



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE CONTROL PARA EL
SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
EN CONDICIONES DE SOMBRA NO
UNIFORME

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA

ING. ITZEL CONTRERAS CARMONA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARTHA BELEM SALDÍVAR MÁRQUEZ

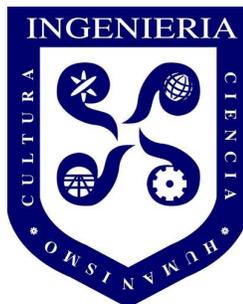
Co-DIRECTOR:

DR. VÍCTOR MANUEL RAMÍREZ RIVERA

TUTOR:

DR. OTNIEL PORTILLO RODRÍGUEZ

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, JULIO 2023



Resumen

La energía fotovoltaica se está volviendo cada vez más popular en muchos países del mundo debido a sus características económicas, ambientales y de disponibilidad. Sin embargo, una desventaja significativa de los sistemas fotovoltaicos es su baja eficiencia de conversión debido a muchos factores, entre ellos, la presencia de sombras, que da lugar a que la irradiancia y temperatura en el panel sea no uniforme. En este escenario, la potencia máxima que puede generarse es variante, por lo que es necesario realizar un seguimiento adecuado del Punto de Máxima Potencia (MPP), el cual representa la energía máxima que se puede extraer del módulo fotovoltaico.

En este trabajo se proponen varias técnicas para seguir el MPP basadas en el control por modos deslizantes (SMC) Super Twisting. Se exploraron dos enfoques:

- En el primero, la superficie de deslizamiento se diseña de tal forma que el problema se traduce en resolver la tarea de seguimiento de trayectorias clásico. Las trayectorias de referencia para seguir el MPP se determinaron de dos formas:
 - A través de técnicas de regresión lineal y múltiple.
 - Utilizando la caracterización teórica de los parámetros óptimos de operación en el MPP.
- En el segundo, la superficie de deslizamiento se diseña empleando las propiedades del MPP observadas en las curvas características. Se busca garantizar que cuando se alcance la superficie de deslizamiento, se obtenga el punto máximo en la curva de potencia-voltaje, que corresponde al MPP.

La contribución principal de este trabajo es el diseño de superficies de deslizamiento para el control Super Twisting SMC que da lugar a una mejora importante en las características de respuesta del sistema. El desempeño de la propuesta de control ilustra mediante simulaciones numéricas. Además, se realiza una comparación con los algoritmos clásico Perturbación y Observación (P&O) y Conductancia Incremental (INC), mostrando la superioridad del enfoque de control propuesto.

Las ventajas del enfoque Super Twisting SMC se identifican en términos de la velocidad de respuesta, amplitud de oscilaciones en la señal de potencia generada y eficiencia. En cuanto a la velocidad de respuesta, aunque las diferencias no son significativas, el método SMC presenta un tiempo de asentamiento menor, de al rededor de 0.05 s, mientras que con los métodos INC y P&O es de hasta 0.65 s y 0.09 s, respectivamente. El método que genera oscilaciones de mayor amplitud es INC, alcanzando valores de hasta 282.3 W, mientras que con el método SMC (con el primer enfoque de diseño de la superficie de deslizamiento) la amplitud de las oscilaciones es menor a 1 W. En cuanto a la eficiencia, el SMC alcanza en la mayoría de los casos valores superiores al 98 %. Con los métodos INC y P&O, bajo ciertas condiciones de operación, se identifican valores de eficiencia similares a los que se alcanza con el SMC, aunque en ciertos casos la eficiencia máxima es de al rededor del 90 %.

Acrónimos

- ACO** Algoritmo de optimización de colonia de hormigas (por sus siglas en inglés, Ant Colony Optimization).
- ANN** Redes neuronales artificiales (por sus siglas en inglés, Artificial Neural Networks).
- FPGA** Circuito integrado digital programable (por sus siglas en inglés, Field Programmable Gate Array).
- GMPP** Punto de máxima potencia global (por sus siglas en inglés, Global Maximum Power Point).
- SFV** Sistema fotovoltaico.
- MPP** Punto de máxima potencia (por sus siglas en inglés, Maximum Power Point).
- LMPP** Punto de máxima potencia local (por sus siglas en inglés, Local Maximum Power Point).
- MPPT** Seguimiento del punto de máxima potencia (por sus siglas en inglés, Maximum Power Point Tracking).
- SFLA** Algoritmo de salto de rana aleatorio (por sus siglas en inglés, Shuffled Frog Leaping Algorithm).
- P&O** Algoritmo de Perturbación y Observación.
- VP&O** Algoritmo de Perturbación y Observación de paso variable.
- INC** Algoritmo de Conductancia Incremental.
- SMC** Control por modos deslizantes (por sus siglas en inglés, Sliding Mode Control).
- PSO** Algoritmo de Optimización de enjambre de partículas, (por sus siglas en inglés, Particle Swarm Optimization).
- MR** Regresión múltiple (por sus siglas en inglés, Multiple Regression).
- LR** Regresión lineal (por sus siglas en inglés, Linear Regression).

Notación

- A Factor ideal del panel fotovoltaico (definido en las especificaciones del fabricante).
- B Factor ideal del panel fotovoltaico medible.
- V_{oc} Voltaje en circuito abierto.
- I_{sc} Corriente en corto circuito.
- I_{ph} Corriente generada por la radiación solar.
- I_o Saturación de corriente inversa del diodo.
- R_s Resistencia en serie de la celda solar que describe el flujo de corriente.
- R_{sh} Resistencia en paralelo de la celda solar que expresa una corriente de fuga.
- I_{pv} Corriente de salida del panel fotovoltaico.
- V_{pv} Voltaje de salida del panel fotovoltaico.
- T_c Temperatura del panel en grados Celsius.
- k_b Constante de Boltzman's ($1.381 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$).
- N_s Número de celdas conectadas en serie.
- q Carga del electrón ($1.602 \times 10^{-19} C$).
- V_{MPP} Voltaje en el punto de máxima potencia.
- I_{MPP} Corriente en el punto de máxima potencia.
- I_r Irradiancia solar, unidad de medida ($\frac{W}{m^2}$).
- I_{rref} Irradiancia en condiciones estándar.
- T_{cref} Temperatura en condiciones estándar.
- u Ciclo de trabajo.
- I_m Corriente estándar de salida.
- V_m Voltaje estándar de salida.
- V_{MPPR} Referencia de Voltaje para alcanzar el MPP generado por MR.
- I_{MPPR} Referencia de corriente para alcanzar el MPP generado por LR.

- $I_{MPP_{OC}}$ Referencia de corriente para alcanzar el MPP con base en sus parámetros óptimos de operación.
- $V_{MPP_{OC}}$ Referencia de voltaje para alcanzar el MPP con base en sus parámetros óptimos de operación.

Índice general

Índice de figuras	8
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes y motivación	11
1.2. Planteamiento del problema	13
1.3. Justificación	14
1.4. Hipótesis	14
1.5. Objetivo general	14
1.6. Objetivos particulares	14
1.7. Alcances y limitaciones	15
1.8. Productos generados	15
1.8.1. Presentación en coloquio	15
1.8.2. Artículo para participación en un congreso nacional	15
1.8.3. Artículo en revista	15
2. Marco teórico	17
2.1. Sistema fotovoltaico	17
2.1.1. Celda solar	17
2.1.2. Parámetros de funcionamiento de las celdas solares	18
2.1.3. Panel solar	18
2.1.4. Tipos de sistemas fotovoltaicos	19
2.2. Convertidores de potencia	20
2.3. Control por modos deslizantes	22
2.4. Efectos de la presencia de sombras en un SFV	22
2.5. Estado del arte	23
3. Super Twisting SMC para el MPPT basado en referencias de corriente y voltaje	29
3.1. Modelo matemático del sistema fotovoltaico	29
3.2. Diseño de control	31
3.2.1. Referencias generadas a partir de técnicas de regresión	32
3.2.2. Referencias generadas a partir de parámetros óptimos de operación	35
3.3. Resultados de simulaciones numéricas	37
3.4. Comparación con los algoritmos P&O e INC	42
3.5. Discusión	44

4. Super Twisting SMC para el MPPT basado en las características de la curva P-V	46
4.1. Diseño de control	46
4.2. Resultados de simulaciones numéricas considerando condiciones de sombra no uniforme	48
4.3. Discusión	54
5. Conclusiones y trabajo futuro	57

Índice de figuras

1.1.	Curva de potencia-voltaje de un panel fotovoltaico [1].	12
1.2.	Curva característica de un sistema fotovoltaico sujeto a condiciones de sombra parcial.	13
1.3.	Constancia de Coloquio.	16
1.4.	Correo de recepción de artículo.	16
2.1.	Estructura de la celda solar [2].	17
2.2.	Celda, módulo y panel fotovoltaico.	18
2.3.	Circuito equivalente de una celda solar.	19
2.4.	Curva I-V, V-P de un panel para una temperatura e irradiancia determinada [3].	20
2.5.	Circuito del convertidor Buck.	20
2.6.	Circuito del convertidor Boost.	21
2.7.	Circuito del convertidor Buck-Boost.	21
2.8.	Circuito del convertidor Cuk.	21
2.9.	Daños en un panel solar provocados por un sobrecalentamiento [4].	22
2.10.	Métodos para el MPPT en condiciones de sombras parciales.	24
2.11.	Diagrama de flujo de ACO [5].	25
2.12.	Diagrama de flujo de escaneo y rastreo recurrente.	27
3.1.	Diagrama del sistema fotovoltaico.	30
3.2.	Diagrama electrónico del Convertidor Boost [6].	30
3.3.	Circuito equivalente con el interruptor en la posición $u = 1$ [6].	30
3.4.	Circuito equivalente con el interruptor en posición 0 [6].	31
3.5.	Relación voltaje-irradiancia-temperatura.	34
3.6.	Relación corriente-irradiancia-temperatura.	34
3.7.	Relación corriente-irradiancia.	35
3.8.	Caso 1 Temperatura Variable.	38
3.9.	Caso 2 Irradiancia Variable.	39
3.10.	Caso 3 Temperatura e irradiancia variables.	39
3.11.	Caso 1. Potencia generada considerando una irradiancia constante de $1000W/m^2$ y una temperatura variable.	40
3.12.	Caso 2. Potencia generada considerando una temperatura constante de $25^{\circ}C$ y una irradiancia variable.	41
3.13.	Caso 3. Potencia generada considerando irradiancia y temperatura variable.	41
3.14.	Caso 1. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando una irradiancia constante y temperatura variable.	43
3.15.	Caso 2. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando temperatura constante y una irradiancia variable.	43

3.16. Caso 3. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando temperatura e irradiancia variables.	44
4.1. División en tres secciones del panel fotovoltaico.	49
4.2. Caso 1: Curva de potencia-voltaje. Punto de Potencia Máxima: 229.833W. . .	49
4.3. Caso 1. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.	50
4.4. Caso 1. Curvas de potencia del SFV.	51
4.5. Caso 2. Puntos de Máxima Potencia.	52
4.6. Caso 2. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.	53
4.7. Caso 2. Curvas de potencia del SFV.	54
4.8. Caso 3. Puntos de Máxima Potencia.	54
4.9. Caso 3. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.	55
4.10. Caso 3. Curvas de potencia del SFV.	56

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y motivación

En la actualidad se busca generar nuevos suministros de energía renovable limpia que permitan reducir el uso de recursos dañinos para el ambiente. Generar electricidad mediante la captación de energía solar contribuye a la sostenibilidad. Los sistemas fotovoltaicos (SFV) son utilizados actualmente como fuente primordial de energía renovable [7].

Los SFV permiten cambiar la forma de generar la energía eléctrica que consumimos; captan la luz del sol y la convierten en energía eléctrica. En los últimos años se han desarrollado distintos tipos dispositivos de captación de energía solar, haciendo posible su uso doméstico.

Los SFV se utilizan cada vez más para generar una mayor cantidad de energía eléctrica. Desafortunadamente, la eficiencia de conversión de energía en los módulos fotovoltaicos tiende ser baja y, por lo tanto, no se aprovecha al máximo la energía solar. Los SFV tienen puntos de operación variantes en el tiempo los cuales dependen de factores externos, como la radiación solar y la temperatura. Estos factores afectan el rendimiento de los SFV, incidiendo principalmente en la potencia de salida, el factor de llenado¹ y la eficiencia del panel [8].

En los SFV instalados en zonas urbanas, existen obstáculos que impiden su funcionamiento adecuado, afectando su rendimiento. Por ejemplo, en general, el espacio disponible es limitado, por lo que el panel se coloca en techos, terrazas o espacios públicos, lo cual hace que se presenten sombras totales o parciales en su superficie. Por este motivo, es de interés primordial conocer el impacto que tiene la presencia de sombras en el sistema con el fin de diseñar un algoritmo robusto capaz de operar en estas condiciones.

Para ilustrar el comportamiento de un SFV pueden construirse curvas características de voltaje-corriente y voltaje-potencia. La potencia en un panel fotovoltaico se determina mediante el producto de la corriente y el voltaje. Para conocer el punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés, Maximum Power Point) se toma el valor de la corriente (I_{MPP}) y el voltaje (V_{MPP}) en el punto máximo de la curva de potencia-voltaje (véase la Figura 1.1).

¹El factor de llenado es la relación entre la potencia que entrega un panel y el producto del voltaje en circuito abierto y la corriente en corto circuito.

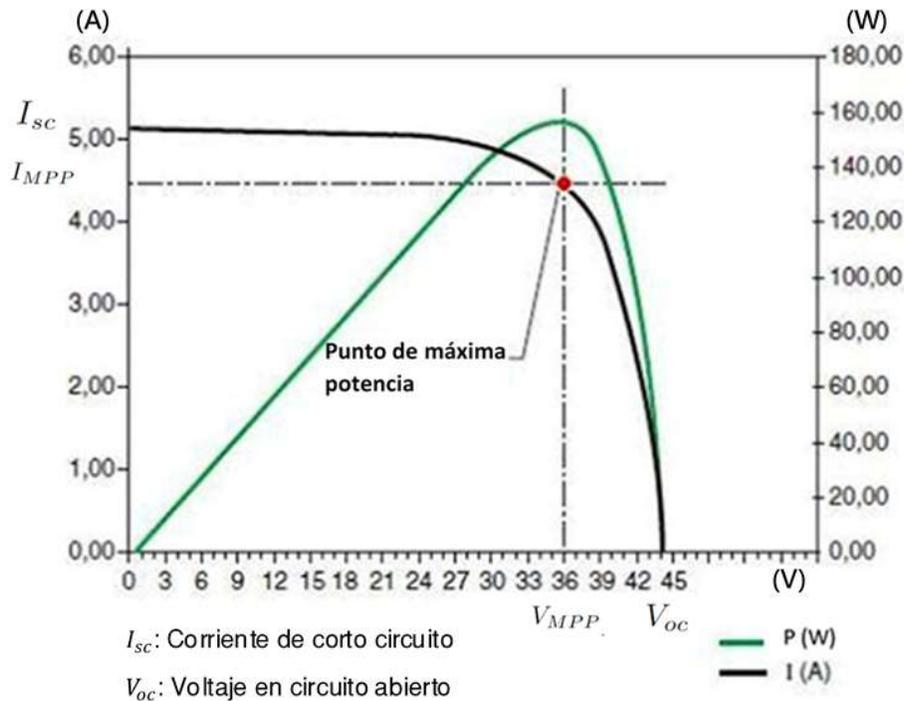


Figura 1.1: Curva de potencia-voltaje de un panel fotovoltaico [1].

Es necesario comprender que el MPP no es constante a lo largo del tiempo, varía de acuerdo con los cambios en la temperatura y en la irradiancia, que pueden presentarse por la presencia de sombras parciales incidiendo en la superficie del panel [9].

Cuando existen obstáculos obstruyendo parcialmente el paso de los rayos solares, se reduce la potencia que entrega el SFV. En este caso se generan varios puntos de potencia máxima: al punto más alto de potencia se le considera el punto de máxima potencia global (GMPP, por sus siglas en inglés, Global Maximum Power Point) y a los puntos máximos de menor magnitud se les conoce como puntos locales o relativos de potencia (LMPP, por sus siglas en inglés, Local Maximum Power Point) [10]. Esto se observa en la Figura 1.2.

Durante varias décadas se han desarrollado distintos métodos para optimizar los SFV, así como para determinar el punto de máxima potencia considerando los efectos en cambios climáticos abruptos en el panel solar y cómo afectan a la generación de energía eléctrica fotovoltaica, como se discute en [11].

En este proyecto se evalúa el desempeño de la ley de control por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en inglés, Sliding Mode Control) en el seguimiento del punto de máxima potencia de un SFV sujeto a variaciones de irradiancia y temperatura, considerando diferentes enfoques de diseño de la superficie de deslizamiento. El propósito es lograr un control robusto con una adecuada velocidad de respuesta ante variaciones abruptas en las condiciones climáticas producidas en el panel solar. El control requiere de un modelo matemático del SFV, a diferencia de la mayoría de los métodos que abordan el problema. Véase por ejemplo [12], donde se desarrolla un análisis comparativo de diversos algoritmos de soft computing

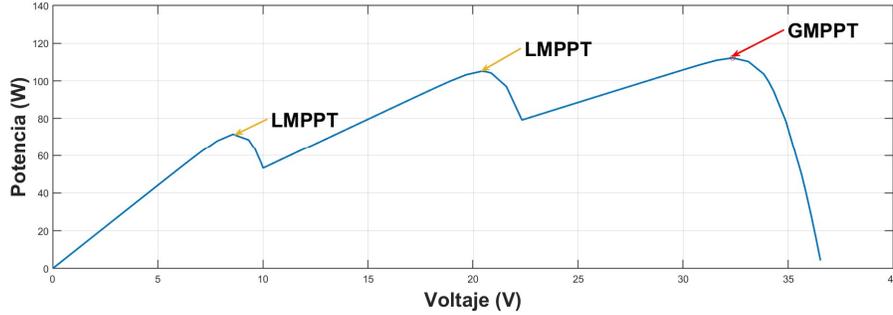


Figura 1.2: Curva característica de un sistema fotovoltaico sujeto a condiciones de sombra parcial.

para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés, Maximum Power Point Tracking) en SFV.

Uno de los antecedentes primordiales de este trabajo es la referencia [6], donde se presenta un método para el MPPT basado en las propiedades de planitud diferencial. El método considera los parámetros eléctricos del panel solar, permitiendo lograr un control robusto del sistema, sin embargo, no considera la presencia de sombras. La estrategia de control propuesta en este trabajo se basa en el modelo matemático presentado en [6].

