



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN CONTROL Y SISTEMAS DINÁMICOS**

**Control del Punto de Máxima Potencia en Paneles Solares  
bajo Variaciones de Radiación y Temperatura**

Tesis que presenta

**Yuz Asaf Zúñiga Ventura**

Para obtener el grado de

**Maestro en Control y Sistemas Dinámicos**

Directores de Tesis:

**Dra. Ilse Cervantes Camacho**

**Dr. Nimrod Vázquez Nava**

San Luis Potosí, S.L.P., Octubre del 2014



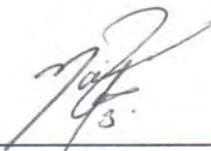
## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Control del punto de máxima potencia en paneles solares bajo variaciones de radiación y temperatura**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Control y Sistemas Dinámicos fue elaborada por **Yuz Asaf Zúñiga Ventura** y aprobada el **veintiuno de octubre dos mil catorce** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Matemáticas Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.



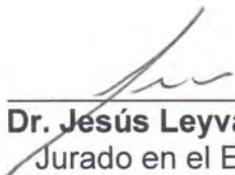
---

**Dra. Ilse Cervantes Camacho**  
Codirector de la tesis



---

**Dr. Nimrod Vázquez Nava**  
Codirector de la tesis



---

**Dr. Jesús Leyva Ramos**  
Jurado en el Examen



---

**Dr. Hugo Cabrera Ibarra**  
Jurado en el Examen



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Sistemas Híbridos de la División de Matemáticas Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección (codirección) de la Dra. Ilse Cervantes Camacho y el Dr. Nimrod Vázquez Nava, y bajo el apoyo técnico del M. en C. Irwin Allen Díaz Díaz.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. de registro 279109) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 012 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Control y Sistemas Dinámicos está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 21 días del mes de octubre del año 2014, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Jesús Leyva Ramos</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Hugo Cabrera Ibarra</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Nimrod Vázquez Nava</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>ITCELAYA</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CONTROL Y SISTEMAS DINÁMICOS**

sustentó el C.

**Yuz Asaf Zúñiga Ventura**

sobre la Tesis intitulada:

*Control del punto de máxima potencia en paneles solares bajo variaciones de radiación y temperatura*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dra. Ilse Cervantes Camacho**  
**Dr. Nimrod Vázquez Nava (ITCELAYA)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 14:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 21 días del mes de octubre de 2014.

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



***Dedicada a mi familia y amigos***

*Por poner un granito de arena en cada momento y apoyarme a construir este objetivo*

## **Agradecimientos**

A mi familia por todo su apoyo que me hace seguir adelante.

A mi asesor de tesis Dr. Nimrod Nava por brindarme sus conocimientos y consejos.

A la Dra. Ilse Cervantes por el apoyo brindado.

A M. en C. Irwin Allen por su ayuda y consejos cuando tenía dudas.

A mis profesores de posgrado quienes brindaron las habilidades y conocimientos para llevar a cabo este trabajo.

A mis sinodales por los consejos y observaciones para que este trabajo sea mejor.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme becado durante mis estudios.

A mis compañeros y amigos por su compañía y apoyo.

# Contenido

<b>Constancia de aprobación de la tesis</b>	ii
<b>Créditos institucionales</b>	iii
<b>Acta de examen</b>	iv
<b>Dedicatorias</b>	v
<b>Agradecimientos</b>	vi
<b>Lista de tablas</b>	ix
<b>Lista de figuras</b>	x
<b>Anexos</b>	xii
<b>Abreviaturas</b>	xiii
<b>Resumen</b>	xv
<b>Abstract</b>	xvi
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introducción y Estado del arte</b>	1
<b>1.1 Introducción</b>	1
<b>1.2 Técnicas de seguimiento</b>	3
<b>1.3 MPPT con sombreado parcial</b>	5
<b>1.4 Trabajos reportados</b>	7
<b>1.4.1 Modificación algoritmo perturbar y observar</b>	7
<b>1.4.2 MPPT individual para cada panel solar</b>	8
<b>1.4.3 Control por inversores Flyback</b>	9
<b>1.4.4 Control de seguimiento extremo (ESC) secuencial basado en MPPT global</b>	10
<b>1.5 Control por Modos Deslizantes</b>	11

<b>Capítulo 2</b>	
<b>Controlador para el punto de máxima potencia</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Justificación e importancia del tema</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Modelado de un arreglo fotovoltaico</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Convertidor propuesto y análisis</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Superficie de conmutación</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Selección óptima de la superficie de conmutación</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Análisis del control por modos deslizantes</b>	<b>28</b>
<b>2.7 Modelo promedio del Convertidor</b>	<b>29</b>
<b>2.8 Análisis de estabilidad</b>	<b>30</b>
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Simulaciones y resultados experimentales</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Simulaciones sin variaciones de sombreado en los paneles</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Simulaciones con variaciones de sombreado en los paneles</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Resultados experimentales</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>Anexos</b>	<b>47</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>

## Lista de tablas

<b>Tabla 1. Valores de Potencia, voltaje y corriente para diferentes MPP</b>	26
<b>Tabla 2. Parámetros de la planta y controlador</b>	35

# Lista de figuras

## Capítulo 1

Fig 1.1 Algoritmo Perturbar y Observar	4
Fig 1.2 Curva característica con sombreado mostrando MPP Global y Local	6
Fig 1.3 Diferencias entre variaciones de sombreado parcial en paneles solares	6
Fig 1.4 Algoritmo perturbar y observar modificado para trabajar con áreas sombreadas	8
Fig 1.5 Configuración individual de MPPT's para paneles en donde a cada panel PV se aplica un control MPPT con convertidor DC/DC	9
Fig 1.6 Inversor Flyback propuesto con medición de potencia del panel PV ( $P_{PV}$ ) y corriente del panel PV ( $I_{PV}$ )	10
Fig 1.7 Diagrama de bloques del ESC	11
Fig 1.8 Trayectorias del sistema con el control por modos deslizantes	13

## Capítulo 2

Fig 2.1 Superficie generada en la cercanía de los MPP	15
Fig 2.2 Lazo de control propuesto con superficie de control dependiente del voltaje, corriente y temperatura del panel PV	16
Fig 2.3 Sistema fotovoltaico propuesto	20
Fig 2.4 Sistema fotovoltaico en modo encendido	20
Fig 2.5 Sistema fotovoltaico en modo apagado	21
Fig 2.6 Esquemático de la implementación superficie de control	24
Fig 2.7 Trayectoria conceptual para cambios de radiación en la superficie de control y estado que toma el interruptor de conmutación dependiendo el valor de la superficie	25
Fig 2.8 Puntos de máxima potencia para una temperatura constante de 30°C	27
Fig 2.9 Puntos de máxima potencia para una temperatura constante de 15°C	27

## Capítulo 3

<b>Fig 3.1 Simulación de la respuesta del sistema bajo cambios de radiación y temperatura</b>	<b>37</b>
<b>Fig 3.2 Simulación de la respuesta del sistema bajo condiciones de sombreado parcial</b>	<b>39</b>
<b>Fig 3.3 Simulación de sistema bajo condiciones de sombreado parcial</b>	<b>40</b>
<b>Fig 3.4 Simulación comparativa entre sistema propuesta con modos deslizantes y sistema tradicional MPPT con algoritmo perturbar y observar en donde se varia la radiación en un panel</b>	<b>40</b>
<b>Fig 3.5 Circuito experimental</b>	<b>42</b>
<b>Fig 3.6 Voltaje de entrada, corriente de entrada y ciclo de trabajo bajo cambios en la radiación del panel del 40% al 60% y temperatura constante</b>	<b>43</b>
<b>Fig 3.7 Voltaje de entrada, corriente de entrada y ciclo de trabajo bajo cambios en la radiación del panel del 80% al 80% y temperatura constante</b>	<b>44</b>

# Anexos

<b>A.1 Energías Renovables</b>	47
<b>A.2 Panel Fotovoltaico</b>	47
<b>A.3 Algoritmo Perturbar y Observar</b>	48
<b>A.4 Prueba de la Proposición 1</b>	49

## Abreviaturas

<b>PV</b>	Fotovoltaico
<b>MPP</b>	Punto de máxima potencia
<b>MPPT</b>	Seguimiento del punto de máxima potencia
<b>PVG</b>	Generador fotovoltaico
<b>PWM</b>	Modulación de ancho de pulso
<b>P&amp;O</b>	Perturbar y observar
<b>RCC</b>	Control de correlación de la ondulación
<b>ESC</b>	Control de seguimiento extremo
<b>pact</b>	Potencia actual
<b>pant</b>	Potencia anterior
<b>pert</b>	Modificación del ciclo de trabajo
<b>Vact</b>	Voltaje actual
<b>Vant</b>	Voltaje anterior
<b>V</b>	Voltaje
<b>I</b>	Corriente
<b>V<sub>ref</sub></b>	Voltaje de referencia
<b>V<sub>oc</sub></b>	Voltaje de circuito abierto
<b>I<sub>sc</sub></b>	Corriente de corto circuito
<b>ΔV</b>	Valor asignado de voltaje para incrementos y decrementos
<b>DMPPT</b>	Seguimiento distribuido del punto de máxima potencia
<b>S</b>	Superficie de deslizamiento
<b>η</b>	Eficiencia de conversión de energía en el panel solar
<b>E</b>	Radiación solar recibida por el panel solar
<b>A<sub>c</sub></b>	Área superficial del panel solar
<b>I<sub>ph</sub></b>	Fotocorriente
<b>I<sub>s</sub></b>	Corriente de saturación del diodo
<b>q</b>	Carga eléctrica ( $1.6 * 10^{-19} C$ )
<b>A</b>	Factor de idealidad del diodo

<b>K</b>	Constante de Boltzmann ( $1.38 * 10^{-23} J/k$ )
<b>T</b>	Temperatura ( $^{\circ}K$ )
<b><math>R_s</math></b>	Resistencia en serie
<b><math>R_{sh}</math></b>	Resistencia de derivación
<b><math>N_s</math></b>	Número de paneles en serie
<b><math>N_p</math></b>	Número de paneles en paralelo
<b><math>V_i</math></b>	Voltaje de salida
<b><math>\lambda</math></b>	Nivel de radiación solar
<b><math>P_A</math></b>	Panel solar "A"
<b><math>P_B</math></b>	Panel solar "B"
<b><math>C_A</math></b>	Capacitor "A"
<b>L</b>	Inductor
<b>R</b>	Resistor
<b>U</b>	Ciclo de trabajo
<b>r</b>	Error cuadrático medio o residuo

# Resumen

## Control del Punto de Máxima Potencia en Paneles Solares Bajo Variaciones de Radiación y Temperatura

El panel solar es un dispositivo con la capacidad de transformar la energía solar en energía eléctrica, esta transformación depende principalmente de dos factores externos, la radiación solar que reciben las celdas y la temperatura a la cual están sometidas; mientras mayor sea la radiación y menor la temperatura, la eficiencia de conversión de energía será mejor. Cabe mencionar que la radiación solar que reciben los paneles puede variar por diversos factores, uno de ellos, áreas sombreadas, generadas ya sea por suciedad o nubes que se interpongan en la superficie de panel. Este bloqueo a la radiación solar y los cambios de temperatura generan variaciones en las curvas características de los paneles solares, motivo por el cual el punto de máxima potencia varía, es por esto que se requieren sistemas de control donde el objetivo sea alcanzar o seguir el punto de máxima potencia que tiene el panel solar; el cual, algunas veces no es alcanzado por sistemas de control convencionales. En este trabajo, se presenta un sistema de control del punto de máxima potencia, con base en la proposición de una superficie de conmutación que utiliza valores medibles del panel solar, tales como, corriente, voltaje y temperatura para posicionar efectivamente el sistema en dicho punto, bajo condiciones variables de radiación y temperatura.

**PALABRAS CLAVE:** Panel solar, celdas fotovoltaicas, áreas sombreadas, punto de máxima potencia.

# Abstract

## Control of Maximum Power Point in Solar Panels Under Radiation and Temperature Variations

A solar panel is a device with the ability to transform solar energy into electrical energy; this transformation depends mainly on two external factors, the solar radiation received by the cells and the cells temperature, *i.e.*, the higher radiation and the lower temperature, the higher energy conversion efficiency. It is worth mentioning, that the solar radiation can vary with several factors, one of them, shaded areas on the solar panel generated either by draft or clouds that block the surface of panel. This obstruction of the solar radiation along with temperature changes generates variations on the characteristic curves of the solar panels, leading to variations of the maximum power point that can be extracted from them. Control systems are used to track the maximum power of the solar panel; however, some conventional control systems, do not accomplish such objective. This work introduces a control system to track the maximum power point of a solar panel based on the use of a switching surface depending on the current, voltage and temperature of the panel, such a proposal allow us compensate temperature and radiation changes on-line.

**KEY WORDS:** solar panel, photovoltaic cell, shaded areas, maximum power point.

# Capítulo 1

---

## Introducción y estado del arte

En este capítulo se expondrán las diferentes técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia que en la actualidad se manejan, al igual de las nuevas tendencias y propuestas de seguimiento de los MPP que se están manejando por otros autores, explicando cómo funcionan y la manera en la cual están implementadas en los paneles solares.

### 1.1 Introducción

Conforme el tiempo avanza, el ser humano ha buscado fuentes de energía prometedoras que permitan abastecer a la humanidad y también que permitan cuidar el medio ambiente. Gracias a las nuevas tecnologías, se ha podido fijar la mirada en una fuente de energía inagotable y de generación limpia como nuestro sol, del cual extraemos su poder mediante la tecnología conocida como fotovoltaica, la cual convierte directamente la energía solar en eléctrica.

A pesar de que esta opción suena muy atractiva, uno de los grandes inconvenientes que presenta la energía fotovoltaica es el bajo rendimiento de la conversión energética. En la actualidad, se experimenta con prototipos que puede alcanzar hasta el 30% de rendimiento. Por lo tanto, los procedimientos, métodos y circuitos de seguimiento de máxima potencia son especialmente útiles, pues permiten extraer la máxima energía en cada momento, disminuyendo así el peso, el tamaño y finalmente los costes de las instalaciones fotovoltaicas.

Bajo diferentes condiciones atmosféricas (dependiendo principalmente de la temperatura [1] y el nivel de insolación), las celdas fotovoltaicas (PV, por sus siglas en inglés) suministran la potencia máxima en un punto particular de operación: el punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés). A

diferencia de las fuentes de energía convencionales, es deseable operar los sistemas fotovoltaicos en su MPP [1-14]. Sin embargo, el lugar geométrico del MPP varía en un amplio intervalo, dependiendo de la temperatura del panel fotovoltaico y la intensidad de la insolación [1-3]. Condiciones de sombreado instantáneos y el envejecimiento de las células fotovoltaicas también afectan el lugar geométrico del MPP. Por lo tanto, con el fin de lograr un funcionamiento en el MPP, se utiliza Los sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés), que aseguran el funcionamiento del generador fotovoltaico (PVG, por sus siglas en inglés) en su MPP bajo condiciones atmosféricas cambiantes. Típicamente, la etapa de potencia del MPPT se implementa normalmente por medio de un convertidor DC-DC, por medio de una modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés).

Se han propuesto muchos algoritmos MPPT [5-20], algunos de ellos con mayor rapidez en el posicionamiento del MPP y otros con mayor precisión. Los algoritmos "perturbar y observar" (P & O) o Hill-Climbing son probablemente los más ampliamente utilizados ya que su principio de funcionamiento es bastante simple; el voltaje y la corriente en el PV son medidos y la potencia se calcula.

El MPP se busca de manera iterativa. Estos algoritmos implican un compromiso en la elección correcta en la que debe de ser ajustado el valor por el cual el punto de máxima potencia es controlado, como el ciclo de trabajo o de tensión de referencia; valores pequeños reducen las pérdidas en el estado de equilibrio debido a pequeñas perturbaciones alrededor del MPP, mientras que los valores grandes mejoran el comportamiento dinámico en situaciones que involucran condiciones rápidamente cambiantes de irradiación o características de la carga [8-9]. En realidad, la eficiencia obtenida del MPPT depende de la complejidad del algoritmo utilizado, pero los algoritmos sofisticados presentan dos inconvenientes principales: aumento de la carga computacional que puede requerir hardware costoso, y una respuesta dinámica lenta. La última es una limitación resultante de la toma de muestras de tensión y corriente. Los intervalos de tiempo entre

iteraciones del algoritmo deben ser cortos para permitir el rastreo rápido, pero, por otro lado, deben ser más largos que el tiempo de establecimiento de la corriente y el voltaje del PV para la medición fiable de la señal.

