

# **MAXIMUM POWER POINT TRACKER SHADED CONDITION**

JHON EDWIN VERA VERA  
MIGUEL ANGEL FERREIRA

FACULTAD DE INGENIERIA  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
BOGOTA D.C 2013

# **MAXIMUM POWER POINT TRACKER SHADED CONDITION**

JHON EDWIN VERA VERA  
MIGUEL ANGEL FERREIRA

DIRECTOR  
ING. DIEGO PATIÑO  
ING. ABDEL KARIM HAY HARB

FACULTAD DE INGENIERIA  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
BOGOTA D.C 2013

## **Advertencia**

*“La Universidad Javeriana no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque la tesis no contenga ataques o polémicas puramente personales; antes bien, se vea en ella el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.*

Reglamento de la Pontificia Universidad Javeriana, Artículo 23, de la Resolución 13, de Julio de 1965

## **Dedicado a**

A Dios y a mi familia por la paciencia y comprensión al ayudarme a superar todas las dificultades y retos que se vieron reflejados en el desarrollo de este proyecto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los integrantes de este proyecto queremos agradecer a nuestros directores, Ing. Abdel Karim Hay Harb, Ing. Diego Patiño quienes con sus pautas en asesoría y conocimiento nos mostraron el camino de viabilidad para cumplir los objetivos planteados desde un principio.

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION .....	10
2.	MARCO TEORICO.....	12
2.1	Panel Solar.....	13
2.1.1	Efecto Fotovoltaico.....	14
2.2	Convertor DC-DC Boost.....	16
2.3	Algoritmo MPPT .....	17
2.3.1	El algoritmo de perturbación y observación.....	17
2.3.2	Método Serie de Fibonacci .....	17
2.3.3	Método de circuito abierto .....	18
2.3.4	Método de Conductancia Incremental.....	19
3.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	21
3.1	Selección del algoritmo .....	24
3.2	Algoritmo de Conductancia Incremental.....	26
3.3	Simulación Algoritmo .....	28
3.3.1	Enlace PSIM- Matlab.....	29
3.4	Hardware e Implementación.....	32
3.4.1	Selección del DSP.....	33
3.4.2	Selección del Convertidor.....	34
3.4.3	Diseño del Convertidor.....	34
3.4.4	Acondicionamiento de las señales de los sensores del Sistema MPPT para el DSP.....	37
3.4.5	Diseño del amplificador no inversor para la señal de Voltaje.....	37
3.4.6	Diseño del amplificador no inversor para la señal de corriente.....	39
3.5	Función de Transferencia .....	41
3.5.1	Linealización y Jacobiano.....	42
3.6	Fuente Emuladora de Tensión DC .....	44
3.6.1	Construcción de gráficas para pruebas del algoritmo.....	44
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	46
5.	CONCLUSIONES .....	48
6.	TRABAJOS A FUTURO .....	49
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	51
8.	ANEXOS .....	53
	Anexo 1 .....	53
	Anexo 2 .....	54
	Anexo 3 .....	55
	Anexo 4 .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general para el MPPTSC .....	13
Figura 2. Curva característica del Voltaje, Corriente y Máximo Punto de Potencia en un panel solar.....	15
Figura 2.1 Variación de potencia debido a los cambios de irradiancia en un panel solar. ....	16
Figura 2.2 Diagrama de flujo del algoritmo de Conductancia Incremental. [12].....	20
Tabla 1. Especificaciones Técnicas .....	21
Figura 3. Circuito montado en PSIM para obtener las curvas P-V del panel fotovoltaico.....	22
Figura 3.1 Análisis de las curvas del panel por medio de la simulación .....	22
Figura 3.2 Conexión varios paneles para simular diferentes perturbaciones.....	23
Figura 3.3 Construcción de graficas con diferentes radiaciones.....	24
Figura 3.4 Simulación de diferentes Algoritmos con Radiación Uniforme.....	25
Figura 3.5 Simulación diferentes algoritmos Potencia vs Tiempo. ....	25
Figura 3.6 Análisis alrededor del punto máximo de potencia .....	26
Figura 3.6.1 Diagrama de flujo algoritmo. ....	28
Figura 3.7 Diagrama de bloques SimCoupler.....	29
Figura 3.8 Conexión Modulo Psim-Matlab .....	30
Figura 3.9 Diagrama de simulación en Psim a) Potencia vs Tiempo, b) Potencia vs Corriente, c) Potencia vs Voltaje. ....	31
Figura 3.10 Simulación del algoritmo .....	32
Figura 3.11 Montaje Experimental para prueba del algoritmo Propuesto.....	33
Tabla 3 Condiciones para el diseño del convertidor boost .....	35
Figura 3.12 Topología convertidor Boost Síncrono .....	37
Figura 3.13. Amplificador No Inversor. ....	38
Figura 3.14 Diseño Amplificador no inversor como sensor del voltaje del panel.....	38
Figura 3.15 Circuito de aplicación del Sensor lineal de corriente de efecto Hall ACS714LLCTR-05B .....	39
Figura 3.16 Diseño Amplificador no inversor para salida del sensor de corriente del panel. ..	40
Figura 3.17 Sensor de corriente completo con amplificador no inversor. ....	40
Figura 3.18 Modos de Conmutación convertidor boost. ....	41
Figura 3.18 Tiempo de respuesta convertidor.....	43
Figura 3.19 Fuente Magna Power y emulador fotovoltaico [17].....	44