1.2. Planteamiento del problema

La energía renovable de mayor uso en la actualidad es la energía generada a través de la luz solar (energía fotovoltaica), la cual utiliza paneles solares que captan los rayos del sol y los convierten en energía eléctrica. Una de las principales desventajas de los SFV es la baja eficiencia al realizar la conversión de energía y entregarla al sistema.

Para lograr que el SFV genere la máxima potencia posible es necesario rastrear de forma continua los MPPs generados por el SFV. Estos puntos dependen de factores externos como la irradiancia y la temperatura. Además, las características no lineales de la potencia generada dificultan la tarea del MPPT.

Además de la baja eficiencia de conversión, otras desventajas de los algoritmos propuestos en la literatura para el MPPT son el bajo rendimiento ante cambios abruptos en las condiciones climáticas, el tiempo de estabilización (asentamiento) grande y la presencia de oscilaciones alrededor del MPP. En algunos casos se presentan también errores de seguimiento. Para mejorar la precisión, se ha propuesto la implementación simultánea de diversos elementos de control para seguir de manera eficiente el MPP, lo que vuelve complejo el SFV. Como ejemplo de estos está el caso del método híbrido propuesto en [13] el cual combina el algoritmo de salto de rana aleatorio (SFLA, por sus siglas en inglés, Shuffled Frog Leaping Algorithm) con una variante del método clásico Perturbación y Observación (P&O): el método P&O de paso variable (VP&O).

Con el fin de superar las desventajas identificadas, en este proyecto se desarrolló un controlador que permite entregar la máxima energía posible del SFV a una carga resistiva, buscando alcanzar la potencia máxima aun en circunstancias en las que se cuenta con variaciones repentinas de las condiciones climáticas (temperatura e irradiancia) que pueden ser producidas por la presencia de sombras.

1.3. Justificación

Es bien sabido que la luz solar es abundante e inagotable. Sin embargo, únicamente la cuarta parte de la energía solar es aprovechada por dispositivos que la transforman en energía eléctrica o térmica [14]. La tendencia actual apunta a que la mayor parte de la energía utilizada provenga de fuentes renovables, por lo que el diseño de algoritmos de control que permitan aprovechar la mayor cantidad de energía solar es un tema de interés prioritario en la comunidad científica.

Una de las mayores desventajas de los SFV es su baja eficiencia en la conversión de energía. Se han desarrollado múltiples técnicas para superar esta desventaja (véase la Sección 2.5), sin embargo, hasta el momento se sigue buscando mejorar la eficiencia en el seguimiento del punto de máxima potencia en un SFV.

Otra desventaja de los algoritmos desarrollados hasta ahora para el seguimiento del MPP es la presencia de oscilaciones en la potencia generada. Además, la complejidad de algunos algoritmos afecta el tiempo de respuesta del sistema. Por otra parte, no todas las técnicas para el seguimiento del MPP son eficientes ante la presencia de variaciones en la irradiancia y temperatura.

Para superar estas desventajas, este trabajo plantea la aplicación del control por modos deslizantes conocido como Super Twisting que ha demostrado ser una estrategia de control eficiente y robusta ante variaciones paramétricas, dinámicas no modeladas y perturbaciones. Se propone diseñar distintas superficies de deslizamiento para evaluar identificar a la que mejor satisfaga los requerimientos del problema planteado.

1.4. Hipótesis

Por medio del algoritmo de control por modos deslizantes Super Twisting es posible seguir el MPP aun en presencia de variaciones abruptas de irradiancia y temperatura que pueden originarse por la presencia de sombras. Con esta técnica de control es posible lograr una eficiencia de conversión mayor o igual al 98 %, un tiempo de respuesta es menor a 0.05s y una amplitud máxima de las oscilaciones en la señal de potencia de 1W.

1.5. Objetivo general

Diseñar un algoritmo de control robusto para el seguimiento del punto de máxima potencia de un SFV capaz de operar ante variaciones en la radiación solar y temperatura.

1.6. Objetivos particulares

1. Validar el modelo matemático del sistema mediante simulaciones numéricas, considerando cambios abruptos de irradiancia y temperatura.
2. Desarrollar un algoritmo de control para el seguimiento del punto de máxima potencia.
3. Validar el algoritmo de control mediante simulaciones numéricas.
4. Comparar el desempeño del algoritmo de control propuesto con los algoritmos clásicos P&O y Conductancia Incremental (INC).

1.7. Alcances y limitaciones

Los alcances de este proyecto son:

- Se desarrolla un algoritmo de control capaz de operar ante variaciones abruptas de irradiancia y temperatura.
- Se valida la técnica de control propuesta por medio de simulaciones numéricas.

Limitaciones:

- No se evalúa la propuesta de control en un SFV constituido por más de un panel solar.
- No se realiza un análisis de costos del algoritmo propuesto con respecto a otros métodos.
- La carga siempre se considera constante y puramente resistiva.
- Se analiza únicamente el caso en el que SFV está constituido por un convertidor Boost.
- No se desarrollan pruebas experimentales.

1.8. Productos generados

1.8.1. Presentación en coloquio

Participación en el 4^{to} Coloquio de Investigación en Ingeniería, 13^{vo} Curso-Taller en Temas Actuales en Ciencias del Agua como ponente del trabajo titulado: Diseño de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de un sistema fotovoltaico, el 12 de noviembre de 2021 (véase la Figura 1.3).

1.8.2. Artículo para participación en un congreso nacional

Se envió el artículo titulado “Super Twisting Sliding Mode Control for the Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System Under Partial Shading” para participar en el Congreso Nacional de Control Automático edición 2023 que se llevará a cabo del 25 al 27 de octubre de 2023 en las instalaciones del Hotel Emporio den Acapulco de Juárez, Guerrero (véase la Figura 1.4).

1.8.3. Artículo en revista

Se está trabajando en la redacción del artículo titulado: A novel strategy for solving the problem of Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System via Sliding Modes Control, que será enviado para su publicación en una revista indizada en el Journal Citations Report.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Sistema fotovoltaico

Los paneles solares son dispositivos compuestos por celdas solares interconectadas que transforman los rayos del sol en energía eléctrica. Como se explica en el Capítulo 3, el sistema fotovoltaico considerado en este trabajo consta de un panel solar (o módulo fotovoltaico), un convertidor Boost conectado a una carga resistiva y un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia.

2.1.1. Celda solar

La celda solar es el componente principal en un panel fotovoltaico, el cual tiene la función de transformar la energía solar que incide sobre él en energía eléctrica por medio de un proceso cuántico-mecánico conocido como efecto fotovoltaico [15].

Las celdas solares están constituidas por material semiconductor dopado que capta fotones provenientes del sol. Tienen un comportamiento similar al diodo; al estar expuesta a la radiación solar, genera una diferencia de potencial en sus extremos, lo cual permite que al tener una carga conectada circule una corriente sobre ella (véase la Figura 2.1).

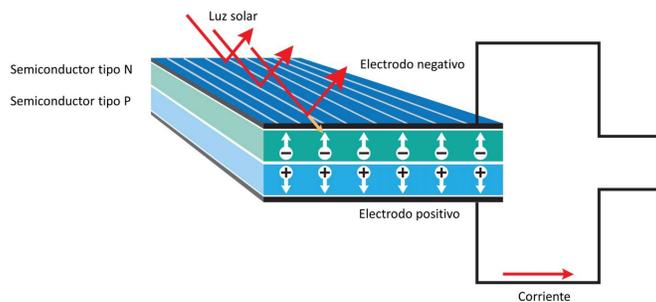


Figura 2.1: Estructura de la celda solar [2].

Un panel fotovoltaico está constituido por celdas conectadas en serie y/o paralelo, como se observa en la Figura 2.2.

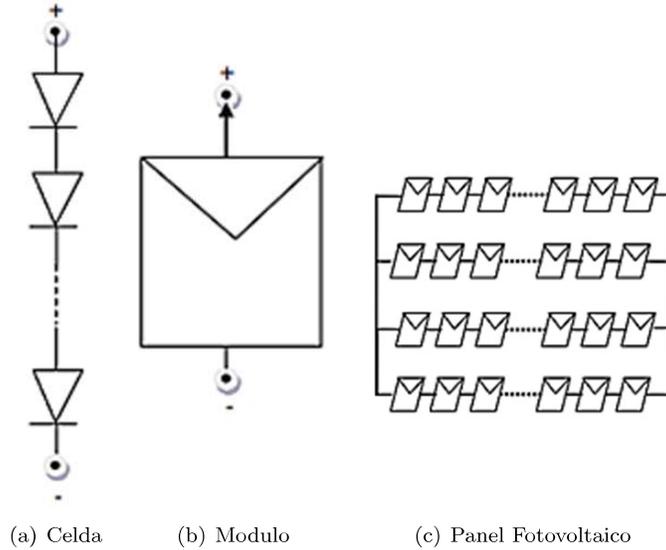


Figura 2.2: Celda, módulo y panel fotovoltaico.

2.1.2. Parámetros de funcionamiento de las celdas solares

Corriente de Cortocircuito: Es la corriente máxima que circula en el panel fotovoltaico cuando el voltaje en sus terminales es nula, también considerada la máxima corriente que la celda podría obtener de forma ideal

Voltaje en circuito Abierto: Es el máximo voltaje que se obtiene en los extremos de la celda solar, se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la celda. Constituye el máximo voltaje que se puede extraer de forma ideal.

2.1.3. Panel solar

Es un módulo fotovoltaico, compuesto por celdas solares conectadas entre ellas en serie o en paralelo, colocadas sobre una superficie metálica, que transforman la radiación solar que incide sobre él en energía eléctrica de corriente directa.

Para analizar el comportamiento de un panel fotovoltaico se debe partir de conocer el circuito equivalente de cada celda solar (véase la Figura 2.3), el cual consta de una fuente alimentación por corriente (I_{ph}), un diodo con una saturación de corriente inversa (I_o), una resistencia en serie (R_s) que describe una resistencia interna al flujo de corriente y una resistencia en paralelo (R_{sh}) que expresa una corriente de fuga [16]. Al ser un modelo que no cuenta con elementos de almacenamiento de energía y es estático, la corriente de salida del panel (I_{pv}) se puede describir mediante la ecuación (2.1),

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \exp \left[\frac{q}{nkT_c A} (V_{pv} + IR_s) \right] - 1 \Big] - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

la nomenclatura empleada se define a continuación:

I_{pv} corriente de salida del panel

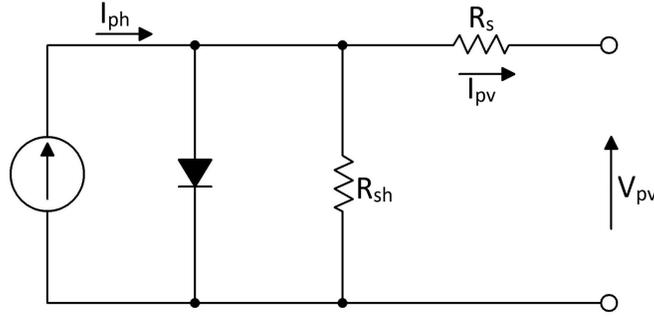


Figura 2.3: Circuito equivalente de una celda solar.

- I_{ph} corriente generada por la radiación solar
- V_{pv} voltaje de salida del panel solar
- N_s número de celdas conectadas en serie
- q carga del electrón ($1.602 \times 10^{-19} C$)
- k_b constante de Boltzman's ($1.381 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$)
- T_c Temperatura del panel en grados Celsius
- I_o corriente de saturación inversa del diodo
- A Factor ideal

La corriente de salida del modulo fotovoltaico I_{pv} se puede describir mediante la ecuación. (2.2), donde se asume que $R_s \ll R_{sh}$ [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{qV_{pv}}{N_s k_b T_c A} \right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

De la Ecuación (2.2), se puede despejar V_{pv} , obteniendo:

$$V_{pv} = \frac{N_s k_b T_c A}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_o - I_{pv}}{I_o} \right) \quad (2.3)$$

Curva característica

Una forma de representar el comportamiento de un panel solar es mediante sus curvas características. Las curvas características son la de corriente-voltaje (I-V) y la de voltaje-potencia (V-P), véase la Figura 2.4.

2.1.4. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los paneles solares cuentan con una amplia gama de aplicaciones en las cuales se requiere satisfacer las necesidades eléctricas, ya sea para proyectos en específico o para introducir energía eléctrica en la red. La clasificación básica de los SFV comprende sistemas autónomos y no autónomos. [18].

Sistemas fotovoltaicos autónomos como su nombre lo indica, son independientes a la red eléctrica.

Sistemas fotovoltaicos no autónomos directamente interconectados a la red eléctrica.

Para la finalidad de este proyecto nos enfocaremos en analizar un sistema fotovoltaico autónomo, el cual cuenta con un panel solar.

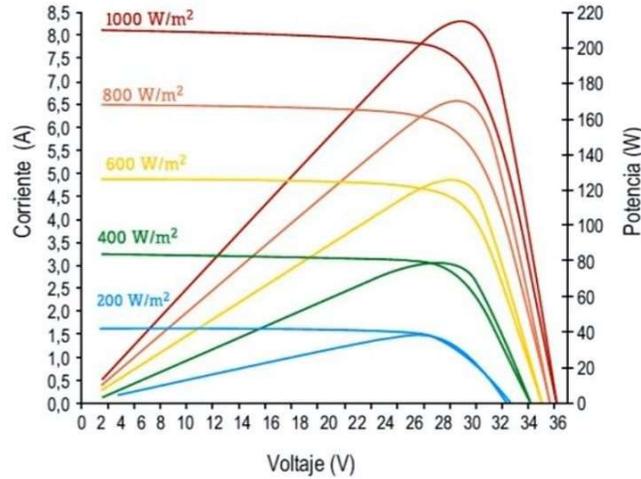


Figura 2.4: Curva I-V, V-P de un panel para una temperatura e irradiancia determinada [3].

2.2. Convertidores de potencia

Los convertidores de potencia, conocidos también como reguladores de conmutación, son dispositivos encargados de modificar el voltaje y la corriente que llegan al dispositivo y acoplar las señales a los requerimientos de la carga, manteniendo la potencia que se les entrega.

Existe una diversidad de configuraciones de convertidores DC-DC, utilizados en la literatura para conectar los módulos fotovoltaicos[19], entre las principales destacan los siguientes.

Convertidor Buck: Este convertidor es conocido como reductor de voltaje, el cual disminuye el voltaje de salida con respecto de la entrada esto por medio de un acondicionamiento, esto a su vez permite que a la salida entregue una mayor corriente. El circuito eléctrico de este convertidor, mostrado en la Figura 2.5, consta de dos dispositivos semiconductores (MOSFET y diodo(D)), un inductor(L), un capacitor(C) y una carga(R) en la salida [20].

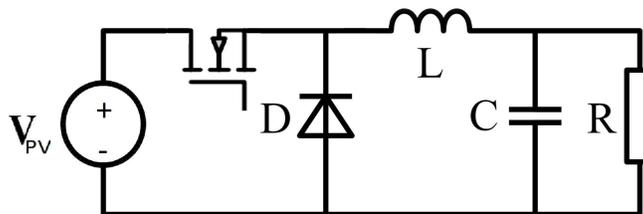


Figura 2.5: Circuito del convertidor Buck.

Convertidor Boost: Mejor conocido como convertidor elevador de voltaje, usa las características de los componentes que almacenan energía (capacitor e inductor) con la finalidad de elevar la corriente que entrega la fuente de alimentación y elevar el voltaje en la carga [21]. Como se observa en la Figura 2.6, el circuito del convertidor esta

compuesto por un inductor, un MOSFET, un diodo, un capacitor y una carga a la salida.

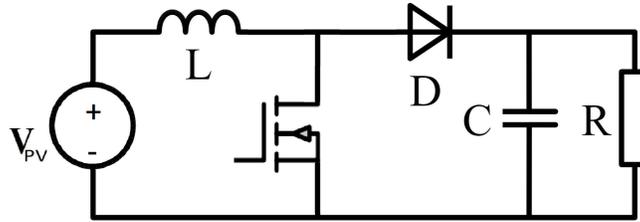


Figura 2.6: Circuito del convertidor Boost.

Convertidor Buck-Boost: Es un convertidor que transforma el voltaje de entrada a un voltaje de salida de mayor o menor amplitud [22]. El circuito eléctrico de este convertidor se puede ver en la Figura 2.7, note que cuenta con dos semiconductores (MOSFET y diodo) así como un inductor, un capacitor y la carga de salida.

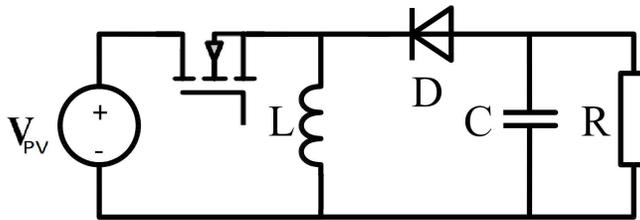


Figura 2.7: Circuito del convertidor Buck-Boost.

Convertidor Cuk: Este tipo de convertidor transforma el voltaje en la salida (que puede ser menor, igual o superior al voltaje de entrada) pero con una polaridad inversa. A diferencia de los anteriores, mantiene la energía en los capacitores [23]. Podemos observar en la Figura 2.8 que este convertidor, a diferencia de los anteriores, cuenta con dos capacitores y 2 inductores, aparte del diodo, el MOSFET y la carga de salida.

Como hemos observado en esta sección, existen diferentes convertidores que se pueden utilizar en los sistemas fotovoltaicos. Para resolver el problema planteado en este proyecto, se emplea un convertidor Boost.

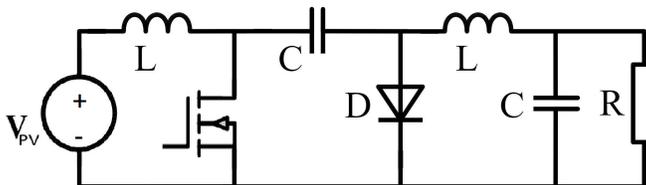


Figura 2.8: Circuito del convertidor Cuk.

2.3. Control por modos deslizantes

El control por modos deslizantes (SMC) es una herramienta eficiente para sistemas no lineales que operan bajo condiciones inciertas. El SMC permite que el sistema se mantenga operando dentro de una superficie definida por el usuario [24], [25].

El SMC consta de dos elementos: el control de conmutación que garantiza la convergencia hacia la superficie deslizante y el control equivalente, que permite que las trayectorias del sistema se mantengan en ésta [26].

Las ventajas del SMC son: robustez contra perturbaciones externas y/o variaciones de los parámetros, no requiere conocer la dinámica del sistema y trabaja a altas frecuencias [27].