Basándose en las características de los módulos fotovoltaicos, el lugar geométrico del MPP se puede aproximar por una relación lineal [10-11]. Por lo tanto, un controlador lineal se puede diseñar para operar el PV a su MPP aproximado. Teniendo una implementación de hardware, esta acción se lleva a cabo mucho más rápido que el algoritmo MPPT.

## **1.2 Técnicas de seguimiento**

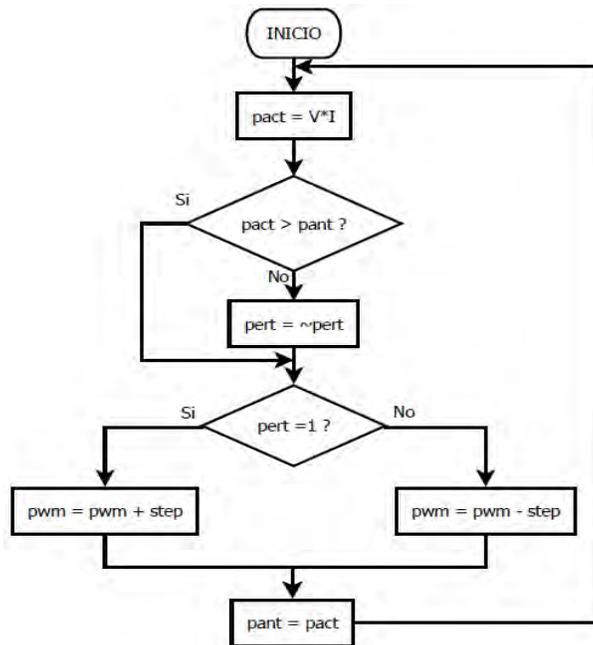
En la literatura existen numerosas técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

- Perturbar y observar
- Hill-Climbing
- Lógica Difusa
- Control de correlación de la ondulación (RCC, por sus siglas en inglés)
- Conductancia incremental
- Control de seguimiento extremo (ESC, por sus siglas en inglés)

Algunos presentan un mejor rendimiento en estado estacionario, mientras que otros son superiores durante las transiciones.

El algoritmo perturbar y observar [20] que se puede observar en la Figura 1.1, es muy utilizado debido a su simplicidad de funcionamiento, este consiste en modificar el ciclo útil de un convertidor de potencia conectado a la salida del arreglo fotovoltaico, con el cambio de ciclo útil se modifica la corriente extraída del arreglo fotovoltaico, por lo consiguiente la potencia obtenida se modifica, esto en base a la medición de la potencia y realizando una comparación entre la potencia actual ( $P_{act}$ ) que se tiene y la potencia anteriormente obtenida ( $P_{ant}$ ), de esta

manera dependiendo el valor de la comparación se decide el valor o dirección de la modificación del ciclo útil (pert).



**Fig 1.1 Algoritmo Perturbar y Observar**

El funcionamiento de este algoritmo es el siguiente:

- a) Si el voltaje de operación se perturba en cierta dirección y la potencia extraída del mismo se incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por lo tanto el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección,
- b) Si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía.

Otro de los algoritmos más utilizados es el Hill-Climbing, el cual es muy similar al Perturbar y Observar, de manera que comienza con una solución arbitraria e intentando encontrar una mejor solución en donde se varía incrementalmente un único elemento de la solución. Si el cambio produce una mejor solución, otro

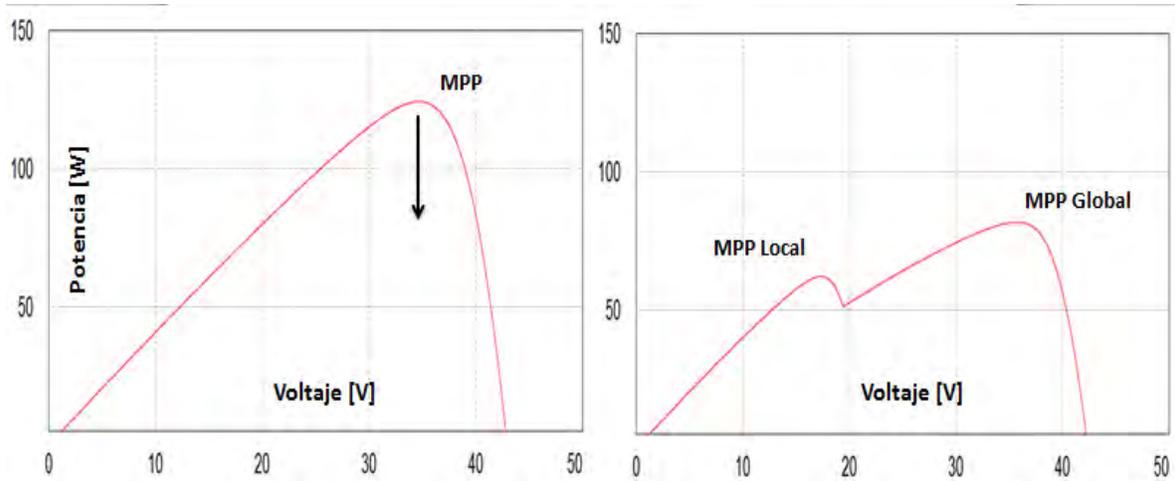
cambio incremental se le realizará a la nueva solución, repitiendo este proceso hasta que no se pueda encontrar mejoras. Otra forma de describir el funcionamiento del algoritmo es de que Hill-Climbing intenta maximizar (o minimizar) una función objetivo. En cada iteración, el algoritmo ajustará un único elemento y determinará si el cambio mejora el valor de la función.

Cuando se presentan puntos globales y locales en el sistema, el algoritmo Hill-Climbing solo podrá converger al máximo local, de tal manera que pare mejorar la eficiencia de posicionamiento se suele corregir el algoritmo.

### **1.3 MPPT con sombreado parcial**

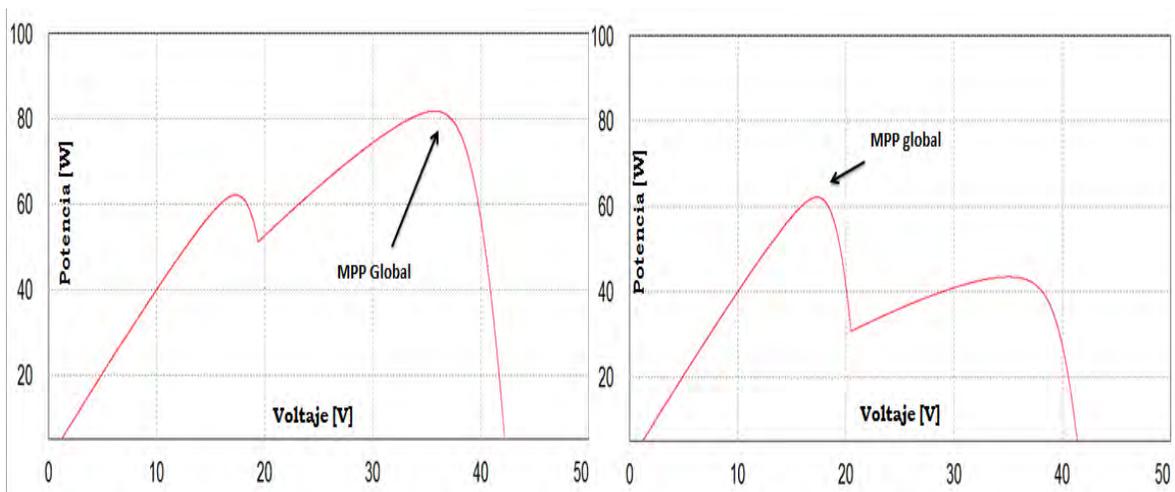
Este tipo de métodos funciona muy bien ya sea con un sólo panel solar que regularmente su uso es para casas o con varios conectados en serie o paralelo para uso industrial en el cual la potencia demandada es mucho mayor. Sin embargo, el mayor problema por el cual no se quieren usar los paneles fotovoltaicos, es por la variación en su eficiencia que estos presentan, en donde como ya se mencionó, los paneles dependen de la radiación solar, haciendo que las nubes o cualquier objeto que genere sombreado sobre el panel sea una perturbación hacia nuestro sistema.

Para este tipo de perturbaciones un simple MPPT no es suficiente, las soluciones varían pero no deja de ser un arreglo que se tiene que hacer sobre el algoritmo de MPPT, para poder reconocer cuando se presenten estas variaciones y poder actuar de forma inmediata. En la Figura 1.2 se puede visualizar cuando los paneles están bajo un sombreado parcial.



**Fig 1.2 Curva característica con sombreado mostrando MPP Global y Local**

Bajo estas condiciones de sombreado, las curvas características presentan variaciones en el MPP, teniendo un MPP global y otro local, siendo el global el máximo de ellos, pero dependiendo la cantidad del panel que se encuentra sombreado y el panel con sombreado se pueden observar los siguientes dos casos mostrados en la Figura 1.3



**Fig 1.3 Diferencias entre variaciones de sombreado parcial en paneles solares**

## **1.4 Trabajos reportados**

En la actualidad los trabajos reportados son básicamente soluciones a estos problemas de Máximos Globales y Locales, en donde en la mayoría de los casos, la solución varía o depende de un arreglo al algoritmo utilizado en donde ahora considera el problema de sombreado.

A continuación se muestran algunas alternativas de trabajos ya reportados para solucionar el problema de sombreado parcial en los paneles solares.

### **1.4.1 Modificación algoritmo perturbar y observar**

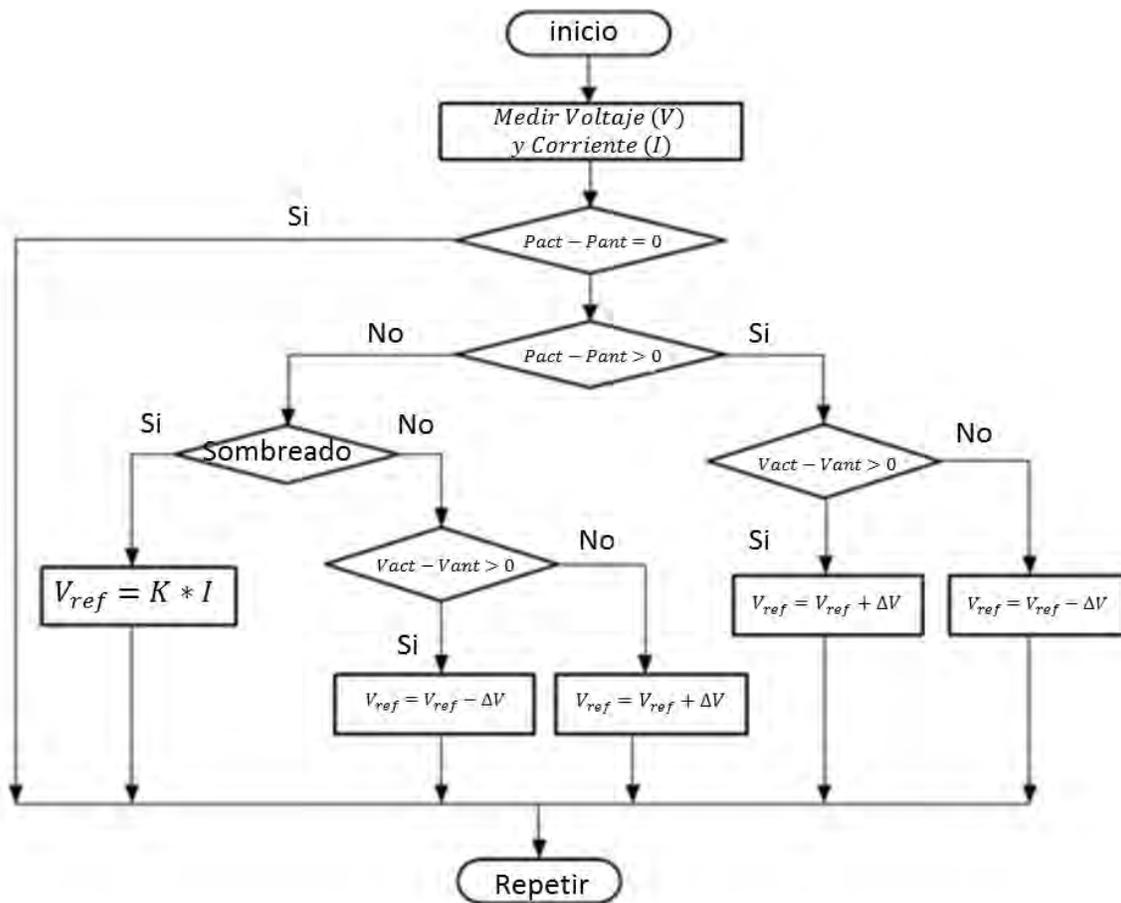
El algoritmo de MPPT en este trabajo [21] se modificó para considerar que el panel solar se encuentra en condiciones de sombreado parcial, realizando comparaciones entre las potencias y voltajes actuales ( $P_{act}$  y  $V_{act}$ ) medidas en el arreglo fotovoltaico, contra las tomadas un muestreo anterior ( $P_{ant}$  y  $V_{ant}$ ) y en el caso de tener sombreado parcial realizar una acción específica. (Ver Figura 1.4)

El funcionamiento de este algoritmo es el siguiente:

- a) Si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico y el voltaje de entrada incrementan, significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por lo tanto el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección,
- b) Si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico incrementa pero el voltaje de entrada disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía.
- c) Si la potencia extraída y el voltaje de entrada disminuyen, el voltaje de operación deberá perturbarse incrementalmente para alcanzar el MPP.
- d) Si la potencia extraída disminuye y el voltaje de entrada se incrementa, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del

MPP, motivo por el cual el voltaje de operación se perturba en dirección contraria.

- e) En el caso contrario, si la potencia extraída disminuye, y esto es generado por un sombreado parcial en el panel fotovoltaico, el voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) se ajusta en base a un criterio de aproximación dado por  $V_{ref} = K * I$ , donde  $K = V_{oc}/I_{sc}$  considerando el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )

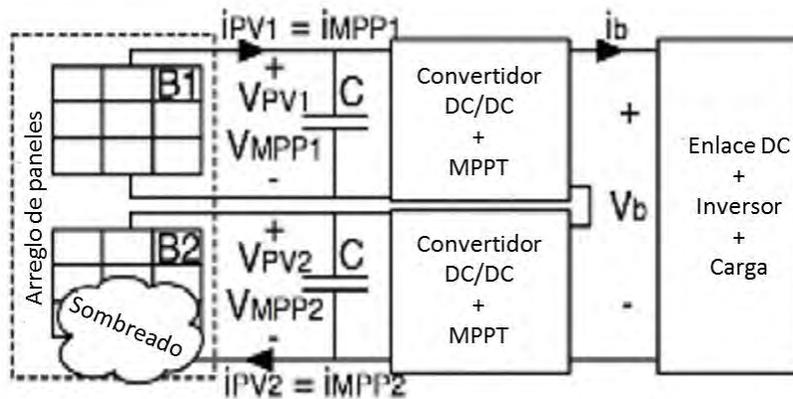


**Fig 1.4** Algoritmo perturbar y observar modificado para trabajar con áreas sombreadas

### 1.4.2 MPPT individuales para cada panel solar

Para obtener el punto de máxima potencia para cada módulo fotovoltaico puede ser asociado a un convertidor DC / DC para extraer todo el MPP [22]. Tal solución

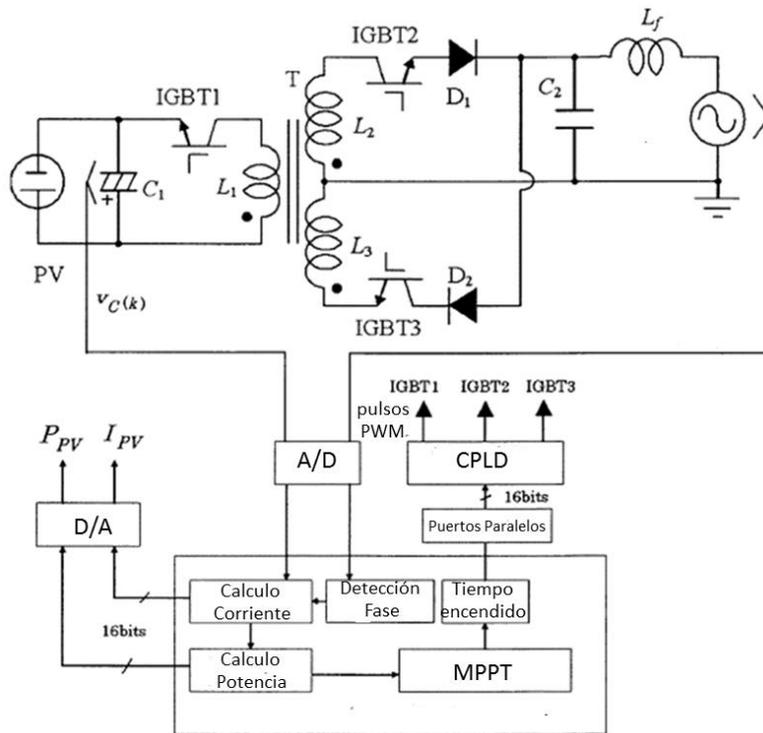
se conoce como Seguimiento distribuido del punto de máxima potencia (DMPPT, por sus siglas en inglés)



**Fig 1.5 Configuración individual de MPPT's para paneles en donde a cada panel PV se aplica un control MPPT con convertidor DC/DC**

### 1.4.3 Control por inversores Flyback

En [23] se presenta un convertidor "flyback" controlado por sensores activos para el seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) para una pequeña instalación fotovoltaica (PV). Cuando un sistema de energía fotovoltaica se construye con un número de sistemas de energía pequeñas, el coste total del sistema se incrementará y será un asunto de preocupación. Para superar esta dificultad, en este trabajo se propone un sistema fotovoltaico que no utiliza el sensor de corriente caro, pero utiliza el método de estimación de la corriente fotovoltaica a partir del voltaje PV.