Figura 3.20 Caracterización de potencia con diferentes picos.....	45
Fig. 4.1 Punto de Máxima Potencia sobre las Graficas de P vs V Implementando el algoritmo. .....	47
Figura 6.1 Comportamiento de promedio móvil .....	49
Figura 6.2 Resultado Análisis promedio móvil .....	50

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Técnicas .....	21
Tabla 2 Condiciones para el diseño del convertidor boost .....	35

# 1. INTRODUCCION

Las energías alternativas son definidas como fuentes generadoras de energía eléctrica diferentes a las tradicionales como hidroeléctricas, termoeléctricas, plantas nucleares etc.

En la actualidad debido al calentamiento global, las fuentes de energía tradicional como el agua, el petróleo, carbón y sus derivados han mostrado una tendencia a desaparecer, siendo la principal causa para buscar métodos y alternativas para la producción de energía eléctrica.

Estudios hechos por CENSOLAR demuestran que cada año el sol irradia sobre la tierra cuatro mil veces más de energía solar en comparación a la que se consume, (CENSOLAR, “Centro de Estudios de Energía solar”). [19] Estos estudios son de gran importancia ya que esta energía se puede aprovechar en aplicaciones eléctricas orientadas hacia diferentes ámbitos como la industria, el hogar, el campo etc.

Los últimos años España ha tenido un avance importante en aplicaciones y aprovechamiento de energía fotovoltaica, de las más importantes se destaca el abastecimiento de energía conectada a la red y el almacenamiento de energía eléctrica alcanzando casi los 4.000MW.

Colombia, por ser un país que se encuentra cercano a la zona del ecuador, cuenta con un buen potencial energético solar, desafortunadamente gran parte de la energía que cae sobre el país no es utilizada de una manera eficiente.

En los años 80, un programa dirigido por Telecom permitió que sistemas para la generación de energía eléctrica a partir de la luz solar fueran instalados en zonas rurales para sistemas de comunicación como bases terrenas de satélites, antenas satelitales terrenas, radioteléfonos entre otros. [1].

Este trabajo plantea aprovechar al máximo la energía solar y se enfoca en la búsqueda de un algoritmo para obtener el máximo punto de potencia en condiciones sombreadas (MPTTSC), tomando la energía solar por medio de un panel como una alternativa para la obtención de energía eléctrica, garantizando mayor eficiencia y la conservación del medio ambiente.

El trabajo de investigación explora en su parte inicial diferentes tipos de algoritmos reportados en la literatura, [4][5][10][11][12][13] realizando simulaciones y comparaciones entre sí, para poder determinar una aproximación inicial a la solución del problema planteado.

Se analiza y se estudia posteriormente el comportamiento básico de un panel solar en condiciones de irradiación uniforme, se implementa un circuito con la ayuda de PSIM (Software de simulación para electrónica de potencia). Se hace una aproximación satisfactoria empleando el software ya mencionado para la simulación del comportamiento de varios paneles en serie como representación de un panel en condiciones de sombreado parcial.

El algoritmo de conductancia incremental es estudiado en detalle para comprender su comportamiento y se escoge como camino de investigación para el desarrollo de un algoritmo que pueda trabajar en condiciones de paneles en sombreado parcial.