El control por modos deslizantes tiene algunas desventajas como son: el efecto denominado chattering que se produce cuando el sistema llega a la superficie deseada y genera altas conmutaciones y señales oscilatorias, además de que el rendimiento del sistema depende de una elección adecuada de la superficie deslizante. Existen distintos tipos de control por modos deslizantes (de primer y segundo orden). Para este proyecto, se utilizará un control por modos deslizantes de segundo orden, conocido como Super Twisting, el cual atenúa el chattering inherente al SMC.

2.4. Efectos de la presencia de sombras en un SFV

Los paneles fotovoltaicos presentan características no lineales. Mantener la corriente y el voltaje en el panel en valores constantes es una tarea desafiante que se vuelve más complicada cuando inciden sombras en él, lo que dificulta la generación de la potencia máxima del SFV. La presencia de sombras produce variaciones en la temperatura y la intensidad de la luz solar captada, lo que complica el MPPT [28], [29].

Además, la vida útil de los paneles sujetos a sombras se acorta rápidamente, esto es porque se puede provocar un sobrecalentamiento en un área determinada y provocar lo que se conoce como “hot spot”, dañando de forma definitiva el panel fotovoltaico, como se observa en la Figura 2.9. Para evitar este problema, generalmente se coloca un diodo bypass,



Figura 2.9: Daños en un panel solar provocados por un sobrecalentamiento [4].

el cual se activa a través de un voltaje negativo dejando que el voltaje de las otras celdas pase por él y no provoque daños.

2.5. Estado del arte

La generación de energía fotovoltaica se ha incrementado a lo largo del tiempo debido a la gran demanda de energía eléctrica que día a día requiere el mundo, es por ello la importancia de lograr el mejor rendimiento en los paneles solares. Es por ello la importancia de los sistemas fotovoltaicos, a pesar de que la eficiencia es muy baja, lo cual es la razón principal de utilizar técnicas que permitan alcanzar el punto de máxima potencia. Esto se puede lograr mediante algoritmos que lleven a cabo el MPPT, existen diferentes técnicas que varían por el tiempo de convergencia, los sensores que requieren para su implementación, los rangos de operación que manejan, su eficacia para rastrear el GMPP entre otros aspectos [30].

Los métodos clásicos aplicados a los sistemas fotovoltaicos para seguir el MPP en condiciones climáticas constantes, son [17]:

- Conductancia Incremental (INC),
- Perturbación y Observación (P&O),
- Lógica Difusa,
- Hill Climbing,
- Soft computing,
- Redes neuronales artificiales,
- Basados en relaciones de proporcionalidad.

Estos métodos, por sí solos, no logran su objetivo cuando se encuentran en situación de cambios abruptos de condiciones climáticas, por lo que para este trabajo es imprescindible conocer algunos de los algoritmos que se han desarrollado para el MPPT.

Algunas de las técnicas para el MPPT se bosquejan en la Figura 2.10. Esta clasificación se basa en el trabajo de revisión [31].

Algunos de los métodos con mejor rendimiento se describen a continuación.

Optimización de enjambre de partículas (PSO) La optimización de enjambre de partículas es una meta heurística inspirada en general en la vida natural, específicamente en el comportamiento social de los animales, desarrollada por James Kennedy y Russel Eberhart [32]. El enjambre corresponde a un grupo de agentes llamados partículas, cada partícula es la solución a un problema. Este método fue diseñado para seguir la curva de potencia-voltaje de un PV, su propósito es la maximización de la potencia. El control parte de un vector inicial del ciclo de trabajo con tres partículas, hasta detectar la variación del patrón e ir buscando el nuevo MPP. Para implementar eficientemente el método PSO se utilizan FPGAs debido a que añade robustez y flexibilidad, además de programarlo en lenguaje VHDL e implementarlo en Xilinx Virtex5, lo que ayuda a mejorar la precisión [33].

Optimización de colonia de hormigas (ACO) El método optimización de colonia de hormigas es un algoritmo de búsqueda aleatoria que genera un ciclo de trabajo aleatorio que ayude a alcanzar la potencia máxima en poco tiempo [34].

El objetivo principal de la colonia de hormigas es buscar de forma aleatoria una función objetivo, provocando una dirección y velocidad más precisa [5]. Para lograr un

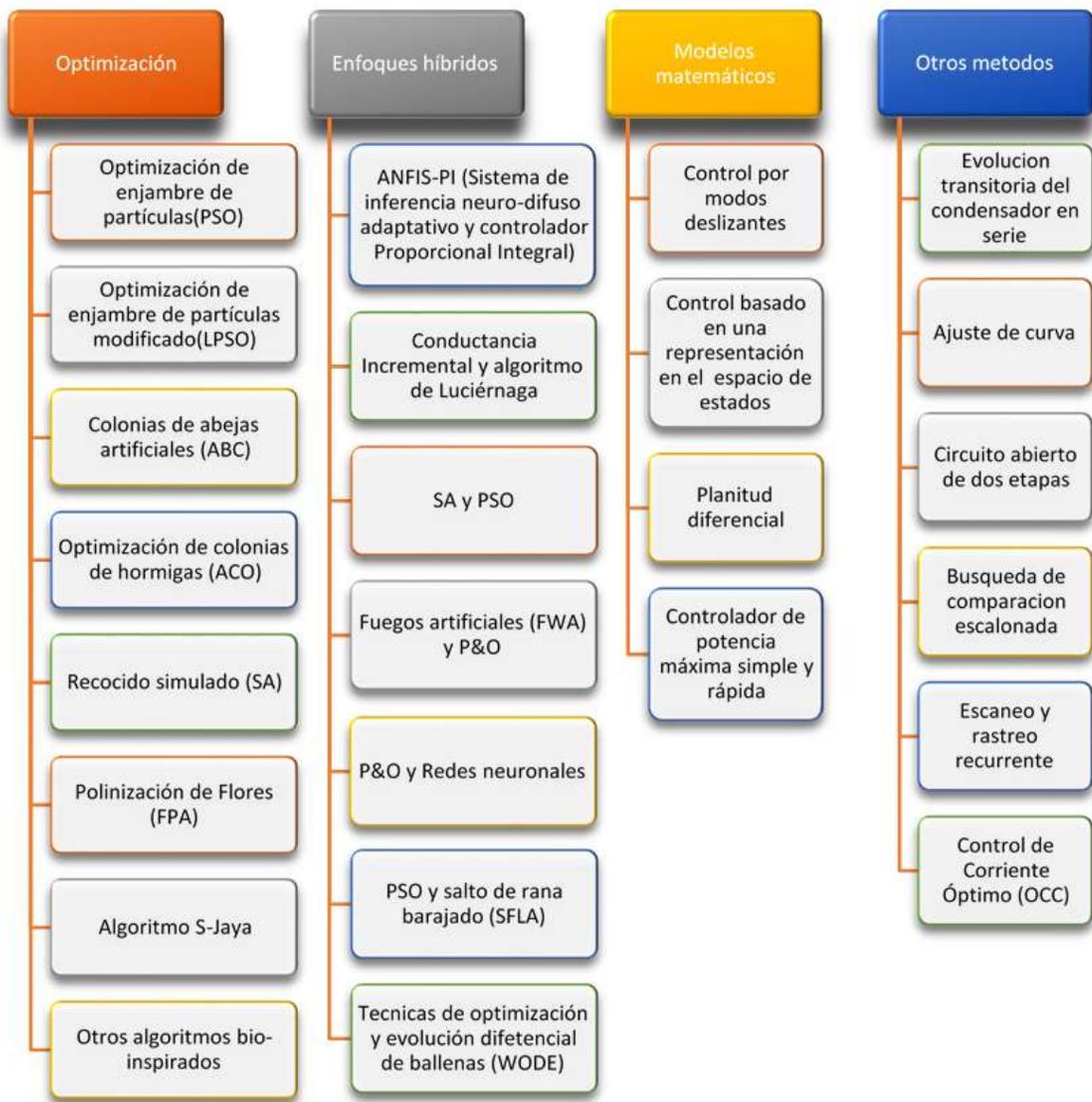


Figura 2.10: Métodos para el MPPT en condiciones de sombras parciales.

MPPT se utilizan múltiples colonias de hormigas para identificar el camino más corto y encontrar el valor óptimo, como se observa en la Figura 2.11.

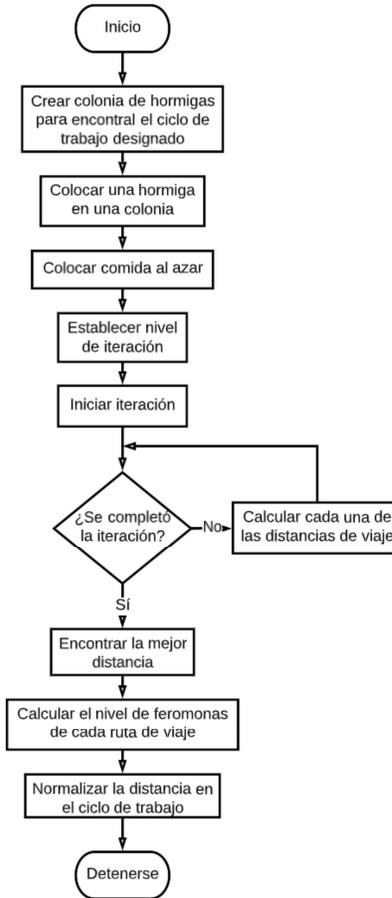


Figura 2.11: Diagrama de flujo de ACO [5].

P&O y redes neuronales (ANN) Es una técnica híbrida de MPPT potencia basada en predecir la región del MPP empleando redes neuronales, mediante la estimación de sus límites de voltaje, después éste se entrega al algoritmo P&O, el cual busca el MPP determinado, lo que resulta en una respuesta menor a 0.1s, aumentando la potencia a la salida del panel. Para implementar esta técnica es necesario entrenar la red neuronal para obtener el conjunto de datos (alrededor de 17,000 puntos), dando como salida de la ANN los voltajes mínimo y máximo que constituyen las señales de entrada del algoritmo P&O [35].

Control por modos deslizantes Este método se basa en controlar el voltaje del panel fotovoltaico el cual se modela como un punto con un campo potencial que atrae los estados controlados hacia la región deseada [36], conociendo los valores mínimos y máximos de irradiancia esperada, así como los puntos de máxima potencia de salida del PV.

Para implementar este método se estima el voltaje en el punto de máxima potencia V_{MPP} mediante alguna técnica tal como el algoritmo P&O. Esta estimación constituye

la referencia para el control por modos deslizantes el cual producirá la señal de control necesaria, tomando como superficie deslizante la ecuación:

$$s = V_{pv} - V_{MPP} \quad (2.4)$$

donde V_{pv} es el voltaje de salida del panel. La ley de control u que permite alcanzar el MPPT se define como la ecuación:

$$u = \frac{1}{2}[1 - \text{sign}(s)] \quad (2.5)$$

Con este método se logra el seguimiento de la potencia máxima y se regula el voltaje del sistema fotovoltaico en el voltaje deseado, lo cual mejora el rendimiento en términos de eficiencia y ondas de potencia [37].

Control por planitud diferencial El control por planitud diferencial es la forma de linealización exacta de un sistema plano a través de una retroalimentación endógena en los sistemas dinámicos que al satisfacer esta propiedad pueden ser considerados sistemas diferencialmente planos [38]. Se dice que un sistema es diferencialmente plano se puede expresar directamente en términos de un conjunto particular de salidas planas y un número finito de sus derivadas.

La planitud es una técnica utilizada para establecer las características sobresalientes para analizar el equilibrio del sistema, las limitaciones y/o restricciones del control, para lograr el seguimiento de trayectoria deseado y evitar la saturación del controlador [39].

Escaneo y rastreo recurrente Este método ha sido diseñado para mantenerse en constante rastreo de la curva de P-V de un panel fotovoltaico por medio de tres pasos simples [40]:

1. Escanear: De inicio se requiere establecer un rango y un tamaño para el proceso. Se toman muestras cercanas al punto más alto de la curva P-V, para ello se considera que la corriente en el MPP (I_{MPP}) se encuentra aproximadamente a su máxima capacidad de la I_{sc} , lo cual se establece como límite superior para el punto de partida.
2. Seguimiento del MPP: Se inicia un algoritmo MPPT, el cual comienza con el punto de potencia más alto, esto garantiza que entregue la potencia máxima.
3. Reiniciar: Debido a los cambios abruptos que se pueden tener en el panel solar, se usa un disparador de reinicio el cual por medio de la detección de cambio en la potencia del panel y/o la corriente de corto circuito (I_{sc}) en intervalos de tiempo regular, hace que el algoritmo regrese al valor inicial siempre y cuando haya cambiado la potencia del panel. Estos pasos se pueden identificar en la Figura 2.12. Al mantenerse en rastreo constante, se dice que tiene una eficiencia de conversión mayor al 98% aún en presencia de variaciones abruptas en las condiciones de operación, la operación del método se validó mediante simulaciones numéricas en [41].

Control basado en la corriente en condiciones óptimas de operación El control se basa en calcular la corriente de referencia a la cual se presenta el MPP con base en los parámetros operativos de dos paneles distintos (Sanyo HIT 200 y LORENTZ75) en condiciones estándar, es decir, temperatura de 25°C e irradiancia solar de 1000

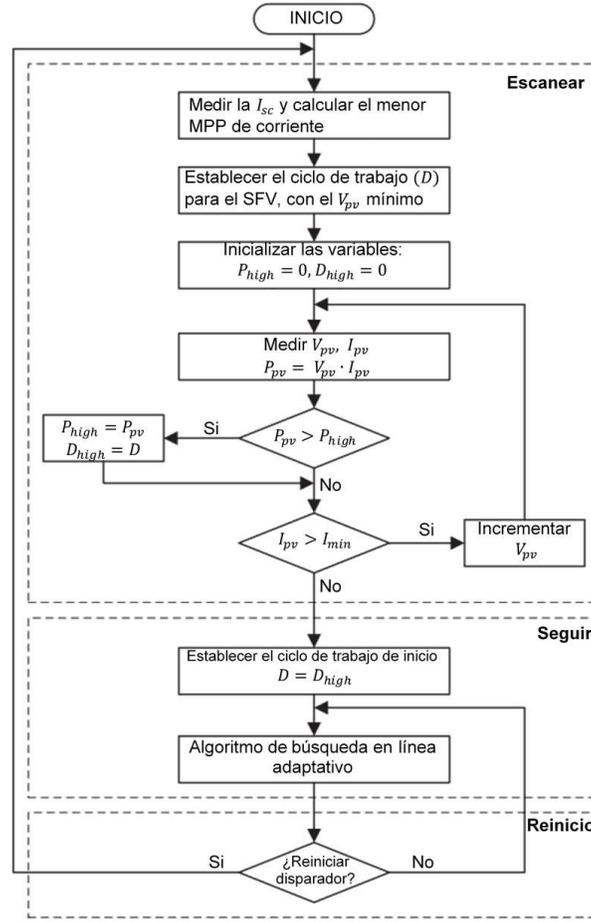


Figura 2.12: Diagrama de flujo de escaneo y rastreo recurrente.

W/m^2 [42]. Los parámetros empleados son 1) corriente de corto circuito, 2) voltaje de circuito abierto, 3) corriente de máxima potencia en condiciones estándar y 4) voltaje de máxima potencia del panel en condiciones estándar.

La corriente máxima de un panel se puede caracterizar de acuerdo con la siguiente ecuación [42]:

$$I_{MPP} = I'_{sci} \left[1 - \frac{1}{\text{Lambert}W(\exp(A'+1))} \right] \quad (2.6)$$

donde A' esta dada por:

$$A' = \frac{1}{V'_m - V'_{oc}} \ln \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}} \right) \quad (2.7)$$

y $I'_m, I'_{sc}, V'_m, V'_{oc}$ son:

$$I'_m = I_m \frac{I_r}{I_{rref}} (1 + a\Delta T_c) \quad (2.8)$$

$$I'_{sc} = I_{sc} + \frac{I_r}{I_{rref}}(1 + a\Delta T_c) \quad (2.9)$$

$$V'_{oc} = V_{oc}(1 - c\Delta T_c) \ln(e + b\Delta I_r) \quad (2.10)$$

$$V'_m = V_m(1 - c\Delta T_c) \ln(e + b\Delta I_r) \quad (2.11)$$

donde: I_{rref} y T_{cref} son la irradiancia y temperatura en condiciones estándar, así como: $\Delta T_c = T_c - T_{cref}$, $\Delta I_r = \frac{I_r}{I_{rref}} - 1$. Los valores comunes de a , b , c son:

$$a = 0.0025^\circ\text{C}$$

$$b = 0.5$$

$$c = 0.00288^\circ\text{C}$$

La Tabla 2.1 muestra las principales características de los algoritmos de control diseñados para el seguimiento del punto de máxima potencia global (GMPPT, por sus siglas en inglés, Global Maximum Power Point) que se describieron en este capítulo. Esta tabla se presenta con fines ilustrativos únicamente, ya que no es posible hacer comparaciones directas entre los métodos debido a que las condiciones en las que se realizaron las pruebas son diferentes para cada caso.

Ref.	Métodos GMPPT	Dependiente del modelo	Tiempo de respuesta (s)	Convertidor de potencia	Complejidad en la implementación	Sensores requeridos	Eficiencia (%)
[43]	INC	No	0.2	Boost	Medio	Voltaje, corriente	93.7
[44]	P&O	No	0.12	Boost	Bajo	Voltaje, corriente	99.1
[45]	Lógica difusa	Sí	0.9	Buck-Boost	Alto	Voltaje, corriente y otros*	-
[35]	P&O-ANN	Sí	-	Boost	Alto	Voltaje, corriente y otros*	97.64
[33]	PSO	Sí	0.32	Buck-Boost	Medio	Voltaje, corriente y otros*	98.92
[34]	ACO	Sí	1.1	Boost	Bajo	Voltaje, corriente	-
[37]	Control por modos deslizantes	No	0.15	Boost	Medio	Voltaje, corriente	-
[46]	Control por planitud diferencial	Sí	0.05	Boost	Medio	Voltaje y corriente	
[40]	Escaneo y rastreo recurrente	Sí	0.15	Boost	Alto	Voltaje, corriente y otros*	99.67
[42]	Control basado en condiciones óptimas de operación	Sí	0.08	Boost	Relativamente bajo	Voltaje, corriente y otros*	99.98

* Puede requerir sensores adicionales, como sensores de temperatura, de radiación entre otros dependiendo de la configuración del método.

Tabla 2.1: Características de distintos métodos para el GMPPT. Datos tomados de [6] y [31].