**Fig 1.6 Inversor Flyback propuesto con medición de potencia del panel PV ( $P_{PV}$ ) y corriente del panel PV ( $I_{PV}$ )**

#### 1.4.4 Control de seguimiento extremo (ESC) secuencial basado en MPPT global

Con el fin de hacer frente a las características multimodales de campo fotovoltaico con sombreado variables, este estudio propone un estrategia de control global MPPT basada en ESC secuencial [23], basado en modelado aproximado y análisis de las características bajo circunstancias de sombreado variable. Para los diversos puntos de máxima potencia de la curva característica, el límite de variación para la tensión se encuentra, y se basa en que la tensión inicial para la búsqueda segmentaria puede ajustarse. El mínimo local de energía para el segmento anterior se utiliza como el comienzo del siguiente segmento, y por tanto, la tensión inicial se puede ajustar con precisión. Tal esquema secuencial puede reducir significativamente el intervalo de búsqueda, es decir, el tiempo en que se posiciona en el MPP.

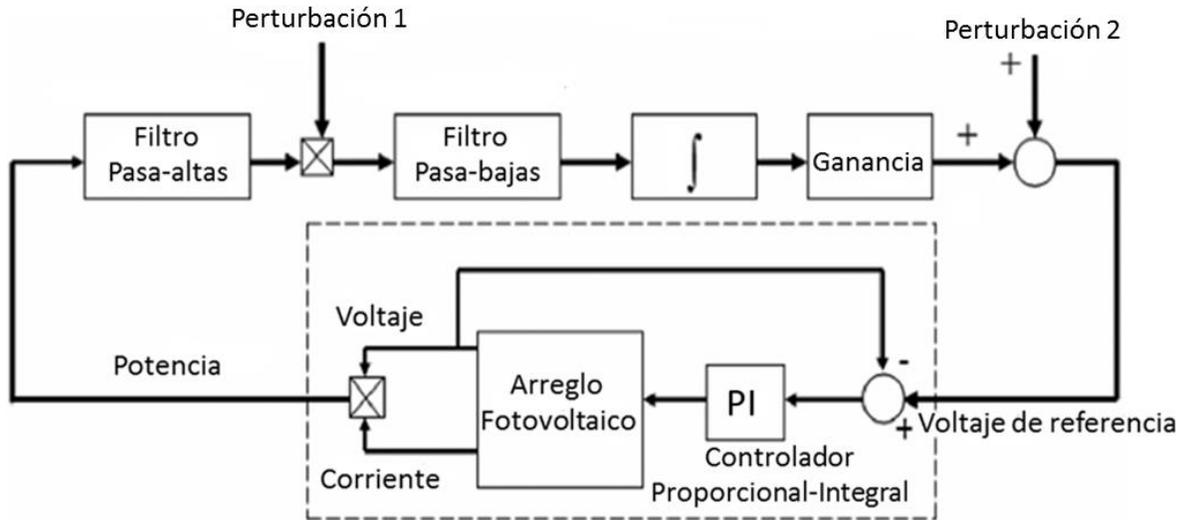


Fig 1.7 Diagrama de bloques del ESC

## 1.5 Control por modos deslizantes

Robustez, buena respuesta dinámica, estabilidad ante variaciones grandes de la carga y de la fuente, son algunas de las características que presentan los sistemas al ser retroalimentados cuando se les aplica un control por modos deslizantes.

El control se basa, a partir de la definición de una superficie atractora denominada de deslizamiento que “atrae” a las trayectorias de los estados del sistema hacia ella y hace que dichos estados del sistema se mantengan ahí, llevando al sistema al punto de operación deseado una vez que se llega a la superficie definida. Definiendo un ejemplo [24] para facilitar la comprensión del funcionamiento, tenemos que:

Sea el sistema

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= ax_2 - bx_1 + u \end{aligned}$$

donde la ley de control  $u$  es de la forma

$$u = -\varphi x_1$$

Se propone una superficie denominada superficie de deslizamiento:

$$S = cx_1 + x_2 = 0$$

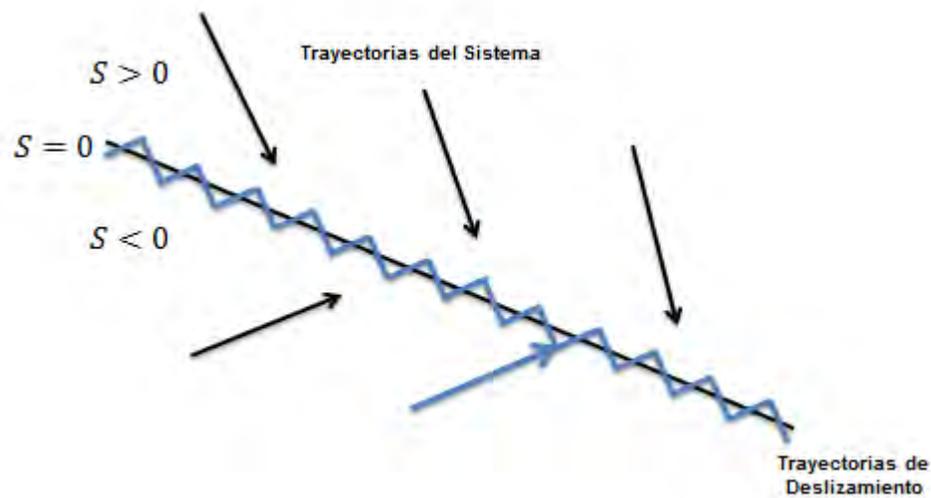
Para completar la ley de control se propone:

$$\varphi = \begin{cases} \alpha & x_1 S > 0 \\ -\alpha & x_1 S < 0 \end{cases}$$

El sistema definido presenta dos estructuras de acuerdo con la ley de control, una asociada con  $\alpha$  y la otra con  $-\alpha$ . En donde la respuesta puede llegar a conducir a sistemas inestables; sin embargo, el control por modos deslizantes tiene la capacidad de garantizar estabilidad para el sistema combinado, aunque las dos estructuras del sistema sean inestables, esto debido a que, el control por modos deslizantes se puede aplicar, no importando el tipo de estructuras, ya sean sistemas estables o inestables.

La ley de control permite lograr estabilidad aún cuando para cada estructura el sistema no lo sea. El sistema estará cambiando de una estructura a otra de manera que se llegue al punto de equilibrio, el sistema conmuta tomando en cuenta, en este caso, dos superficies,  $x_1 = 0$  y  $S = 0$  (superficie de deslizamiento).

Las trayectorias del sistema asociadas al movimiento con el control por modos deslizantes propuesto es el mostrado en la Figura 1.8. En cualquier punto de operación en el que se encuentre el sistema, el control aplicará un estado tal que obligue al sistema a llegar y a permanecer en la superficie de deslizamiento, una vez ahí el sistema es llevado al punto de equilibrio, en este caso cero.



**Fig 1.8 Trayectorias del sistema con el control por modos deslizantes**

Con base en el funcionamiento del control por modos deslizantes, los pasos de diseño pueden ser enlistados de la siguiente manera:

- Obtener el modelo del sistema.
- Proponer una superficie de deslizamiento.
- Verificar la existencia del modo de deslizamiento.
- Verificar la estabilidad dentro de la superficie.

# Capítulo 2

---

## Controlador para el punto de máxima potencia

En este capítulo se presentara todo lo relevante a la propuesta de tesis, desde su planteamiento en base a la observación del comportamiento de las curvas características de los PVs, las cuales presentan variación con cambios de radiación y temperatura, hasta el análisis matemático de la superficie de control y la respuesta del sistema en lazo cerrado que se llevó a cabo para la realización física del proyecto.

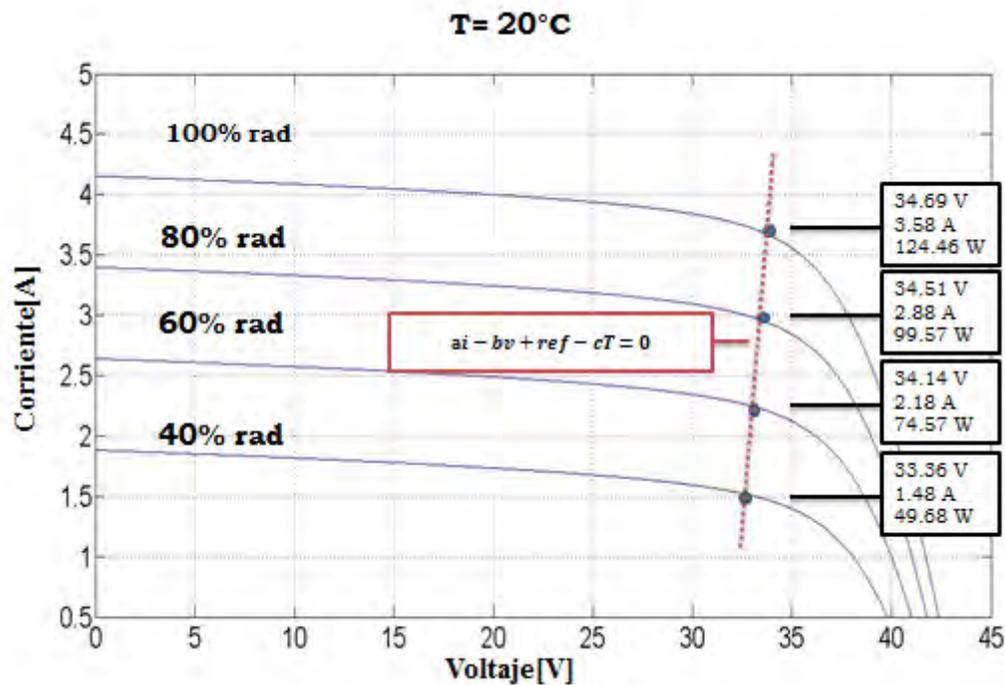
Como ya se presentó, las curvas características i-v de los paneles solares presentan un cambio en su punto de máxima potencia, ya sea porque su ubicación cambia o porque se presenten puntos de máxima potencia globales o locales. Esta variación en el MPP genera, que lo sistemas convencionales de MPPT no se puedan posicionar correctamente, teniendo como principal problema una baja eficiencia de conversión.

Esto debido a los factores de los cuales se depende la conversión energética en el panel solar. La eficiencia de un panel solar ( $\eta$ , "eta"), es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, este término se calcula usando la relación del punto de máxima potencia (MPP), dividió entre la luz que llega a la celda ( $E$ = radiación solar ( $W/m^2$ )) y el área superficial del panel solar ( $A_c$ = área superficial del panel solar ( $m^2$ )).

$$\eta = \frac{MPP}{E * A_c}$$

De tal manera que la respuesta de seguimiento al punto de máxima potencia es muy importante, ya que para obtener una mejor eficiencia de conversión, el punto de máxima potencia debe de ser siempre alcanzado.

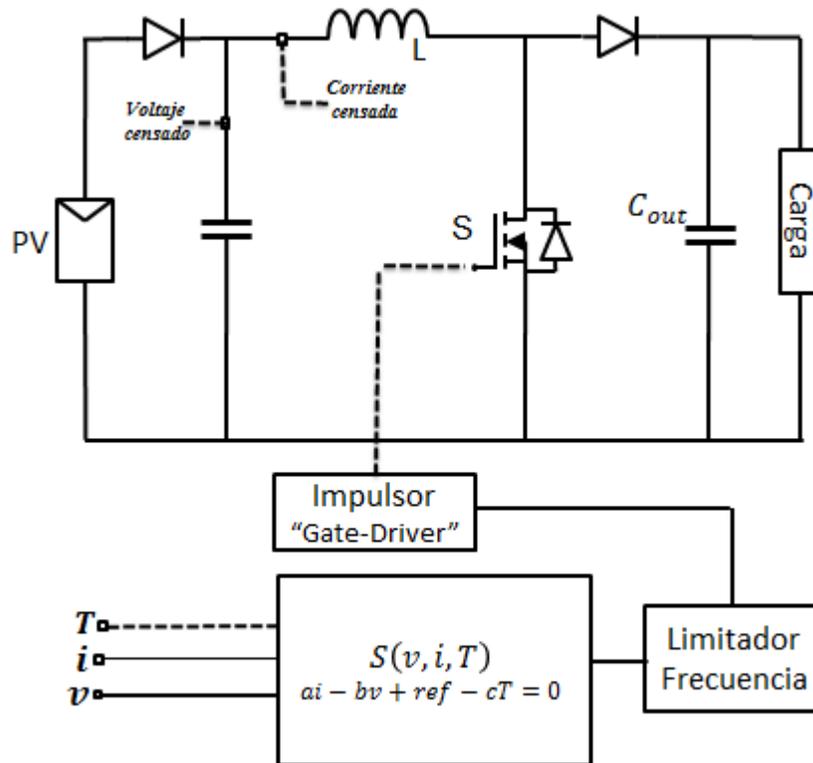
De manera que en esta tesis se propone un control de retroalimentación que posicione al sistema siempre en el punto de máxima potencia bajo cualquier variación en dicho punto incluyendo también en el caso de tener MPP global y local.



En base a la observación de que se puede trazar una superficie que conecte a todos los MPP que se generan en un panel solar baja cambios en la radiación solar que recibe, (ver. Fig. 2.2), se propuso el uso de la teoría de control de Modos Deslizantes, en la cual el objetivo de control es llevar las trayectorias del sistema a una superficie de conmutación, se decidió que sería la opción más viable y eficiente para alcanzar los MPP.

La retroalimentación propuesta (modo deslizante) utiliza una combinación lineal de la tensión, la corriente y la temperatura para lograr su funcionamiento a lo largo de una superficie en las cercanías de los lugares geométricos del MPP, de tal manera

que si se demuestra la cercanía de los puntos a la superficie propuesta o dicho de otra manera, que el margen de error entre la superficie y los puntos es muy pequeño, la eficiencia de convergencia del sistema hacia los MPP será muy alta.



**Fig 2.2 Lazo de control propuesto con superficie de control dependiente del voltaje, corriente y temperatura del panel PV**

En la Figura 2.2 se puede observar el sistema propuesto en donde los parámetros de entrada estarían dados como ya se mencionó por el voltaje, corriente y temperatura de panel solar.

## 2.1 Justificación e importancia del tema

En la actualidad pueden ser muchos ya los sistemas de búsqueda de punto de máxima potencia, pero son sistemas basados en hardware, en los cuales su eficiencia es basada en la complejidad del código utilizado, siendo por lo mismo

sistemas que dependen de un tiempo de muestreo, teniendo entonces que considerar que si se requiere una velocidad más alta de procesamiento se necesita equipo más caro, siendo este una desventaja clara a la hora de trabajar con los MPPT.

