participación del convertidor dc-dc que interactúa con el módulo fotovoltaico. Este modelo es expresado en espacios de estados para simplificar su análisis y encontrar el diseño del controlador. Las estrategias de control utilizadas fueron asociadas con algoritmos de búsqueda del Máximo Punto de Potencia (MPP), producido por el panel fotovoltaico.

Para el diseño de los controladores se usó en primera instancia un control lineal PID y de otro lado un control no lineal por modos deslizantes. En el caso del control convencional PID este mostró un correcto funcionamiento en el punto de operación, pero cuando el punto de operación cambia no se puede garantizar que el sistema responda ante las mismas condiciones de diseño, tanto para el estado transitorio como para el estado estable. El control PID se comparó con el diseño de modos deslizantes el cual observó responde bien para un amplio rango de operación, sin embargo, en este caso se requiere de un control adicional PI, con el fin de garantizar la estabilidad del sistema este debe ser diseñado para el peor caso (periodo más largo). Los resultados obtenidos son presentados en

simulación, mostrando un buen desempeño de este tipo de control frente al convencional PID.

1. INTRODUCCIÓN

Según el informe publicado por “Proure” [1], se espera que la demanda mundial de energía se habrá duplicado para el 2050, como consecuencia del inevitable crecimiento de la población mundial, la economía global, la urbanización continua, así como la demanda resultante del aumento de la movilidad y otros servicios energéticos dependientes; lo cual hace estrictamente necesario reducir como mínimo a la mitad las emisiones de gases de efecto invernadero para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 2 grados Celsius, lo cual se dificultará si se continúa con los métodos de generación tradicionales como por ejemplo el carbón, cuya extracción, almacenamiento y utilización generan grandes emisiones de CO₂ que están disminuyendo la calidad de vida en el planeta [2]. El impacto ambiental que genera la producción de energía por métodos tradicionales, y la inevitable necesidad de la misma han generado que se convierta en un tema de alta prioridad para la agenda política de muchos países como Japón, Rusia y Alemania, convirtiéndose en prioridad para primeros ministros y presidentes; es por esta razón que la mirada de los líderes mundiales se ha ido dirigiendo cada vez hacia la producción de energías limpias por medio renovables no convencionales, dentro de los que se encuentran la hidráulica, eólica, geotérmica, biomasa y solar. [3], dado que los recursos renovables representan una fuente de energía inagotable que los hace competitivos frente a

los recursos no renovables; por ejemplo, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en un alternativa que dada una inversión inicial relativamente elevada permite una recuperación de costos a mediano y largo plazo, con el valor agregado del bajo impacto ambiental generado dado que los paneles solares encargados de convertir la luz solar en energía eléctrica se fabrican a base de silicio que es muy abundante en la naturaleza, no siendo necesario explotar yacimientos de forma intensiva e invasiva; por otro lado, es destacable que las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica cubren una amplia gama de posibilidades tales como: viviendas alejadas de la red eléctrica convencional, electrificación rural, iluminación de espacios públicos mediante lámparas autónomas, calles, monumentos, refugios de montaña, alumbrado de vallas publicitarias. Con la alimentación fotovoltaica de luminarias se evita la realización de zanjas, canalizaciones, sin necesidad de adquirir derechos de paso, otras como la posibilidad de aporte a la conexión a la red eléctrica distribuida. Otras aplicaciones se dan en el sector agrícola y ganadera, por ejemplo, su uso en sistemas de riego, iluminación de invernaderos y granjas, suministro eléctrico a sistemas automáticos de ordeño, refrigeración, limpieza de aguas, sumado a otros campos como señalización de vías de transporte y suministro eléctrico a equipos de comunicaciones desatendidos, equipos remotos de navegación aérea, señales del aeródromo y señalización de faros y boyas en el sector marítimo, señalización de torres, vías de ferrocarril, repetidores desatendidos de radio, televisión y telefonía, sistemas telefónicos apartados, sistemas de recepción satelital, sistemas de telemetría, estaciones de tomas de tele datos, equipos sismológicos,

estaciones meteorológicas, dispositivos de señalización y alarma, entre muchas otras aplicaciones de residencias e industrias.

De acuerdo con las mejores estimaciones, las grandes inversiones en la infraestructura energética (22 trillones de dólares) se llevarán a cabo hasta el año 2030 para satisfacer la demanda energética global, alrededor de la mitad de estas inversiones corresponderán al sector eléctrico, en su mayoría en los países desarrollados que en el año 2030 alcanzarán aproximadamente el 80% de la capacidad de generación global instalada, una cuarta parte corresponderá al sector petrolífero principalmente en la exploración y desarrollo y la otra cuarta parte en el sector del gas, haciendo hincapié en el “*upstream*” y el GNL. (Energía, 2008).

La eficiencia energética debe convertirse en prioridad global cada vez mayor en términos de producción y consumo; la conservación energética también deberá poner en evidencia las posibles estrategias para incrementar el suministro energético disponible; más del 50% de la energía total demandada en 2050 debería conseguirse mediante el desarrollo de alternativas ambientalmente aceptables para conservar un equilibrio ambiental y sostenible en el planeta. Tras el análisis de los resultados de las proyecciones a futuro, se evidencia la necesidad de enfocar proyectos de investigación que busquen generar nueva tecnología orientada a optimizar la extracción, control, mejor aprovechamiento y distribución de la energía generada de manera limpia. [3]

Con el propósito de trabajar en esta área del mejor aprovechamiento y optimización de los recursos energéticos, en especial de sistemas fotovoltaicos, en este trabajo se propone la simulación y evaluación de un control lineal frente a otro no lineal para un convertidor dc-dc aplicado a un sistema fotovoltaico (FV). Cuyo objetivo general es: “Determinar la viabilidad y efectividad mediante simulaciones del método de control no lineal denominado de “modos deslizantes” como solución al control del convertidor dc-dc de un sistema de panel fotovoltaicos frente al común uso de técnicas de control clásico”.

Y los objetivos específicos son:

- Obtener el modelo matemático del sistema panel-convertidor-carga que describa su funcionamiento.
- Definir las características más importantes del control por modos deslizantes orientado a convertidores DC-DC tipo Boost para sistemas de paneles fotovoltaicos.
- Evaluar el comportamiento y estabilidad de un control PID para un sistema fotovoltaico alrededor de un punto de trabajo frente a las perturbaciones y cambios causados en el panel y la carga.
- Diseñar y evaluar un control por modos deslizantes que cumpla con la maximización de la potencia entregada y sea capaz de rechazar las perturbaciones y cambios en el panel y la carga DC.
- Comparar la relación entre las técnicas de control mediante PID y modos deslizantes tomando como indicador la mayor potencia transferida a la carga y la mayor inmunidad a los cambios externos.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos, el trabajo se encuentra organizado en seis (6) capítulos, en el primer capítulo se presentó la introducción de este trabajo, en el capítulo dos (2) se hará una revisión al estado del arte con el fin de dar cumplimiento al primer objetivo específico; en el tercer (3) capítulo se realiza el análisis matemático al modelo del panel fotovoltaico; en el cuarto (4) capítulo se diseña el controlador convencional PID y se realiza un análisis de resultados, en el quinto (5) capítulo se diseña el controlador no lineal por modos deslizantes y se realiza un análisis de resultados y finalmente en el capítulo seis (6) se realiza una comparación entre el control convencional y el control en modos deslizantes llevando finalmente a presentar las conclusiones y referencias respectivas.

2. ESTADO DEL ARTE

El campo de la generación de energía solar por medio de módulos fotovoltaicos (FV) ha despertado el interés del mundo ya que la energía solar es una opción prometedora de las energías renovables [4], pero la eficiencia de conversión de módulos FV comerciales es todavía bastante bajo y la salida de potencia del sistema FV aún falta mejorarse dado su comportamiento no lineal y dependencia de las condiciones ambientales externas, tales como temperatura e irradiación solar [5]; debido a las no linealidades que presenta el sistema, los métodos tradicionales de control del voltaje del arreglo fotovoltaico (FV) se basan en la aproximación de su modelo por linealización, limitando su validez a vecindades alrededor del punto de máxima potencia [6]; ésta característica, pone en riesgo el desempeño adecuado del sistema en todo su rango de operación, por lo que es necesario diseñar técnicas de control que garantice el mejor y más óptimo funcionamiento del panel FV.

2.1 Revisión a la literatura de los algoritmos de máxima potencia (MPPT)

Monitorear o realizar un seguimiento al punto de máxima potencia es una técnica que permite obtener la máxima potencia posible disponible del sistema FV; en sistemas fotovoltaicos el rendimiento depende principalmente de circunstancias externas ambientales como la irradiancia y temperatura presentes en el panel, adicionalmente a estos, los cambios y fluctuaciones en la carga generan no linealidades en la relación entre la corriente y el voltaje de panel FV [7], [8]. Por lo

tanto, la implementación de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, de sus siglas en inglés MPPT (Maximum Power Point Tracking) se hace necesario para asegurar que el punto de funcionamiento del panel, coincida con el punto de máxima potencia (MPP) que él pueda entregar según las condiciones externas ya mencionadas. Diferentes algoritmos han sido desarrollados para este propósito, actualmente se pueden contar más de 19 técnicas los cuales varían dependiendo de la complejidad y el número de sensores necesarios para su funcionamiento, además de características asociadas como: su velocidad de convergencia, costo, rango de efectividad, entre otros [4].

Dos de los algoritmos o técnicas más utilizadas para encontrar el MPPT son: *Perturbar y Observar (P&O - Perturb & Observe)* y el de *Conductancia Incremental (IC – Incremental Conductance)*; la razón de la popularidad de ambos es la sencillez de su implementación y su relativo buen desempeño [8],[9]. Otras técnicas basadas en las cantidades fraccionales del voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito (*Fractional Open Circuit – Voltage, Fractional Short-Circuit Current*), tienen bajo costo y simpleza en su implementación debido a que sólo requieren de un sensor de voltaje o de corriente [10], pero su eficacia es baja en comparación con las técnicas de optimización en línea como es el caso por ejemplo de las ya mencionadas P&O e IC [11]. Por su parte, aún otras técnicas basadas en métodos inteligentes como redes neuronales y lógica difusa representan otra opción que ofrece velocidad y eficacia en el seguimiento del punto de máxima potencia ante variaciones de la irradiación solar [12],[13], pero que sin embargo, su complejidad y costo de implementación son altos en

comparación nuevamente con el P&O e IC, lo cual lo hacen poco atractivos al usuario o integrador final.

2.2 Revisión de literatura a sistemas de control en modos deslizantes

Debido a la naturaleza no lineal de los sistemas fotovoltaicos, los métodos convencionales de control de voltaje del panel se basan en la aproximación de su modelo por linealización, limitando su validez a las vecindades alrededor del punto de máxima potencia [6]. En [14] Con el objetivo de mitigar el efecto de las perturbaciones de la carga, mediante un análisis analítico se compensa el ciclo de trabajo. El método propuesto solo es válido para un punto de operación ($F=100\text{Hz}$). Ésta característica, pone en riesgo el desempeño adecuado del sistema en todo su rango de operación, por lo tanto, las técnicas no-lineales como el control por modos deslizantes, se convierten en alternativas viables para regular el voltaje del arreglo foto voltaico FV, *(que seguiremos indicando como PV en vez de FV, por su alta incidencia en artículos internacionales, esta última sigla (PV) viene del inglés de Photo Voltaics)* tal como se describe en [15], [16], donde se usa el control por modos deslizantes para encontrar el punto de máxima potencia, y la superficie de deslizamiento es diseñada a partir del error de la potencia de salida. De forma similar en [17] el control por modos deslizantes se asocia a un MPPT basado en P&O para incrementar la robustez del sistema y su tiempo de respuesta mientras que en [18] y en [19] se presenta el uso de la técnica *extremum-seeking* para el mismo propósito. Además de la técnica MPPT a usar, otro aspecto importante es la arquitectura de la misma, en este caso básicamente

existen dos tipos de arquitectura para seguir el punto de máxima potencia: la arquitectura centralizada y la arquitectura distribuida.