Es desarrollada una co-simulación entre Matlab y PSIM para simular y evaluar el algoritmo propuesto en el desarrollo de la investigación. Matlab simula la parte correspondiente al algoritmo (control) y PSIM simula el convertidor de Potencia DC-DC (Circuito de Potencia).

Se implementa un hardware con el que se puede aplicar el algoritmo propuesto, que consta de una fuente DC-DC que puede emular el comportamiento del panel solar en condiciones de sombra, un DSP el cual contiene la adquisición de datos, el algoritmo MPPTSC y la acción de control (PWM) para el convertidor DC-DC que es la interfaz entre el panel y la carga.

Se evalúa el comportamiento del algoritmo propuesto con ayuda de esta implementación. Al final del documento se muestran los resultados experimentales y las conclusiones finales de este trabajo.

Adicionalmente dentro del trabajo de investigación se hicieron simulaciones de otro posible algoritmo basado en el promedio móvil de la curva P-V que no pudieron ser terminados ante la imposibilidad de encontrar un modelo matemático apropiado que demostrara la viabilidad de este sistema. No se encuentran reportados en este documento esta parte de la investigación y se menciona como un posible trabajo a futuro.

## 2. MARCO TEORICO

Durante la década de 1980 la humanidad comienza a entender la vulnerabilidad de las fuentes de energía como las hidroeléctricas, termoeléctricas y sistemas eólicos debido al cambio y las alteraciones que han presentado los recursos naturales. [2]

El impacto causado por los cambios climáticos muestra la “energía solar fotovoltaica” con un gran potencial debido a la incidencia de energía radiante producida por el sol.

El concepto de efecto fotoeléctrico muestra a la humanidad las ventajas para el desarrollo de la energía eléctrica por medio de paneles solares. El físico francés *Alexandre Edmon* introduce el concepto de energía solar y energía eléctrica en el año de 1839, su teoría define el cambio de corriente de conducción en diferentes materiales a partir de las incidencias e intensidad de la luz.

Este principio nos lleva a realizar un análisis del comportamiento de módulos o celdas solares con capacidad de generar voltajes, corriente y potencia.

En sistemas de energía solar la potencia máxima de un módulo fotovoltaico se mide en vatio pico. Esta característica está definida para condiciones estándar de medida, que vienen determinadas por unos niveles de radiación estándares de (1.000 W/m<sup>2</sup>), temperatura (25°). De acuerdo con estas características se definen métodos para mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y encontrar los niveles máximos de potencia [3]. Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características *V-I* que establecen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación. La potencia de una celda solar se define como el producto entre la corriente y el voltaje. El punto de máxima potencia *MPP* (*Maximum Power Point*) es el producto del voltaje en el punto máximo (*VMPP*) y corriente en el punto máximo (*IMPP*) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (*PMPP*).

Los métodos convencionales de *MPPT* (*Máximo Power Point Tracker*) son eficaces en la irradiación solar uniforme [4] [5]. Estos métodos determinan el comportamiento del panel sin perturbaciones y definen siempre un punto máximo de potencia. Sin embargo, bajo condiciones de irradiación solar no coincidente, donde se presentan perturbaciones en la incidencia de luz debido a diferentes factores, conocidos como *MPPTSC* (*Máximo Power Point Tracker Shaded Condition*) pueden fallar puesto que pueden encontrar múltiples máximos locales en la

curva característica P-V del arreglo fotovoltaico. En la actualidad el MPPTSC es de gran importancia pues existen aplicaciones que se exponen a continuas perturbaciones como árboles, redes eléctricas, nubes etc.

Debido a las variaciones o perturbaciones que generan cambios significativos en la potencia de los paneles solares se han generado varios algoritmos para realizar el seguimiento del máximo punto de potencia, tales como el método de P&O (Perturbación y Observación), el método de Fibonacci, la conductancia incremental etc. [6].

Aunque algunos investigadores han trabajado en el seguimiento real del MPPT en condiciones de sombra parcial, los métodos tienen algunas desventajas en términos de complejidad y los requisitos para circuitos adicionales [7].