Para esta tesis se propone hacer un sistema de control por modos deslizantes que pueda auto-ajustarse a las condiciones de radiación y temperatura a las cuales este expuesto el arreglo de paneles solares; el aspecto que motivo al uso de control por modos deslizante, fue la observación de una similitud en los puntos de máxima potencia en diferentes curvas características en donde se observa una misma temperatura en los paneles pero diferentes radiaciones en ellos. En la Figura 2.1 se puede observar, un mismo panel, en el cual se presenta las diferentes curvas características bajo diferentes cambios en la radiación que recibe (40%, 60%, 80% y 100%) y cuya temperatura es la misma. Se puede observar que se puede trazar una recta, la cual concordaría con nuestra superficie de modos deslizantes.

## 2.2 Modelado de un arreglo fotovoltaico

Un panel solar tiene una potencia y voltaje de trabajo limitado, por lo que usualmente se conectan varios paneles solares en arreglo de conexiones, ya sea serie o paralelo para garantizar el voltaje, corriente y potencia deseada.

La ecuación voltaje-corriente de un panel solar [19] puede ser descrita como:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AKT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

donde:

- $I_{ph}$  es la fotocorriente,
- $I_s$  es la corriente de saturación del diodo,
- $q$  es la carga eléctrica ( $1.6 * 10^{-19} C$ ),
- $A$  es el factor de idealidad del diodo,

- $K$  es la constante de Boltzmann ( $1.38 * 10^{-23} J/K$ ),
- $T$  la temperatura de la unión, ( $^{\circ}K$ )
- $R_s$  la resistencia en serie, y
- $R_{sh}$  la resistencia de derivación.

El valor de la resistencia de derivación ( $R_{sh}$ ) es grande, por lo que el ultimo término de la Ecuación (1) puede ser despreciado. Al mismo tiempo, la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) es aproximadamente igual a la fotocorriente ( $I_{ph}$ ). Por lo tanto la ecuación puede ser reescrita como:

$$I = I_{sc} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AKT} (V + IR_s) \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

Cuando el panel solar está en circuito abierto, su corriente de salida es igual a cero, y la corriente de saturación del diodo es

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{qV_{oc}}{AKT} \right) - 1} \quad (3)$$

donde:  $V_{oc}$  es el voltaje de circuito abierto.

La Ecuación (2) es una función implícita de voltaje y corriente. Para facilitar el análisis, puede ser reescrita como:

$$V = \frac{AKT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc} - I}{I_s} \right) - IR_s \quad (4)$$

Entonces la potencia de salida puede ser expresada de la siguiente manera:

$$P = VI = \frac{AKTI}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc} - I}{I_s} \right) - I^2 R_s \quad (5)$$

Utilizando las Ecuaciones (4) y (5), las curvas características de salida ( $I$ - $V$  y  $P$ - $V$ ) pueden ser fácilmente obtenidas. Cuando el panel solar es conectado en serie-paralelo para conformar un arreglo, los valores totales de voltaje de salida, corriente de salida, voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito y resistencia en serie del arreglo pueden ser expresados de la siguiente manera:

$$V_A = N_S V, \quad I_A = N_P I, \quad V_{ocA} = N_S V_{oc}, \quad I_{scA} = N_P I_{sc}, \quad R_{SA} = (N_S/N_P)R_S$$

donde:  $N_S$  es el número de paneles en serie y  
 $N_P$  es el número de paneles en paralelo.

Cuando el panel solar trabaja en serie bajo radiación uniforme la corriente de carga es igual a la corriente de salida de arreglo. Si una o más parte del panel aparece sombreada, la corriente de salida de los paneles sombreados será menor. La ecuación que describe el comportamiento de un arreglo de PV que considera un arreglo en serie y además incluye la radiación está dado por:

$$V_A = \sum_{i=1}^{N_S} V_i = \sum_{i=1}^{N_S} \left[ \frac{AKT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc} - \frac{I}{\lambda}}{I_s} \right) - IR_s \right] \quad (6)$$

donde:  $V_i$  es el voltaje de salida,  
 $I$  es la corriente de salida, y  
 $\lambda$  representa el nivel de radiación solar.

#### Observación 1:

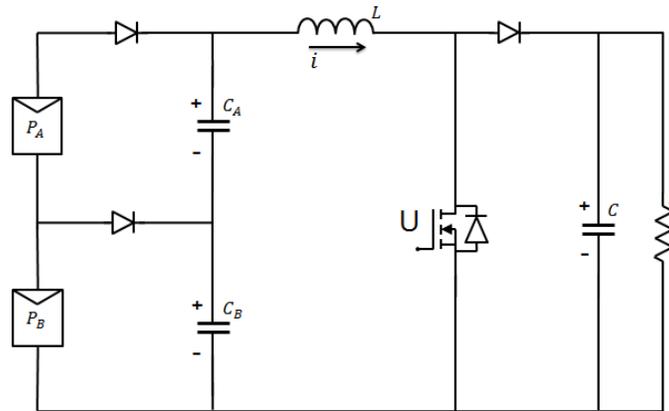
$\lambda$  toma valores entre 0 y 1 correspondientes al porcentaje del área del panel solar que está recibiendo radiación en donde 0 es totalmente despejado y 1 completamente sombreado.

#### Observación 2:

En la Ecuación 6, el voltaje entregado por el panel es directamente proporcional a la corriente, al nivel de radiación que tiene el panel solar y a la temperatura a la que está sometido.

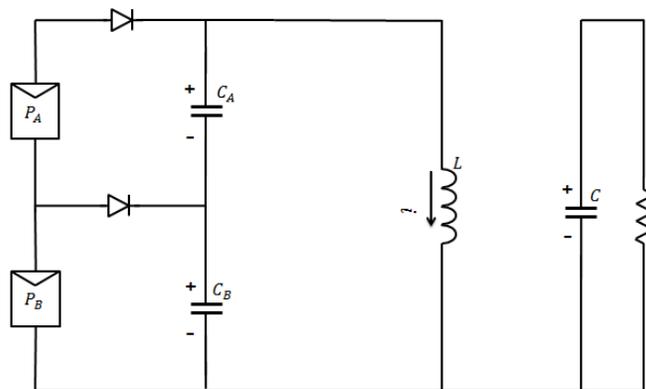
### 2.3 Convertidor propuesto y análisis

El sistema fotovoltaico propuesto está compuesto por dos arreglos de paneles solares conectados en serie y un convertidor cd/cd del tipo elevador para demandar la máxima potencia (Ver Figura 2.3)



**Fig 2.3 Sistema fotovoltaico propuesto**

El convertidor elevador tiene dos modos de operación los cuales suceden cuando el MOSFET está encendido o apagado. En el Modo 1, el MOSFET está encendido y se comporta como un corto circuito, además el diodo está abierto o polarizado inversamente, obteniéndose el circuito equivalente que se muestra en la Figura 2.4.



**Fig 2.4 Sistema fotovoltaico en modo encendido (Modo 1)**

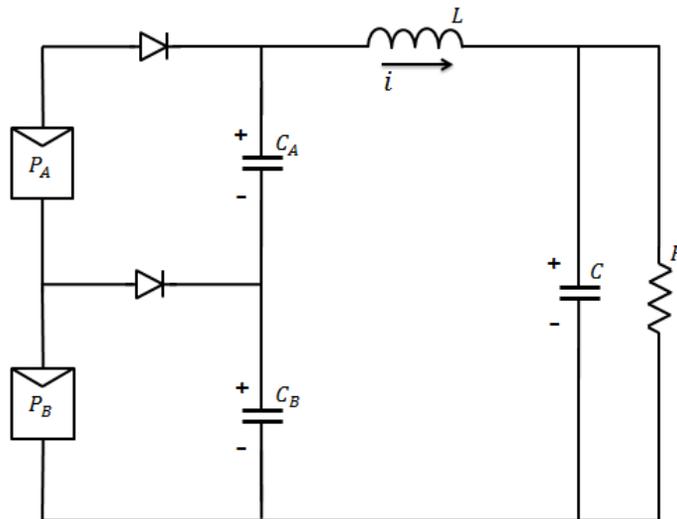
Para el Modo 1 se tienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}
 i_{PA} - C_A \frac{dV_{CA}}{dt} - i_L &= 0 \\
 -i_{PB} + C_B \frac{dV_{CB}}{dt} + i_L &= 0 \\
 V_{PA} + V_{PB} &= L \frac{di_L}{dt} \\
 C \frac{dV_o}{dt} &= -\frac{V_o}{R}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Despejando las variables de estado:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_{CA}}{dt} &= \frac{i_{PA} - i_L}{C_A} \\
 \frac{dV_{CB}}{dt} &= \frac{i_{PB} - i_L}{C_B} \\
 \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_{PA} + V_{PB}}{L} \\
 \frac{dV_o}{dt} &= \frac{-V_o}{RC}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

El Modo 2 se presenta cuando el MOSFET se encuentra apagado en donde se comporta como si estuviera en circuito abierto, pero el diodo ahora está en conducción. En la Figura 2.5 se muestra el circuito equivalente.



**Fig 2.5 Sistema fotovoltaico en modo apagado (Modo 2)**

Para el Modo 2 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 i_{PA} - C_A \frac{dV_{CA}}{dt} - i_L &= 0 \\
 -i_{PB} + C_B \frac{dV_{CB}}{dt} + i_L &= 0 \\
 V_{PA} + V_{PB} &= L \frac{di_L}{dt} + V_o \\
 i_L &= C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Despejando de igual manera las variables de estado:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_{CA}}{dt} &= \frac{i_{PA} - i_L}{C_A} \\
 \frac{dV_{CB}}{dt} &= \frac{i_{PB} - i_L}{C_B} \\
 \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_{PA} + V_{PB} - V_o}{L} \\
 \frac{dV_o}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Usando las Ecuaciones (8) y (10), asumiendo que el convertidor elevador funciona en modo de conducción continua; es decir, que la corriente del inductor nunca decae a cero, y ponderando las Ecuaciones (8) y (10) mediante el tiempo de encendido y de apagado respectivamente, se obtiene el modelo conmutado del sistema.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_{PA}}{L} + \frac{V_{PB}}{L} - \frac{V_o(1-u)}{L} \\
 \frac{dV_o}{dt} &= \frac{i_L(1-u)}{C} - \frac{V_o}{RC} \\
 \frac{dV_{CA}}{dt} &= \frac{i_{PA}}{C_A} - \frac{i_L}{C_A} \\
 \frac{dV_{CB}}{dt} &= \frac{i_{PB}}{C_B} - \frac{i_L}{C_B}
 \end{aligned} \tag{11}$$

En donde “u” toma el valor de 1 en el modo de encendido del MOSFET y 0 en el modo de apagado.

Utilizando la Ecuación (4) del panel solar y despreciando  $R_s$  por ser muy pequeña, tenemos que:

$$V_{CA} = \frac{AKT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc} - \frac{I}{\lambda}}{I_s} \right) \quad (12)$$

Despejando el término de la corriente tenemos que:

$$i_{PJ} = \lambda \left( I_{sc} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} \right) \quad (13)$$

donde:  $J = \{A, B\}$

Sustituyendo (13) en el modelo conmutado (11), se obtiene:

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{V_{CA}}{L} + \frac{V_{CB}}{L} - \frac{V_o(1-u)}{L} \\ \dot{V}_o &= \frac{i_L(1-u)}{C} - \frac{V_o}{RC} \\ \dot{V}_{CA} &= \frac{\lambda I_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda I_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_A} \\ \dot{V}_{CB} &= \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_B} \end{aligned} \quad (14)$$

Estas ecuaciones describen el comportamiento del sistema fotovoltaico propuesto, incluyendo el modelo del panel solar y del convertidor elevador.

## 2.4 Superficie de conmutación

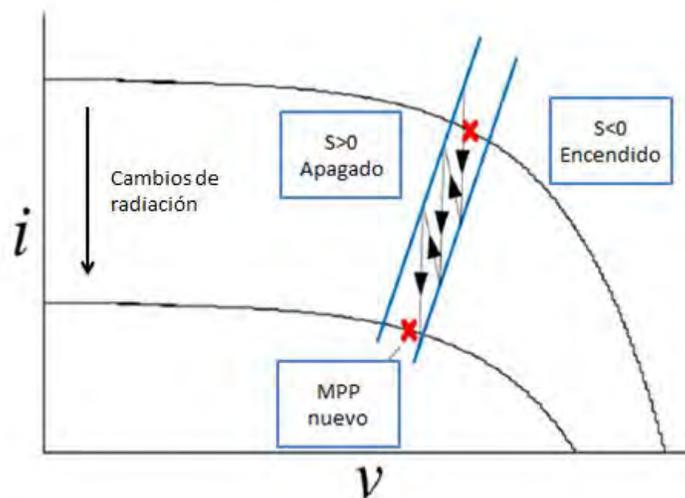
El objetivo en la mayoría de los convertidores CC-CC es regular la tensión de salida para obtener un valor constante y esto se logra mediante la manipulación del ciclo de trabajo de los transistores que se encuentran en el elevador [16-19]. Se define una superficie de conmutación como una combinación lineal de la tensión, corriente y temperatura del PV, que nos permite definir el valor del ciclo de trabajo y así encontramos el MPP.

$$\begin{aligned} S(v, i, t) &= a * i - b * v + ref - c * t = 0 \quad (a, b, c \geq 0) \\ S < 0: & \text{encendido}, \quad S > 0: \text{apagado} \end{aligned} \quad (15)$$

donde:  $i$  es la corriente,  
 $v$  la tensión de entrada,  
 $t$  la temperatura del PV,  
 $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $ref$  son los parámetros de la ecuación que describe la superficie de conmutación en donde  $a$ ,  $b$ , y  $c$  establecen la pendiente en el plano corriente-voltaje ( $i-v$ ) del arreglo de paneles solares, y son elegidos como positivos, y  $ref$  establece el offset.

Este controlador restringe la operación del sistema a la superficie de deslizamiento. El circuito de modos deslizantes está formado por un conjunto de amplificadores operacionales en la configuración de sumador para realizar la operación de la superficie de control; el resultado de esta operación modifica el valor del ciclo de trabajo con un generador de PWM que está conectado al transistor de la PVG.

El punto de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos resulta de la intersección de la superficie de conmutación,  $S = 0$ , con la curva de PV.

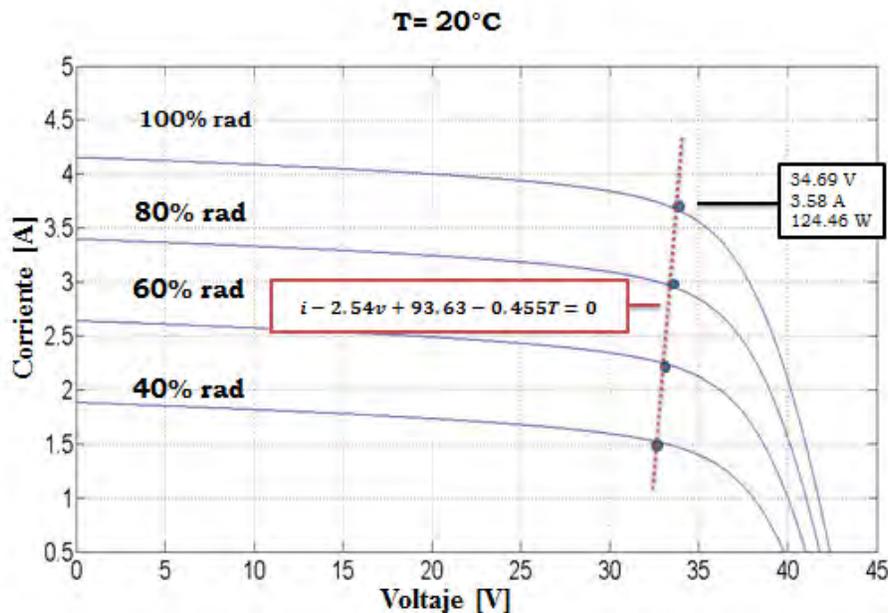


**Fig 2.6 Trayectoria conceptual para cambios de radiación en la superficie de control y estado que toma el interruptor de conmutación dependiendo el valor de la superficie**

## 2.5 Selección óptima de la superficie de conmutación

Muchas superficies de conmutación podrían asegurar el posicionamiento adecuado del sistema en los puntos de máxima potencia. Se eligió una superficie lineal, basada en la línea recta trazada entre los MPP, cuando tienen diferentes condiciones de temperatura y de irradiación. La pendiente de la superficie representada por la constante A, B y C, es un parámetro determinado por el MPP. Una buena elección de la pendiente puede acortar significativamente el tiempo de convergencia del MPPT. La Figura 2.6 muestra un ejemplo conceptual de la trayectoria del sistema debido a un paso brusco de la insolación.