- En la arquitectura centralizada se utiliza un único convertidor dc/dc con un controlador MPPT, lo que implica ventajas como bajo costo y fácil implementación [20], pero también desventajas como pérdidas y baja eficiencia ante condiciones climáticas de nubosidad parcial sobre la superficie del arreglo de paneles [21].
- La arquitectura distribuida consiste en la implementación de un algoritmo MPPT para cada módulo PV, y por tanto debe existir un convertidor dc/dc para cada módulo PV del sistema [22]. Esta arquitectura resulta más costosa debido a la cantidad de dispositivos que se deben utilizar pero permite obtener un mejor desempeño del sistema ante condiciones de desigualdad por modulo conocido esto como "*mismatching*". (Barchowsky, Parvin, Reed, Korytowski, & Grainger, 2012). Así mismo, permite la incorporación de módulos fotovoltaicos con diferente inclinación y orientación, haciendo posible la implementación de nuevas arquitecturas de arreglos fotovoltaicos y la instalación de sistemas de protección inteligente para aislar módulos que estén operando en condiciones deficientes debido a fallas y/o poca luminosidad.

La solución propuesta de esta trabajo está basado en dos trabajos previos publicados en [23], [24] y, donde se diseña un control en modos deslizantes con el fin de regular el voltaje del panel fotovoltaico y mitigar las oscilaciones de tensión producida por la carga, las cuales afectan el comportamiento del

sistema. En el primer caso [23], con el fin de regular el voltaje del PV y mitigar las perturbaciones en la carga, se implementa un control por modos deslizante (SMC) donde se regula la corriente de entrada del convertidor boost a través de la corriente del inductor. El diseño del sistema se realiza mediante 3 controladores en cascada, donde el algoritmo P&O provee la señal de referencia a un controlador PI, y la salida de este genera la corriente de referencia al control en modos deslizantes, encargado de regular la corriente de entrada. De forma similar, en el segundo caso [24], por medio de un control por modos deslizantes se regula el voltaje del PV y se mitigan las perturbaciones en la carga. El controlador por modos deslizante (SMC) regula la corriente de entrada del convertidor boost a través de la medición de la corriente del capacitor, esta solución presenta una ventaja importante con respecto a la solución reportada en [23], ya que al linealizar el sistema la función de transferencia no depende de los cambios de irradiación y/o temperatura, garantizándose un comportamiento deseado en todo rango de operación.

3. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

El sistema fotovoltaico está compuesto generalmente por los siguientes elementos: el panel fotovoltaico el cual produce una potencia DC que luego se encuentra regulado mediante un algoritmo que busca el punto de máxima potencia, conocido como se indicó anteriormente como el MPPT, pero para poder llevar a cabo el seguimiento del punto de máxima potencia se necesita de un conversor DC-DC. Por sus características el de tipo conversor elevador es el más utilizado debido a que los bajos niveles de voltaje que exhibe el módulo fotovoltaico (de sus siglas en inglés PVM), deben ser elevados a niveles más altos de voltaje para la entrada requerida por el típico inversor conectado a la red. En la Figura 1 se muestra el sistema fotovoltaico con sus comunes etapas de control y seguimiento de potencia.

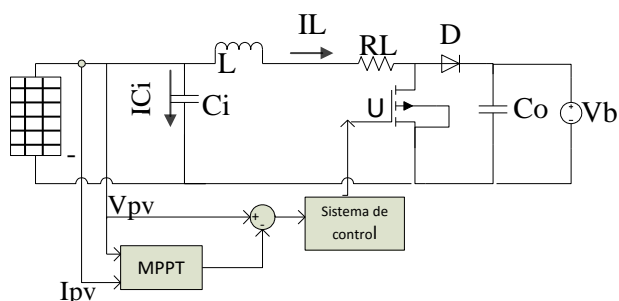


Figura 1. Estructura general de un sistema fotovoltaico

3.1 Modelo del panel fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico típico está compuesto por una asociación de celdas fotovoltaicas que mediante el efecto fotovoltaico transforma la energía del sol en energía eléctrica; una celda fotovoltaica a mayor irradiancia recibida del sol genera

una mayor interacción entre los átomos, por ende una mayor diferencia de potencial o voltaje entre sus terminales [8].

Diferentes modelos han sido utilizados para definir el comportamiento del panel, que normalmente consisten en ecuaciones no lineales debido a las variables físicas involucradas en la operación del módulo foto-voltaico (PVM). Uno de los modelos más usado es el modelo de simple diodo mostrado en la Figura 2, el cual representa en forma precisa el panel monocristalino.

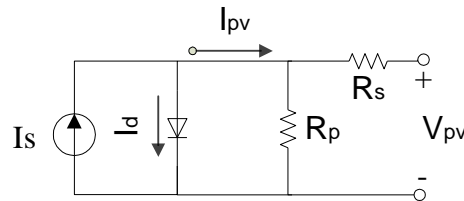


Figura 2. Circuito eléctrico equivalente para una celda fotovoltaica

Aplicando la ley de Kirchoff se obtiene:

$$I_p = I_{pv} = I_s - I_d \quad (1)$$

donde I_s es la corriente generada por la luz incidente en la célula, y depende tanto de la irradiancia solar como de la temperatura del panel que al manipular se puede describir por (2): [25]

$$I_s = I_{s, stc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) + \alpha_i (T_{pv} - T_{stc}) \quad (2)$$

El subíndice *stc* se refiere a las condiciones estándares, G es la irradiancia solar, T_{pv} es la temperatura en el panel fotovoltaico y α_i es una coeficiente térmico de corriente [25].

La I_d es la corriente en el diodo, la cual se puede encontrar aplicando el modelo de Shockley del Diodo.

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{qV_{pv}}{nkT}} - 1 \right) \quad (3)$$

donde I_{sat} es la corriente de saturación, q la carga del electrón, T es la temperatura absoluta de la unión, k es la constante de Boltzmann, n : es el coeficiente de emisión y dependiente del proceso de fabricación del diodo, V_{pv} es la tensión del panel fotovoltaico. Reemplazando (2) y (3) en (1) se tiene un modelo simplificado de una célula fotovoltaica expresado en (4).

$$I_p = I_{s, stc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) + \alpha_i (T_{pv} - T_{stc}) - I_{sat} \left(e^{\frac{qV_{pv}}{nkT}} - 1 \right) \quad (4)$$

Como se observa este modelo es no lineal por el exponencial involucrado y para solucionar la ecuación se requiere un método matemático denominado LambertW, la cual requiere alta capacidad de cómputo.

Aunque solo se va a trabajar en simulación, se seleccionó un panel fotovoltaico real, de la empresa Hybritec referencia FV9512, cuyas características eléctricas a una irradiancia de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y a una $T=25^\circ\text{C}$, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características eléctricas del panel fotovoltaico FV9512

		Valor	% Tolerancia
Potencia Máxima	P_{Max}	95W	$\pm 3\%$
Voltaje a máxima potencia	V_{MP}	18.19V	$\pm 5\%$

Voltaje en circuito abierto	V_{OC}	22.68	$\pm 5\%$
Corriente a máxima potencia	I_{MP}	5.23A	$\pm 5\%$
Corriente en corto circuito	I_{SC}	5.57A	$\pm 5\%$
Eficiencia del Panel	P%	14.5%	

El modelo se valida en Matlab obteniendo la respuesta de la Figura 3 y Figura 4 para un nivel de irradiancia de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y a una $T=25^\circ\text{C}$, los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 2, donde se evidencia que los errores obtenidos se encuentran en el rango de tolerancia que da el fabricante.

Tabla 2. Valores obtenidos en simulación mediante Matlab.

		Valor	% error
Potencia Máxima	P_{Max}	95.36 W	0.38%
Voltaje a máxima potencia	V_{MP}	18.06 V	0.7147%
Corriente a máxima potencia	I_{MP}	5.282 A	1.07%

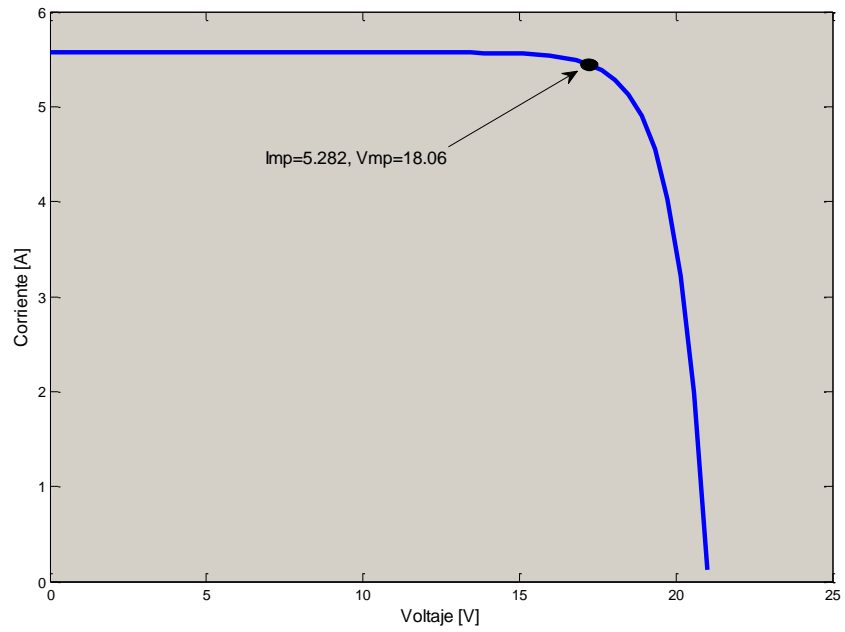


Figura 3. Respuesta I-V para un $S=1000\text{W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$

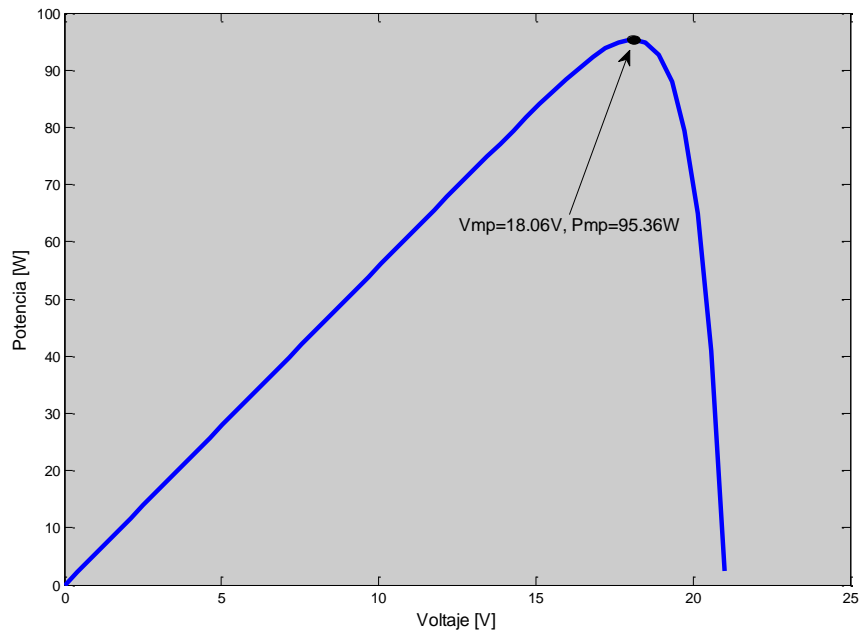


Figura 4. Respuesta P-V para un $S=1000\text{W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$

Para efectos de control y buscando simplicidad en el diseño de estos se usan modelos simplificados; existen 3 modelos comúnmente aceptados en la literatura para representar el modulo fotovoltaico PVM alrededor del MPP, estos son: resistencia diferencial [26], equivalente Norton [27] y equivalente Thevenin [28], dichos modelos se muestran en la Figura 5.