Capítulo 3

Super Twisting SMC para el MPPT basado en referencias de corriente y voltaje

En esta sección se analiza el desempeño del control por modos deslizantes (SMC) Super Twisting para resolver la tarea de GMPPT. La superficie de deslizamiento se diseña de tal forma que el problema se traduce en resolver la tarea de seguimiento de trayectorias clásico.

Las trayectorias de referencia para seguir el MPP se determinan de dos formas:

- a través de técnicas de regresión lineal y múltiple, y
- utilizando una caracterización teórica de los parámetros óptimos de operación en el MPP.

3.1. Modelo matemático del sistema fotovoltaico

Los elementos principales de un SFV son:

Panel fotovoltaico: capta la energía solar y la transforma en electricidad; suministra una potencia al sistema.

Convertidor Boost: circuito elevador de tensión, con elementos almacenadores de energía.

Control para el MPPT: regula el ciclo de trabajo del convertidor para garantizar el seguimiento del MPP.

Carga: son elementos que consumen energía eléctrica, para este trabajo se considera una carga puramente resistiva.

El SFV considerado en este trabajo consta de un panel fotovoltaico Renesola JC250® conectado a un convertidor de potencia Boost, el cual es controlado por medio de un ciclo de trabajo (u), que a su vez se conecta a una carga fija, como se puede ver en la Figura 3.1.

La Figura 3.2 muestra el diagrama del convertidor Boost. El convertidor Boost es un regulador de conmutación elevador de voltaje, el cual incluye un inductor y un capacitor para almacenar energía proveniente de la fuente de alimentación. En este proyecto la fuente de alimentación corresponde al voltaje que entrega el panel fotovoltaico.

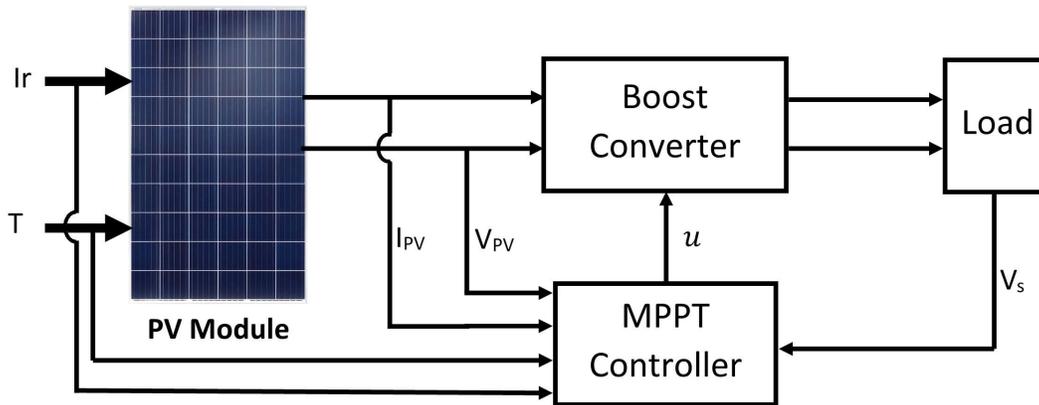


Figura 3.1: Diagrama del sistema fotovoltaico.

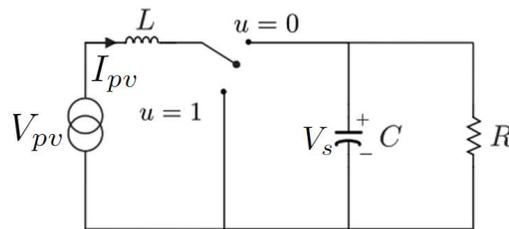


Figura 3.2: Diagrama electrónico del Convertidor Boost [6].

El circuito del convertidor se observa en la Figura 3.2. El interruptor (u) consta de dos elementos: un transistor de conmutación rápida que recibe la señal de control a una frecuencia específica y un diodo de rápida recuperación. La función del diodo es proteger al inductor para bloquear la corriente que regresa del capacitor, debido a que en este punto la energía es suministrada a la carga.

El interruptor u tiene dos estados, uno cuando esta en modo de conducción (véase la Figura 3.3), permitiendo al inductor almacenar la energía, mientras el transistor esta en modo saturación, y el diodo esta polarizado de forma inversa cortocircuitado a tierra, al no conducir energía el sistema se comporta como un interruptor abierto.

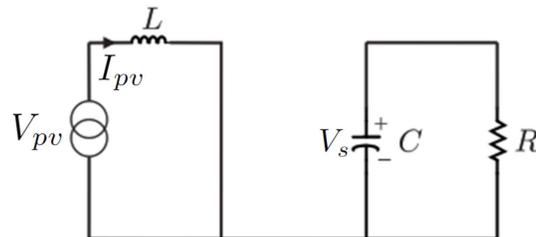


Figura 3.3: Circuito equivalente con el interruptor en la posición $u = 1$ [6].

El modelo matemático del sistema se deriva de la ley de voltaje de Kirchhoff, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

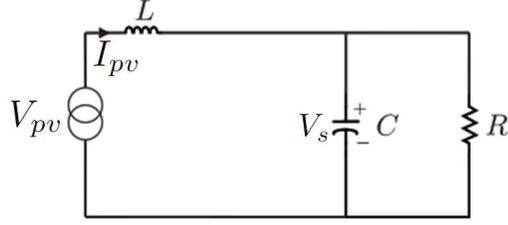


Figura 3.4: Circuito equivalente con el interruptor en posición 0 [6].

$$\frac{dI_{pv}}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \quad (3.1)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{RC} \quad (3.2)$$

El otro estado es cuando el interruptor se encuentra en posición 0 (no conduce) (Figura 3.4), el transistor está en modo de no conducción lo que permite el paso de la corriente almacenada en el inductor hacia la carga, las ecuaciones resultantes son:

$$\frac{dI_{pv}}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_s}{L} \quad (3.3)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{I_{pv}}{C} - \frac{V_s}{RC} \quad (3.4)$$

De acuerdo con [47], las ecuaciones obtenidas se combinan en un solo modelo dinámico, formando un sistema de ecuaciones bilineales que describen el convertidor elevador:

$$\frac{dI_{pv}}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{(1-u)V_s}{L} \quad (3.5)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{(1-u)I_{pv}}{C} - \frac{V_s}{RC} \quad (3.6)$$

El modelo descrito por las ecuaciones (3.5)-(3.6), puede representarse en la forma general de un sistema invariante en el tiempo no lineal definido por la siguiente ecuación [48]:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.7)$$

donde:

$$x = [I_{pv} \ V_s]^T \ u \in [0 \ 1].$$

3.2. Diseño de control

La técnica Super Twisting SMC es una estrategia de control no lineal derivada de la teoría de sistemas de estructura variable que se introdujo originalmente en [49] (véase también [50]). Debido a sus múltiples ventajas, tales como una implementación simple, robustez y buena respuesta dinámica, esta técnica se ha aplicado con éxito a los convertidores DC-DC [51]. Su principal ventaja es que no requiere información sobre la derivada temporal de la

variable de deslizamiento y reduce significativamente los fenómenos de vibración (chattering) en la señal de salida [52].

El SMC requiere la formulación de un control equivalente u_{eq} junto con un control de conmutación u_{st} , i.e.,

$$u = u_{eq} + u_{st} \quad (3.8)$$

La superficie de deslizamiento debe elegirse de tal forma que cuando las trayectorias del sistema converjan a ésta, se alcance la máxima potencia de salida.

En este capítulo se proponen diferentes superficies de deslizamiento que permiten el seguimiento del MPP. Con la primer propuesta se busca que la corriente de salida I_{pv} alcance una señal de referencia I_{MPP} correspondiente a la corriente en el MPP. La superficie deslizante se define como:

$$s(I_{pv}) = I_{pv} - I_{MPP} \quad (3.9)$$

La estrategia de control debe garantizar que $s(I_{pv}) = 0$, lo que implica que $I_{pv} = I_{MPP}$ con lo que se logra el seguimiento del MPP.

De manera similar, se propone una segunda superficie de deslizamiento relativa al voltaje. Es decir, se busca que el voltaje de salida del panel V_{pv} alcance la señal de referencia V_{MPP} que corresponde al voltaje en el MPP. La superficie de deslizamiento toma la forma:

$$s(V_s) = V_{pv} - V_{MPP} \quad (3.10)$$

El control equivalente u_{eq} es propuesto en [48] como:

$$u_{eq} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} \quad (3.11)$$

El control de conmutación u_{st} introducido en [53] está dado por:

$$u_{st} = -\lambda|S|^{\frac{1}{2}} - \Upsilon \int \text{sign}(S) \quad (3.12)$$

donde λ y Υ son parámetros de diseño.

En [54] y [55] se puede consultar el análisis de estabilidad basado en el enfoque de Lyapunov para esta estrategia de control.

Una vez que definieron las superficies de deslizamiento y la estructura del SMC, el problema radica en definir las señales de referencia I_{MPP} y V_{MPP} . Para esto se exploran dos posibilidades:

1. Generar las referencias a partir de técnicas de regresión.
2. Utilizar la caracterización teórica de las señales deseadas considerando parámetros óptimos de operación.

3.2.1. Referencias generadas a partir de técnicas de regresión

Las técnicas de regresión permiten identificar la correlación entre una o varias variables independientes y una variable dependiente, ajustando un modelo lineal a los datos disponibles [56]. Para el módulo fotovoltaico Renesola JC250[®], se obtuvieron ecuaciones representativas de la relación irradiancia-temperatura con respecto a la corriente y el voltaje.

Se ajustaron los siguientes modelos:

- 1) Dos planos para determinar I_{MPP} o V_{MPP} (variables dependientes) a partir de la irradiancia y la temperatura (variables independientes) usando regresión múltiple (MR).
- 2) Una línea recta para determinar I_{MPP} (variable dependiente) a partir de la irradiancia (variable independiente) usando regresión lineal (LR).

Para generar las distintas referencias voltaje y corriente, se realizaron los siguientes pasos, en los cuales se analizaron los datos obtenidos en las curvas características del panel fotovoltaico.

1. Se generaron 63000 curvas de $V_{pv} - P_{pv}$ (tensión pico-potencia pico) variando la radiación solar entre 100 y 1150 W/m^2 , en incrementos de 1 W/m^2 . La temperatura se varió entre 5 °C y 65 °C para cada valor de irradiancia, en incrementos de 1 °C. El voltaje del panel se varió entre 0 V y 38 V, para cada curva, considerando incrementos de 0.1 V.
2. Para cada curva, el voltaje y la corriente a los que el panel alcanza la potencia máxima (V_{MPP}, I_{MPP}) se determinaron y almacenaron junto con las condiciones de temperatura e irradiancia solar.
3. De las 63000 tríadas de datos (V_{MPP} , irradiancia solar y temperatura), el modelo de regresión multivariante definido en la ecuación (3.13) se ajustó para predecir el V_{MPP} . De la misma manera se predice la I_{MPP} (véase la Ecuación (3.14)).

El análisis de los datos obtenidos en los pasos anteriores se desarrolló empleando el software Matlab, Simulink.

Referencia de Voltaje

La ecuación (3.13) describe la relación encontrada entre el V_{MPP} , la irradiancia I_r y la temperatura del panel T_c .

$$V_{MPP} = a_0 + a_1 I_r + a_2 T_c \quad (3.13)$$

donde: a_0, a_1, a_2 son constantes.

En la Figura 3.5 se muestra la relación definida en la ecuación (3.13). Se obtuvieron los siguientes valores para los coeficientes (con límites de confianza del 95%),

$$R^2 = 0.9904$$

$$a_0 = 33.89, \quad a_0 \in (33.89, 33.9)$$

$$a_1 = 0.002357, \quad a_1 \in (0.002347, 0.002367)$$

$$a_2 = -0.2204, \quad a_2 \in (-0.2206, -0.2202)$$

Referencias de Corriente

La ecuación (3.14) describe la relación encontrada entre la I_{MPP} , la irradiancia I_r y la temperatura del panel T_c .

$$I_{MPP} = a_0 + a_1 I_r + a_2 T_c \quad (3.14)$$

Se obtuvieron los siguientes valores para los coeficientes (límites de confianza del 95%),

$$a_0 = 0.03452, \quad a_0 \in (0.03425, 0.03479)$$

$$a_1 = 0.008239, \quad a_1 \in (0.008239, 0.00824)$$

$$a_2 = -0.001048, \quad a_2 \in (-0.001053, -0.001043)$$

El modelo se ajusta a la I_{MPP} perfectamente ($R^2 = 1$), entonces se puede concluir que

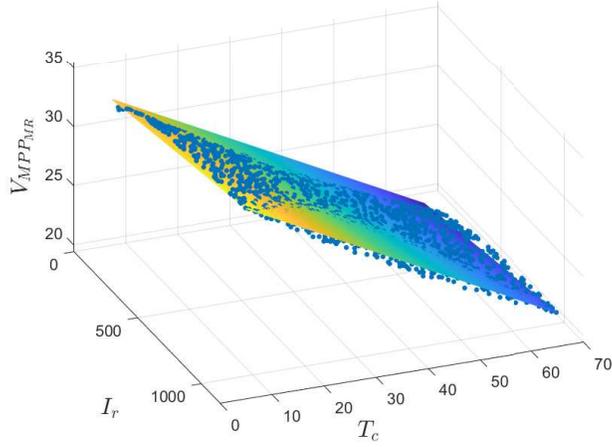


Figura 3.5: Relación voltaje-irradiancia-temperatura.

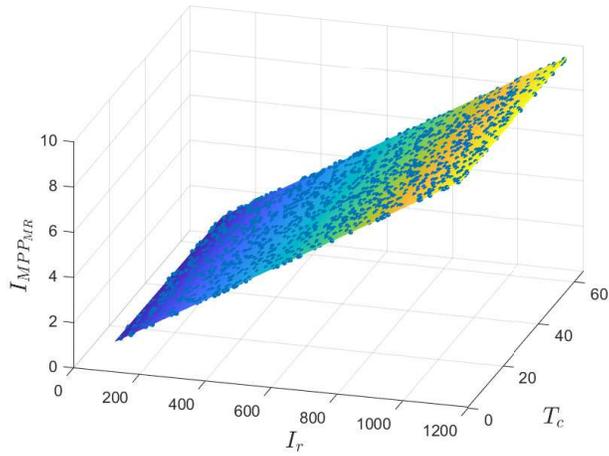


Figura 3.6: Relación corriente-irradiancia-temperatura.

la I_{MPP} es independiente de la temperatura del panel (coeficiente de correlación de Pearson $\rho = -0.0074$, y el coeficiente a_2 es cercano a 0 (-0.001048), lo que implica que la temperatura del panel puede descartarse del modelo. Además, se encuentra una correlación perfecta entre la I_{MPP} y la irradiancia.

Por las razones anteriores, se determina un modelo lineal de primer orden que permite caracterizar la I_{MPP} en función de la irradiancia:

$$I_{MPP} = c_0 + c_1 I_r \quad (3.15)$$

donde $c_0 = -0.002159$, $c_0 \in (-0.002545, -0.001772)$
 $c_1 = 0.008239$, $c_1 \in (0.008239, 0.00824)$
 $R^2 = 0.9999$

La relación definida en (3.15) se observa en la Figura 3.7.

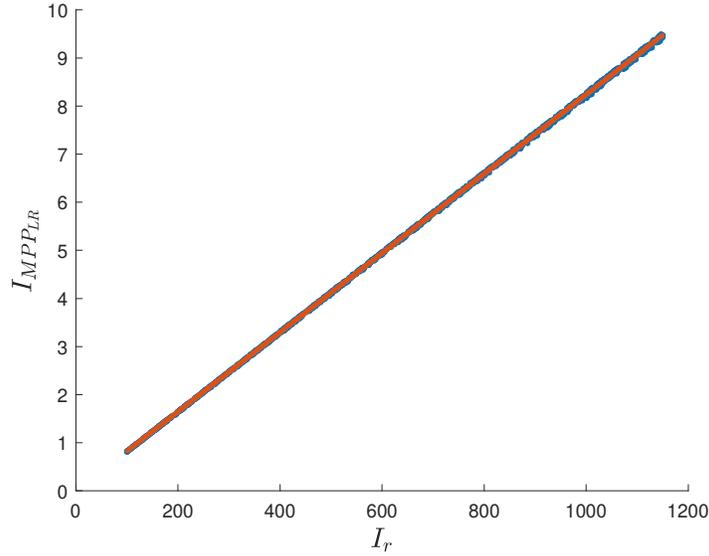


Figura 3.7: Relación corriente-irradiancia.

3.2.2. Referencias generadas a partir de parámetros óptimos de operación

Los parámetros ideales de operación de los paneles solares son especificados por el fabricante. Para este trabajo se realiza el análisis con respecto a cuatro parámetros de operación:

- Corriente de corto circuito del panel I_{sc}
- Voltaje de circuito abierto del panel V_{oc}
- Corriente de salida del panel I_m
- Voltaje de salida del panel V_m

Estos parámetros se obtienen cuando el panel está funcionando en condiciones estándar, es decir, a $1000W/m^2$ y $25^\circ C$ [42], [57].

A partir de estos parámetros ideales se caracteriza el voltaje y la corriente en el MPP.

Referencia de Corriente

La corriente ideal del panel fotovoltaico se determina a través de la ecuación (2.1).

Una celda fotovoltaica ideal tiene una resistencia en serie equivalente R_s muy pequeña en comparación con la resistencia en paralelo R_{sh} [58]. Haciendo esta consideración, para $N_s = 1$, se tiene:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \exp(BV) - 1 \quad (3.16)$$

$$I_{pv} \cong I_{ph} - I_o \exp(BV) \quad (3.17)$$

donde:

$$B = \frac{q}{N_s K T A} \quad (3.18)$$

Si las terminales de salida del panel están cortocircuitadas, es decir, $V_{pv} = 0$, entonces $I_{pv} = I_{sc}$. Sustituyendo esta condición en la ecuación (3.17), se obtiene:

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3.19)$$

Ahora, si las terminales de salida del panel están en circuito abierto, es decir, $V_{pv} = V_{oc}$, entonces $I_{pv} = 0$. Sustituyendo esta condición y la ecuación (3.19) en (3.17), se tiene que:

$$I_o = I_{sc} \exp(-BV_{oc}) \quad (3.20)$$

Los parámetros óptimos de operación de corriente y voltaje, denotados por I_m y V_m , respectivamente, que generan la potencia máxima en las condiciones ambientales estándar del panel, están relacionados con I_{sc} y V_{oc} a través de la ecuación (3.21), que se deriva de las ecuaciones (3.16) y (3.20) [58].

$$I_m = I_{sc} [1 - \exp\{B(V_m - V_{oc})\}] \quad (3.21)$$

Dado que el fabricante proporciona los parámetros I_{sc} , V_{oc} , I_m y V_m , a partir de (3.21), se puede conocer el valor de B a partir de la siguiente ecuación:

$$B = \frac{1}{V_m - V_{oc}} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \quad (3.22)$$

Para caracterizar el MPP en las condiciones ambientales no estándar del panel, se deben definir los parámetros I'_{sc} , V'_{oc} , I'_m , V'_m y B' . Según [59], estos parámetros están relacionados con I_r y T_c , como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$I'_{sc} = I_{sc} + \frac{I_r}{I_{rref}} (1 + a\Delta T_c) \quad (3.23)$$

$$V'_{oc} = V_{oc}(1 - c\Delta T_c) \ln(e + b\Delta I_r) \quad (3.24)$$

$$I'_m = I_m \frac{I_r}{I_{rref}} (1 + a\Delta T_c) \quad (3.25)$$

$$V'_m = V_m(1 - c\Delta T_c) \ln(e + b\Delta I_r) \quad (3.26)$$

$$B' = \frac{V'_{oc}}{V'_m - V'_{oc}} \ln \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}} \right) \quad (3.27)$$

donde:

ΔT_c y ΔI_r se definen como: $\Delta T_c = T_c - T_{cref}$, $\Delta I_r = \frac{I_r}{I_{rref}} - 1$, I_{rref} y T_{cref} son la irradiancia y la temperatura en condiciones estándar.