En estado estacionario, la superficie de conmutación cruza el MPP. Un cambio en la radiación provoca un desplazamiento del MPP, de igual manera se verá reflejado en el voltaje y la corriente entregados por el panel, de tal manera que la superficie se autoajustara al nuevo MPP. Por lo tanto, una elección natural de la pendiente se hace mediante la aproximación de la línea para todos los MPP correspondientes a diversos niveles de radiación y temperatura.



**Fig 2.7 Superficie de control estimada dependiente de la corriente, voltaje y temperatura de panel solar**

La Tabla 1, muestra los diferentes valores de potencia, tensión y corriente con el MPP bajo diferentes condiciones de radiación, pero con temperatura constante. (Ver Fig. 2.7)

Tabla 1. Valores de Potencia, voltaje y corriente para diferentes MPP en el arreglo PV

Potencia	Voltaje	Corriente
124.46	34.69	3.58
99.57	34.51	2.88
74.57	34.14	2.18
49.68	33.36	1.48

Utilizando los valores de la tabla y técnicas de análisis numérico como lo es mínimos cuadrados, las cuales dado un conjunto de pares ordenados, se puede encontrar una superficie, dentro del conjunto, que mejor se aproxime a los datos de acuerdo al criterio de mínimo error cuadrático. De lo siguiente se obtiene, que la recta que mejor se ajusta a los puntos de máxima potencia dados por el panel en la Tabla 1 son:

$$i - 2.54v + 84.53 = 0 \quad (16)$$

Sin embargo, esta superficie no representa todos los puntos de la curva característica i-v, por qué debe compararse varias superficies incluyendo la variación de temperatura. De tal manera que al hacer dicha comparación entre diferentes rectas en donde cada recta se determinó variando la temperatura, se puede estimar la superficie de control que abarcaría dichos cambios en la temperatura.

$$i - 2.54v + 84.53 - 0.455(T - 20) = 0 \quad (17)$$

$$i - 2.54v + 93.63 - 0.455T = 0$$

De otra manera para verificar que la superficie propuesta este bien definida se realiza un cálculo de mínimos cuadrados en donde el error cuadrático medio o residuo de la superficie fue  $r = 0.9554$ . De tal manera que, se obtiene una superficie de control (17) que se puede ajustar a las diferentes condiciones en el PVG, en donde el error cuadrático medio es muy cercano a 1, motivo por el cual, la precisión de la superficie de control hacia los puntos de máxima potencia es muy alta (ver Fig. 2.8 y 2.9).

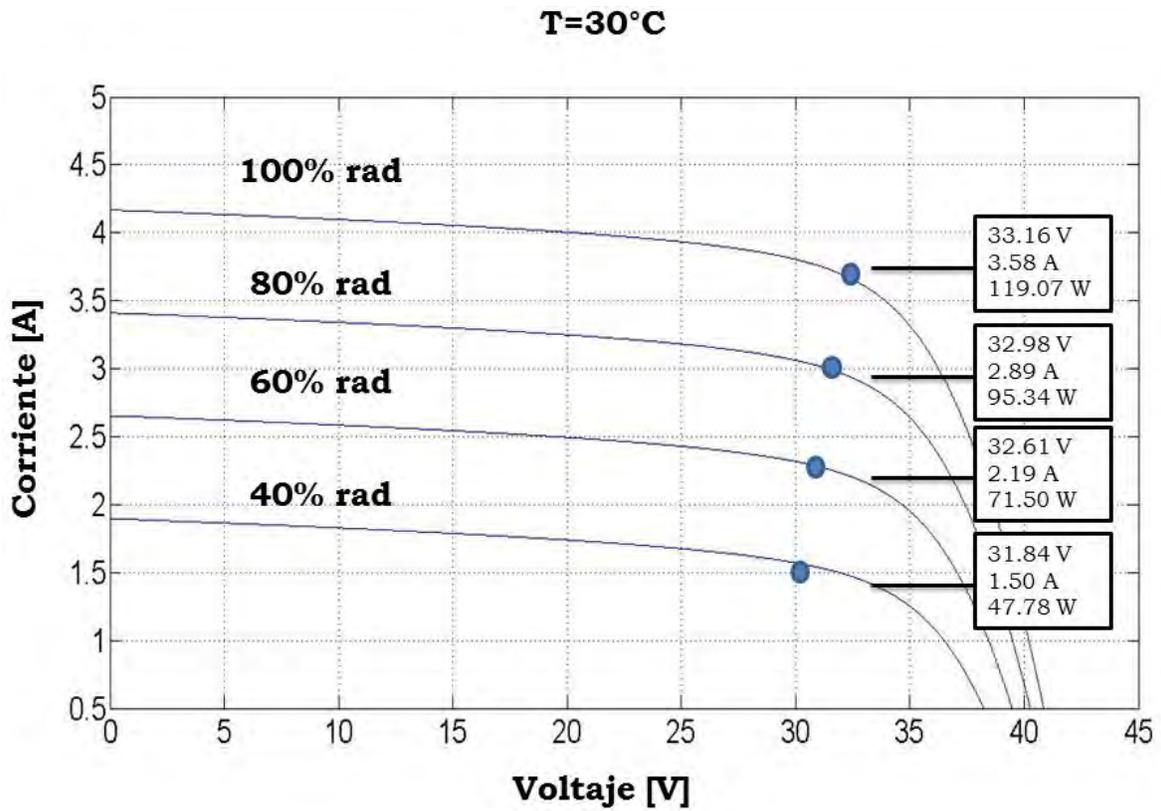


Fig 2.8 Puntos de máxima potencia para una temperatura constante de 30°C

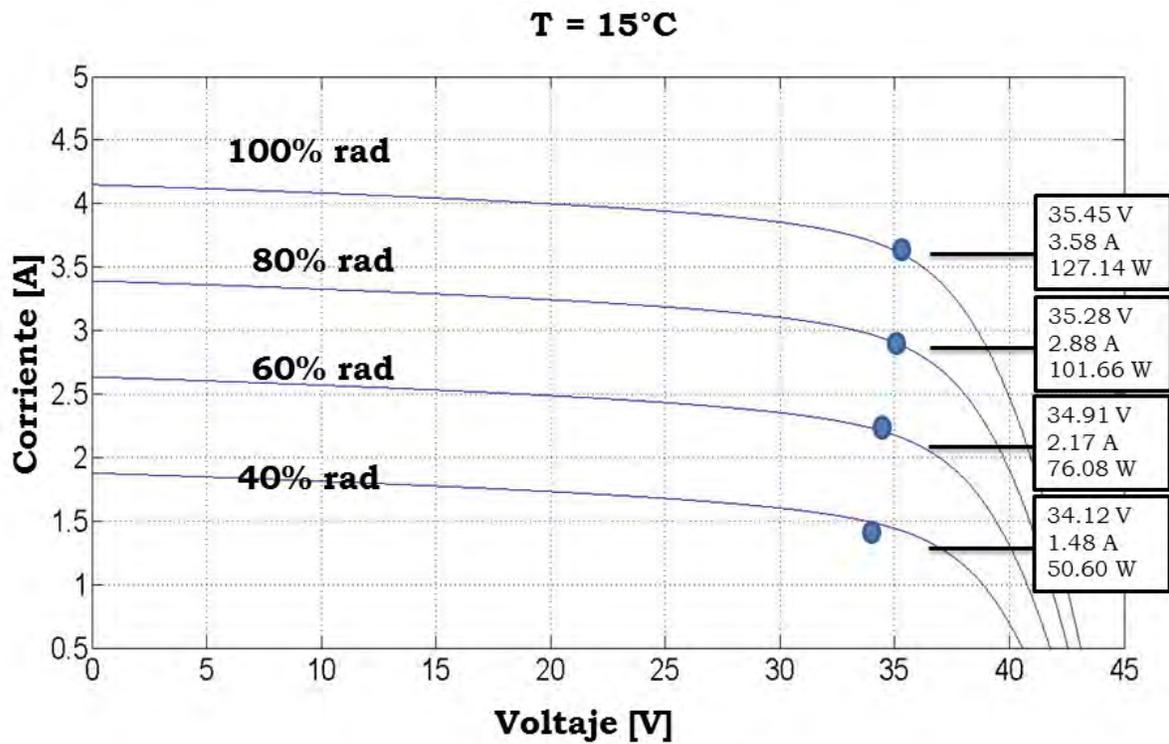


Fig 2.9 Puntos de máxima potencia para una temperatura constante de 15°C

**Observación 3:**

Para que la superficie de control sea adecuada, las variables de voltaje, corriente y temperatura deben cumplir lo siguiente.

$$0 \leq v \leq V_{oc}$$

$$0 \leq i \leq i_{sc}$$

$$-10 \leq T \leq 70^\circ C$$

**2.6 Análisis del control por modos deslizantes**

Para asegurar el correcto funcionamiento de la superficie propuesta, se debe verificar la existencia del modo deslizante satisfaciendo la condición [27-28]. En particular en lo siguiente se probará que la superficie de conmutación propuesta, es de hecho una superficie de deslizamiento, por lo que debe cumplir:

$$\sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (18)$$

Usando la superficie propuesta (17) y considerando que la temperatura cambia de forma muy lenta (por lo tanto se puede considerar despreciable su derivada) la derivada de la superficie de control es:

$$\dot{\sigma} = \frac{d_i}{dt} - 2.54 \frac{d_v}{dt} \quad (19)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (14) en (19) obtenemos:

$$\dot{\sigma} = \frac{V_{CA}}{L} + \frac{V_{CB}}{L} - \frac{V_o(1-u)}{L} - 2.54 \left[ \frac{dv_{CA}}{dt} + \frac{dv_{CB}}{dt} \right] \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & \frac{V_{CA}}{L} + \frac{V_{CB}}{L} - \frac{V_o(1-u)}{L} \\ & - 2.54 \left[ \frac{\lambda I_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda I_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_A} + \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_B} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

Por lo tanto, las condiciones que hay que cumplir para que haya existencia del modo deslizante son las siguientes:

a) Si  $\sigma > 0 \rightarrow \dot{\sigma} < 0 \therefore u = 0$

$$\dot{\sigma} = \frac{V_{CA}}{L} + \frac{V_{CB}}{L} - \frac{V_o}{L} - 2.54 \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_B} \right] < 0 \quad (22)$$

b) Si  $\sigma < 0 \rightarrow \dot{\sigma} > 0 \therefore u = 1$

$$\dot{\sigma} = \frac{V_{CA}}{L} + \frac{V_{CB}}{L} - 2.54 \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{qV_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{i_L}{C_B} \right] > 0 \quad (23)$$

#### Observación 4:

La mayoría de los valores en las desigualdades (22) y (23) son constantes, dadas por los componentes del circuito elevador utilizado.

## 2.7 Modelo promediado del convertidor

Para derivar el modelo promediado del convertidor, se parte del modelo conmutado (11). En particular, se puede reescribir (11) como:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (24)$$

donde:  $x = [i_L \quad V_o \quad V_{PA} \quad V_{PB}]^T$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{V_{PA}}{L} + \frac{V_{PB}}{L} - \frac{V_o}{L} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \\ \frac{i_{PA}}{c_A} - \frac{i_L}{c_A} \\ \frac{i_{PB}}{c_B} - \frac{i_L}{c_B} \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} & -\frac{i_L}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

#### Observación 5:

Anteriormente se mostró como S es una superficie deslizante, por lo que los modos  $u=1$  y  $u=0$  (Modos 1 y 2 de las Figuras 2.4 y 2.5) están conmutando a alta frecuencia. Este hecho se usará para derivar el modelo promediado en tiempo aprovechando la alternancia de los modos cada cierto tiempo T.

**Proposición 1: [16]**

El Modelo Conmutado:

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

con:

$$u = \begin{cases} 1 & \text{for } t_k < t \leq t_k + \mu(x(t_k))T \\ 0 & \text{for } t_k + \mu(x(t_k))T \leq t < t_k + T = t_k + 1 \end{cases}$$

Tiene Modelo Promediado:

$$\dot{z} = f(z) + g(z)\mu$$

Usando esta proposición así como la Observación 5 se obtiene el modelo promediado:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{v}_L}{dt} &= \frac{\bar{V}_{PA}}{L} + \frac{\bar{V}_{PB}}{L} - \frac{\bar{V}_o(1 - \bar{u})}{L} \\ \frac{d\bar{V}_o}{dt} &= \frac{\bar{v}_L(1 - \bar{u})}{C} - \frac{\bar{V}_o}{RC} \\ \frac{d\bar{V}_{CA}}{dt} &= \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\bar{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{v}_L}{c_A} \\ \frac{d\bar{V}_{CB}}{dt} &= \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\bar{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{v}_L}{c_B} \end{aligned} \quad (25)$$

donde: las variables son un promedio en el intervalo  $[(k-1)T, kT]$   
 $k=0,1,2,\dots$

La prueba de la Proposición 1 se omite aquí por brevedad pero se incluye en el Anexo 4.

## 2.8 Análisis de estabilidad (análisis del sistema promedio)

Para verificar la estabilidad del sistema promediado se utiliza una herramienta conocida como el control equivalente [25], esta herramienta permite obtener el sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del sistema cuando está

en la superficie de deslizamiento, es por ello que se obtiene el control equivalente a partir de esta consideración, es decir que la derivada de la superficie de control se asume igual a cero, la cual es:

$$\dot{\sigma} = \frac{\overline{V_{CA}}}{L} + \frac{\overline{V_{CB}}}{L} - \frac{\overline{V_o}(1 - \bar{u})}{L} - 2.54 \left[ \frac{d\overline{v_{CA}}}{dt} + \frac{d\overline{v_{CB}}}{dt} \right] = 0 \quad (20)$$

Igualando a cero y despejando u, el cual es el control equivalente se obtiene:

$$u_{eq} = \frac{2.54L}{\overline{V_o}} \left[ \frac{d\overline{v_{CA}}}{dt} + \frac{d\overline{v_{CB}}}{dt} \right] - \frac{\overline{V_{CA}}}{\overline{V_o}} - \frac{\overline{V_{CB}}}{\overline{V_o}} + 1 \quad (26)$$

La  $u_{eq}$  se sustituye en el Sistema (25), esto de acuerdo con [25], y entonces obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}_L}{dt} &= \frac{\overline{V_{CA}}}{L} + \frac{\overline{V_{CB}}}{L} - \frac{\overline{V_o}}{L} + \frac{\overline{V_o}}{L} \left\{ \frac{2.54L}{\overline{V_o}} \left[ \frac{d\overline{v_{CA}}}{dt} + \frac{d\overline{v_{CB}}}{dt} \right] - \frac{\overline{V_{CA}}}{\overline{V_o}} - \frac{\overline{V_{CB}}}{\overline{V_o}} + 1 \right\} \\ \frac{d\overline{V_o}}{dt} &= \frac{\bar{i}_L}{C} - \frac{\bar{i}_L}{C} \left\{ \frac{2.54L}{\overline{V_o}} \left[ \frac{d\overline{v_{CA}}}{dt} + \frac{d\overline{v_{CB}}}{dt} \right] - \frac{\overline{V_{CA}}}{\overline{V_o}} - \frac{\overline{V_{CB}}}{\overline{V_o}} + 1 \right\} - \frac{\overline{V_o}}{RC} \\ \frac{d\overline{V_{CA}}}{dt} &= \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} \\ \frac{d\overline{V_{CB}}}{dt} &= \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CB}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_B} \end{aligned} \quad (27)$$

Sustituyendo todos los valores de (27), tenemos

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}_L}{dt} &= \frac{\overline{V_{CA}}}{L} + \frac{\overline{V_{CB}}}{L} - \frac{\overline{V_o}}{L} + 2.54 \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CB}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_B} \right] \\ &\quad - \frac{\overline{V_{CA}}}{L} - \frac{\overline{V_{CB}}}{L} + \frac{\overline{V_o}}{L} \\ \frac{d\overline{V_o}}{dt} &= \frac{\bar{i}_L}{C} - \frac{2.54L\bar{i}_L}{\overline{V_o}C} \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CB}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_B} \right] - \frac{\overline{V_{CA}}\bar{i}_L}{\overline{V_o}C} \\ &\quad - \frac{\overline{V_{CB}}\bar{i}_L}{\overline{V_o}C} + \frac{\bar{i}_L}{C} - \frac{\overline{V_o}}{RC} \\ \frac{d\overline{V_{CA}}}{dt} &= \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{d\overline{V}_{CB}}{dt} = \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B}$$

**Observación 6:**

Las términos  $I_{sc}$  y  $I_s$  son valores constantes dados por la corriente de corto circuito y la corriente del saturación del diodo, motivo por el cual no son promediados.