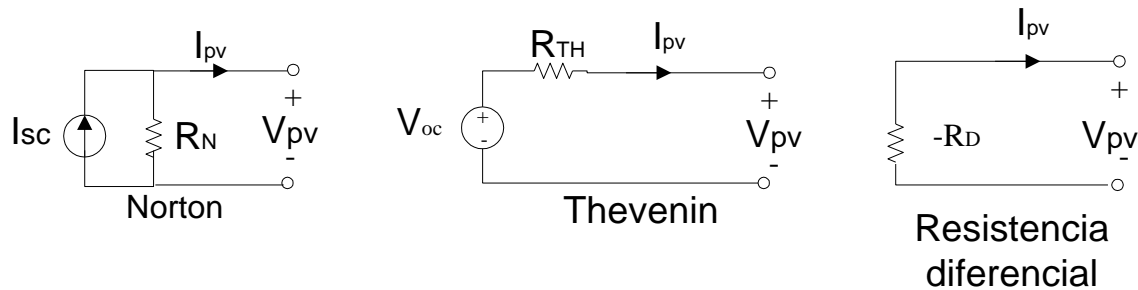


Figura 5. Modelos simplificados alrededor del MPP

Donde el modelo de resistencia diferencial predice muy bien en el punto de máxima potencia, el equivalente Thevenin predice el perfil del panel después del punto de máxima potencia y el equivalente Norton predice el perfil del panel antes del punto de máxima potencia. En este trabajo se usará el modelo simplificado equivalente Norton ya que permite perturbar la corriente de cortocircuito la cual es proporcional a la irradiancia, parámetro que genera más impacto sobre el comportamiento eléctrico del PV.

3.2 Modelo del convertor DC-DC tipo Boost

Como se mencionó anteriormente, debido a los bajos niveles de voltaje que exhibe el PVM, estos deben ser elevados a niveles más altos de voltaje para la entrada requerida por el inversor clásico conectado a la red eléctrica, donde la topología Boost es la más usada en los paneles PV conectados a la red. [26],[29],[30],[31].

La Figura 6 representa el circuito del convertidor, el cual tiene como función mantener una tensión de salida regulada incluso teniendo variaciones en el voltaje de entrada o en la impedancia de la carga. Las características de este circuito permiten que sea especialmente utilizado en fuentes de alimentación conmutadas, sistemas alimentados por bancos de baterías conectadas en serie (lo cual genera variaciones en el voltaje total), cumpliendo también un papel muy importante en los sistemas de energías renovables debido a que las fuentes primarias de estos sistemas no son generalmente controladas por el hombre y por lo tanto sus fluctuaciones son impredecibles.

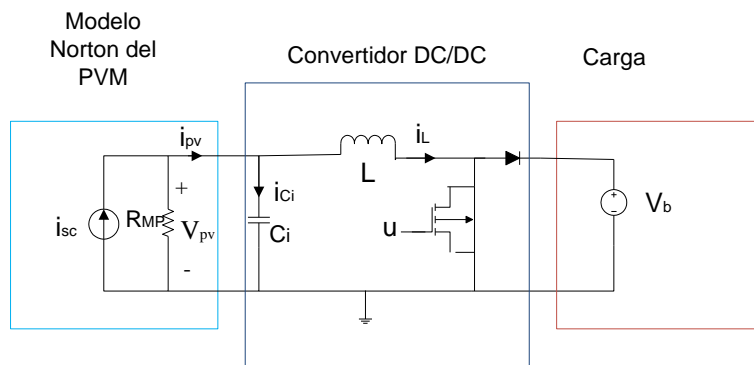


Figura 6. Convertidor Boost sin pérdidas

Aplicando la leyes de Kirchoff se tiene:

Para $u=1$ (Conducción).

$$V_L = V_{C_i} \tag{5}$$

$$i_{C_i} = C_i \frac{dV_{C_i}}{dt} = i_{pv} - i_L$$

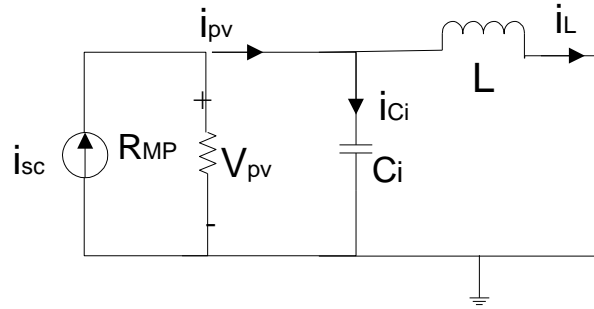


Figura 7. Sistema con $u=1$

Para $u=0$ (No conducción).

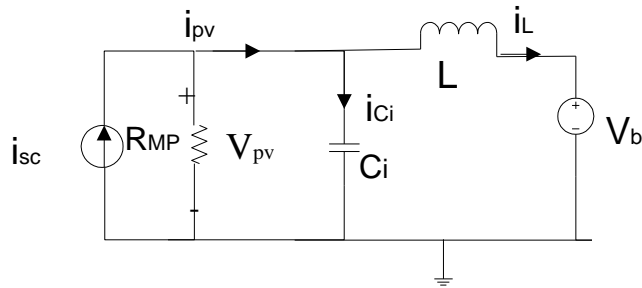


Figura 8a. Sistema con $u=0$

$$V_L = V_{Ci} - V_b \quad (6)$$

$$i_{Ci} = C_i \frac{dV_{Ci}}{dt} = i_{pv} - i_L$$

Las ecuaciones diferenciales que definen el modelo están dadas por (7)

$$f1 = \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{Ci} - V_b(1 - u)) \quad (7)$$

$$f2 = C_i \frac{dV_{Ci}}{dt} = i_{pv} - i_L = \frac{1}{C_i} \left(i_{sc} - \frac{V_{Ci}}{R_{pv}} - i_L \right)$$

El sistema es claramente no lineal, por lo que se requiere calcular las matrices jacobianas para obtener un modelo lineal (8) alrededor del punto operación.

$$\dot{X} = A_m X + B_m U \quad (8)$$

$$Y = C X + D_m U$$

La realización de espacio de estado se caracteriza por los vectores dados en (9)

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_{Ci} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde el modelo en espacio de estado para el sistema descrito en (7) está dado por (10).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_i} & -\frac{1}{C_i R_{pv}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} V_b/L & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_i} \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1], \quad D = 0 \quad (10)$$

Para validar el modelo propuesto, una comparación entre el modelo matemático y las respuestas en frecuencia del circuito no lineal del conversor DC-DC será implementa en PSIM, con los siguientes parámetros $u = 0.2424, L = 100\mu H, C_i = 50\mu f, R_{pv} = 60.63\Omega$, con una $f_s = 60Hz$. La respuesta del sistema se observa en la Figura 7 con lo que se comprueba la validez del modelo matemático.

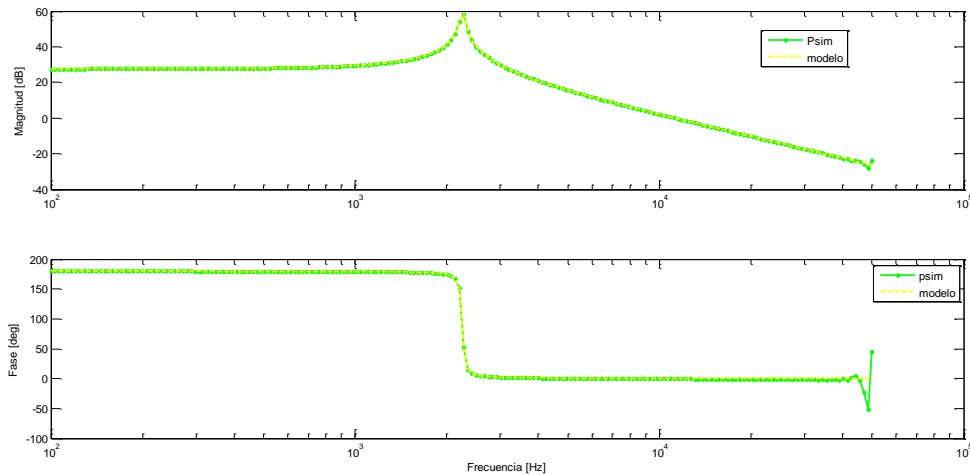


Figura 9b. Respuesta de Bode

3.3 Algoritmo MPPT

A continuación se analizan los dos algoritmos más utilizados para el seguimiento del punto de máxima potencia MPP, como se indicó anteriormente estos son el denominado Perturbar y Observar (P&O) y el denominado Conductancia Incremental (IC), con el fin de determinar con cuál de los dos algoritmos se trabajará en esta investigación.

3.3.1 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O)

El método se basa en modificar (perturbar) la tensión o voltaje a la entrada del inversor, y observar la variación de la potencia de salida. El incremento o decremento de tensión modifica la potencia de salida, por lo tanto, si hay un aumento en la potencia, la perturbación debe continuarse realizando en el mismo sentido para alcanzar el MPP, ahora, si con el mismo estímulo hay una

disminución en la potencia, la perturbación debe ser invertida, el algoritmo se muestra en la Figura 10. [30], [32], [24]

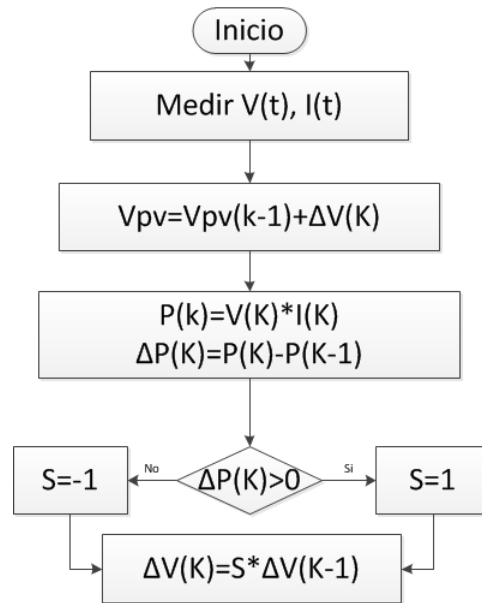


Figura 10. Algoritmo P&O

3.3.2 Algoritmo Conductancia Incremental (IC)

El MPP se puede rastrear mediante la comparación de la conductancia instantánea ($\frac{I}{V}$) a la conductancia incremental ($\frac{\Delta I}{\Delta V}$), donde V_{ref} es la tensión de referencia por el que la red obliga a operar al panel FV. El algoritmo emplea decrementos o incrementos de tensiones e intensidades para realizar un seguimiento del nuevo MPP. [33], [34], [35]. El algoritmo emplea la variación de la potencia de salida con respecto a la tensión, la cual se expresa en (11)

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (11)$$

En el punto MPP la variación de la potencia con respecto a la tensión es nula. En este caso el cociente entre los valores de intensidad y tensión tiene un valor

opuesto al cociente entre los incrementos de intensidad y tensión, en caso de no coincidir estos cocientes, la diferencia entre sus valores nos indica que nos hemos desplazado del MPP y además esto nos aporta información sobre el sentido de esa desviación. En la Figura 11 se presenta el algoritmo.