El desarrollo de este trabajo busca implementar un algoritmo de MPPTSC y se estructura como se muestra en la figura 1, con el fin de seguir una secuencia lógica para su ejecución:

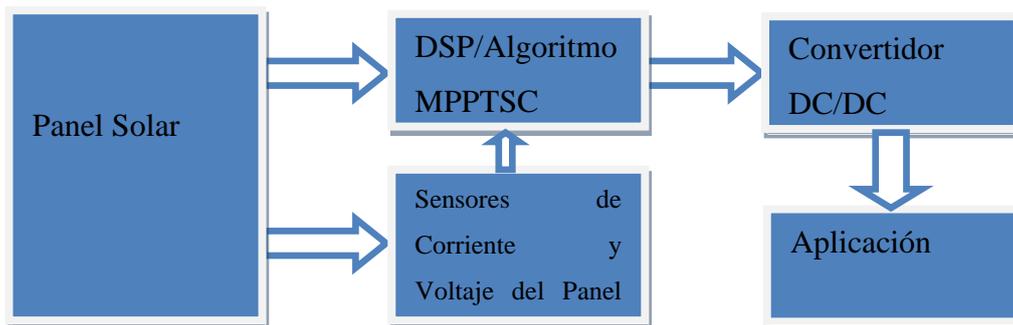


Figura 1. Diagrama general para el MPPTSC

## 2.1 Panel Solar

Los paneles fotovoltaicos son los encargados de convertir la luz solar en electricidad. Están compuestos por conjuntos de células fotoeléctricas o fotovoltaicas en serie y paralelo, que son las encargadas de convertir la luz en electricidad, las conexiones en serie se utilizan para aumentar el voltaje y las que están en paralelo se emplean para aumentar la corriente, están hechas de silicio en su mayoría, aunque también se utilizan materiales como el CdTe (Teluro de Cadmio). Algunas poseen impurezas de otros materiales como el fósforo. Con el silicio se forma una juntura PN similar a la de los diodos semiconductores, cuando un semiconductor es golpeado por un fotón que viaja a una longitud de onda específica, la energía de este es capaz

de desprender un electrón que esta débilmente ligado a la banda de valencia del material semiconductor antes de que este vuelva a su estado de equilibrio térmico. Esto es llamado el efecto fotoeléctrico o fotovoltaico. La capa superior está dopada con material de tipo n. Esto quiere decir que contiene un número mayor de electrones que el silicio puro, y la parte inferior esta con un dopaje tipo p el cual tiene una cantidad menor de electrones que el silicio puro. Los electrones de la parte N pasan a la parte P para rellenar los huecos que existen en esta, de ahí el nombre de unión PN [8].

Los paneles solares que existen hoy en día tienen varios valores de potencia. Esta potencia depende no tanto del tamaño del módulo como tal sino de la eficiencia de las células que lo componen, de las uniones que tiene interiormente y de la irradiación que este sobre el panel. El término estandarizado para los paneles solares es el de potencia pico Wp, que corresponde a la potencia que el módulo es capaz de entregar bajo las condiciones ideales que corresponden a una irradiación de ( $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ ) y a la temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

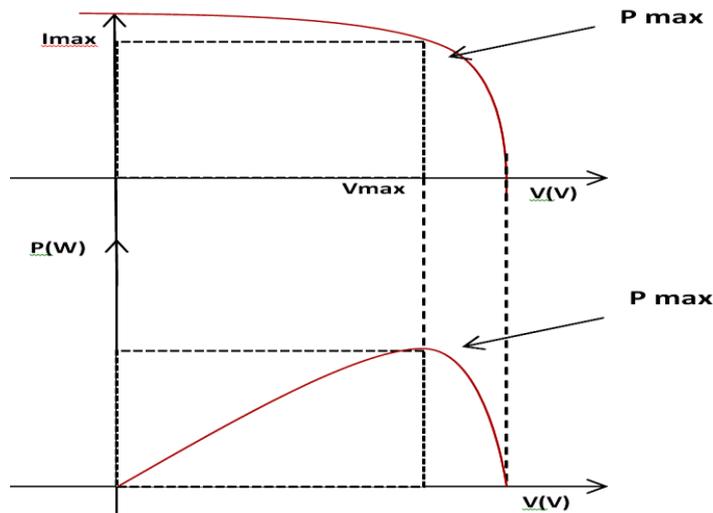
### **2.1.1 Efecto Fotovoltaico**

Las celdas solares tienen una cobertura metálica en la parte superior y en la parte inferior un tipo de contacto metálico con el fin de transferir los electrones a circuitos externos; seguida a esta capa, está otra capa transparente para poder sellar la célula y protegerla de las condiciones ambientales como la humedad excesiva, luego de esta hay una capa anti-reflexiva para tener la mayor cantidad de fotones absorbidos.