Reduciendo términos de (28) se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{i}_L}{dt} &= 2.54 \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} \right] \\ \frac{d\overline{V}_o}{dt} &= -\frac{2.54L\overline{i}_L}{\overline{V}_oC} \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} \right] \\ &\quad + \frac{\overline{i}_L\overline{V}_{CA}}{\overline{V}_oC} + \frac{\overline{i}_L\overline{V}_{CB}}{\overline{V}_oC} - \frac{\overline{V}_o}{RC} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{V}_{CA}}{dt} &= \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} \\ \frac{d\overline{V}_{CB}}{dt} &= \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} \end{aligned}$$

Calculando los puntos de equilibrio de la Ecuación (29), se tiene:

$$\begin{aligned} 2.54 \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} \right] &= 0 \\ -\frac{2.54L\overline{i}_L}{\overline{V}_oC} \left[ \frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} \right] &+ \frac{\overline{i}_L\overline{V}_{CA}}{\overline{V}_oC} \\ + \frac{\overline{i}_L\overline{V}_{CB}}{\overline{V}_oC} - \frac{\overline{V}_o}{RC} &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{\lambda_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CA}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_A} = 0$$

$$\frac{\lambda_{sc}}{C_B} - \frac{\lambda_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q\overline{V}_{CB}}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\overline{i}_L}{C_B} = 0$$

Despejando el valor de  $V_{CA}$  de la ecuación anterior tenemos:

$$\begin{aligned}
 \lambda I_{sc} - \bar{i}_L &= \lambda I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q \overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \right\} \\
 \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} &= \exp \left[ \frac{q \overline{V_{CA}}}{AKT} \right] - 1 \\
 \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 &= \exp \left[ \frac{q \overline{V_{CA}}}{AKT} \right] \\
 \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right] &= \frac{q \overline{V_{CA}}}{AKT} \\
 \overline{V_{CA}} &= \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right] \tag{31}
 \end{aligned}$$

De la misma manera de la Ecuación (30) obtenemos el valor de  $V_{CB}$

$$\overline{V_{CB}} = \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right] \tag{32}$$

Sustituyendo las Ecuaciones (31) y (32) en la Ecuación (30) tenemos

$$\begin{aligned}
 2.54 \left[ \frac{\lambda I_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda I_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right]}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} \right. \\
 \left. - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right]}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_B} \right] = 0 \tag{33}
 \end{aligned}$$

De manera que al reducir términos la ecuación se vuelve 0, motivo por el cual no se encuentra ningún valor para  $i_L$ , procediendo a sustituir los valores de  $V_{CA}$  y  $V_{CB}$  de las Ecuaciones (31) y (32) en la Ecuación (30) para despejar  $V_o$  se tiene

$$\begin{aligned}
 -\frac{2.54L\bar{i}_L}{\overline{V}_o C} \left[ \frac{\lambda I_{sc}}{C_A} - \frac{\lambda I_s}{C_A} \left\{ \exp \left[ \frac{q \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right]}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_A} + \frac{\lambda I_{sc}}{C_B} \right. \\
 \left. - \frac{\lambda I_s}{C_B} \left\{ \exp \left[ \frac{q \frac{AKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \bar{i}_L}{\lambda I_s} + 1 \right]}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{\bar{i}_L}{C_B} \right] + \frac{\bar{i}_L \overline{V_{CA}}}{\overline{V}_o C} + \frac{\bar{i}_L \overline{V_{CB}}}{\overline{V}_o C} - \frac{\overline{V}_o}{RC} = 0 \tag{34}
 \end{aligned}$$

Reduciendo términos semejantes la expresión quedaría de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\frac{\overline{i_L V_{CA}}}{\overline{V_o C}} + \frac{\overline{i_L V_{CB}}}{\overline{V_o C}} - \frac{\overline{V_o}}{RC} &= 0 \\ \frac{\overline{i_L V_{CA}}}{\overline{V_o}} + \frac{\overline{i_L V_{CB}}}{\overline{V_o}} &= \frac{\overline{V_o}}{R} \\ \overline{i_L V_{CA}} + \overline{i_L V_{CB}} &= \frac{\overline{V_o}^2}{R} \\ (\overline{V_{CA}} + \overline{V_{CB}})\overline{i_L} &= \frac{\overline{V_o}^2}{R}\end{aligned}\tag{35}$$

Como  $\overline{V_{CA}}$  y  $\overline{V_{CB}}$  son iguales, tenemos que:

$$(2\overline{V_{CA}})\overline{i_L} = \frac{\overline{V_o}^2}{R}$$

Sustituyendo el valor de  $V_{CA}$  de la Ecuación (31) se obtiene:

$$\frac{2RAKT}{q} \ln \left[ \frac{\lambda I_{sc} - \overline{i_L}}{\lambda I_s} + 1 \right] = \overline{V_o}^{-2}\tag{36}$$

De tal manera que se puede analizar que todos los estados dependen de la corriente demandada al panel solar, este es un punto importante de observar por lo tanto lo analizaremos más adelante.

#### **Observación 7:**

Como se vio anteriormente, los voltajes del sistema dependen de la corriente en el equilibrio. Así también la ecuación de la corriente deja su valor indeterminado pudiendo tomar cualquier valor en el dominio. Lo anterior implica que ésta puede estar variando de acuerdo a la demanda dentro del dominio de operación.

La Ecuación (29) nos representa un sistema de ecuaciones diferenciales que describe el comportamiento del sistema en la superficie deslizante, por lo que si este sistema de ecuaciones es estable, el sistema controlado también lo es. Para esto el sistema se linealiza mediante el uso de derivadas parciales:

$$\begin{aligned}
\hat{i}_l &= -\frac{2.54\lambda q I_s}{C_A AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CA}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CA} - 2.54 \frac{\hat{i}_L}{C_A} - \frac{2.54\lambda I_s q}{C_B AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CB}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CB} - 2.54 \frac{\hat{i}_L}{C_B} \\
\dot{\widehat{V}}_o &= -\frac{2.54 I_{sc} L \lambda}{C_A \bar{V}_o C} \hat{i}_L + \frac{2.54 I_s L \lambda}{C_A \bar{V}_o C} \left\{ \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CA}}{AKT}\right] - 1 \right\} \hat{i}_L + \frac{5.08 \bar{i}_L L}{C_A \bar{V}_o C} \hat{i}_L \\
&\quad + \frac{2.54 \bar{i}_L I_s L \lambda q}{C_A \bar{V}_o C AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CA}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CA} \\
&\quad - \frac{2.54 I_{sc} L \lambda}{C_B \bar{V}_o C} \hat{i}_L + \frac{2.54 I_s L \lambda}{C_B \bar{V}_o C} \left\{ \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CB}}{AKT}\right] - 1 \right\} \hat{i}_L + \frac{5.08 \bar{i}_L L}{C_B \bar{V}_o C} \hat{i}_L + \frac{2.54 \bar{i}_L I_s L \lambda q}{C_B \bar{V}_o C AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CB}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CB} \\
&\quad + \frac{\bar{V}_{CA}}{\bar{V}_o C} \hat{i}_L + \frac{\bar{i}_L}{\bar{V}_o C} \widehat{V}_{CA} + \frac{\bar{V}_{CB}}{\bar{V}_o C} \hat{i}_L + \frac{\bar{i}_L}{\bar{V}_o C} \widehat{V}_{CB} - \frac{\widehat{V}_o}{RC} \\
\dot{\widehat{V}}_{CA} &= -\frac{\lambda I_s q}{C_A AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CA}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CA} - \frac{\hat{i}_L}{C_A} \\
\dot{\widehat{V}}_{CB} &= -\frac{\lambda I_s q}{C_B AKT} \exp\left[\frac{q\bar{V}_{CB}}{AKT}\right] \widehat{V}_{CB} - \frac{\hat{i}_L}{C_B}
\end{aligned} \tag{38}$$

Tabla 2 Parámetros de la planta y controlador

<b><math>A = 90</math></b>	<b><math>I_{sc} = 4.1A</math></b>	<b><math>R = 30\Omega</math></b>
<b><math>K = 1.38 * 10^{-23}</math></b>	<b><math>q = 1.6 * 10^{-19}</math></b>	<b><math>\lambda = 1</math></b>
<b><math>T = 12^\circ C = 288.15^\circ K</math></b>	<b><math>V_{CA} = V_{CB} = 18.19V</math></b>	<b><math>L = 200\mu F</math></b>
<b><math>C = 200\mu H</math></b>	<b><math>C_A = C_B = 220\mu H</math></b>	<b><math>V_{OC} = 21.8</math></b>
<b><math>V_o = 60V</math></b>	<b><math>C_A = C_B = 220\mu H</math></b>	<b><math>V_o = 60V</math></b>
<b><math>I_s = 2.39 * 10^{-4}</math></b>	<b><math>i_{il} = 4</math></b>	

Sustituyendo los valores de la Tabla 2 en el Sistema Linealizado (38) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_l \\ \dot{\widehat{V}}_o \\ \dot{\widehat{V}}_{CA} \\ \dot{\widehat{V}}_{CB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -23090.9 & 0 & -4197.186 & -4197.186 \\ 4845.421 & -166.66 & 613.1399 & 613.1399 \\ -4545.45 & 0 & -1652.432 & 0 \\ -4545.45 & 0 & 0 & -1652.432 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_l \\ \widehat{V}_o \\ \widehat{V}_{CA} \\ \widehat{V}_{CB} \end{bmatrix} \tag{39}$$

Los Valores Propios de este sistema de ecuaciones son:

$$\lambda_1 = -167, \quad \lambda_2 = -24742, \quad \lambda_3 = 0, \quad \lambda_4 = -1652$$

Por lo tanto el sistema tiene 3 variedades atractivas (estables) y una con un valor propio nulo. Considerando la observación generada al analizar los puntos de equilibrio, el valor propio (eigenvalor) que vale cero al realizar la linealización, corresponde a la corriente, ya que para poder controlar el sistema, principalmente se debe controlar la demanda de corriente hacia el panel.

También es muy importante considerar, que el modos deslizantes genera una reducción en el orden del sistema, ya que fuerza a este, a mantenerse sobre la superficie de control, de tal manera el sistema no puede responder libremente, y particularmente en los casos donde se utiliza modos deslizantes, al realizar el análisis de los eigenvalores, algunos de ellos tienen valor 0.

# Capítulo 3

---

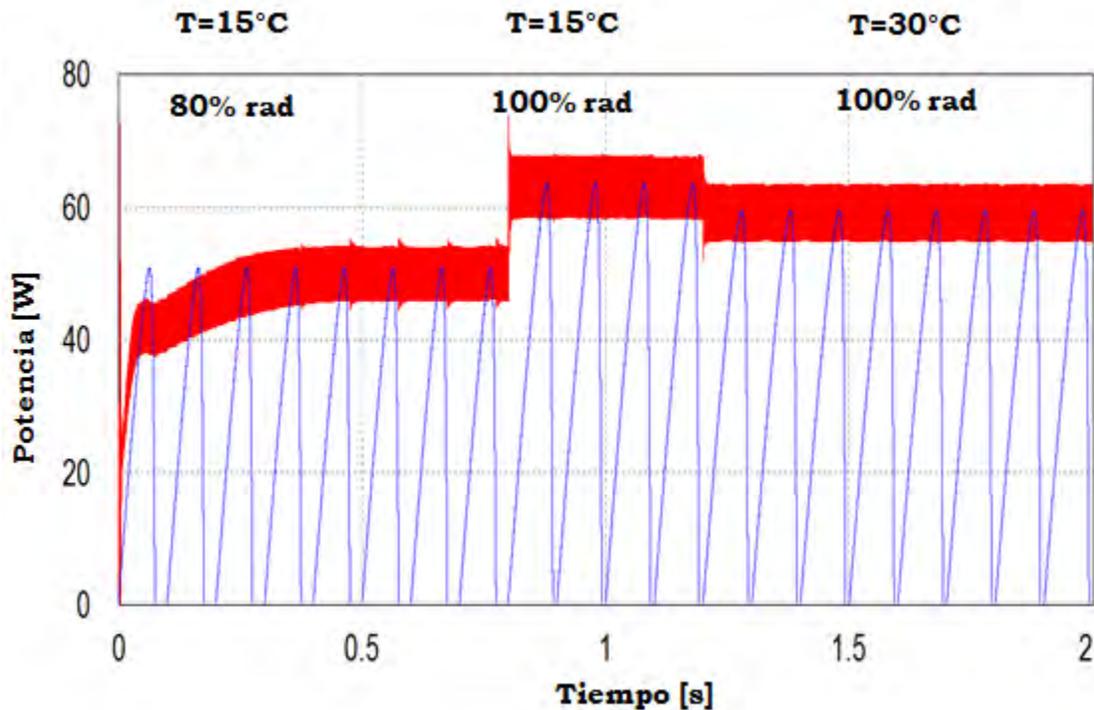
## **Simulaciones y resultados experimentales**

En este capítulo se presentan las simulaciones y resultados experimentales, así como la presentación del proyecto final de control, definiendo los componentes que se utilizaron para la etapa de potencia y de control. También se presentan las gráficas tomadas por osciloscopio del proyecto operando en un emulador de panel solar para la verificación de las condiciones en las cuales el sistema funciona.

### **3.1 Simulaciones sin variaciones de sombreado en los paneles**

Este trabajo presenta un nuevo control del MPP basada en modos deslizantes aplicando una superficie de conmutación. El sistema resulta en un rápido y eficiente seguimiento para los cambios en la radiación y temperatura a los cuales está sometido un panel solar.

Para probar el desempeño del sistema se hicieron varias simulaciones; la respuesta de seguimiento a un cambio de la radiación es bastante buena, como se puede ver en la Figura 3.1. En esta figura se aprecia la respuesta del control a diferentes cambios en radiación solar y temperatura a la cual está sometido el PV.



**Fig 3.1 Simulación de la respuesta del sistema bajo cambios de radiación y temperatura**

**Observación 8:**

En la Figura 3.1 se puede observar la respuesta del sistema con el controlador propuesto (Línea Roja) en comparativa con el mismo sistema sin retroalimentación (Línea Azul), en el cual la demanda de carga varía como un diente de sierra con una frecuencia de 10 Hz. Esta demanda pretende que el punto de máxima potencia se repita constantemente y se pueda apreciar el seguimiento del punto de máxima potencia que realiza el sistema con el controlador. De la misma manera se implementará la comparativa en las figuras siguientes.

Se puede observar que la respuesta del sistema es rápida, debido a que la superficie de control lleva al sistema al punto más cercano al MPP. En otras palabras; la convergencia rápida se alcanza por una selección óptima de la superficie de conmutación. Después de un cambio de la radiación, los valores medidos por el control cambian y esto permite a la superficie ajustarse a su nueva posición.

### 3.2 SIMULACIONES CON VARIACIONES DE SOMBRADO EN LOS PANELES

Como ya se mencionó anteriormente, al estar un arreglo de paneles solares, bajo diferentes condiciones de sombreado [20], se presentan variaciones en los puntos de máxima potencia, generando un MPP globales y locales. Para este tipo de casos la superficie de deslizamiento se posicionara sobre el punto global, esto debido a que el error cuadrático medio o residuo es mucho menor a la distancia entre los puntos globales y locales, motivo por el cual la superficie llevara al sistema siempre el punto global.

En la Figura 3.2 se pueden observar dos casos de variaciones en la radiación solar, los cuales se consideran como los más difíciles de resolver para los métodos convencionales debido a la gran variación entre las distancias de los MPP global y local.