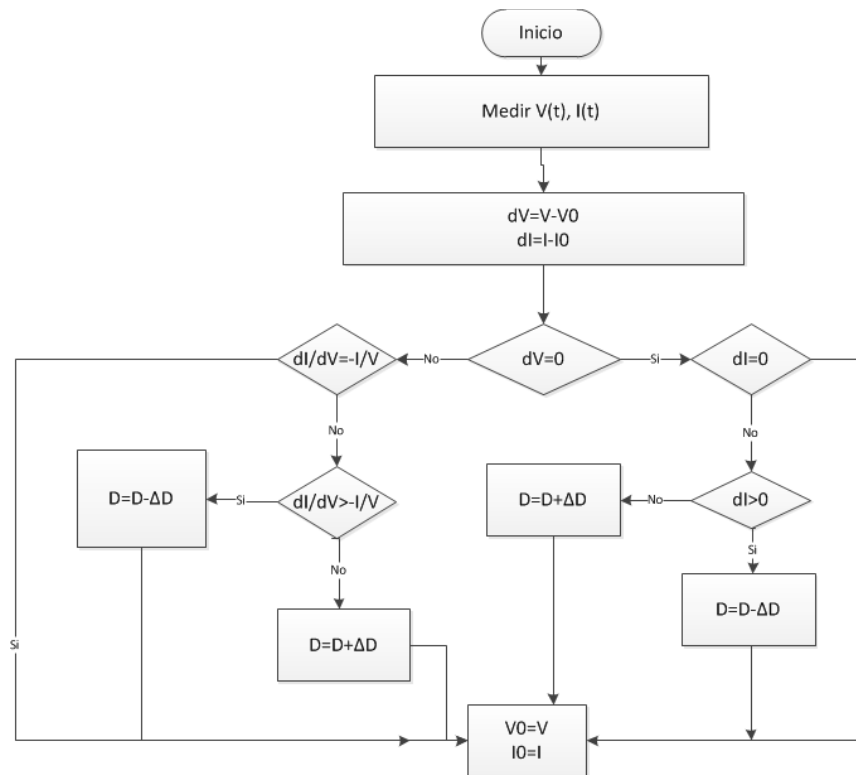


Figura 11. Algoritmo IC

Los algoritmos propuestos son implementados en Matlab con el fin de analizar el comportamiento, en las Figura 12 y 11 se analiza el comportamiento del algoritmo P&O sin y con perturbación en la carga respectivamente y en la Figura 14, Figura 15 se analiza el comportamiento del algoritmo IC sin y con perturbación en la carga respectivamente, luego se observa que el algoritmo IC presenta un mejor comportamiento siendo más estable y rápido, además el algoritmo P&O presenta

oscilaciones permanentes ante perturbaciones en el sistema, por esta razón en este trabajo se utilizará el IC más que el inicialmente propuesto P&O.

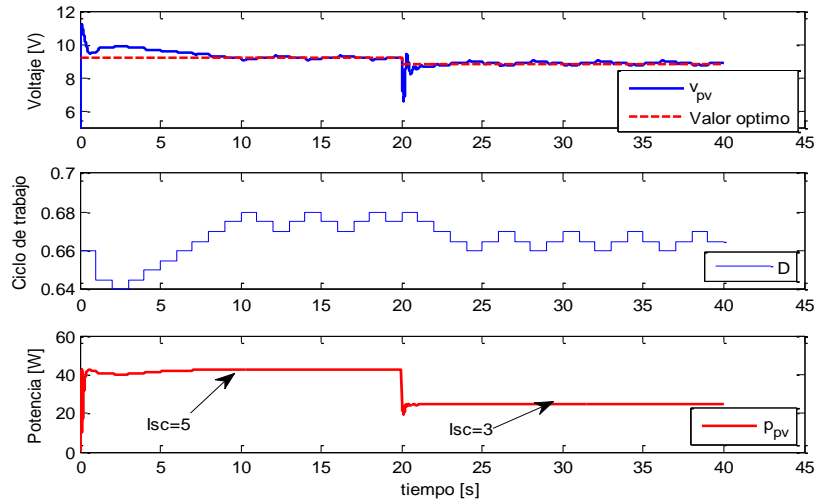


Figura 12. Respuesta P&O sin perturbaciones en la carga

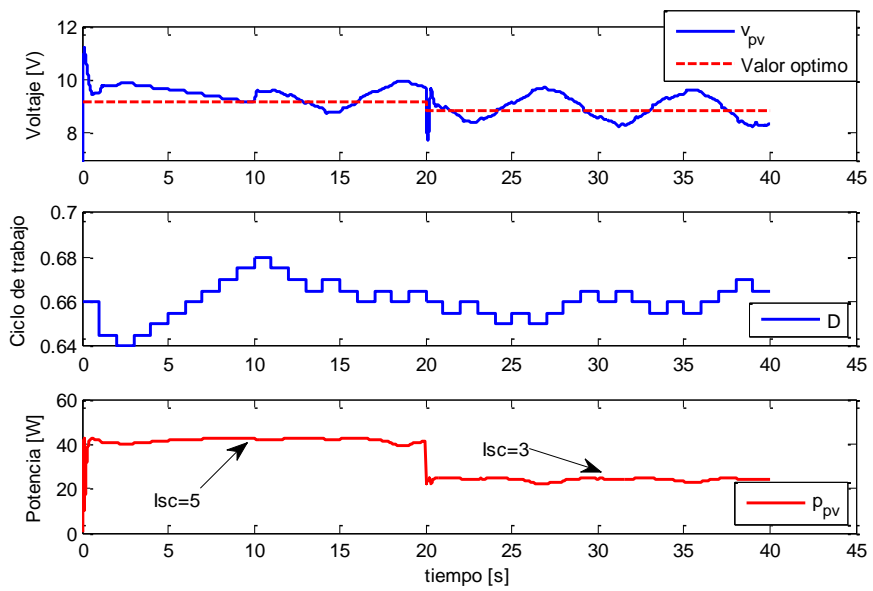


Figura 13. Respuesta P&O con perturbaciones en la carga

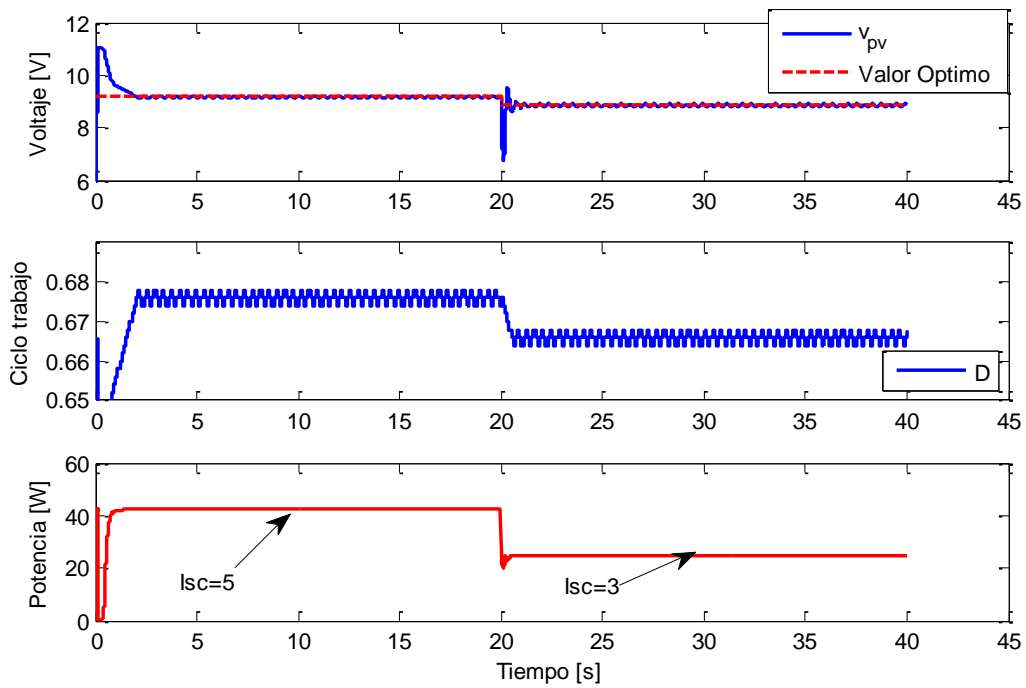


Figura 14. Respuesta IC sin perturbaciones en la carga

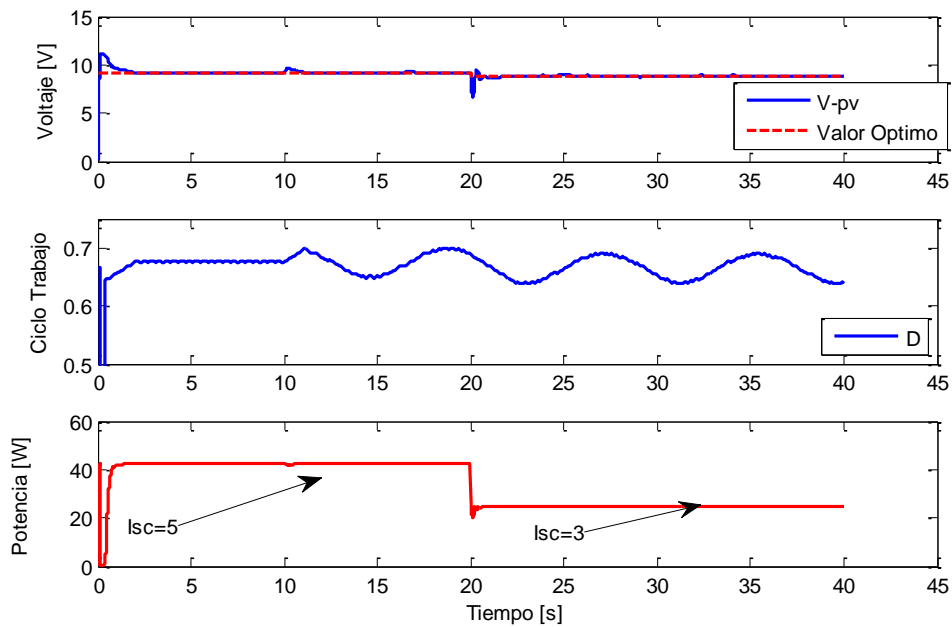


Figura 15. Respuesta IC con perturbaciones en la carga

Hay que tener en cuenta que en ambos algoritmos hay dos parámetros a ser optimizados que son el tiempo en que se realiza la perturbación y el paso en el

que se va hacer la perturbación de voltaje; la selección de un paso alto de perturbación en el voltaje puede generar pérdidas en estado estacionario, pero un paso bajo puede generar pérdidas en estado transitorio, lo que con lleva con una menor eficiencia para llegar al punto de máxima potencia; a su vez un tiempo de perturbación alta genera mayores pérdidas de potencia y un tiempo bajo requiere mayor costo computacional.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR CONVENCIONAL PID

Para diseñar el sistema de control se parte del sistema de espacio de estado encontrado en (10), donde se puede analizar que el sistema es completamente controlable y observable ya que el rango de las matrices de controlabilidad y observabilidad mostradas en (12) es igual a 2.

$$ctrb = \begin{bmatrix} 240e3 & 0 & -7576 & 0 & 200e6 & 0 \\ 0 & 20e3 & 0 & -4.8e9 & -659e6 & 1512e4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$obs = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -20e3 & -329.8696 \end{bmatrix}$$

Encontrar que el sistema sea completamente controlable es un resultado importante, ya que garantiza que es posible regular el sistema fotovoltaico, por otra parte, la observabilidad completa es muy importante e interesante ya que da la posibilidad del diseño de observadores de estado, lo cual permitiría reemplazar sensores costosos.