Los fotones, dependiendo de la energía que tengan, pueden ser reflejados, absorbidos o pueden atravesar la célula. Solo cuando los fotones son absorbidos se produce un flujo de electrones, esto se logra cuando el fotón cede la energía que tiene a un electrón que se encuentra en la banda de valencia de un átomo de la célula. También se puede tener en cuenta la energía de un fotón que ha sido absorbido y este es igual a la energía necesaria para liberar un electrón más la energía cinética del electrón emitido [9].

Las curvas características  $V-I$  de la Figura 2 establecen el comportamiento de un panel y muestran el máximo punto de potencia como el producto entre la corriente y el voltaje.

Es importante aclarar que las gráficas son caracterizadas de esta forma si las condiciones sobre el panel solar son estándar es decir, la temperatura ( $25^{\circ}$ ), la radiación no es alterada y se conserva en ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ).



*Figura 2. Curva característica del Voltaje, Corriente y Máximo Punto de Potencia en un panel solar.*

Cuando los niveles de radiación varían sobre el panel solar por diferentes factores como el movimiento de las nubes, el movimiento del panel, la temperatura, la lluvia etc. El comportamiento del voltaje, la corriente y la potencia máxima cambian significativamente, debido a que la radiación sobre el panel no es la misma en los módulos o las celdas que lo componen.

Para el desarrollo de este proyecto, es preciso estudiar el comportamiento del panel solar en condiciones de nubosidad o perturbaciones, las cuales hacen que su potencia máxima varíe significativamente, obteniendo diferentes puntos de potencia por debajo de la potencia máxima.

La figura 2.1 muestra el voltaje, la corriente y la potencia con perturbación o en condiciones de nubosidad. Para la potencia uno ( $P_1$ ) se asume que la radiación sobre el panel es total ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ), para la potencia dos ( $P_2$ ) la radiación sobre el panel es menor debido a las posibles perturbaciones.

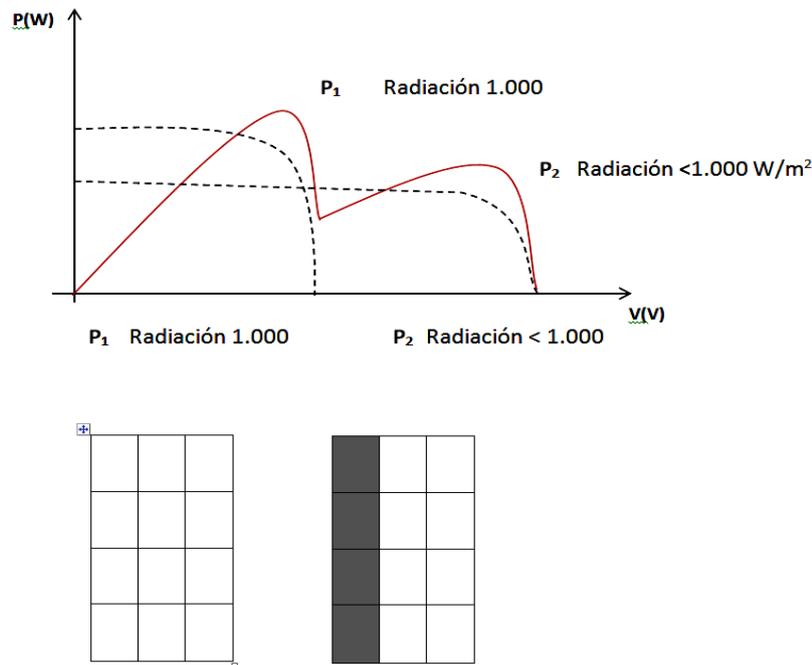


Figura 2.1 Variación de potencia debido a los cambios de irradiancia en un panel solar.

## 2.2 Conversor DC-DC Boost

Un conversor DC-DC es un sistema de conversión de potencia que transforma voltaje DC de un nivel determinado en su entrada, a un voltaje de nivel DC diferente en su salida, se construye con switches de potencia y un filtro de salida.