De acuerdo con [42], los valores de a , b , c son :

$$a = 0.0025/^\circ\text{C}$$

$$b = 0.5$$

$$c = 0.00288/^\circ\text{C}$$

Por lo que al usar la función W Lambert, como se explica en [42], es posible definir la corriente del panel en el MPP, en función de sus parámetros operativos estándar, como se muestra en la ecuación (3.28).

$$I_{MPP} = I'_{sc} \left[1 - \frac{1}{\text{LambertW}(\exp^{(B'+1)})} \right] \quad (3.28)$$

Referencia de Voltaje

Para determinar la referencia de voltaje, se realiza un análisis similar al realizado para determinar la ecuación (3.28). Según [57], el voltaje en el MPP se puede definir como:

$$V_{MPP} = \frac{1}{B'} \left[LambertW(e^{B'V'_{oc}+1} + e) - 1 \right] \quad (3.29)$$

Las referencias dadas en las ecuaciones (3.13), (3.15) así como (3.28) y (3.29), corresponden a las señales de entrada consideradas para el control por modos deslizantes Super Twisting.

3.3. Resultados de simulaciones numéricas

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas del sistema fotovoltaico en lazo cerrado con el algoritmo Super Twisting SMC. Las señales de referencia de V_{MPP} y I_{MPP} se derivan de la técnica de regresión (ecuaciones (3.13) y (3.15)), y, alternativamente, de las ecuaciones determinadas a partir de los parámetros óptimos de operación (ecuaciones (3.28)-(3.29)).

Para el desarrollo de simulaciones numéricas se considera el panel fotovoltaico Renesola JC250[®] cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.1.

Parámetro	Valor numérico
I_r	1000 W/m^2
I_o	$1.9164 \times 10^{-9} A$
R_s	0.29835 Ω
N_s	60 celdas
k_b	1.38×10^{-23}
q	1.6×10^{-19}
A	1.1

Tabla 3.1: Especificaciones del panel fotovoltaico JC250 Renesola[®].

En la Tabla 3.2 se muestran los valores numéricos de los elementos del convertidor Boost. Estos valores se calcularon con base en el voltaje y la corriente entregados por el módulo fotovoltaico y la carga aplicada al sistema; en este caso, se toma una carga resistiva.

Parámetros	Valor
Resistencia de carga	12 Ω
Capacitor de salida	470 μf
Frecuencia de operación PWM	45 Khz
Inductancia	10 mH
Capacitor de entrada	330 μf

Tabla 3.2: Parámetros del Convertidor Boost.

Para lograr un resultado satisfactorio, las ganancias de control de conmutación u_{st} de la ecuación (3.12) se proponen como en [60]: $\lambda = 0.1$ $\Upsilon = 0.01$.

Se analiza el desempeño del algoritmo Super Twisting SMC para dos superficies deslizantes. La primera, definida en (3.9), está destinada a dirigir I_{pv} a una señal de referencia I_{MPP} . La segunda, definida en (3.10), permite conducir el V_{pv} a una referencia V_{MPP} . Para el análisis se utilizaron cambios bruscos en la irradiancia y la temperatura; se consideran los

tres casos de estudio descritos a continuación.

Caso 1: En el intervalo de 0 a 1 s, la temperatura es de 25 °C, de 1 a 2 s aumenta a 40 °C, y de 2 a 3 s, incrementa nuevamente a 60 °C, mientras que la irradiancia permanece constante en $1000 \frac{W}{m^2}$ (véase la Figura 3.8).

Caso 2: En el intervalo de 0 a 1 s, la irradiancia es de $1000 \frac{W}{m^2}$, de 1 a 2 s, la irradiancia disminuye a $900 \frac{W}{m^2}$, y, en el intervalo de 2 a 3 s, la irradiancia disminuye a $800 \frac{W}{m^2}$. Se considera una temperatura constante de 25 °C (véase la Figura 3.9).

Caso 3: En el intervalo de 0 a 1s, la temperatura es de 25 °C y la irradiancia es de $1000 \frac{W}{m^2}$, de 1 a 2 s, la temperatura aumenta a 40 °C y la irradiancia disminuye a $900 \frac{W}{m^2}$, en el intervalo de 2 a 3 s, la temperatura aumenta a 60 °C, mientras que la irradiancia disminuye a $800 \frac{W}{m^2}$ (véase la Figura 3.10).

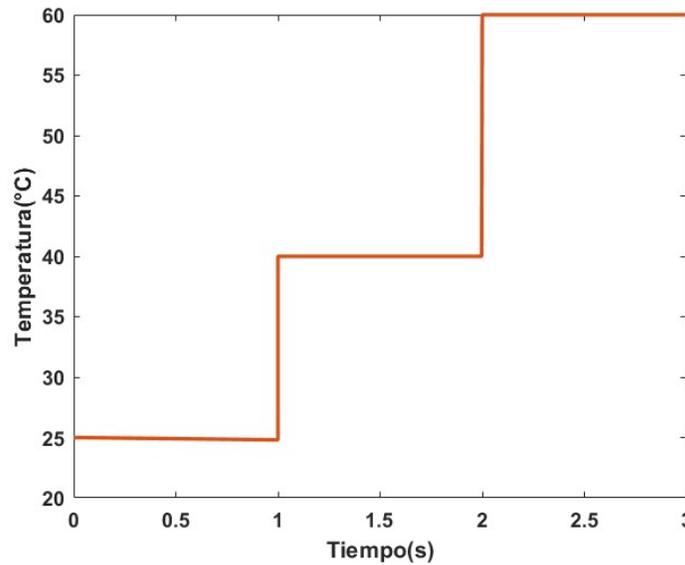


Figura 3.8: Caso 1 Temperatura Variable.

El objetivo de considerar cambios abruptos en la temperatura e irradiancia en el intervalo de 0 a 3 s, que difícilmente ocurrirán en el caso real, es ilustrar la efectividad de la ley de control en escenarios desafiantes. Si el desempeño del controlador es satisfactorio en los casos mencionados, implica que su funcionamiento será apropiado ante el tipo de variaciones que ocurren en un escenario real (con variaciones suaves).

Para el análisis con las distintas referencias para seguir el MPP se utiliza la siguiente nomenclatura. I_{MPPR} y V_{MPPR} son las referencias de corriente y voltaje definidas en (3.15) y (3.13), respectivamente, generadas por la técnica de regresión. I_{MPPOC} y V_{MPPOC} son las referencias de corriente y voltaje definidas en (3.28) y (3.29), respectivamente, basadas en los parámetros óptimos de operación.

La Tabla 3.3 muestra las características de la respuesta del sistema considerando las condiciones de operación descritas en el Caso 1. Las curvas de potencia se muestran en la

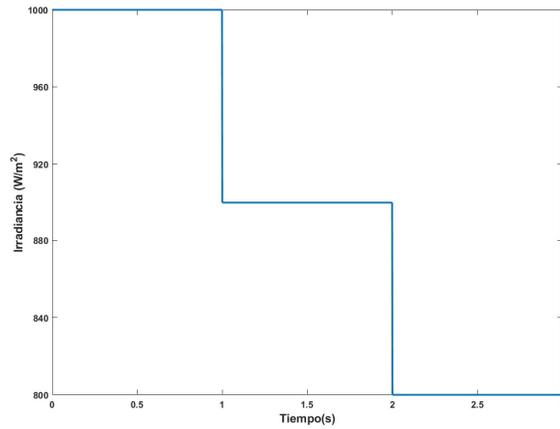


Figura 3.9: Caso 2 Irradiancia Variable.

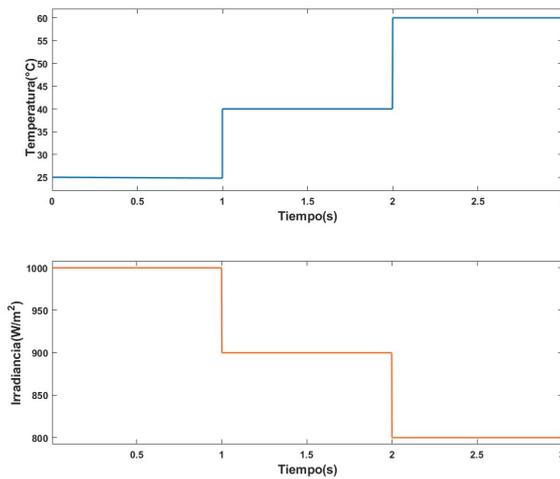


Figura 3.10: Caso 3 Temperatura e irradiancia variables.

Figura 3.11.

Caso 1: Observe que no hay diferencias significativas en cuanto al tiempo de respuesta obtenido en todos los intervalos para las diferentes referencias. La mayor amplitud de oscilaciones se identifica cuando se emplea la referencia $I_{MPP_{OC}}$. En cuanto a la potencia generada, los mejores resultados se obtienen con la referencia $I_{MPP_{OC}}$ en el intervalo de 0 a 1 s, $V_{MPP_{OC}}$ en el intervalo de 1 a 2 s, y I_{MPP_R} en el intervalo de 2 a 3 s. El valor más bajo de eficiencia se identifica en el intervalo de 2 a 3 s con la referencia $I_{MPP_{OC}}$.

La Tabla 3.4 muestra las características de la respuesta del sistema considerando las condiciones de operación descritas en el Caso 2. Las curvas de potencia se muestran en la Figura 3.12.

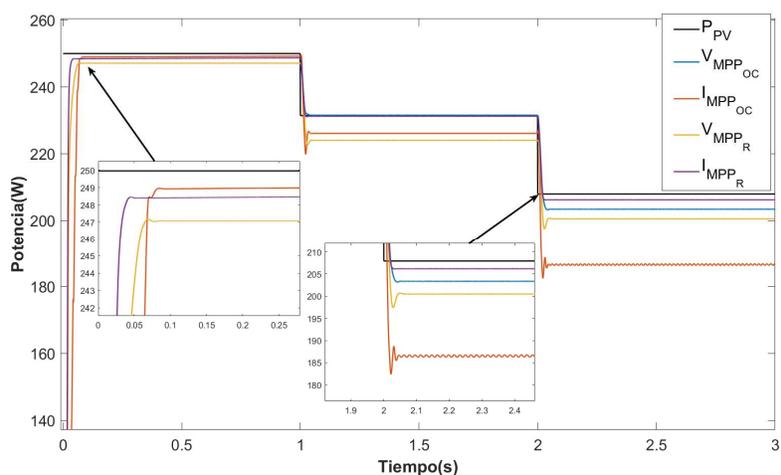


Figura 3.11: Caso 1. Potencia generada considerando una irradiancia constante de $1000W/m^2$ y una temperatura variable.

Caso 1												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$V_{MPP_{OC}}$	0.06	0.04	0.06	0.021	0.021	0.24	247.161	231.372	203.42	95	99.9	97.8
$I_{MPP_{OC}}$	0.08	0.04	0.06	0.001	6.7	6.2	248.954	226.725	188.73	99.7	97.9	91.7
V_{MPP_R}	0.06	0.06	0.05	0.02	0.465	3.2	237.65	224.092	200.691	99.02	96.8	96.5
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.04	0.023	0.2	0.019	248.43	231.16	206.181	99.4	99.9	99.2

Tabla 3.3: Caso 1. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a) 249.961 W, b) 231.372 W, c) 207.928 W.

Caso 2: Como en el caso anterior, no se aprecian diferencias significativas en cuanto al tiempo de respuesta obtenido en todos los intervalos para las diferentes referencias. Es importante resaltar que la mayor amplitud de oscilaciones se identifica cuando se emplea la referencia $I_{MPP_{OC}}$ en el intervalo de 2 a 3 s (esto puede identificarse claramente en la Figura 3.12). En cuanto a la potencia generada, los mejores resultados se obtienen en general con la referencia I_{MPP_R} , salvo en el intervalo de 0 a 1 s, donde la potencia generada con la referencia $I_{MPP_{OC}}$ es ligeramente mayor. Como en el caso anterior, el valor más bajo de eficiencia se identifica también en el intervalo de 2 a 3 s con la referencia $I_{MPP_{OC}}$.

La Tabla 3.5 muestra las características de la respuesta del sistema considerando las condiciones de operación descritas en el Caso 3. Las curvas de potencia se muestran en la Figura 3.13.

Caso 3: En este caso tampoco existen diferencias significativas en cuanto a los tiempos de respuesta observados en cada intervalo para las diferentes referencias. Coincide también que la mayor amplitud de oscilaciones se identifica cuando se emplea la referencia $I_{MPP_{OC}}$ en el intervalo de 2 a 3 s. En cuanto a la potencia generada, los mejores resultados se obtienen en general con la referencia I_{MPP_R} , salvo en el intervalo de 0 a 1 s, donde la potencia generada con la referencia $I_{MPP_{OC}}$ es ligeramente mayor. El valor más bajo de eficiencia se identifica en el intervalo de 0 a 1 s con la referencia $V_{MPP_{OC}}$.

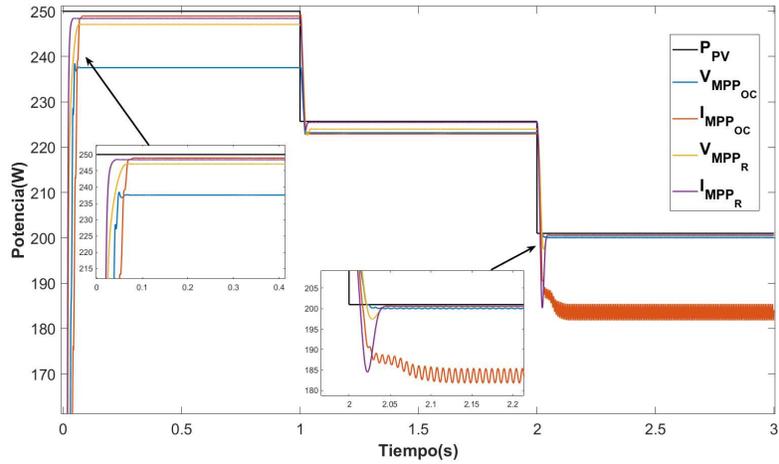


Figura 3.12: Caso 2. Potencia generada considerando una temperatura constante de 25°C y una irradiancia variable.

Caso 2												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$V_{MPP_{OC}}$	0.06	0.04	0.04	0.021	0.001	0.27	237.65	223.238	199.98	95	98.9	99.5
$I_{MPP_{OC}}$	0.08	0.05	0.04	0.001	0.01	3.625	248.954	222.96	188.787	99.7	98.8	93.9
V_{MPP_R}	0.06	0.04	0.06	0.094	0.016	0.014	247.171	224.09	200.496	99.02	99.3	99.7
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.04	0.023	0.017	0.014	248.43	225.461	200.586	99.4	99.9	99.8

Tabla 3.4: Caso 2. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a) 249.961 W, b) 225.662 W, c) 200.977 W.

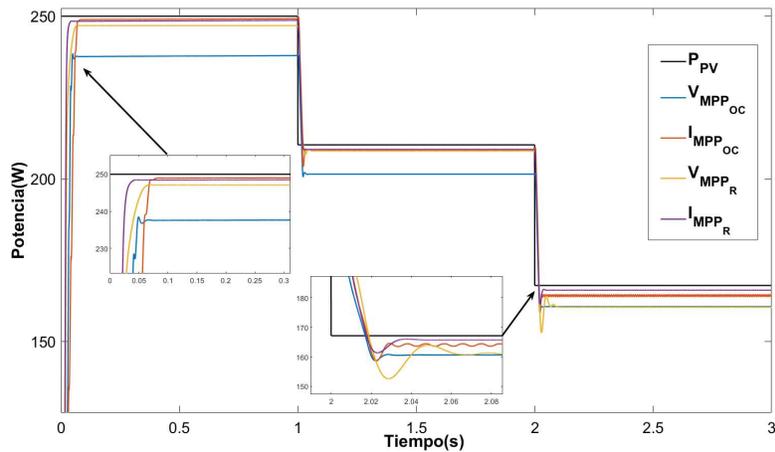


Figura 3.13: Caso 3. Potencia generada considerando irradiancia y temperatura variable.

Caso 3												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$V_{MPP_{OC}}$	0.06	0.04	0.04	0.021	0.001	0.001	237.65	201.953	160.846	95	96	96.2
$I_{MPP_{OC}}$	0.08	0.06	0.04	0.001	0.001	0.81	248.954	208.893	164.599	99.7	99.3	98.5
V_{MPP_R}	0.06	0.06	0.08	0.094	0.018	0.016	247.171	208.524	160.542	99.02	99.1	96
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.05	0.023	0.018	0.014	248.62	209.07	166.012	99.4	99.4	99.3

Tabla 3.5: Caso 3. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a)249.961 W, b) 210.391 W, c)167.159 W.

Caso 1												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$P\&O$	0.08	0.07	0.1	2.012	2.15	2.08	246.015	222.87	192.47	98	96	92.5
INC	0.2	0.15	0.65	167.2	168.6	173.82	248.88	230.55	205.82	99.5	99.6	98.9
V_{MPP_R}	0.06	0.06	0.06	0.02	0.465	3.2	247.171	224.092	200.691	99.02	96.8	96.5
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.04	0.023	0.02	0.019	248.62	231.16	206.181	99.4	99.9	99.2

Tabla 3.6: Caso 1. Comparación con los métodos P&O e INC. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a)249.961 W, b) 231.372 W, c)207.928 W.