Una vez analizado si el sistema era completamente observable y/o controlable, se procede con el diseño del controlador convencional PID, actuando directamente sobre el ciclo de trabajo del convertidor DC-DC, el cual ha sido diseñado para regular la tensión del PVM, para la cual se calcula la función de transferencia entre la tensión de módulo fotovoltaico y el ciclo de trabajo $V_{c_i}(s)/u(s)$ mostrada en (13)

$$G_p(s) = -\frac{R_{pv} V_b}{L C_i R_{pv} S^2 + L S + R_{pv}} \quad (13)$$

Reemplazando los valores se tiene que la función de transferencia está dada por (14)

$$G_p(s) = -\frac{4.8e9}{S^2 + 329.9 S + 2e8} \quad (14)$$

Para la función de transferencia dada en (14) se diseña un control PID con filtro en la parte derivativa, para que el sistema responda con un MP<5% y ts< 0.006 seg, utilizando la técnica del lugar geométrico de las raíces [36], donde se obtiene la función de transferencia del controlador dada en (15).

$$G_c(s) = -\frac{10.1302(s + 2.25e4)(s + 1423)}{s(s + 8.453e5)} \quad (15)$$

Para analizar la estabilidad se encuentra la función de transferencia en lazo cerrado y se ubican los polos y los ceros en el plano real-imaginario, como se muestra en la Figura 16, se puede observar que todos los polos del sistema se encuentran en el semiplano izquierdo, con lo que se comprueba la sí estabilidad del sistema según acorde a la teoría del control.

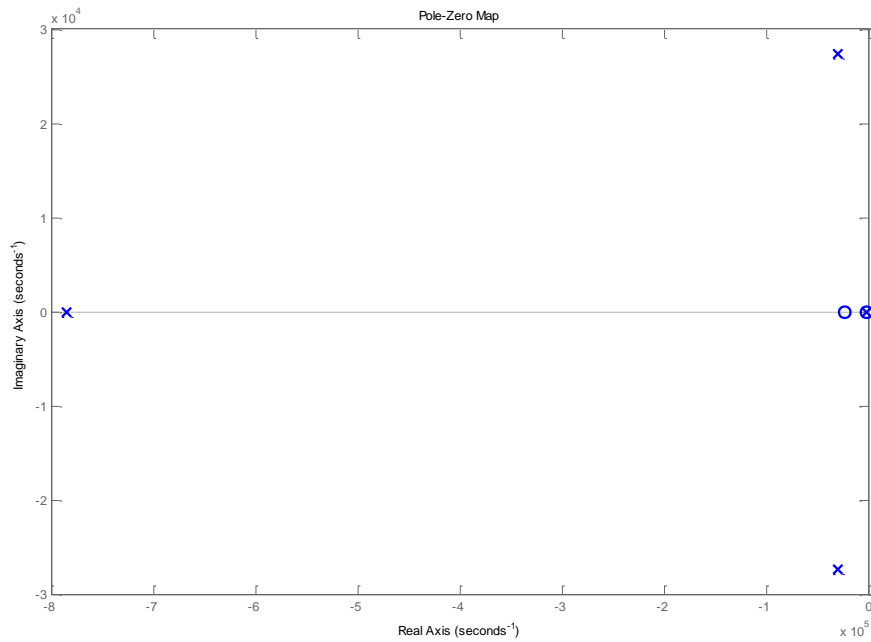


Figura 16. Análisis de estabilidad en lazo cerrado

Se valida la respuesta del sistema y se obtiene la respuesta en Matlab mostrada en la Figura 17, donde se comprueba que el controlador es estable y cumple bien con las especificaciones planteadas, dando un MP=4% y un Ts=0.0057s.

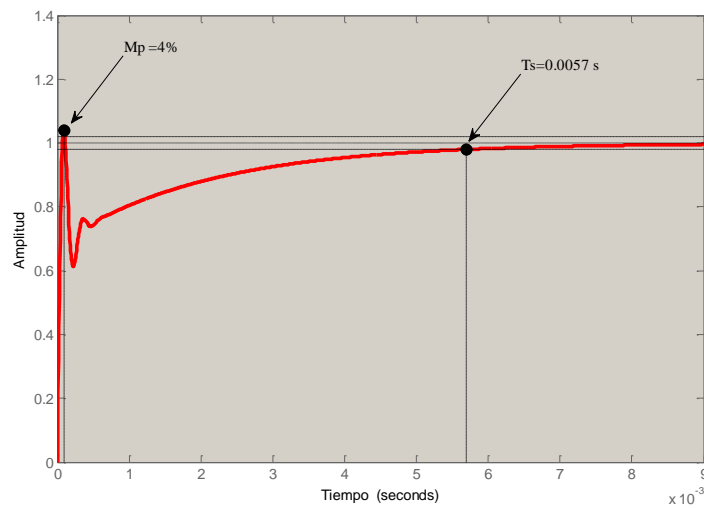


Figura 17. Respuesta del sistema linealizado

Para comprobar la validez del diseño el controlador se valida el sistema no lineal siguiendo la estructura mostrada en la Figura 18, el sistema es implementado en psim-simulink usando la herramienta simcoupler; el diagrama se muestra en la Figura 19 y 18.

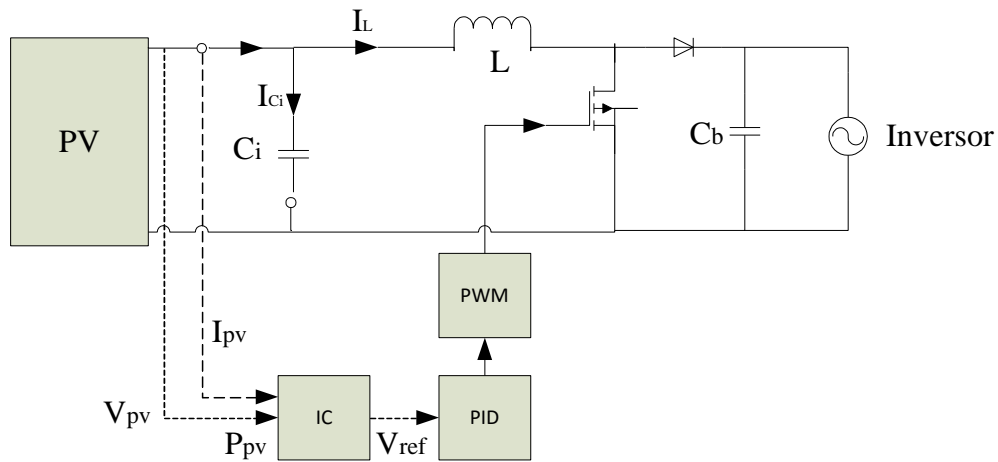


Figura 18. Estructura del sistema

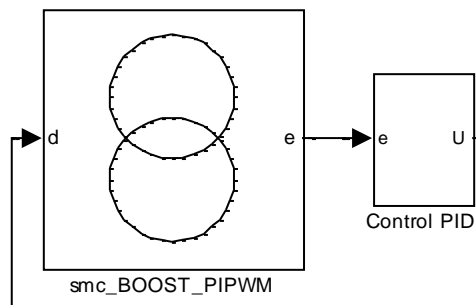


Figura 19. Montaje en Simulink

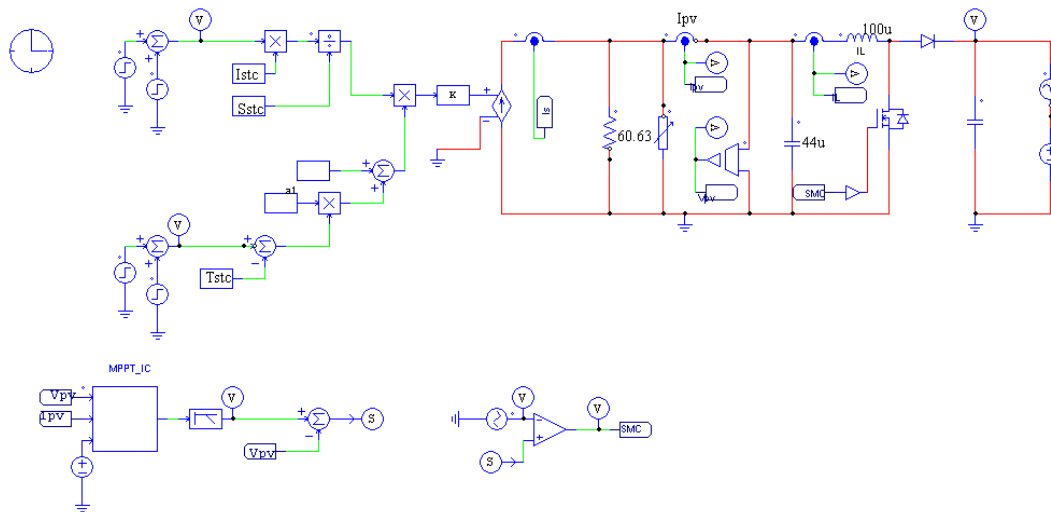


Figura 20. Implementación en PSIM

En la Figura 21, se muestra el comportamiento del sistema, donde el controlador se evaluó considerando una irradiancia inicial estándar de 1000 W/m^2 y una temperatura estándar de 25°C , entonces un tipo de perturbación en la irradiancia se produce a un $t=0.05 \text{ s}$, llegando a un valor de 500 W/m^2 , luego a un $t= 0.07\text{s}$ se produce otra perturbación en la irradiancia a un valor de 100 W/m^2 y finalmente en un $t=0.08\text{s}$ se produce un cambio de $T=30^\circ\text{C}$. Adicional a esto el sistema se simula con una perturbación constante en la carga, donde se observa un buen seguimiento en el punto de operación de la tensión de referencia proporcionado por el controlador MPPT de conductancia incremental.

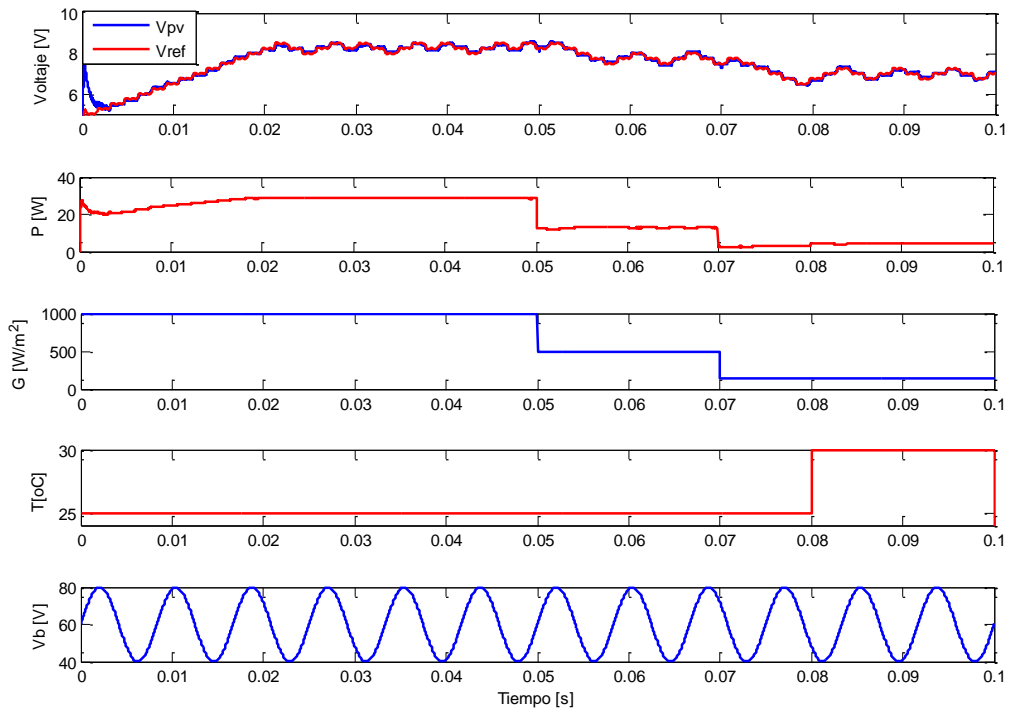


Figura 21. Respuesta del PVM para un controlador PID

5. DISEÑO DEL CONTROLADOR EN MODOS DESLIZANTES

En este capítulo se diseña un control en modos deslizantes de corriente basado en un MPTT IC, buscando como es el objetivo propuesto mejorar la respuesta obtenida con el control convencional PID, que permita mejorar la extracción de la máxima potencia del panel; para el desarrollo de este controlador se basó el trabajo en el artículo [24], pero notar que en este artículo se trabaja con un algoritmo MPPT del tipo P&O lo cual nos permitirá validar mejor ambos resultados.