De acuerdo a la relación entre el valor del voltaje de entrada y el valor del voltaje de salida se pueden clasificar en tres tipos básicos de convertidores: Boost (Salida superior a la entrada), Buck (Salida inferior a la entrada) y el Buck-Boost (Salida superior igual o inferior a la entrada).

El conversor DC-DC que se implementa para el desarrollo de este trabajo es un Boost. El cual eleva el voltaje del panel en su entrada y es convertido a un voltaje superior en la salida, para poder suministrar la máxima potencia disponible al panel a una carga predeterminada.

## **2.3 Algoritmo MPPT**

El objetivo de la utilización de los algoritmos de seguimiento de máxima potencia MPPT, es el de aprovechar al máximo la energía suministrada por el panel fotovoltaico.

La potencia entregada por el panel depende de las variaciones que se tengan sobre el panel solar como: la temperatura, la irradiación, la corriente y el voltaje. El punto de máxima potencia de un panel es denominado comúnmente  $V_{MPP}$ .

Por esta razón se han realizado diferentes estudios y algoritmos para encontrar la máxima potencia entregada por el panel según las perturbaciones anteriormente mencionadas:

### **2.3.1 El algoritmo de perturbación y observación**

Este algoritmo de seguimiento de potencia varía el voltaje del panel y monitorea la potencia resultante. Si la potencia medida es mayor que la medida en la muestra anterior se continúa realizando la misma variación en el voltaje (aumento o disminución). Si la potencia es menor que la obtenida en la muestra anterior, se realiza la variación de voltaje opuesta (disminución o aumento) a la que se estaba haciendo en el ciclo anterior. Las muestras del voltaje del panel solar permiten ubicar el punto de operación. Una vez alcanzado el punto de máxima potencia, el algoritmo P&O hará que el punto de operación del panel oscile en torno a él [10].

Su principal desventaja es que su eficiencia depende de la velocidad con que se midan las variables, como la corriente y el voltaje, esto depende directamente de la velocidad de muestreo, pues un muestreo lento puede producir inestabilidad para alcanzar el MPP.

### **2.3.2 Método Serie de Fibonacci**

La secuencia de Fibonacci es una serie matemática de números enteros que comienza por definición con los valores 0 y 1, cada número subsecuente es la suma de los dos

inmediatamente anteriores. En una secuencia de Fibonacci de 7 números se tendrían: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8. [17]

El método de búsqueda con la serie de Fibonacci, está clasificado dentro de los métodos de búsqueda lineal. Los métodos de búsqueda lineal son algoritmos iterativos que calculan una dirección y luego determinan que tan lejos van en esa dirección. La iteración está dada por:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{p}_k \quad (1)$$

Donde  $a_k$  es la longitud del paso de búsqueda y  $p_k$  es la dirección. El éxito de estos métodos depende de la elección apropiada de  $a_k$  y  $p_k$  para hallar el valor óptimo buscado.

La serie de Fibonacci se aplica a la longitud del incremento o decremento del algoritmo de búsqueda definido por este método y convierte a este método bien aplicado en una gran estrategia para poder buscar la máxima potencia disponible en un panel solar en pocas iteraciones. Por tanto el método de Serie de Fibonacci es un método de búsqueda más sofisticado en comparación con el método de perturbación y observación, ya que el método de perturbación y observación analizado desde el punto de vista de métodos de búsqueda lineal tendría un valor  $a_k$  siempre fijo. Se puede deducir que la estrategia de Serie de Fibonacci reduce las localizaciones posibles del punto de máximo de potencia y lo encuentra con la velocidad y distribución con la que crece o se reduce esta secuencia de números.

Este método iterativamente restringe y desplaza el intervalo de búsqueda de tal manera que pueda contener en el intervalo el valor de máxima potencia. La dirección del desplazamiento se escoge de acuerdo a un chequeo hecho en dos puntos dentro del rango y la restricción o intervalo de búsqueda se escoge de acuerdo a la regla de la secuencia de Fibonacci [11].