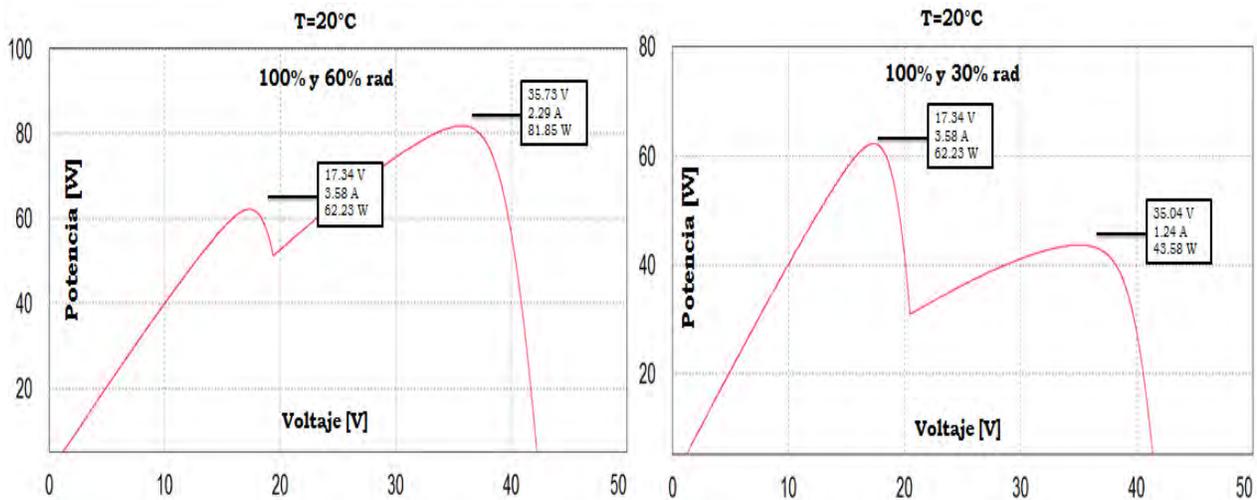
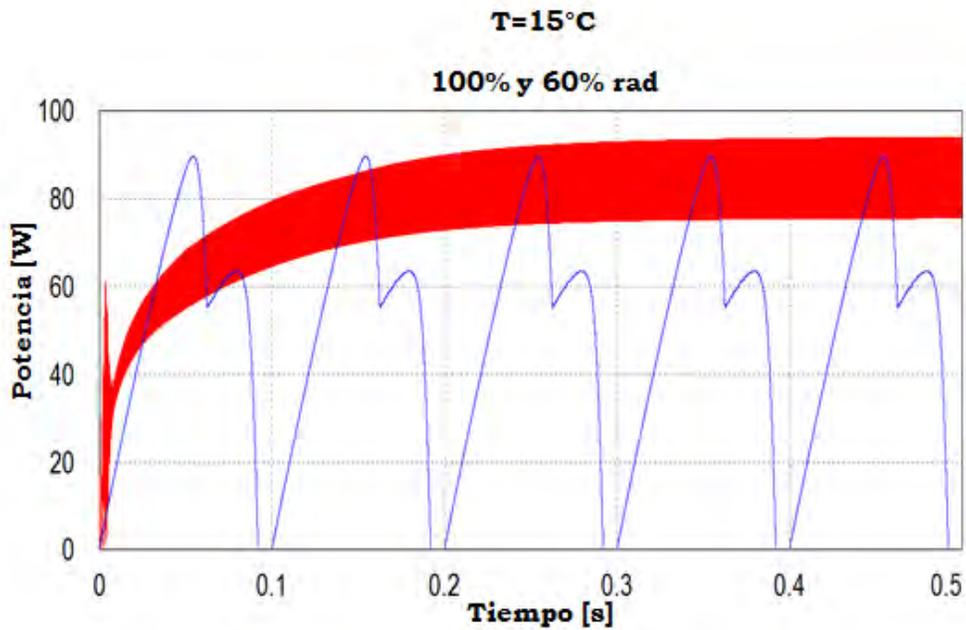


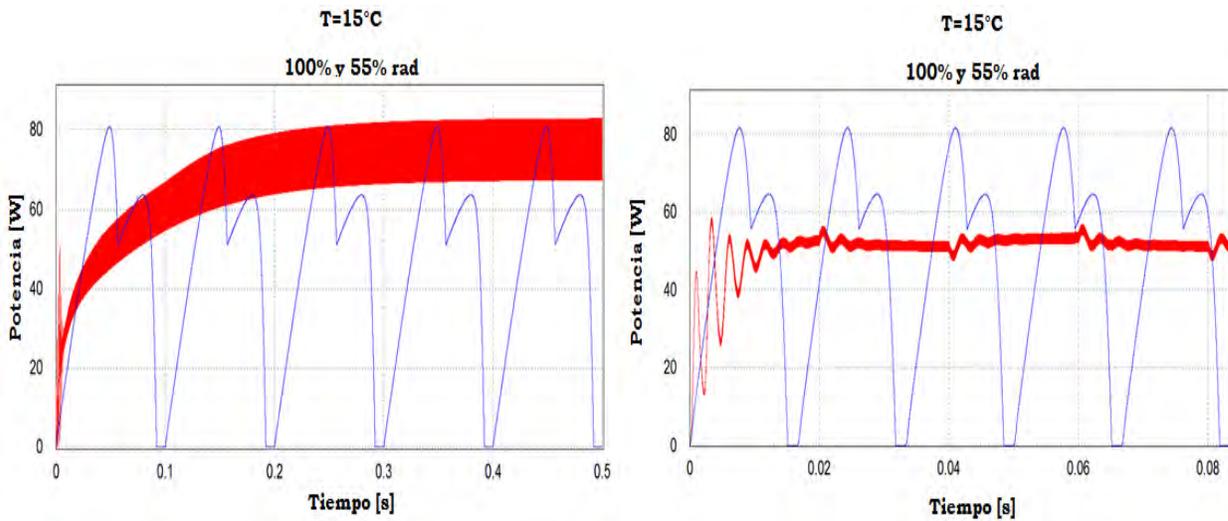
Fig 3.2 Simulación del sistema bajo condiciones de sombreado parcial

Bajo este tipo de condiciones de sombreado, la respuesta del sistema se puede ver en la Figura 3.3 en donde se puede observar que la superficie de control asegura el posicionamiento sobre el MPP global en una de las condiciones más estrictas en donde los sistemas convencionales no pueden operar.



**Fig 3.3 Simulación de la respuesta del sistema bajo condiciones de sombreado parcial**

Realizando una comparación, entre el sistema propuesta y con sistema convencional de MPPT con algoritmo perturbar y observar, en donde se tienen 2 paneles conectados y en una de ellos se encuentra una interferencia en su área (ver Figura 3.4).



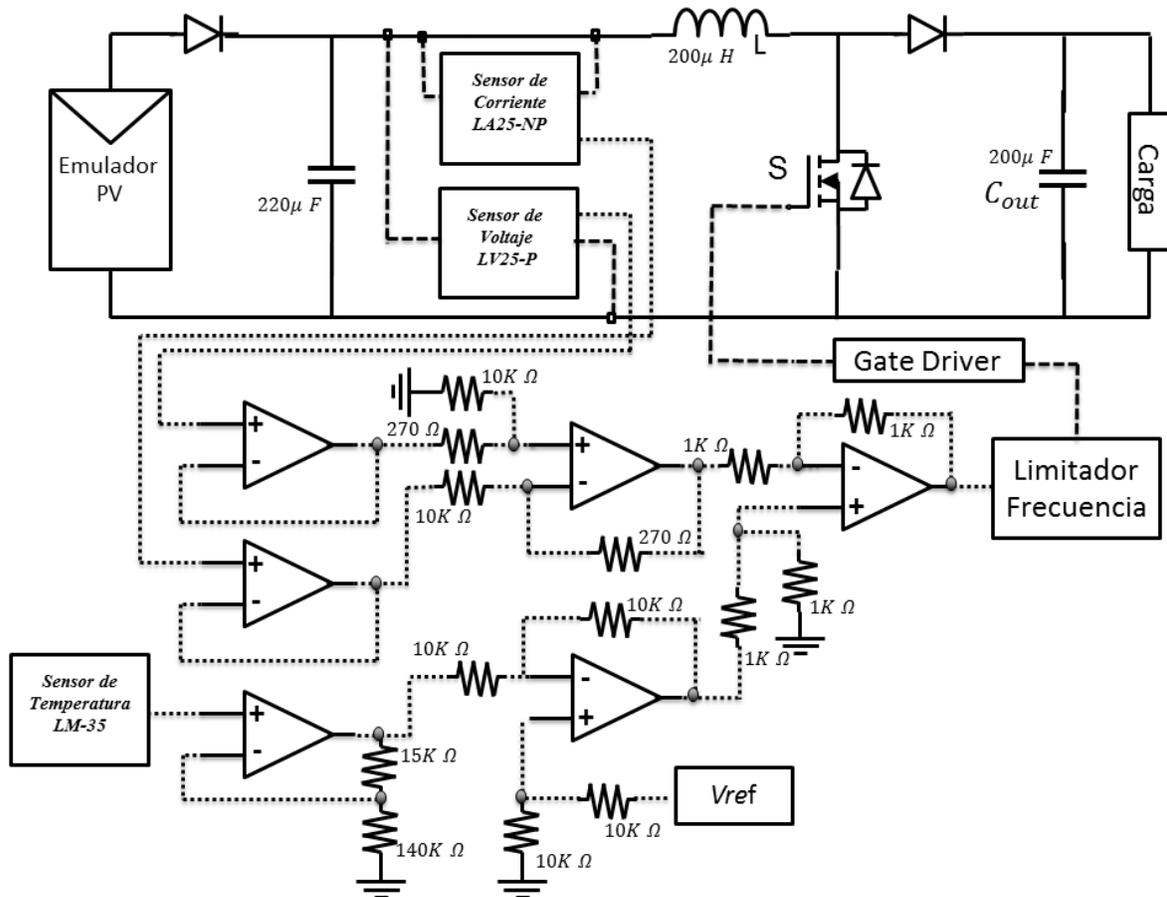
**Fig 3.4 Simulación comparativa entre sistema propuesta con modos deslizantes y sistema tradicional MPPT con algoritmo perturbar y observar en donde se varia la radiación en un panel**

En la Figura 3.4 se puede observar como el sistema propuesto alcanza el punto de máxima potencia sin problema alguno, mientras el sistema convencional de MPPT con algoritmo perturbar y observar no logra el posicionamiento ni en los puntos locales.

### **3.3 Resultados experimentales**

La Figura 3.5 muestra el sistema implementado, incluye un emulador de PV (Agilent E4360), un convertidor elevador, circuito impulsor (gate-driver), sensores y la implementación del controlador de modos deslizantes realizada con amplificadores operacionales.

Cabe señalar que las características PV emuladas son similares a los exhibidos por PVG reales; por lo tanto, este método de emulación es muy eficaz para la verificación del MPPT y el rendimiento del controlador de modos deslizantes. El convertidor elevador consiste de un inductor de  $200 \mu\text{H}$ , un capacitor de entrada de  $220 \text{ mF}$ , y un capacitor de salida de  $200 \text{ mF}$ . La carga en la resistencia es de  $30 \Omega$ . Se utiliza un MOSFET complementario de tipo "IRF3415" el cual es impulsado por un circuito "floating gate", basado en el "HCPL -3020", y se utiliza la generación de pulsos PWM mediante el integrado "TL494". El voltaje de entrada y la corriente detectados se alimenta al controlador de modos deslizantes mediante los sensores correspondientes de voltaje y corriente (LA25 y LV25). Los circuitos utilizados para formar la superficie de modo deslizante se basa en amplificadores operacionales (TL084CN). El MPPT Perturbar y Observar (Anexo A.3) que se utilizó para la comparación se implementa en un PIC16F887 (microchip). Un arreglo RC impulsa la salida externa de referencia ( $V_{\text{ref}}$ ) hacia el control de modos deslizantes.

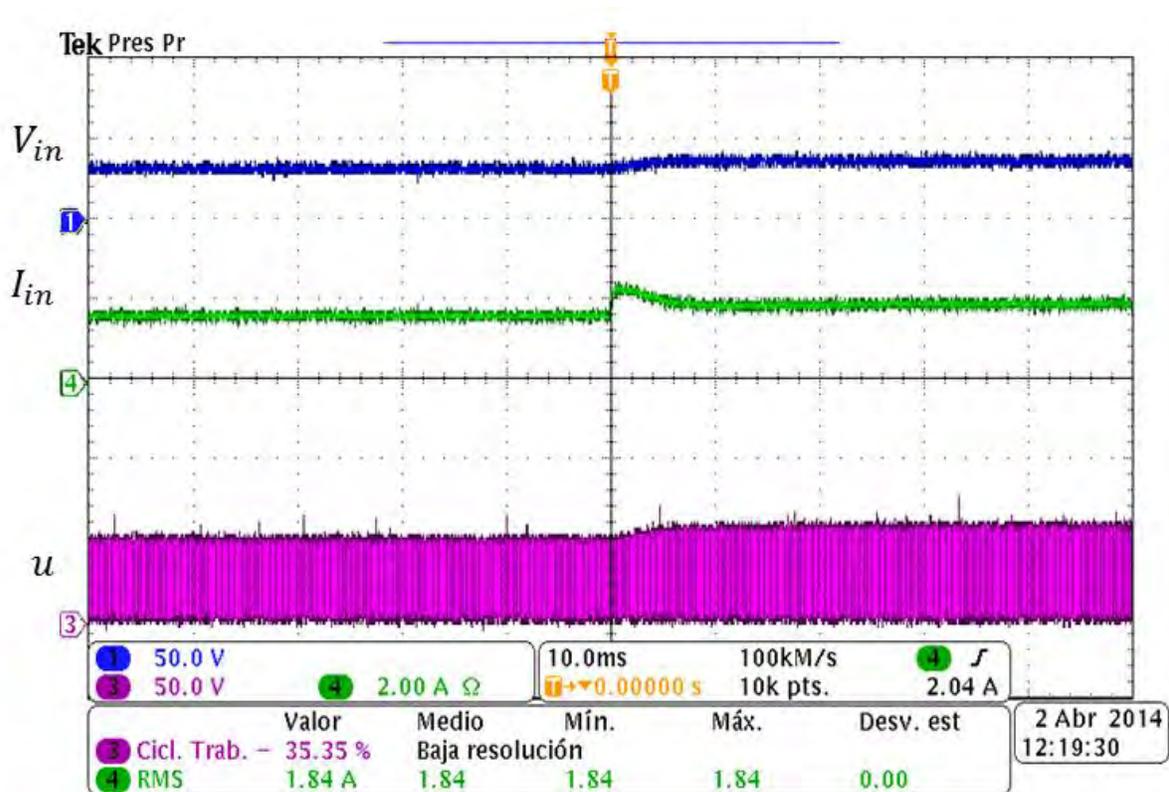


**Fig 3.5 Circuito experimental**

La superficie óptima de conmutación (16) se selecciona mediante la aplicación de los lugares geométricos del MPP, véase la Fig. 2.8. La pendiente resultante es  $a = 0.0256$ ,  $b = 0,0650$ ,  $c = 0,01164$ . El valor de  $ref$  se establece, de acuerdo con (16) el cual es  $ref = 2.39$ . La implementación real es mostrar en la Figura 3.5, teniendo en cuenta la ganancia de los sensores.

El control de modos deslizantes, con la superficie óptima de conmutación, está conectado a 2 PV con la misma radiación y condición de temperatura. Se utilizó el emulador de PV para cambiar la condición y representar la variación presentada en un PV bajo condiciones atmosféricas específicas, midiendo la respuesta al escalón de control.

En la Figura 3.6 se puede observar como la corriente y voltaje de la fuente del emulador de PV ( $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ ) se conmutan instantáneamente de 1,90 A a 2,70 A y 40 V a 40,88 V esto para emular un aumento de insolación del 40% al 60% y poder medir la velocidad y la precisión con la que el sistema de control actúa ante los cambios de radiación y temperatura.



**Fig 3.6 Voltaje de entrada, corriente de entrada y ciclo de trabajo bajo cambios en la radiación del panel del 40% al 60% y temperatura constante**

En la Figura 3.7 la conmutación se realiza de 3.45 A a 1,90 A y 41.57 V a 40 V para emular un decremento del 80% al 40% en la insolación, esto con el fin de evaluar la respuesta a cambios muy bruscos en las condiciones de radiación, esto con el fin de aproximarse a las condiciones de sombreado parcial a las cuales están sometidos los paneles en un ambiente real.