Del análisis anterior puede observarse que el punto de máxima potencia puede seguirse de manera satisfactoria con el algoritmo de control por modos deslizantes Super Twisting empleando las referencias de corriente y voltaje determinadas a través de la técnica de regresión y a través de la caracterización obtenida empleando los parámetros óptimos de operación. Sin embargo, pueden apreciarse mejores resultados cuando se emplean las referencias obtenidas por medio de la técnica de regresión. En la siguiente sección se realiza un análisis comparativo de la estrategia de control Super Twisting SMC con las referencias derivadas de la técnica de regresión con dos de los algoritmos clásicos más populares para seguir el MPP: P&O e INC.

3.4. Comparación con los algoritmos P&O e INC

Para el desarrollo del análisis comparativo de la técnica Super Twisting SMC con los métodos P&O e INC, se consideran los tres casos descritos en la Sección 3.3.

La Figura 3.14 muestra las curvas de potencia generadas bajo las condiciones descritas en el Caso 1. La Tabla 3.6 resume los resultados numéricos de las características de respuesta para este caso.

Caso 1: Es importante señalar que el mayor tiempo de respuesta se tiene cuando se emplea el algoritmo INC (0.65 s), mientras que el menor tiempo se da al considerar el algoritmo SMC con la referencia I_{MPP_R} . En cuanto a las oscilaciones en la respuesta, con el algoritmo INC se presentan las de mayor magnitud, mientras que con el algoritmo SMC con la referencia I_{MPP_R} las oscilaciones son de magnitud insignificante. La potencia máxima se obtiene también con el controlador SMC con la referencia I_{MPP_R} , seguido muy cercanamente por el algoritmo INC. Los peores resultados en cuanto a la potencia generada se obtienen con el método P&O.

La Figura 3.15 muestra las curvas de potencia generadas bajo las condiciones descritas

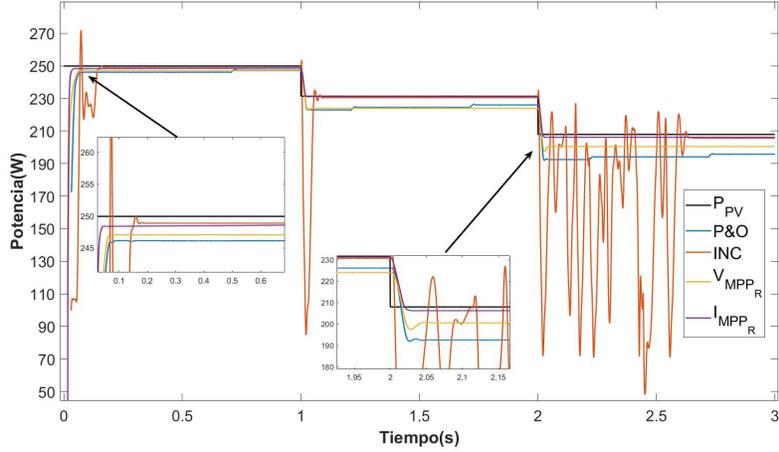


Figura 3.14: Caso 1. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando una irradiancia constante y temperatura variable.

en el Caso 2. La Tabla 3.7 resume los resultados numéricos de las características de respuesta para este caso.

Caso 2: Bajo las condiciones consideradas en el Caso 2, la diferencia entre los tiempos de respuesta de los diferentes enfoques de control analizados no es significativa, aunque con el método INC los tiempos de respuesta son mayores. De manera similar que en el Caso 1, con el algoritmo INC se presentan las oscilaciones de mayor magnitud, mientras que con el algoritmo SMC con las referencias I_{MPP_R} y V_{MPP_R} , las oscilaciones son de magnitud insignificante. En cuanto a la potencia máxima generada, no existen diferencias significativas, en todos los casos se obtienen valores cercanos al MPP. La menor eficiencia se obtiene con el método P&O (96.7%).

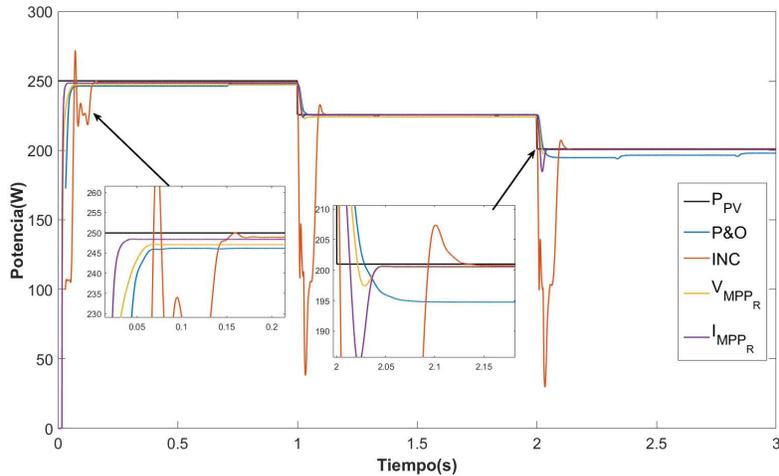


Figura 3.15: Caso 2. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando temperatura constante y una irradiancia variable.

La Figura 3.16 muestra las curvas de potencia generadas bajo las condiciones descritas en el Caso 3. La Tabla 3.8 resume los resultados numéricos de las características de respuesta

Caso 2												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$P\&O$	0.08	0.1	0.09	2.012	1.235	1.929	246.015	224.388	197.91	98	99.4	96.7
INC	0.2	0.12	0.16	167.2	194.65	177.51	248.88	225.46	200.332	99.5	99.7	99.6
V_{MPP_R}	0.06	0.04	0.06	0.02	0.016	0.014	247.171	224.09	200.496	99.02	99.3	99.7
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.04	0.023	0.02	0.019	248.62	225.461	200.586	99.4	99.9	99.8

Tabla 3.7: Caso 2. Comparación con los métodos P&O e INC. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a)249.961 W, b) 225.662 W, c)200.977 W.

para este caso.

Caso 3: Como en el Caso 2, bajo las condiciones consideradas en el Caso 3, la diferencia entre los tiempos de respuesta de los diferentes enfoques de control analizados no es significativa, aunque con el método INC los tiempos de respuesta son mayores. De manera similar que en los Casos 1 y 2, con el algoritmo INC se presentan las oscilaciones de mayor magnitud, mientras que con el algoritmo SMC con las referencias I_{MPP_R} y V_{MPP_R} , la magnitud de las oscilaciones no es significativa. Como en el Caso 1, no existen diferencias significativas en cuanto a la potencia máxima generada, en todos los casos se obtienen valores cercanos al MPP. La menor eficiencia en este caso se obtiene con el método SMC con la referencia V_{MPP_R} (96 %).

La comparación de los algoritmos analizados, se pueden observar en la tabla 3.8.

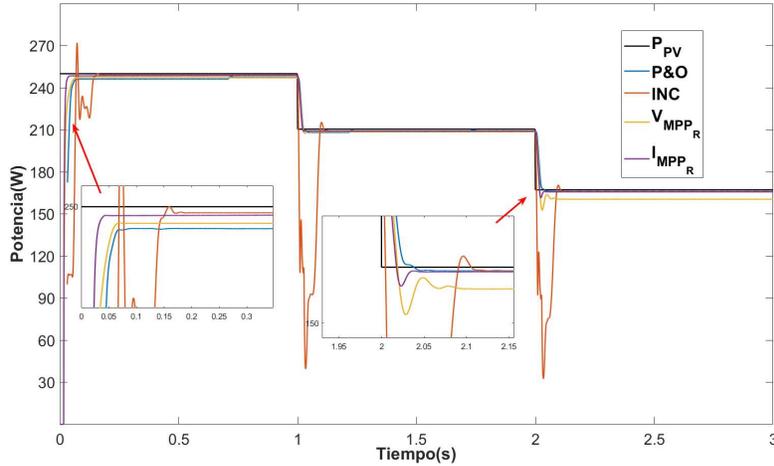


Figura 3.16: Caso 3. Comparación con los métodos P&O e INC. Potencia generada considerando temperatura e irradiancia variables.

3.5. Discusión

En este capítulo se evaluó el desempeño del algoritmo Super Twisting SMC considerando tres diferentes casos de estudio con variaciones abruptas en la irradiancia y en la temperatura. Se consideraron las referencias de voltaje y corriente generadas a partir de la técnica de regresión y a partir de su caracterización en términos de parámetros óptimos de operación. En general, se obtuvieron mejores resultados cuando se emplean las referencias generadas

Caso 3												
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)			Máxima amplitud de oscilaciones (W)			Máxima Potencia (W)			Eficiencia (%)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$P\&O$	0.08	0.06	0.09	2.012	1.4	0.182	246.015	208.039	165.126	98	98.8	98.7
INC	0.2	0.12	0.12	167.2	174.26	136.37	248.88	208.99	164.91	99.5	99.3	98.6
V_{MPP_R}	0.06	0.06	0.08	0.02	0.016	0.014	247.171	208.524	160.542	99.02	99.1	96
I_{MPP_R}	0.04	0.04	0.05	0.023	0.018	0.014	248.62	209.07	166.012	99.4	99.4	99.3

Tabla 3.8: Caso 3. Comparación con los métodos P&O e INC. Características de la respuesta del sistema en los intervalos a) 0 a 1s, b) 1 a 2s, c) 2 a 3s. Las potencias máximas teóricas en cada intervalo son: a)249.961 W, b) 210.391 W, c)167.159 W.

con la regresión. Es importante mencionar que se generan importantes oscilaciones cuando se emplea la referencia de corriente basada en los parámetros óptimos, especialmente en el Caso 2, en el intervalo de 2 a 3 s, cuando la irradiancia es menor. En cuanto al tiempo de respuesta, no hay diferencias significativas, aunque con la referencia de corriente generada a partir de la técnica de regresión, el tiempo de asentamiento es menor.

Por otra parte, con el fin de contrastar el rendimiento del algoritmo Super Twisting SMC con respecto a las técnicas clásicas más populares, se presentaron simulaciones numéricas del sistema considerando los algoritmos INC y P&O. Los resultados muestran que con la técnica INC se presentan oscilaciones y sobreimpulsos de magnitud significativa en todos los casos, especialmente cuando la irradiancia es menor (véase por ejemplo en el Caso 1, el intervalo de 2 a 3 s). Con el método P&O también se observan oscilaciones en la potencia generada por el SFV que son de una magnitud mayor comparadas con las del enfoque propuesto en este trabajo. Sin embargo, su magnitud es mucho menor cuando se compara con la que corresponde al método INC. Aunque las diferencias en el tiempo de respuesta no son significativas, con el algoritmo Super Twisting SMC se obtuvieron los menores tiempos de respuesta considerando las referencias de corriente y voltaje derivadas de la técnica de regresión.

En el siguiente capítulo, se propone modificar la superficie de deslizamiento. En vez de plantearla en términos de la referencia de corriente o voltaje en el MPP, se propone relacionarla con la la pendiente de la curva de potencia-voltaje, de tal forma que cuando el controlador conduce a cero la superficie de deslizamiento, la pendiente de esta curva es cero, es decir, el sistema estará operando en el MPP.

Capítulo 4

Super Twisting SMC para el MPPT basado en las características de la curva P-V

En esta sección se propone una técnica para el MPPT basadas en el control por modos deslizantes (SMC) Super Twisting. La superficie de deslizamiento se diseña empleando las propiedades del MPP observadas en las curvas características. Se busca garantizar que cuando se alcance la superficie de deslizamiento, se obtenga el punto máximo en la curva de potencia-voltaje, que corresponde al MPP.

4.1. Diseño de control

Siguiendo las ideas presentadas en [48], el diseño de control consta de dos etapas:

- Diseñar una superficie deslizante que permita al convertidor Boost exhibir las propiedades deseadas.
- Desarrollar la ley de control que impulse y mantenga el sistema en la superficie deslizante.

La superficie de deslizamiento se diseña a partir del siguiente razonamiento. En el MPP se satisface la siguiente igualdad [61]:

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0. \quad (4.1)$$

Considerando que:

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv}, \quad (4.2)$$

se tiene:

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = V_{pv} \left(\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right) \quad (4.3)$$

En vista de las ecuaciones (4.1) y (4.3), la superficie de deslizamiento se define como [61]:

$$S(x) = \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (4.4)$$

En este sentido, cuando $S(x) = 0$ la ecuación (4.1) se satisface, es decir, se alcanza el punto de máxima potencia.

Como se mostró en la ecuación (3.8), el control por modos deslizantes Super Twisting consta de dos términos u_{eq} y u_{st} .

El control equivalente u_{eq} se propone como en [62]:

$$u_{eq} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} \quad (4.5)$$

El control de conmutación, se toma con base en [53] como:

$$u_{st} = -\lambda|S|^{\frac{1}{2}} - \Upsilon \int \text{sign}(S) \quad (4.6)$$

donde λ y Υ son parámetros de diseño.

Para garantizar la propiedad de convergencia del control, se realiza un análisis de estabilidad empleando la función de Lyapunov definida como:

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (4.7)$$

La estabilidad se garantiza si la derivada de la función de Lyapunov es negativa.

Note que $\dot{V} = S\dot{S}$,

$$\dot{S} = \left[\frac{\partial S}{\partial x} \right] \dot{x} \quad (4.8)$$

donde \dot{x} esta definida en la ecuación (3.1), por lo que:

$$\dot{S} = \left[\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \right] \left(-\frac{V_s}{L}(1-u) + \frac{V_{pv}}{L} \right) \quad (4.9)$$

El primer factor de la ecuación (4.9) puede expresarse como:

$$\left[\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \right] = \frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right] \quad (4.10)$$

Note que, considerando I_{pv} definida en (2.2), se tiene:

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{q}{N_s k_b T A} I_o \exp\left(\frac{qV_{pv}}{N_s k_b T A}\right)$$

y sustituyendo V_{pv} definida en (2.3):

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{q}{N_s k_b T A} I_o \left(\frac{I_{ph} + I_o - I_{pv}}{I_o} \right)$$

Así, el primer término de (4.10) se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \right] = \frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[-\frac{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})}{N_s k_b T A} \right] = \frac{q}{N_s k_b T A}$$

Del segundo término de la Ecuación (4.10), se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right] = \frac{1}{V_{pv}} - \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} \quad (4.11)$$

Entonces,

$$\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} = \frac{q}{N_s k_b T A} + \frac{1}{V_{pv}} - \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} \quad (4.12)$$

Considerando la expresión de V_{pv} definida en (2.3) se tiene:

$$\frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} = -\frac{N_s k_b T A}{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})}$$

Sustituyendo esta última expresión en (4.12), resulta en:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} = \frac{q}{N_s k_b T A} + \frac{1}{V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{N_s k_b T A}{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})} \quad (4.13)$$

En vista de la definición de I_{pv} dada en (2.2), siempre se cumple que $I_{ph} + I_o - I_{pv} > 0$, así, $\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} > 0$.

En vista de (4.9), y, sustituyendo u definido en la ecuación (3.8), se tiene:

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \left(\frac{V_s}{L} \left(-\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \Upsilon \int \text{sign}(S) \right) \right) \quad (4.14)$$

Entonces, la derivada de la función de Lyapunov es:

$$\dot{V} = S \dot{S} = S \frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \frac{V_s}{L} \left(-\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \Upsilon \int \text{sign}(S) \right) \quad (4.15)$$

donde $\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} > 0$, $\frac{V_s}{L} > 0$. Note que si $S > 0$, entonces, el último factor de (4.15) es negativo, así $\dot{V} < 0$. Si $S < 0$, entonces, el último factor de (4.15) es positivo lo que implica que en este caso también $\dot{V} < 0$. Lo anterior garantiza la estabilidad del sistema.

4.2. Resultados de simulaciones numéricas considerando condiciones de sombra no uniforme

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas del SFV en lazo cerrado con el algoritmo de control Super Twisting, considerando la presencia de sombras no uniformes incidiendo en la superficie del panel.

Como en el capítulo anterior, para el desarrollo de simulaciones numéricas se considera el panel fotovoltaico Renesola JC250[®] cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.1. La Tabla 3.2 en el Capítulo 3 muestra los valores numéricos de los parámetros del convertidor Boost.

En los experimentos que se describen a continuación, se considera que el panel está dividido en tres secciones, como se muestra en la Figura 4.1. En cada una de las secciones se asumen diferentes valores de temperatura e irradiancia para representar la obstrucción de luz solar provocada por la presencia de sombras.

Las simulaciones fueron realizadas en MATLAB-Simulink[®]. Como se mencionó, el sistema consta de un panel fotovoltaico, un convertidor Boost, una carga resistiva y un algoritmo de control por modos deslizantes de segundo orden (Super Twisting), véase la Figura 3.1. Las ganancias del control de conmutación (u_{st}) definido en la ecuación (4.6) se eligen como: $\lambda = 0.1$ y $\Upsilon = 0.01$, de acuerdo con [60].

Para evaluar el desempeño del algoritmo de control Super Twisting SMC en el seguimiento del GMPP en presencia de sombras, se realizan comparaciones con las técnicas clásicas P&O e INC. La operación de estos algoritmos puede consultarse en [44] y [43].

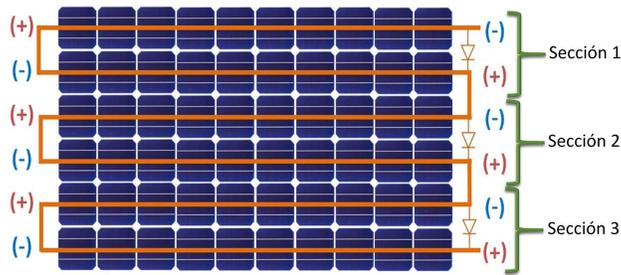


Figura 4.1: División en tres secciones del panel fotovoltaico.

Se consideran los tres casos descritos a continuación.

Caso 1: Se toman diferentes temperaturas para cada sección con una irradiancia constante de 1000 W/m^2 en todo el panel, las temperaturas de cada sección son:

Sección 1 = 25°C

Sección 2 = 40°C

Sección 3 = 60°C

La Figura 4.2 muestra la curva de potencia-voltaje correspondiente a las condiciones de operación descritas en el Caso 1.