5.1 Introducción al Control por modos deslizantes

Los sistemas de control de estructura variable (SEV) son un tipo de sistema de control no lineal, en los que la estructura del controlador varía de tal forma que un punto representativo del sistema siga una trayectoria definida en el espacio de estados; donde los sistemas en modo deslizante son un tipo especial de sistemas de estructura variable, en los cuales la dinámica del sistema es atraído hacia una superficie en el espacio de estado conocida como superficie de deslizamiento. Dos de los pioneros de este tipo de controles por modos deslizantes y convertidores controlados son Vadim I. Utkin y Debmalya Banerjee, ellos muestran ser de los primeros trabajos en este campo y quedan plasmados en sus artículos de la IEEE Transactions on Automatic control en 1977 y en Power Electronics, IEEE Transactions on , Volume:24 en 2009, Issue: 4. En dichos trabajos además se muestran que cuando se satisfacen ciertas condiciones, el estado “desliza” sobre la superficie, permaneciendo insensible a variaciones en los parámetros de la

planta y a las perturbaciones externas, lo que se constituye en la característica fundamental para su aplicación en los sistemas de control [37].

El objetivo del controlador en modos deslizante (CMD) es llevar las trayectorias del sistema sobre una variedad o superficie de deslizamiento y forzarlas a evolucionar sobre ella. Así, el comportamiento dinámico del sistema en estas condiciones queda determinado por las ecuaciones que definen dicha superficie en el espacio de estados. De este modo, plasmando los objetivos de control en tales ecuaciones mediante un diseño adecuado de las mismas, es posible lograr la estabilización del sistema, el seguimiento de referencias y la regulación de variables.

Para el diseño del control en modos deslizantes se deben seguir los siguientes pasos:

A. Elección de la superficie de deslizamiento: se debe elegir una función $S(x)$, tal que $S(x) = 0$ defina una superficie, conocida como superficie de deslizamiento, en el espacio de estados. Existen múltiples propuestas para determinar la superficie de deslizamiento y en general puede ser cualquier función del estado x tal que el error de regulación o seguimiento se haga cero en régimen permanente, como se define en (16).

$$S(x) \approx x_i - k = 0 \quad (16)$$

B. Alcanzabilidad de la superficie: Es una de las propiedades de los SEV es la posible existencia de modos deslizantes en las superficies de discontinuidad de la estructura. Si la trayectoria del sistema alcanza las proximidades de una región (superficie de deslizamiento) en la que existe un modo deslizante, el movimiento ya no se alejará de la región excepto

posiblemente en las fronteras de la región. Si la trayectoria evoluciona sobre la superficie de deslizamiento se dice que el sistema se encuentra en modo deslizante. Cuando se encuentra en modo deslizante un sistema puede tener cualquier comportamiento dinámico como tender hacia un punto de equilibrio asintóticamente estable dentro de la superficie de deslizamiento o seguir una trayectoria de amplitud creciente que lo lleve a abandonar la región de deslizamiento.

La ley de control por estructura variable más sencilla que puede plantearse, con el objetivo de que el sistema opere sobre la superficie de conmutación, consiste en alternar valores de $u(x)$ entre dos valores posibles, según el signo de $\Psi(x)$, como se expresa en (17).

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{si } \Psi(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{si } \Psi(x) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Donde los dos niveles de u , son funciones suaves de los estados que no se cruzan.

C. Condición de transversalidad: La condición de transversalidad significa que el control equivalente está definido y que existe la superficie de deslizamiento. En términos de sistemas de control, pedir que se cumpla la condición de transversalidad es equivalente a decir que la función de conmutación $\Psi(x)$ sea de grado relativo 1 con respecto a la entrada de control u . Donde, el grado relativo de una función de estados de un sistema, puede definirse como la cantidad de veces que es necesario derivar esta para que aparezca la entrada de control en forma explícita.[38]

D. Condición de invarianza: También conocida como dinámica de deslizamiento ideal, la trayectoria en modo deslizante se debe hacer todo lo más próxima a cero que se pueda $S(x) = 0$, seleccionado el valor del umbral lo suficientemente pequeño (Δ). La dinámica del sistema en modo deslizante cuando Δ tiende a cero se conoce como dinámica de deslizamiento ideal.

E. Control equivalente: El control equivalente (u_{eq}) es una ley de control que lleva al sistema a deslizarse sobre la superficie en forma ideal, y se puede interpretar como un valor continuo que representa un cierto valor promedio del control discontinuo, donde u_{eq} es el valor requerido para mantener el sistema en la región de deslizamiento $S(x) = 0$, por lo tanto si la ley de control es igual a u_{eq} , se puede garantizar que el sistema se encuentra en modo deslizante. El esquema de control equivalente se muestra en la Figura 22.

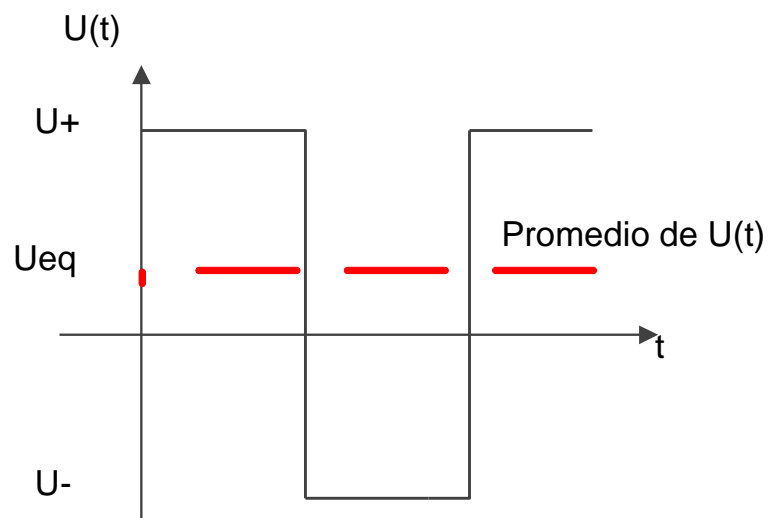


Figura 22. Control equivalente

5.1 Aplicación del control en modos deslizante al PV

La Figura 23, muestra la estrategia de control propuesta, la cual opera sobre el conductor de corriente del convertidor DC-DC con el fin de regular la corriente del panel PV. El papel del condensador de entrada C_i es la de absorber el rizado de conmutación que afecta a la corriente del inductor, por lo que el control de la corriente fotovoltaica se obtiene actuando sobre el promedio de la corriente del inductor [24].

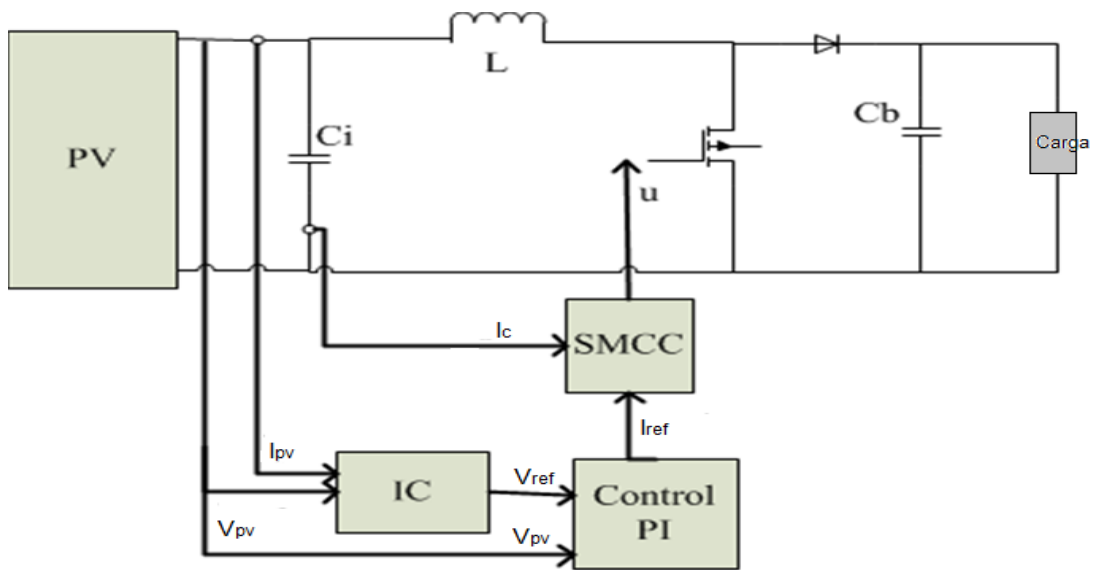


Figura 23. Estrategia de control propuesta

Al diseñar el sistema de control se tiene como objetivo que el error sea cero es decir que la $I_{ref} = I_c$, y con el siguientes consideraciones y reemplazos.

$$I_{Lref} = I_{pv} + I_{ref} \quad y \quad I_{PV} = I_{Cin} + I_L \quad e(t) = I_{Lref} - I_L$$

$$I_{Lref} = I_{Cin} + I_L + I_{ref} \quad \rightarrow \quad e(t) = I_{Cin} + I_L + I_{ref} - I_L$$

De allí se define la superficie de deslizamiento definida por (18).

$$\Psi = 0 = -I_c - I_{ref} \quad (18)$$

Dos condiciones se deben de cumplir con el fin de asegurar la superficie de deslizamiento, las cuales se expresan en (19).

$$\Psi = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0$$

Se tiene que la ecuación característica del condensador de entrada está definida por (20).

$$I_c = C_i \frac{dV_{pv}}{dt} \quad (20)$$

Despejando $\frac{dV_{pv}}{dt}$, se obtiene (21).

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{I_c}{C_i} \quad (21)$$

De la primera condición de deslizamiento se tiene que $I_c = -I_{ref}$, por lo tanto se obtiene la condición de deslizamiento, expresada en (22).

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = -\frac{I_{ref}}{C_i} \quad (22)$$

La ecuación (22), proporciona la relación entre la tensión fotovoltaica y la corriente de referencia, la cual permitirá diseñar el compensador de tensión, como se mostrará más adelante.

De la segunda ecuación de deslizamiento y teniendo que $I_c = -I_{ref}$ y $I_c = I_{pv} - I_L$ y con $I_L = I_{pv} + I_{ref}$ $I_L - I_{pv} - I_{ref} = 0$

Entonces se obtiene (23).