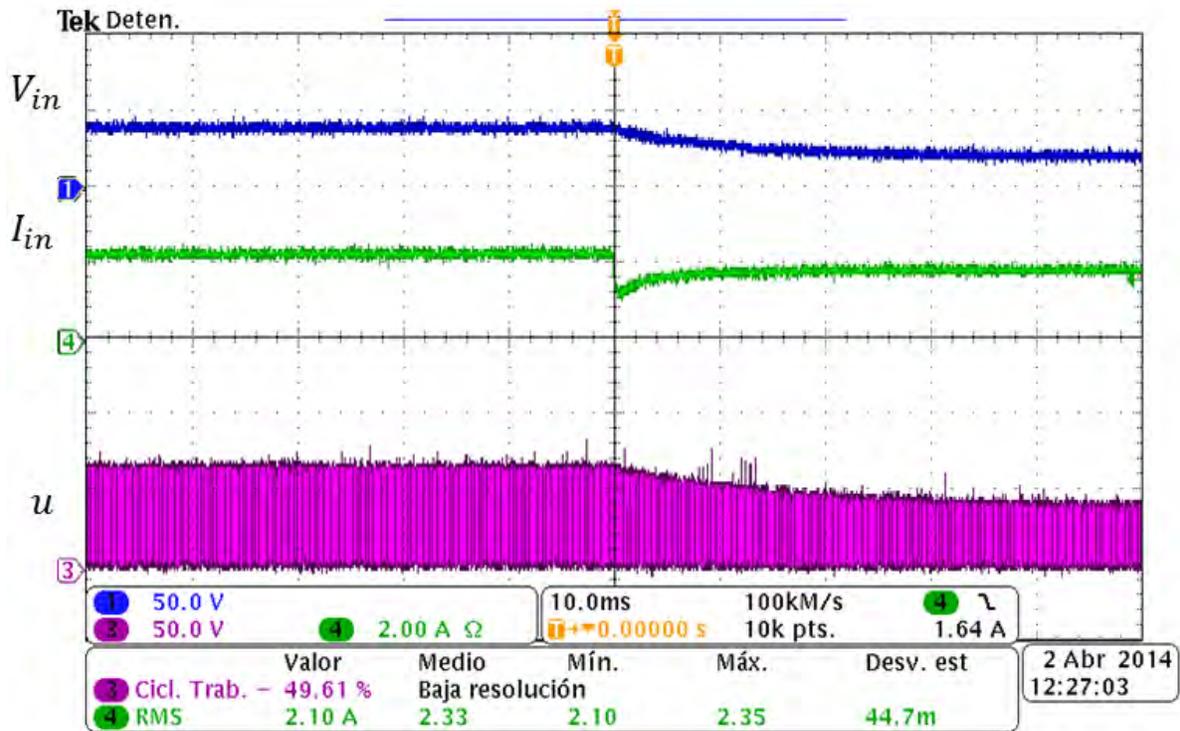


Fig 3.7 Voltaje de entrada, corriente de entrada y ciclo de trabajo bajo cambios en la radiación del panel del 80% al 40% y temperatura constante

Se puede observar que la respuesta del sistema además de ser rápida, conlleva siempre al punto de máxima potencia correctamente, a pesar de variaciones en la radiación muy altas.

# Capítulo 4

---

## Conclusiones

La generación de energía eléctrica utilizando paneles solares es una alternativa muy interesante en la actualidad, en especial en nuestro país, por la alta gama de radiación solar que se recibe día a día, lamentablemente presenta un gran inconveniente, una baja eficiencia de la conversión eléctrica, esto debido al mal posicionamiento en el punto de máxima potencia que tiene el panel PV, el cual varía debido a algunos factores externo como los cambios en la radiación solar recibidos por el panel y a la temperatura a la cual está sometido. Para solucionar este problema se utilizan sistemas conocidos como MPPT los cuales mantienen la salida de la potencia en su valor máximo, garantizando un mejor funcionamiento de los paneles solares. Pero esta alternativa de solución presenta varios inconvenientes, ya que regularmente las variaciones a las cuales están sometidos los paneles genera diversos puntos de máxima potencia, para los cuales, los sistemas convencionales de MPPT no pueden responder adecuadamente.

El trabajo presenta un nuevo método de control basado en modos deslizantes, en donde, en comparación con métodos convencionales, la convergencia al punto de máxima potencia siempre se logra, incluso para los casos en donde las condiciones de radiación y temperatura presentan variaciones muy extremas en los puntos de máxima potencia. Esto se logra mediante una selección óptima de la superficie de conmutación la cual es la superficie de modos deslizantes utilizada.

Además, la propuesta de añadir una detección de la temperatura, resulta ser más eficiente de lo esperado, ya que no sólo permite ajuste a las variaciones en las condiciones atmosféricas, sino también a los problemas presentados con sombreado parcial al tener una consideración de todos los puntos de máxima potencia que puede tener el arreglo de paneles solares.

Cabe mencionar también que valor del error entre los puntos de máxima potencia y la superficie de conmutación son muy pequeños, motivo por el cual se asegura un excelente posicionamiento en la potencia máxima, de la misma manera como la diferencia entre los puntos global y local son más grandes que el error, se asegura el posicionamiento sobre el punto de máxima potencia global.

Este trabajo presenta una solución adecuada para seguimiento del punto de máxima potencia en arreglos de paneles solares los cuales son utilizados, en el ámbito industrial en donde se suelen conectar extensiones muy grandes de arreglos de paneles solares.

### **Trabajos futuros**

El proyecto presentado en esta tesis dejó un camino para futuros trabajos y pruebas en el área de trabajo, ya que este proyecto solo se probó en simuladores y en laboratorio mediante emuladores de paneles solar, algunos de los trabajos futuros que se podrían realizar serian:

- Probar sistema de control en arreglos de paneles solares, realizando pruebas desde un panel solar hasta un número “n”, considerando que la superficie de control debe de ser adecuada.
- En este trabajo solo se comparó la propuesta con un modelo de control convencional de MPPT (Perturbar y Observar), motivo por el cual se deberá realizar una comparación con más sistemas de control.
- Implementar este sistema de control a diferentes tipos de paneles solares para verificar que siempre se obtengan los puntos de máxima potencia adecuados.
- Desarrollar otro tipo de control incluyendo factores internos que se presentan en la conversión de energía de los paneles solares los cuales reducen la vida útil de los mismos.

# Anexos

## A.1 Energías renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, la biomasa y los biocombustibles.

## A.2 Panel fotovoltaico

La palabra fotovoltaico está formada por la combinación de dos palabras de origen griego: foto, que significa luz, y voltaico que significa eléctrico. El nombre resume la acción de estas celdas: transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

Los paneles fotovoltaicos están formados por un conjunto de componentes llamados células fotovoltaicas que se encargan de producir electricidad a partir de la luz que incide sobre ellas. Una única célula, es capaz de proporcionar una tensión de apenas 0,5 V y una potencia de entre 1 y 2 W. Para elevar la potencia suministrada, las células se conectan en serie y en paralelo, dando lugar a lo que se denomina panel o módulo fotovoltaico.

Las celdas fotovoltaicas que se ofrecen en el mercado actual utilizan dos tipos de materiales semiconductores. Uno tiene una estructura cristalina uniforme, el otro una estructura policristalina.

### A.3 Algoritmo perturbar y observar

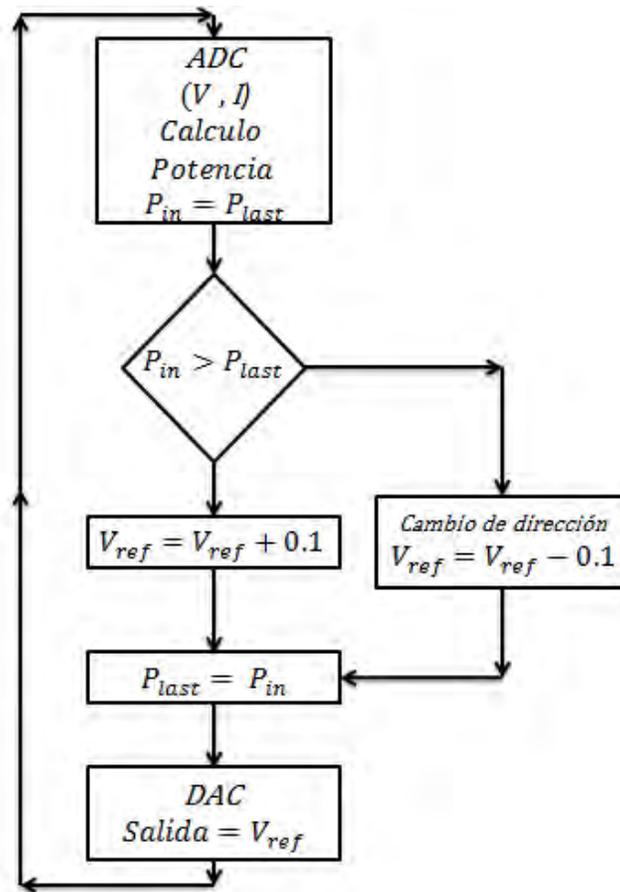


Fig 4.1 Algoritmo Perturbar y Observar programado en el microcontrolador para la comparación

donde:

$P_{in}$  es la potencia actual

$P_{last}$  es la potencia pasada

$V_{ref}$  el voltaje de referencia

#### A.4 Prueba de la proposición 1

Considerando el siguiente sistema conmutado:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (4.1)$$

EL cual opera bajo las siguientes circunstancias en donde  $u$  es una función de la posición del interruptor tomando valores en el conjunto discreto  $\{0,1\}$ .

$$u = f(x) = \begin{cases} 1, & t_k < t \leq t_k + \mu(x(t_k))T \\ 0, & t_k + \mu(x(t_k))T \leq t < t_k + T = t_k + 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

Considerando también un intervalo de tiempo de muestreo arbitrario  $[t_k, t_k + 1] = [t_k, t_k + \mu(x(t_k))T] \cup [t_k + \mu(x(t_k))T, t_k + 1]$  de longitud  $T$ , se tiene la siguiente descripción:

$$x(t_k + \mu(x(t_k))T) = x(t_k) + \int_{t_k}^{t_k + \mu(x(t_k))T} [f(x(\sigma)) + g(x(\sigma))]d\sigma \quad (4.3)$$

Por otro lado, en el tiempo  $t_k + T = t_k + 1$  el estado está dado por:

$$x(t_k + T) = x(t_k + \mu(x(t_k))T) + \int_{t_k + \mu(x(t_k))T}^{t_k + T} f(x(\sigma))d\sigma \quad (4.4)$$

Sustituyendo (4.3) en (4.4) se obtiene,

$$\begin{aligned} x(t_k + T) &= x(t_k) + \int_{t_k}^{t_k + \mu(x(t_k))T} f(x(\sigma)) + g(x(\sigma))d\sigma + \int_{t_k + \mu(x(t_k))T}^{t_k + T} f(x(\sigma))d\sigma \\ &= x(t_k) \int_{t_k}^{t_k + T} f(x(\sigma))d\sigma + \int_{t_k}^{t_k + \mu(x(t_k))T} g(x(\sigma))d\sigma \end{aligned} \quad (4.5)$$

La diferencia de los estados al principio y al final del intervalo de muestreo  $[t_k, t_k + T]$ , dividido por el periodo de muestreo  $T$  está dada por,

$$\begin{aligned} \frac{1}{T}[x(t_k + T) - x(t_k)] &= \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k + T} f(x(\sigma))d\sigma + \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k + \mu(x(t_k))T} g(x(\sigma))d\sigma \\ &= x(t_k + \mu(x(t_k))T) + \int_{t_k + \mu(x(t_k))T}^{t_k + T} f(x(\sigma))d\sigma \end{aligned} \quad (4.6)$$

Tomando límites como  $T \rightarrow 0$  y dejando que el instante de tiempo  $t_k$  tome el valor genérico  $T$  se obtiene,

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T}[x(t + T) - x(t)] &= \lim_{T \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x(\sigma))d\sigma + \frac{1}{T} \int_t^{t + \mu(x(t_k))T} g(x(\sigma))d\sigma \right] \\ &= \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))\mu(x(t)) \end{aligned} \quad (4.7)$$

El modelo promedio continuo de un sistema PWM regulado está dado entonces por el mismo modelo no lineal, excepto que la entrada de control discreta “ $u$ ” se sustituye por la continua, pero limitada, función de relación de trabajo  $\mu$ .

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maffezzoni, P.; D'Amore, D., "Compact Electrothermal Macromodeling of Photovoltaic Modules," *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, vol.56, no.2, pp.162,166, Feb. 2009.
- [2] Muhammad, H.; Char, L., "Solar Power Conversion," *Power Electronics Handbook*, cap.26, pp.661,672, Academic Press, Segunda edición, 2007.
- [3] Hussein, K.; Muta, I.; Hoshino, T.; Osakada, M., "Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions," in *IEE Proc. Gener., Transm., Distrib.*, vol.142, pp.59,64, 1995.
- [4] Zinger, Z.; Braunstein, A., "Dynamic Matching of a Solar-Electrical (photovoltaic) System an Estimation of the Minimum Requirements on the Matching System," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol.PAS-100, no.3, pp.1189,1192, 1981.
- [5] Esham, T.; Chapman, P. L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE transactions on*, vol.22, no.2, pp.439,449, Jun. 2007.
- [6] Chun-xia, L.; Li-qunm, L., "Research Into Maximum Power Point Tracking Method of Photovoltaic Generate System," *Intelligent Systems and Applications, ISA, International Workshop on* , pp.1,4, 23-24 May 2009.
- [7] Shmilovitz, D., "On the Control of Photovoltaic Maximum Power Point Tracker Via Output Parameters," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -* , vol.152, no.2, pp.239,248, 4 March 2005.
- [8] Jain, S.; Agarwal, V., "A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaic Systems," *Power Electronics Letters, IEEE* , vol.2, no.1, pp.16,19, March 2004.
- [9] Lijun G.; Dougal, R.A; Liu, S; Iotova, A.P., "Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.56, no.5, pp.1548,1556, May 2009.
- [10] Scarpa, V. V. R.; Spiazzi, G.; Buso, S., "Low Complexity MPPT Technique Exploiting the Effect of the PV Cell Series Resistance," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE*, pp.1958,1964, 24-28 Feb. 2008.

- [11] Sokolov, M.; Shmilovitz, D., "A Modified MPPT Scheme for Accelerated Convergence," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.23, pp.1105,1107, Dec. 2008.
- [12] Kasa, N.; Iida, T.; Liang, C., "Flyback Inverter Controlled by Sensorless Current MPPT for Photovoltaic Power System," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.52, no.4, pp.1145,1152, Aug. 2005.
- [13] Jiyong L.; Honghua W., "Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Generation Based on the Optimal Gradient Method," *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, pp.1,4, 27-31 March 2009.
- [14] Mummadi, V., "Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Sources," *Sustainable Energy Technologies, ICSET. IEEE International Conference on*, vol., no., pp.301,305, 24-27 Nov. 2008.
- [15] Levron, Y.; Shmilovitz, D., "Maximum Power Point Tracking Employing Sliding Mode Control," *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol.60, no.3, pp.724,732, March 2013.
- [16] Ortega, R.; Loría, A.; Nicklasson, P.J.; Sira-Ramírez, H., *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical, electrical and electromechanical applications*, Springer, 1998.
- [17] Ortega, M.A., "Control no lineal de convertidores conmutados cc/cc: análisis de prestaciones y verificación experimental," tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España: 2006
- [18] Spiazzi, G.; Mattavelli, P.; Rossetto, L.; Malesani, L., *Application of Sliding Mode Control to Switched-mode Power Supplies*, *J. Circuits, Syst. Comput. (JCSC)*, vol.5, no.3, pp.337,354, Sep. 1995.
- [19] Martinez, L., "Why is Sliding Mode Control Methodology Needed for Power Converters," *Proc. 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (EPE/PEMC)*, 2010, pp. S9-25–S9-31.
- [20] Ruiz, C.; Beristáin, J.; Ian, M., "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar", *Revista de ingeniería eléctrica y computación*, vol. 8, pp 17-23, 2010.
- [21] Liu, G.; Wang, P.; Wang, W.; Wang, Q., "MPPT Algorithm Under Partial Shading Conditions", *Elect. Inf. Eng. And Mech.* 2011 vol.1, pp.91,98, 2011.

- [22] Femia, N.; Lisi, G.; Petrone, G.; Spagnuolo, G.; Vitelli, M., "Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays: Novel Approach and System Analysis," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.55, no.7, pp.2610,2621, July 2008.
- [23] Peng L.; Yaoyu L.; Seem, J.E., "Sequential ESC-Based Global MPPT Control for Photovoltaic Array With Variable Shading," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* , vol.2, no.3, pp.348,358, July 2011.
- [24] Utkin, V. I., *Sliding Modes and their Application in Variable Structure Systems*, MIR Publishers, Moscow, 1974.
- [25] Utkin, V. I, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.40, no.1, pp.23,36, Feb 1993.
- [26] Decarlo, R. A.; Zak, S.H.; Matthews, G.P., "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial," *Proceedings of the IEEE*, vol.76, no.3, pp.212,232, Mar 1988.
- [27] Hung, J.Y.; Gao, W.; Hung, J.C., "Variable Structure Control: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.40, no.1, pp.2,22, Feb 1993.