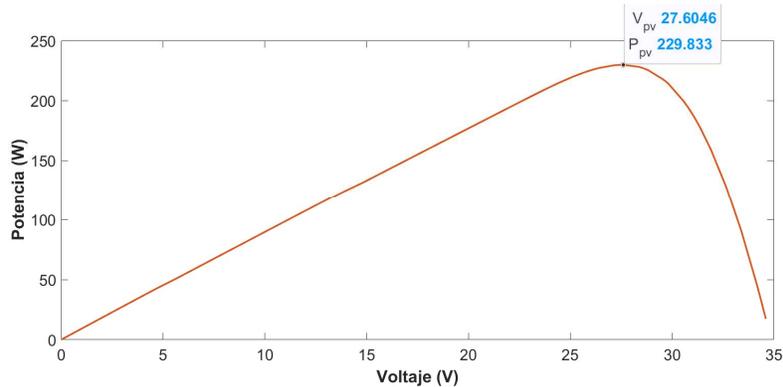
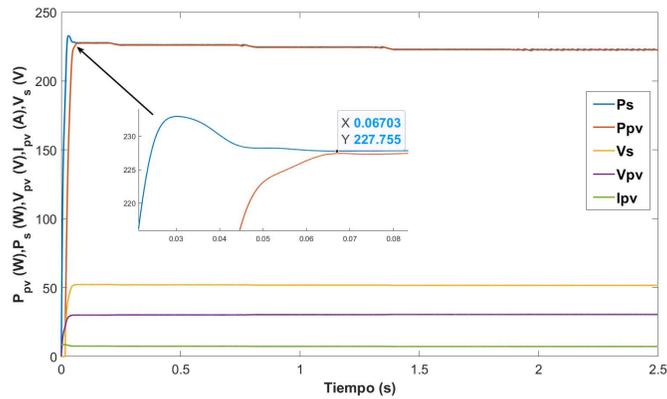


Figura 4.2: Caso 1: Curva de potencia-voltaje. Punto de Potencia Máxima: 229.833W.

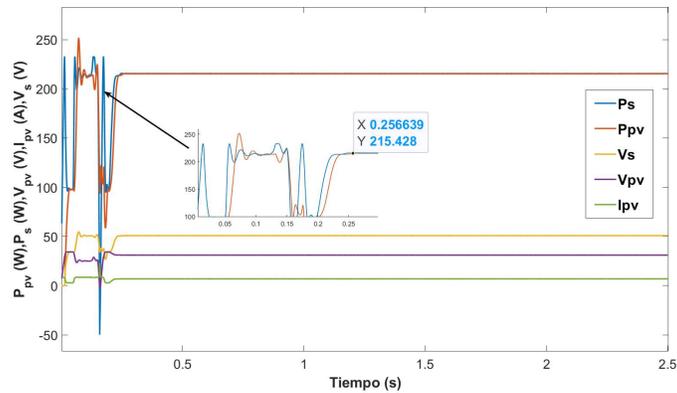
La Figura 4.3 muestra los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas bajo las condiciones descritas en el Caso 1, empleando los algoritmos P&O, INC y Super Twisting SMC. En esta Figura se puede identificar la evolución de las variables P_s , P_{pv} , V_s , V_{pv} e I_{pv} .

Como se puede observar en la Figura 4.3(c), con el algoritmo Super Twisting SMC la potencia entregada por el panel fotovoltaico mantiene un valor cercano a la potencia máxima mostrada en la Figura 4.2 (229.833W). Note que con el algoritmo P&O, la potencia inicia en un valor cercano al esperado, pero disminuye progresivamente a lo largo del tiempo (véase la Figura 4.3(a)), mientras que en el caso del algoritmo INC, el valor de la potencia se mantiene por debajo de éste (215.573W).

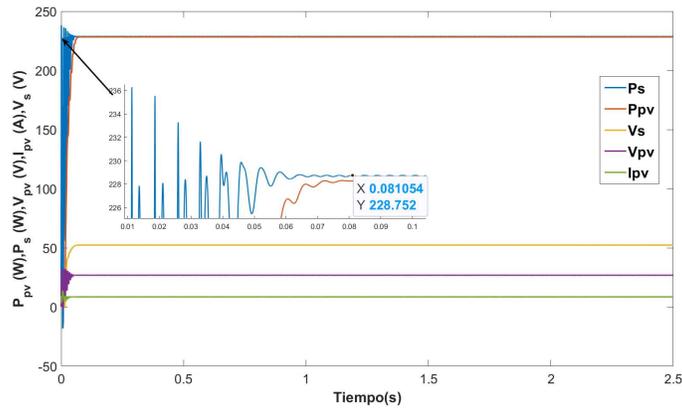
La Figura 4.4 muestra la evolución de la potencia generada por el SFV a partir de los tres métodos de control mencionados. Note que el mayor valor de potencia se genera a través del algoritmo de SMC, con la desventaja de presentar oscilaciones al inicio de la operación.



(a) Perturbación y Observación



(b) Conductancia Incremental



(c) Super Twisting

Figura 4.3: Caso 1. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.

Con los algoritmos P&O e INC, se genera una potencia menor, la cual no aumenta en el transcurso del tiempo.

La Tabla 4.1 muestra los datos numéricos de las características de la respuesta del sistema en lazo cerrado con los algoritmos P&O, INC y SMC, bajo las condiciones descritas en

Caso 1				
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)	Máxima amplitud de oscilaciones (W)	Máxima Potencia (W)	Eficiencia (%)
<i>P&O</i>	0.04	4.168	227.768	99.1
INC	0.26	281.2024	215.573	93.7
SMC	0.05	180	228.802	99.55

Tabla 4.1: Caso 1. Características de respuesta del sistema. Potencia máxima teórica: 229.833W.

Caso 2				
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)	Máxima amplitud de oscilaciones (W)	Máxima Potencia (W)	Eficiencia (%)
<i>P&O</i>	0.07	5.124	120.124	85.5
INC	0.26	282.3144	127.748	90.9
SMC	0.06	179.09	131.424	93.6

Tabla 4.2: Caso 2. Características de respuesta del sistema. Potencia máxima teórica: 140.455W.

el Caso 1.

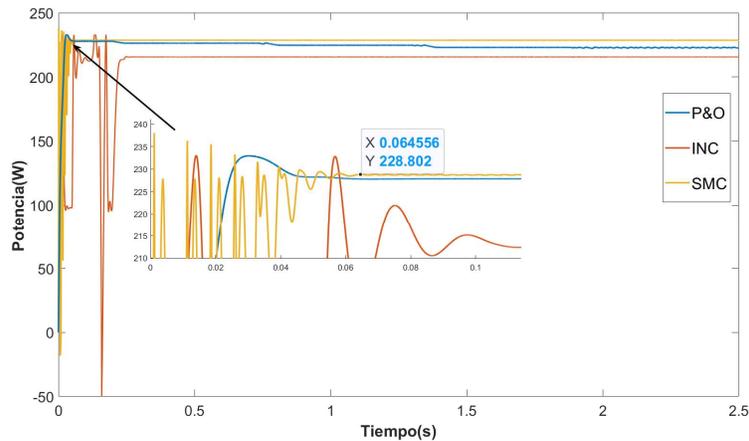


Figura 4.4: Caso 1. Curvas de potencia del SFV.

Caso 2: Se consideran diferentes valores de irradiancia para cada sección del panel con una temperatura constante de 25°C en toda la superficie. Para este caso las irradiancias en cada sección son:

$$\text{Sección 1} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Sección 2} = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Sección 3} = 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

En la Figura 4.5 se muestra la curva de potencia-voltaje correspondiente a las condiciones de operación descritas en el Caso 2; se generan tres puntos de máxima potencia, dos de ellos son locales y uno global (GMPP). La Figura 4.6 muestra los resultados obtenidos bajo las condiciones descritas en el Caso 2.

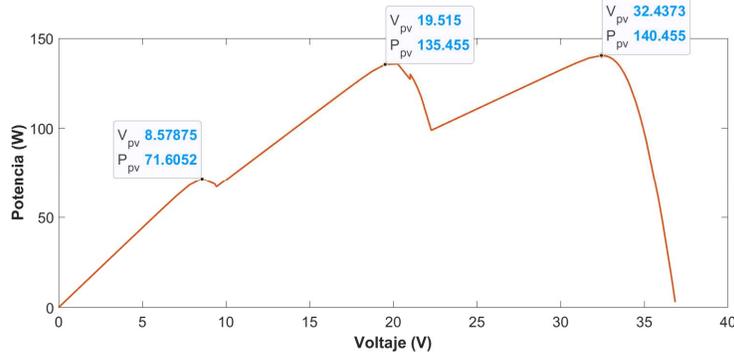


Figura 4.5: Caso 2. Puntos de Máxima Potencia.

Como se observa en la Figura 4.6(c), el algoritmo de SMC mantiene una potencia máxima cercana al GMPP (131.424W), mientras que con el algoritmo P&O, la potencia entregada es de 120.124 W (véase la Figura 4.6(a)). Por otra parte, en la Figura 4.6(b) se observa que con el algoritmo INC, el valor de la potencia se mantiene en 127.748 W.

En la Figura 4.7 podemos observar la evolución de la potencia generada por el SFV con respecto a los algoritmos analizados. Note que con el algoritmo SMC se genera una potencia más cercana al GMPP.

La Tabla 4.2 muestra las características de respuesta del SFV bajo las condiciones descritas en el Caso 2.

Caso 3: Como se muestra en la Tabla 4.3, para este caso se consideran diferentes valores de irradiancia y temperatura en las tres secciones del panel.

Sección	Temperatura	Irradiancia
Sección 1	25°C	1000 $\frac{W}{m^2}$
Sección 2	40°C	800 $\frac{W}{m^2}$
Sección 3	60°C	500 $\frac{W}{m^2}$

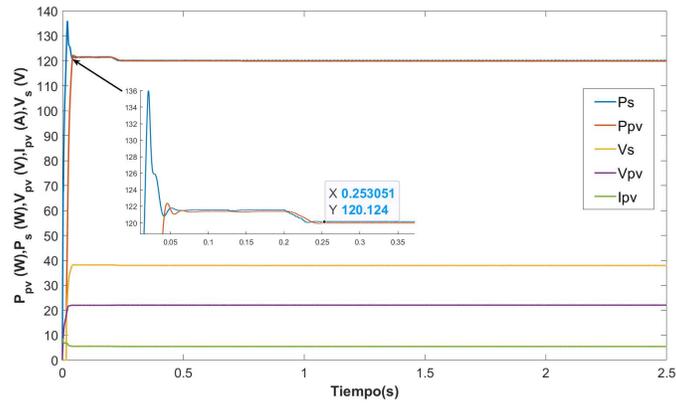
Tabla 4.3: Condiciones de temperatura e irradiancia consideradas en el Caso 3.

En la Figura 4.8 se muestran los puntos de máxima potencia efectuados bajo las condiciones descritas en el Caso 3. Se identifican tres puntos máximos: dos locales (71 W y 128.589 W) y uno global (128.91 W).

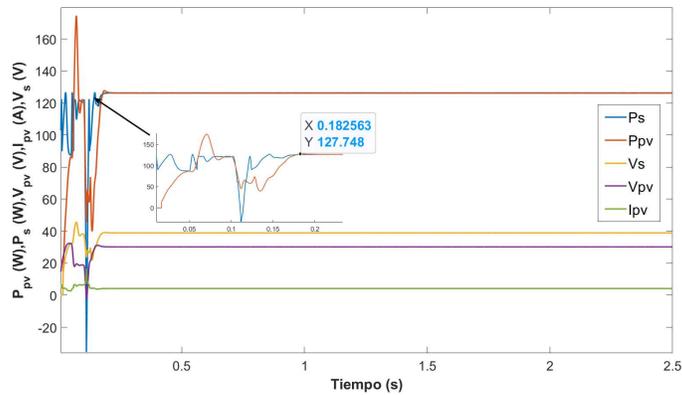
La Figura 4.9 muestra la evolución de las señales de P_s , P_{pv} , V_s , V_{pv} e I_{pv} considerando los algoritmos P&O, INC y SMC.

La Tabla 4.4 muestra las características de respuesta del SFV bajo las condiciones descritas en el Caso 3.

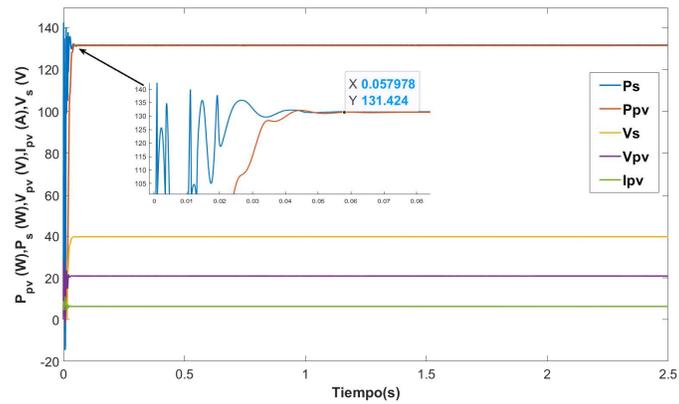
La evolución de la potencia generada por el SFV a partir de las condiciones descritas en el Caso 3 con los algoritmos P&O, INC y SMC, se muestra en la Figura 4.10. Note que el algoritmo SMC genera una potencia mayor (124.434 W) que es muy cercana al valor del GMPP (128.91 W), sin embargo, presenta oscilaciones importantes al inicio de la operación. Por otra parte, el algoritmo P&O no tiene la desventaja de la presencia de oscilaciones en la respuesta del sistema, pero la potencia generada es considerablemente menor (115.259 W)



(a) Perturbación y Observación



(b) Conductancia Incremental



(c) Super Twisting

Figura 4.6: Caso 2. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.

y va disminuyendo con respecto al tiempo. Con el algoritmo INC se genera una potencia muy cercana a la que se genera con el algoritmo SMC (123.044 W), con la desventaja de presentar oscilaciones de mayor magnitud en comparación con el método SMC.

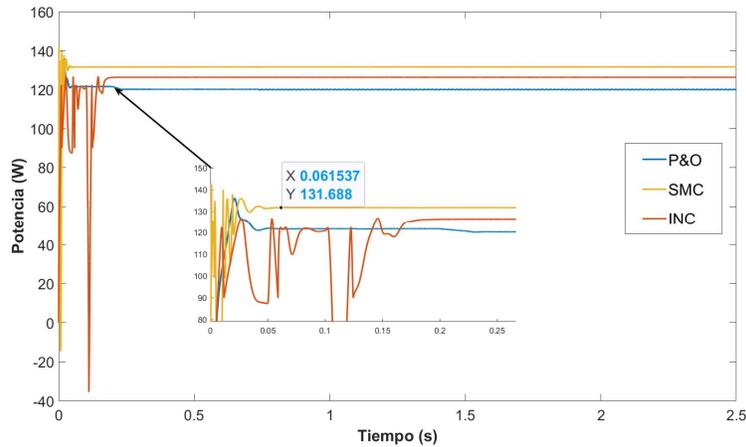


Figura 4.7: Caso 2. Curvas de potencia del SFV.

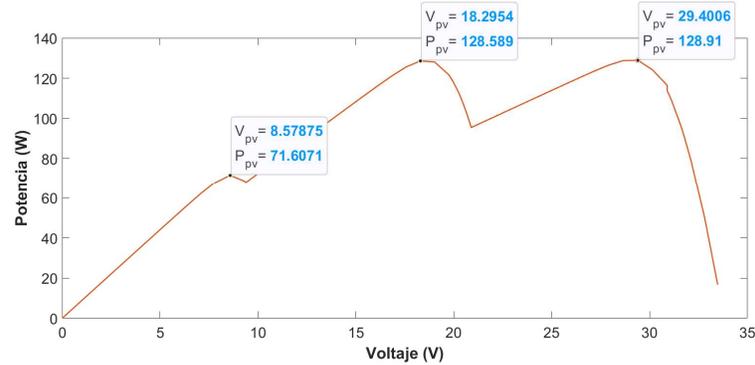


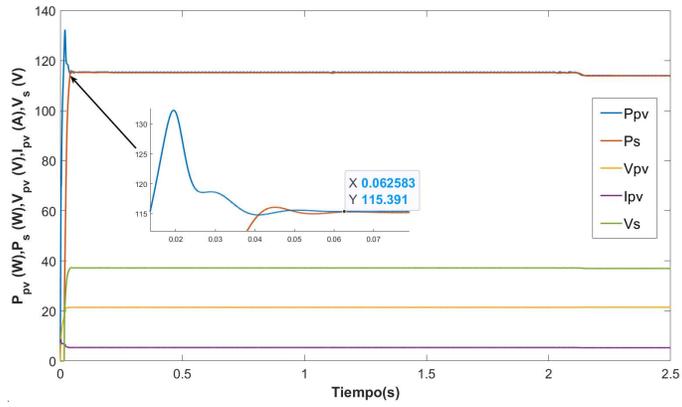
Figura 4.8: Caso 3. Puntos de Máxima Potencia.

4.3. Discusión

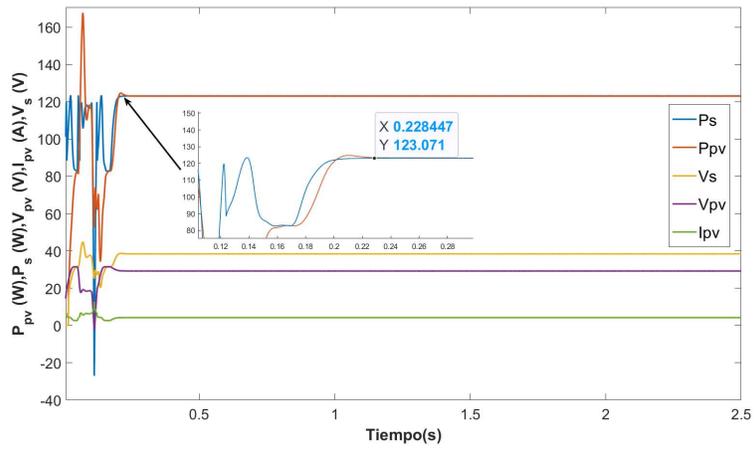
En este capítulo se evaluó el desempeño del algoritmo de control Super Twisting SMC considerando la presencia de sombras no uniformes en la superficie del panel. Para representar la presencia de sombras, se consideró una división del panel en tres segmentos y en los casos de estudio se consideraron valores diferentes de irradiancia y temperatura en cada sección.

La superficie de deslizamiento se diseñó considerando que, en el GMPP, la curva de potencia-voltaje es cero. Así, cuando la estrategia de control garantiza la convergencia a cero de esta superficie, se garantiza la operación del SFV en el GMPP.