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{dI_L}{dt} - \frac{dI_{pv}}{dt} - \frac{dI_{ref}}{dt} = 0 \quad (23)$$

Del análisis de pequeña señal del sistema en lazo abierto, analizado en [24], se obtiene el circuito mostrado en la Figura 24, donde $I_L = I_{pv} - I_c = I_{pv} - G(V_{pv} - V_{ref})$, como resultado la ecuación (23), puede ser reescrita en (24):

$$\frac{dI_L}{dt} + G \frac{dV_{pv}}{dt} - \frac{dI_{sc}}{dt} - \frac{dI_{ref}}{dt} = 0 \quad (24)$$

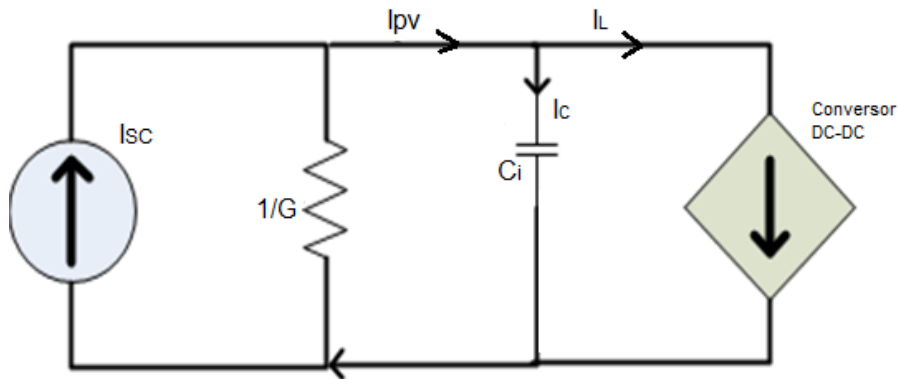


Figura 24. Modelo de pequeña señal

Donde la función de transferencia del sistema está dada por (25). [24].

$$G_p(s) = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = -\frac{1}{C_i s} \quad (25)$$

Del modelo del convertor DC-DC analizado en el capítulo 3, se tiene la relación mostrada en (26):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{Ci} - V_b(1 - u)) \quad (26)$$

Para que se cumpla la superficie de deslizamiento se requiere como se indicaba que $\Psi = 0$; pero si se presenta que $\Psi < 0$, entonces $I_c > -I_{ref}$ por lo tanto la corriente del inductor debe decrementar con el fin de que incremente la corriente del capacitor, por lo tanto $u = 1$; pero si se presenta que $\Psi > 0$, entonces $I_c < -I_{ref}$ por lo tanto la corriente del inductor debe incrementar con el fin de que decremente la corriente del capacitor, por lo tanto $u = 0$ [24]. Con lo que con estos dos análisis se obtienen las dos condiciones de conmutación, expresada en (27).

$$u = 1 \text{ si } \Psi < 0, \quad (27)$$

$$u = 0 \text{ si } \Psi > 0$$

En la Figura 25, se muestra la implementación del control en modos deslizantes con el fin de controlar la corriente del capacitor.

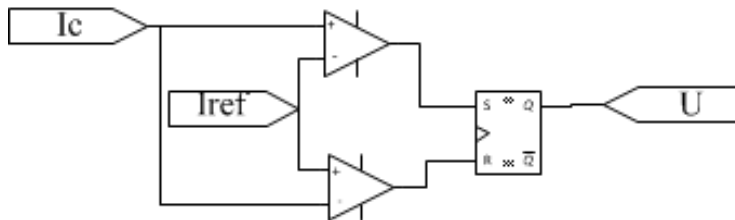


Figura 25. Control en modos deslizantes

Como se observa en la Figura 23, la corriente de referencia es suministrada por un controlador PI, cuya función de transferencia está dada por (28).

$$G_c(s) = \frac{E(s)}{I_{pv}(s)} = K_p + \frac{k_i}{s} \quad (28)$$

Donde $E(s) = -(V_{ref} - V_c)$, en la Figura 24 se muestra el diagrama de bloques del sistema.

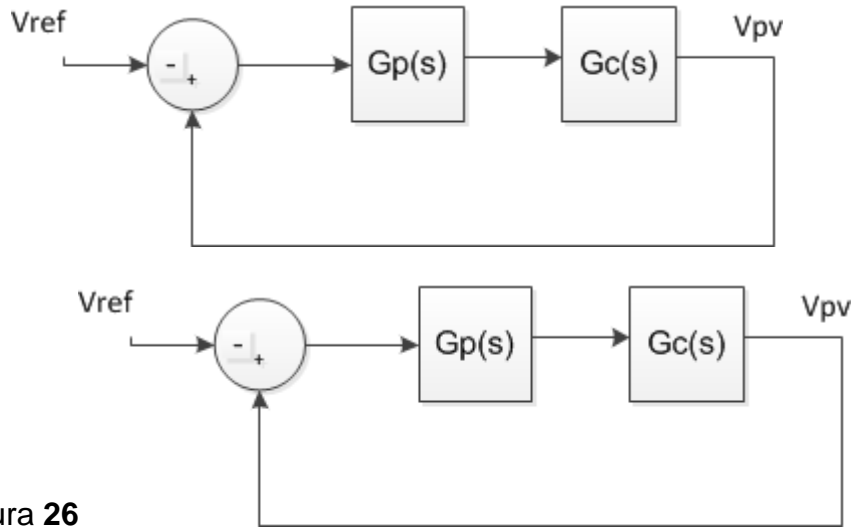


Figura 26

Figura 26 Diagrama de bloques del sistema

La función de transferencia en lazo cerrado está dada por (28).

$$G_w(S) = \frac{V_{pv}}{V_{ref}} = \frac{-G_p(S) \cdot G_c(S)}{1 + G_p(S) \cdot G_c(S)} = \frac{K_p S + K_i}{C_i S^2 + K_p S + K_i} \quad (28)$$

Comparando el denominador con un sistema de segundo orden de la forma $S^2 + 2 \varepsilon w_n S + w_n^2$, se tiene que $K_p = 2 \varepsilon w_n C_i$ y $K_i = w_n^2$, usando la aproximación para el tiempo de establecimiento $t_s = 1/\varepsilon w_n$.

En la Figura 27 se muestra el comportamiento del sistema, donde el controlador se evaluó bajo las mismas condiciones que el controlador convencional PID, donde se observa un seguimiento satisfactorio para un amplio rango de operación

en la tensión de referencia proporcionado por el controlador MPPT de conductancia incremental.

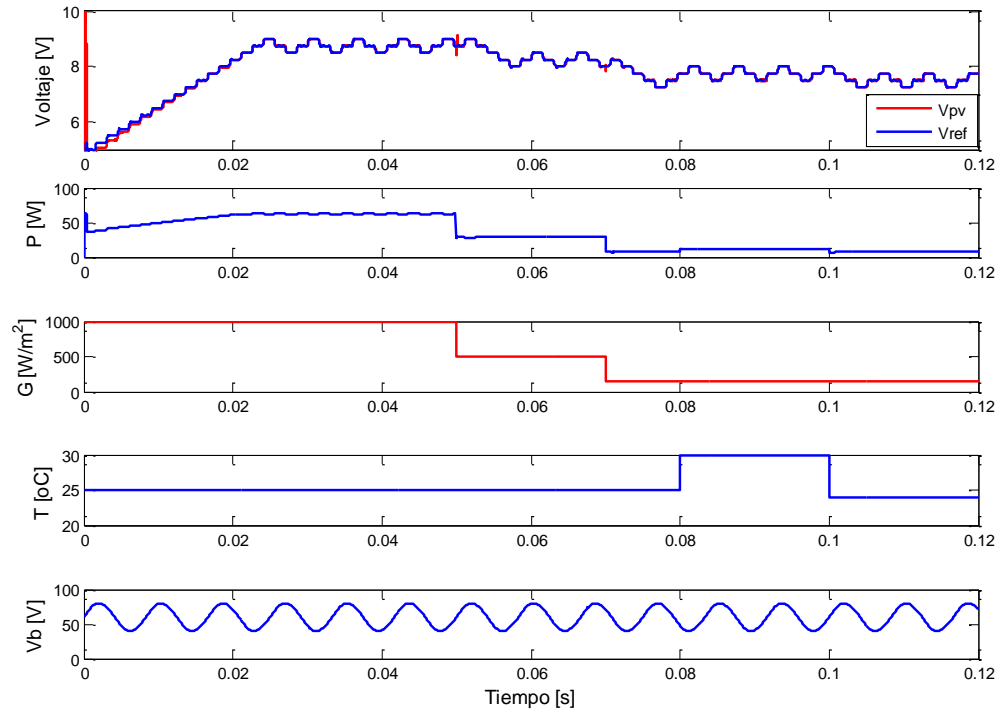


Figura 27. Respuesta del PVM para un controlador en modos deslizantes

6. Comparación del control convencional Vs el control en modos deslizantes

En la Figura 28 y en la Figura 29, se comparan el control en modos deslizantes frente al control convencional PID, donde se observa que el control PID aunque sigue la referencia, existe un error en estado estable, que es variable para los diferentes puntos de operación, lo que conlleva a más pérdida de potencia, mientras que el control en modos deslizantes sigue correctamente el voltaje de

referencia y responde adecuadamente ante los cambios de perturbaciones, con lo que se demuestra las ventajas de trabajar con este tipo de controlador.

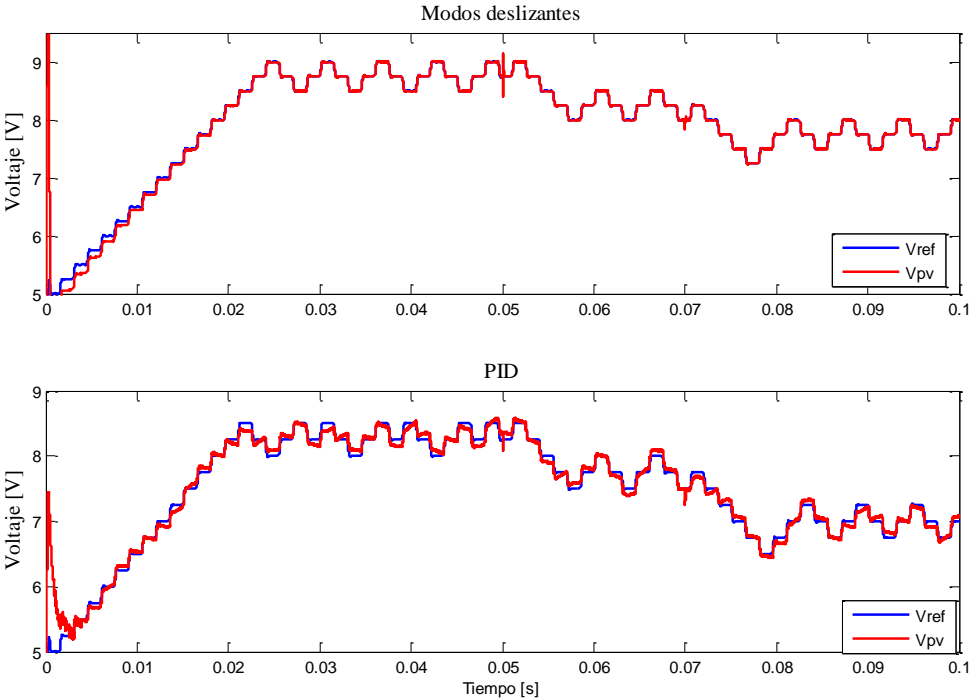


Figura 28. Comparación entre el control PID y Modos deslizantes para voltaje

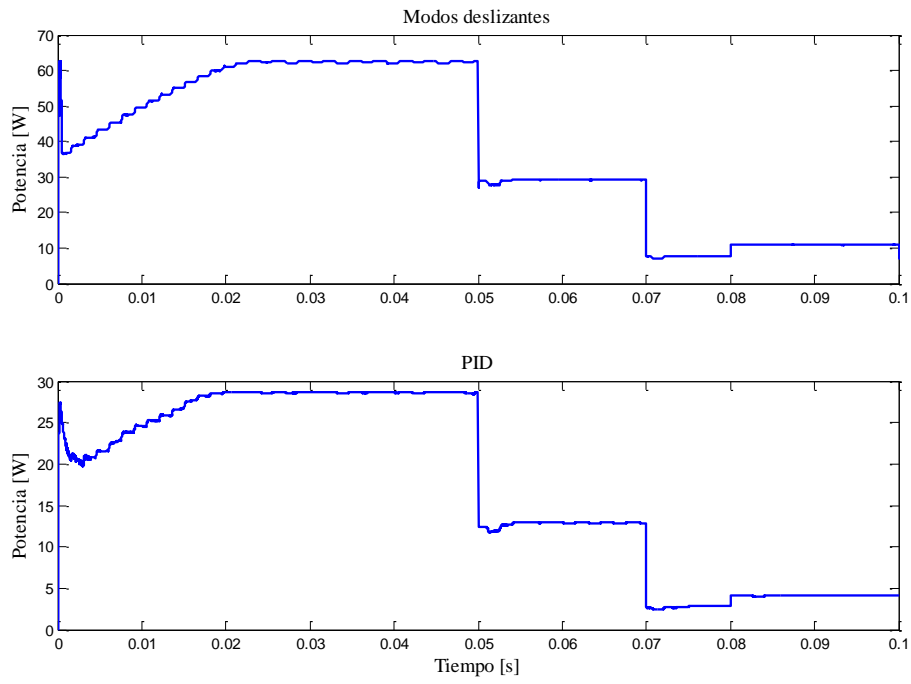


Figura 29. Comparación entre el control PID y Modos deslizantes para Potencia

CONCLUSIONES

Se obtuvo el modelo matemático del sistema panel-convertidor-carga y se comprobó mediante simulación su validez, para la simulación se tomaron los valores característicos del panel datos de un panel real y de uso en la ciudad de Medellín, donde se prueba la validez del modelo.