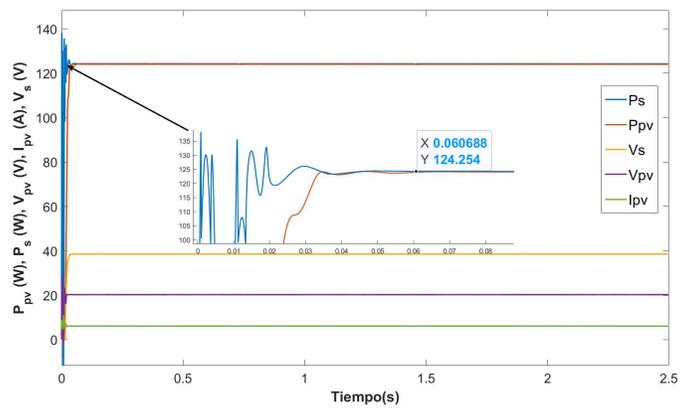
Se realizaron comparaciones del método propuesto con las técnicas clásicas P&O e INC. Los resultados de las simulaciones ilustran el desempeño del algoritmo Super Twisting SMC en contraste con éstas. El tiempo de respuesta en todos los casos es mayor con el algoritmo INC, mientras que con los métodos SMC y P&O no hay diferencias significativas. Las oscilaciones de mayor magnitud se observaron cuando se emplea el algoritmo INC, aunque también se identificaron oscilaciones de magnitud importante con el SMC. Puede concluirse que el algoritmo con mejores características en términos de oscilación en la señal de potencia generada es el P&O. Es importante mencionar que, en los tres casos analizados, el algoritmo Super Twisting SMC permite generar una potencia más cercana al GMPP.



(a) Perturbación y Observación



(b) Conductancia Incremental



(c) Super Twisting

Figura 4.9: Caso 3. (a) P&O, (b) INC, (c) SMC.

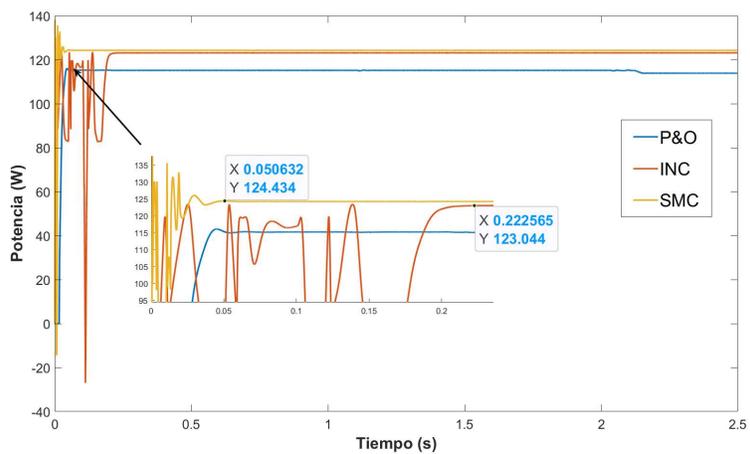


Figura 4.10: Caso 3. Curvas de potencia del SFV.

Caso 3				
Algoritmo	Tiempo de respuesta (s)	Máxima amplitud de oscilaciones (W)	Máxima Potencia (W)	Eficiencia (%)
<i>P&O</i>	0.07	1.442	115.259	89.4
INC	0.22	150.402	123.044	95.4
SMC	0.05	149.7347	124.434	96.5

Tabla 4.4: Caso 3. Características de respuesta del sistema. Potencia máxima teórica: 128.91W.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

En este documento se proponen diversas técnicas para resolver la tarea de MPPT en un SFV basadas en el método Super Twisting SMC. Se exploraron dos enfoques diferentes para proponer la superficie deslizante.

- En el primero, presentado en el Capítulo 3, la superficie de deslizamiento está dada en términos de trayectorias de referencia para la corriente y el voltaje correspondientes al MPP. Estas trayectorias de referencia se generan a partir de técnicas de regresión y también a partir de la caracterización teórica de los parámetros óptimos de operación en el MPP.
- En el segundo, presentado en el Capítulo 4, la superficie de deslizamiento se diseña empleando las propiedades del MPP observadas en las curvas características de potencia-voltaje. La convergencia de las trayectorias del sistema a la superficie de deslizamiento se traduce en el seguimiento del MPP.

Las estrategias propuestas se validaron mediante simulaciones numéricas considerando escenarios que contemplan variaciones abruptas en la temperatura e irradiancia y, para considerar la presencia de sombras, propuso dividir el panel en tres secciones, asignando a cada una de ellas valores diferentes de temperatura e irradiancia. Con el fin de destacar el desempeño del enfoque de control propuesto, se realizó una comparación con los algoritmos clásicos P&O e INC.

Los Capítulos 3 y 4 incluyen una sección de discusión de los resultados obtenidos, en los que podemos observar que la técnica Super Twisting SMC logra una eficiencia mayor al 98 % en la mayoría de los casos analizados. En cuanto a la velocidad de respuesta, se destaca que el método Super Twisting SMC presenta un tiempo de respuesta de $0.05 \text{ s} \pm 0.01 \text{ s}$.

Como se discute en el Capítulo 3, las oscilaciones generadas con el algoritmo Super Twisting SMC, cuando se considera una superficie de deslizamiento relacionada con señales de referencia de voltaje y corriente en el MPP, no son significativas (la amplitud máxima identificada es de 0.465 W). Sin embargo, en el Capítulo 4 se explicó que, cuando se considera una superficie de deslizamiento relacionada con la pendiente de la curva de potencia-voltaje, las oscilaciones generadas con el algoritmo Super Twisting SMC son de magnitud considerable al inicio de la operación (de hasta 180 W).

Por lo anterior, puede concluirse que la hipótesis planteada en este proyecto en cuanto al tiempo de asentamiento (0.05 s) y la eficiencia (98 %) es válida. Sin embargo, con respecto a

la magnitud de las oscilaciones, la hipótesis se valida en el caso de las superficies diseñadas a partir de señales de referencia en el MPP, mientras que no se cumple cuando se consideran las superficies planteadas en términos de la pendiente de la curva de potencia-voltaje.

Es importante mencionar que, en comparación con los algoritmos clásicos INC y P&O, en todos los casos analizados la eficiencia del SFV con el método Super Twisting SMC es mayor y el tiempo de respuesta es menor.

La contribución principal de este trabajo de investigación es el diseño de superficies de deslizamiento que permiten resolver de manera eficiente la tarea de seguimiento del GMPP considerando variaciones abruptas en la temperatura e irradiancia, así como condiciones de operación no uniformes en el panel, que pueden originarse por la presencia de sombras.

Como trabajo futuro, se plantea el diseño de un control robusto que combine un método metaheurístico con la técnica de modos deslizantes para el seguimiento del GMPP de un SFV capaz de operar en presencia de sombras parciales (uniformes y no uniformes), que permitan acelerar la respuesta del sistema y reducir la magnitud de las oscilaciones al rededor del MPP. Además, se contempla la validación experimental del enfoque de control propuesto.

Bibliografía

- [1] Jorge Rios Aliaga. Seguidor del punto de máxima potencia, 2021.
- [2] Lorenzo E. Almonacid, Gabino. Celula solar. *Grupo Idea*, pages 16–45, 2004.
- [3] Ernesto Rodriguez. Paneles solares, 2013.
- [4] Juan Medela. Paneles solares: Defectos mas frecuentes, 2020.
- [5] S Gokula Brindha, R Madhumitha, and C Aravind. International journal of intellectual advancements and research in engineering computations maximum power point tracking for pv array based on ant colony optimization under uniform and non-uniform irradiance.
- [6] Leopoldo Gil. *Control de Convertidores para aplicaciones Fotovoltaicas*. PhD thesis, Universidad Autónoma del Estado de M´xico. Facultad de Ingeniería; M´xico, 2019.
- [7] Martín Silva. *Modelado y estudio del impacto de sombras sobre paneles solares fotovoltaicos*. PhD thesis, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina, 2020.
- [8] Fabián Alonso García Barrios. *Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos*. PhD thesis, Universidad Autónoma del Caribe., 2018.
- [9] L Ruiz, J Beristáin, I Sosa, and J Hernández. Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar. *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, 8(1):17–23, 2010.
- [10] Mutlu Boztepe, Francesc Guinjoan, Guillermo Velasco-Quesada, Santiago Silvestre, Aissa Chouder, and Engin Karatepe. Global mppt scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 61(7):3302–3312, 2013.
- [11] Mauricio Troviano. Diseño y desarrollo de un emulador solar basado en celdas solares de laboratorio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23:51–58, 2019.
- [12] Diana Sirley Cardozo Rangel, Lidia Yaneth Neita Duarte, et al. Comparación de la metodología general ajustada mga con la metodología del pmbok® sexta edición del pmi aplicado a los proyectos de sistemas fotovoltaicos en zonas no interconectadas. 2020.
- [13] Mingxuan Mao, Lin Zhou, Zengrui Yang, Qianjin Zhang, Chen Zheng, Bao Xie, and Yihao Wan. A hybrid intelligent gmppt algorithm for partial shading pv system. *Control Engineering Practice*, 83:108–115, 2019.

- [14] Norma Rosario Flores Rivera and Miguel Ángel Domínguez Ramírez. Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio. 2017.
- [15] A Martínez Barbosa. Diseño e implementación de un sistema mppt y regulación de voltaje mediante el panel solar sunmodule sw50. *Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca*, 2016.
- [16] EE Granda-Gutiérrez, OA Orta, JC Díaz-Guillén, MA Jimenez, M Osorio, and MA González. Modelado y simulación de celdas y paneles solares. In *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica*, volume 35, pages 17–22, 2013.
- [17] Djamilia Rekioua and Ernest Matagne. *Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] Esteban Santiago Villegas Tapia and Luís Enrique Alcívar Tello. Diseño de un sistema fotovoltaico para la escuela de educación básica simón bolívar en la comunidad masa 2, golfo de guayaquil. B.S. thesis, 2020.
- [19] Renan Antonio González Espinosa et al. Diseño, implementación y evaluación de convertidor dc-dc para aplicaciones fotovoltaicas. 2021.
- [20] Camilo Sanabria, Mónica Martín, Joaquín Campuzano, and Wilson Javier Pérez. Modelo de simulación con pérdidas y estrategia de control pid para el convertidor buck. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(22), 2013.
- [21] Freddy Fernando Valderrama, Henry Moreno, and Héctor Manuel Vega. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc-dc tipo boost. *Ingenium Revista de la facultad de ingeniería*, 12(24):44–55, 2011.
- [22] Nadia S Zúñiga-Peña, Marco A Márquez-Vera, Julio C Ramos-Fernández, Luis F Cerecero-Natale, and Filiberto Muñoz-Palacios. Regulación de voltaje de un convertidor buck-boost mediante su modelo difuso inverso. *Research in Computing Science*, 146 (6): 315, 326, 2018.
- [23] Andrés Felipe Cifuentes Tobón. Modelo y construcción de un convertidor dc/dc tipo cuk para estudio en el laboratorio. 2019.
- [24] Christopher Edwards and Sarah Spurgeon. *Sliding mode control: theory and applications*. Crc Press, 1998.
- [25] Jorge Arturo Perez Venzor. Control por modos deslizantes de motores cd a pasos. *Instituto de Ingeniería y Tecnología*, 2018.
- [26] Ramos González Daniel, Saveedra Paja Carlos, and Montes Andrés. Control por modos deslizantes en sistemas fotovoltaicos: soluciones y oportunidades. In *CIDET*, volume 12, pages 39–46, 2022.
- [27] Marlon Fernando Velásquez Lobo. *Control en Modo Deslizante con Estimación de la Perturbación Aplicado a la Marcha de un Robot Bípedo*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2013.
- [28] Hussein A Kazem, Miqdam T Chaichan, Ali H Alwaeli, and Kavish Mani. Effect of shadows on the performance of solar photovoltaic. In *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy: Selected Papers from the World Renewable Energy Network's Med Green Forum*, pages 379–385. Springer, 2017.

- [29] I Daut, Muhammad Irwanto, YM Irwan, N Gomesh, and NS Ahmad. Clear sky global solar irradiance on tilt angles of photovoltaic module in perlis, northern malaysia. In *International conference on electrical, control and computer engineering 2011 (InECCE)*, pages 445–450. IEEE, 2011.
- [30] Noelia Echeverria, Marcos Judewicz, Guillermo Murcia, Jorge Strack, and Sergio Alejandro González. Algoritmo mppt de conductancia incremental con doble cota. *Potencia [W]*, 20:30, 2014.
- [31] Faiza Belhachat and Cherif Larbes. A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92:513–553, 2018.
- [32] Russell Eberhart and James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, pages 39–43. Ieee, 1995.
- [33] Karim Kaced, Cherif Larbes, Salah Mohamed Ait-Chikh, Moussaab Bounabi, and Zine Elabadine Dahmane. Fpga implementation of pso based mppt for pv systems under partial shading conditions. In *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, pages 150–155. IEEE, 2017.
- [34] Lian Lian Jiang, Douglas L Maskell, and Jagdish C Patra. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy and Buildings*, 58:227–236, 2013.
- [35] Hadi M El-Helw, Ahmed Magdy, and Mostafa I Marei. A hybrid maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic arrays. *IEEE access*, 5:11900–11908, 2017.
- [36] Nelson Luis Manuel and Nihat İnanç. Sliding mode control-based mppt and output voltage regulation of a stand-alone pv system. *Power Electronics and Drives*, 7(1):159–173, 2022.
- [37] Nelson Luis Manuel and Nihat İnanç. Sliding mode control-based mppt and output voltage regulation of a stand-alone pv system. *Power Electronics and Drives*, 7(1):159–173, 2022.
- [38] Michel Fliess and Hugues Mounier. Tracking control and π -freeness of infinite dimensional linear systems. In *Dynamical Systems, Control, Coding, Computer Vision*, pages 45–68. Springer, 1999.
- [39] Hebertt Sira-Ramírez. *Sliding mode control: the delta-sigma modulation approach*. Birkhäuser, 2015.
- [40] Alberto Dolara, Sonia Leva, Giulia Magistrati, Marco Mussetta, E Ogliari, and R Varun Arvind. A novel mppt algorithm for photovoltaic systems under dynamic partial shading—recurrent scan and track method. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pages 1122–1127. IEEE, 2016.
- [41] Alberto Dolara, Sonia Leva, Giulia Magistrati, Marco Mussetta, E Ogliari, and R Varun Arvind. A novel mppt algorithm for photovoltaic systems under dynamic partial shading—recurrent scan and track method. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pages 1122–1127. IEEE, 2016.

- [42] Jian Zhao, Xuesong Zhou, Zhiqiang Gao, Youjie Ma, and Zhenwei Qin. A novel global maximum power point tracking strategy (gmpppt) based on optimal current control for photovoltaic systems adaptive to variable environmental and partial shading conditions. *Solar Energy*, 144:767–779, 2017.
- [43] Cristiano Quevedo Andrea, Roger Gules, Eduardo Félix Ribeiro Romaneli, Joao nofre Pereira Pinto, and Rafael Collar Gonçalves. Sistema de rejeicao de disturbio e rastreamento h eh 2 aplicado ao conversor boost usando lmis. In *Research Article Presented in XVIII Brazilian Congress of Automatics*, page 2010, 2010.
- [44] Dinis António Dias Afonso et al. Modelação e controlo analógico de um sistema de microgeração a energia solar. 2009.
- [45] Wei-Yi Yang, Zong-Ying Yang, Yuang-Shung Lee, Chien-Liang Chen, and Jih-Sheng Lai. Fuzzy logic maximum power point tracking control for pv inverter. In *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, volume 3, pages 2056–2060. IEEE, 2012.
- [46] Leopoldo Gil-Antonio, Belem Saldivar, Otniel Portillo-Rodríguez, Juan Carlos Ávila-Vilchis, Pánfilo Raymundo Martínez-Rodríguez, and Rigoberto Martínez-Méndez. Flatness-based control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system. *Energies*, 12(10):1843, 2019.
- [47] Hebertt J Sira-Ramirez and Ramón Silva-Ortigoza. *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [48] A Kchaou, A Naamane, Y Koubaa, and N M’sirdi. Second order sliding mode-based mppt control for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 155:758–769, 2017.
- [49] Vadim I Utkin. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, 22(2):212–222, 1977.
- [50] Vadim I Utkin. Scope of the theory of sliding modes. *Sliding modes in control and optimization*, pages 1–11, 1992.
- [51] Zicheng Li, Mengxiong Ruan, Hou-Neng Wang, and Sai Zhang. Chaos control of boost converter based on super-twisting sliding mode control. In *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pages 188–193, 2019.
- [52] Shahzad Ahmed, Hafiz Mian Muhammad Adil, Iftikhar Ahmad, Muhammad Kashif Azeem, Zil e Huma, and Safdar Abbas Khan. Supertwisting sliding mode algorithm based nonlinear mppt control for a solar pv system with artificial neural networks based reference generation. *Energies*, 13(14):3695, 2020.
- [53] Mohamed Derbeli, Oscar Barambones, Jose Antonio Ramos-Hernanz, and Lassaad Sbita. Real-time implementation of a super twisting algorithm for pem fuel cell power system. *Energies*, 12(9):1594, 2019.
- [54] Marisol Moreno, Jaime A. and Osorio. Strict lyapunov functions for the super twisting algorithm. *IEEE Transactions on automatic control*, 57(4):1035–1040, 2012.
- [55] Jeronimo Ramirez, Jazmín Zenteno Torres, Belem Saldivar, Jorge Davila, and Juan Carlos Avila Vilchis. Robust stabilisation of linear time-variant time-delay systems via first order and super twisting sliding mode controllers. *IET Control Theory Applications*, 14(1):175–186, 2020.

- [56] Cesar Higinio Menacho Chiok. Modelos de regresión lineal con redes neuronales. In *Anales Científicos*, volume 75, pages 253–260. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.
- [57] Guolian Hou, Yin Ke, and Congzhi Huang. A flexible constant power generation scheme for photovoltaic system by error-based active disturbance rejection control and perturb & observe. *Energy*, 237:121646, 2021.
- [58] Nobuyoshi Mutoh, Masahiro Ohno, and Takayoshi Inoue. A method for mppt control while searching for parameters corresponding to weather conditions for pv generation systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53(4):1055–1065, 2006.
- [59] Hans S Rauschenbach. *Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [60] Amar Bouafassa, Lazhar Rahmani, and Saad Mekhilef. Design and real time implementation of single phase boost power factor correction converter. *ISA transactions*, 55:267–274, 2015.
- [61] Chian-Song Chiu, Ya-Lun Ouyang, and Chan-Yu Ku. Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems. *Solar Energy*, 86(10):2986–2995, 2012.
- [62] Emilio Mamarelis, Giovanni Petrone, and Giovanni Spagnuolo. Design of a sliding-mode-controlled sepic for pv mppt applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(7):3387–3398, 2013.