En este trabajo se presentó un análisis de la viabilidad y efectividad en el que se encontró que el control de modos deslizantes es más efectivo que el tradicional PID para un amplio rango de operación, mientras el control convencional PID necesita ser linealizado y no garantiza el correcto funcionamiento del sistema del panel fotovoltaico en todo el rango de operación.

Haciendo una revisión al estado del arte se encuentra que el convertidor Boost es el más usado para sistemas fotovoltaicos, ya que cumple la función de elevar el voltaje suministrado por el panel. Además se debe tener en cuenta que al diseñar un sistema fotovoltaico es necesario realizar un estudio de factibilidad donde se determine: necesidades energéticas a satisfacer; impacto ambiental, social y cultural; garantizando además la máxima extracción de potencia disponible del módulo fotovoltaico. Para ello, es necesario diseñar un sistema de control, el cual usualmente combina la acción de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), con un regulador de tensión, este último con la función de mitigar las perturbaciones en los terminales del panel.

En este trabajo a diferencia de las soluciones propuestas en la literatura se trabajó con un algoritmo de búsqueda MPPT de conductancia incremental. La ventaja principal del algoritmo IC sobre el P&O, radica en que el algoritmo IC puede calcularse en cada momento la dirección en la que se debe modificar el punto de trabajo del generador fotovoltaico para aproximarlos al MPP, determinando además, cuándo se ha alcanzado. Es por esto que bajo cambios atmosféricos rápidos no tomará una dirección errónea y, además, una vez alcanzado el MPP no oscilará significativamente en torno a él, garantizando un mejor desempeño en el sistema, el inconveniente con este algoritmo es su alta sensibilidad a ruidos en los sensores físico ya que $\Delta I/\Delta V \approx dI/dV$, donde la derivada es muy sensible al ruido, lo que afecta el seguimiento del punto de máxima potencia. Lo que se recomienda cuando el sistema sea implementado filtrar el ruido en los sensores para evitar inconvenientes con este algoritmo.

Para realizar el control en modos deslizantes se encuentran dos estructuras: La primera es medir la corriente de la inductancia del convertidor, la cual si se aproxima al sistema a pequeña señal se encuentra que la función de transferencia depende de la resistencia del panel fotovoltaico, la cual varía dependiendo de las condiciones de irradiancia y temperatura; pero si se censa la corriente del convertidor boost, al realizar el análisis en pequeña señal se encuentra una función de transferencia constante lo que asegura que el controlador es único y no depende de los cambios en la irradiación y/o temperatura.

Se analizó el comportamiento y estabilidad del control convencional PID, concluyendo que el sistema es estable, además para poder diseñar el controlador

fue necesario linealizar el sistema en un punto de operación, garantizando en este punto un comportamiento adecuado, notando sin embargo que cuando el punto de operación cambia el control sigue la referencia pero las condiciones de estado transitorio y estado estable varían. El sistema fue validado en simulación ante diferentes tipos de perturbaciones, tanto en la irradiancia, temperatura y carga, mostrando un buen comportamiento del controlador.

Se diseñó y se evaluó mediante simulación el control por modos deslizantes ante diferentes perturbaciones, tanto en la irradiancia, temperatura y carga, mostrando que el control responde para un amplio rango de operación, pero este requiere de un control adicional basado en una linealización del sistema el cual disminuye el ancho de banda y por ende el control pierde velocidad a la hora de responder ante perturbaciones.

Se requiere de un compensador (PI) adicional en la implementación de modos deslizantes para el acondicionamiento de señales basado en una linealización del sistema el cual disminuye el ancho de banda, aunque debido a su censado en V_c no se ve afectado significativamente por cambios de temperatura, lo cual lo mantiene en el rango de operación analizado..

Se compara el control en modos deslizantes frente al control convencional PID, concluyendo que con el control en modos deslizantes existe mayor transferencia de potencia al panel PV, respondiendo adecuadamente a las perturbaciones impuestas en el sistema. Todos los resultados se obtuvieron mediante simulaciones realizadas en PSIM y en Matlab.

Para posibles futuros trabajos se recomienda:

- Realizar simulación con modos deslizantes de orden superior para determinar la incidencia en el rizado o también llamado “chattering”.
- Implementar el presente trabajo en físico para validar simulaciones.
- Verificar en la implementación práctica la estabilidad del algoritmo IC ante los ruidos propios en los sensores de medición y electrónica asociada.
- Encontrar alternativas de mejora que no involucre el compensador PI y su linealización embebida.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de minas y Energía. República de Colombia., “Programa De Uso Racional Y Eficiente De Energía Y Fuentes No Convencionales – PROURE.,” 2010. .
- [2] World Energy Council, “2013 World Energy Issues Monitor,” 2013.
- [3] F. No and C. Proure, “Ministerio de Minas y Energía República de Colombia,” 2010.
- [4] J. Qi, Y. Zhang, and Y. Chen, “Modeling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 337–345, Jun. 2014.
- [5] L. Tang, W. Xul, C. Zengl, S. Member, and S. Member, “One Novel Variable Step-Size MPPT Algorithm for Photovoltaic Power Generation,” in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 5750–5755.
- [6] N. Zitouni, B. Khiari, R. Andoulsi, A. Sellami, A., Mami, and HssenA., “Modelling and non linear control of a photovoltaic system with storage batteries: A bond graph approach,” *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, pp. 105–114, 2011.
- [7] H. N. Zainudin, “Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems,” no. 1, pp. 750–755, 2010.
- [8] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [9] G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Granular control of photovoltaic arrays by means of a multi-output Maximum Power Point Tracking algorithm.,” *Prog. Photovoltaics Appl.*, 2012.
- [10] J. Ahmad, “A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays,” *2010 2nd Int. Conf. Softw. Technol. Eng.*, pp. 247–250, Oct. 2010.
- [11] M. Azab, “A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems.,” *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, pp. 702–705, 2009.
- [12] N. Khaehintung, A. Kunakorn, and P. Sirisuk, “A novel fuzzy logic control technique tuned by particle swarm optimization for maximum power point tracking for a photovoltaic system using a current-mode boost converter with

- bifurcation control,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 289–300, Apr. 2010.
- [13] W.-M. C.-H, C.-M. Hong, and C.-H. Chen, “Neural-Network-Based MPPT Control of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3571–3581, Dec. 2011.
- [14] E. Mamarelis, C. Andr, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, R. Giral, and D. Ingegneria, “FPGA-based controller for mitigation of the 100 Hz oscillation in grid connected PV systems,” pp. 925–930.
- [15] H. Serhoud and D. Benattous, “Sliding mode control of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Array,” in *International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, 2010, pp. 1–5.
- [16] M. Romero, A. P. De Madrid, C. Mañoso, and B. M. Vinagre, “A Survey of Fractional – Order Generalized Predictive Control,” pp. 6867–6872, 2012.
- [17] D. S. Karanjkar, S. Chatterji, S. L. Shimi, and A. Kumar, “Performance Analysis of Integer and Fractional Order Current Mode Control Strategies Applied to Boost Power Converter,” no. 24, 2013.
- [18] R. Leyva, C. Alonso, I. Queinnec, A. Cid-Pastor, and L. Martinez-Salamero, “MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum-Seeking Control,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, pp. 249–258, 2006.
- [19] S. Moura, “A Switched Extremum Seeking Approach to MPPT,” *Photovolt. Syst.*, 2009.
- [20] A. Elasser, M. Agamy, J. Sabate, R. Steigerwald, R. Fisher, and M. Harfman-Todorovic, “A comparative study of central and distributed MPPT architectures for megawatt utility and large scale commercial photovoltaic plants.,” in *ECON-2010 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 2753 – 2758.
- [21] A. Barchowsky, G. Parvin, J., Reed, M. Korytowski, and B. Grainger, “A comparative study of MPPT methods for distributed photovoltaic generation,” in *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012, pp. 1–7.
- [22] N. Femia, G. Lisi, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays: Novel Approach and System Analysis,” *EEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 2610–2621., 2008.
- [23] E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, E. Mamarelis, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Perturb and Observe MPPT algorithm

with a current controller based on the sliding mode,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 346–356, Jan. 2013.

- [24] E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, E. Mamarelis, G. Petrone, C. A. Ramos-paja, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “A Fast Current-Based MPPT Technique Employing Sliding Mode Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1168–1178, 2013.
- [25] C. A. Ramos-paja and M. Vitelli, “DISTRIBUTED MAXIMUM POWER POINT TRACKING WITH OVERVOLTAGE PROTECTION FOR PV SYSTEMS SEGUIMIENTO DISTRIBUIDO DEL PUNTO DE MAXIMA POTENCIA CON PROTECCION DE SOBREVOLTAJE,” pp. 141–150, 2013.
- [26] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005.
- [27] D. Gonzalez and G. Petrone, “Automated Procedure for Calculating the Controller Parameters in Photovoltaic DC / DC Converters,” vol. 6, no. November, pp. 3027–3040, 2011.
- [28] A. Trejos, D. Gonzalez, and C. A. Ramos-Paja, “Modeling of Step-up Grid-Connected Photovoltaic Systems for Control Purposes,” *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 1900–1926, Jun. 2012.
- [29] R. Chenni, M. L. Zarour, Amarouayache, and Bouzid, “A new design for analogue maximum power point tracking,” *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 93–99, 2008.
- [30] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “A Technique for Improving P&O MPPT Performances of Double-Stage Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482, Nov. 2009.
- [31] H.-T. Yau and C.-H. Wu, “Comparison of extremum-seeking control techniques for maximum power point tracking in photovoltaic systems,” *Energies*, vol. 4, no. 12, pp. 2180–2195, 2011.
- [32] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005.
- [33] F. Kazan, S. Karaki, R. a. Jabr, and M. Mansour, “Maximum power point tracking using ripple correlation and incremental conductance,” *2012 47th Int. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2012.

- [34] G. J. Kish, J. J. Lee, and P. W. Lehn, "Modelling and control of photovoltaic panels utilising the incremental conductance method for maximum power point tracking," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 6, no. 4, p. 259, 2012.
- [35] C. Base, P. System, K. B. Shah, and L. P. Joshi, "Comparative Analysis of Incremental," 2013.
- [36] P.-A. Ortiz-Valencia, J. Ramirez, and L. Cardona-Rendón, *Modelo Matemático y control de un sistema de fluidos*. 2011.
- [37] F. NARANJO, "Sistemas de Control de Estructura Variable con Modo de Deslizamiento," 1991.
- [38] C. A. Evangelista, "Control de sistemas no lineales por modos deslizantes de segundo orden. Aplicación a la conversión de energía eólica.," 2012.