### 2.3.3 Método de circuito abierto

Existe una relación casi lineal, entre el Voltaje de circuito abierto y el voltaje de máxima potencia del panel en diferentes niveles de irradiación y condiciones de temperatura. La relación casi lineal ha dado origen al método fraccional del Voltaje del circuito abierto. Y viene dado por la ecuación: [12]

$$V_{MPP} \approx k_1 * V_{OC} \quad (2)$$

El factor  $k_1$  depende del tipo de panel usado y debe ser calculado empíricamente, determinando el VMPP y VOC del panel en diferentes niveles de irradiación y temperatura. Se han reportado valores entre 0.71 y 0.78. [12]

Su mayor ventaja es su simplicidad. Su mayor desventaja es tener que desconectar la carga temporalmente para determinar el VOC del panel. Con la medición del VOC se puede ubicar el punto de máxima potencia,  $V_{MPP}$ . Esta desconexión temporal desperdicia potencia y produce ineficiencia.

### 2.3.4 Método de Conductancia Incremental

El método de conductancia incremental estudia la curva P-V de un panel. Esta curva es la potencia en función del voltaje en el panel. El análisis de la pendiente de esta función determina el método de conductancia incremental. [12]

La pendiente de la función P-V es cero en  $V_{MPP}$ , negativa al lado derecho y positiva al lado izquierdo. Se puede definir matemáticamente de la siguiente manera: [12]

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0, \text{ en } V_{MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0, \text{ a la derecha de } V_{MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0, \text{ a la izquierda de } V_{MPP} \end{cases} \quad (3)$$

Se reemplaza  $P=V.I$  en  $dP/dV$ , para poner el método de conductancia incremental en variables fácilmente medibles, como corriente y voltaje. Se realiza de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= d \frac{(VI)}{dV} = I * \frac{dV}{dV} + V * \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} &= I + V * \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} &\cong I + V * \frac{\Delta I}{\Delta V} \end{aligned} \quad (4)$$

Este método rastrea el punto de máxima potencia comparando la relación entre  $\Delta I/\Delta V$  (Conductancia incremental) con el valor de  $I/V$  (Conductancia instantánea). [12]

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo de este algoritmo. Primero se determina un  $V_{ref}$  (Voltaje de referencia) como punto de partida del algoritmo. Luego el panel es obligado a operar en este punto de referencia. En el punto de máxima transferencia  $V_{MPP}$  coincide con  $V_{ref}$  y allí se mantiene, pero si hay un cambio en  $\Delta I$  debido a un cambio en las condiciones atmosféricas,  $V_{ref}$  es decrementado o incrementado para encontrar el nuevo MPP.

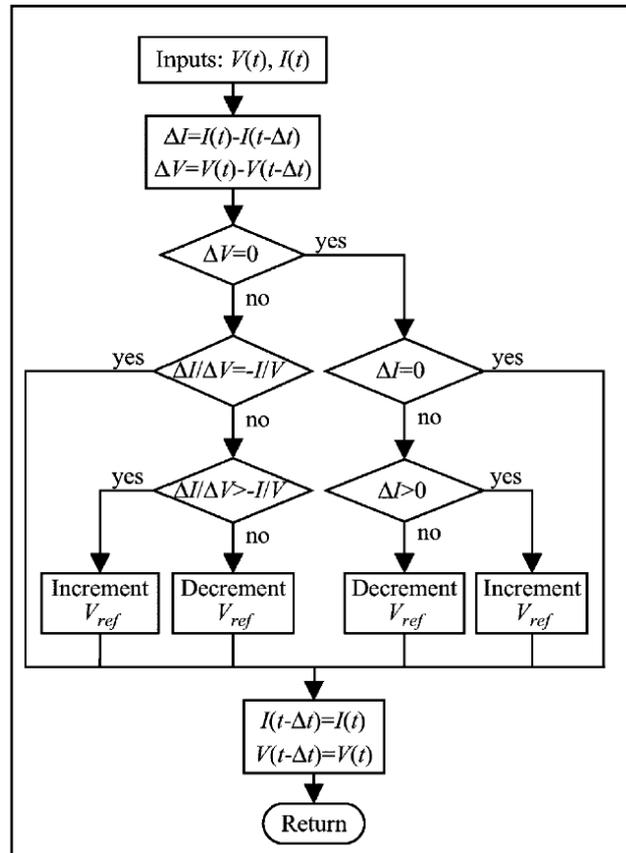


Figura 2.2 Diagrama de flujo del algoritmo de Conductancia Incremental. [12]

La velocidad del rastreo depende de la magnitud del incremento, sin embargo al incrementar la velocidad de rastreo el algoritmo podría no operar exactamente en el punto de máxima potencia, oscilando alrededor de él. Este algoritmo es implementado en DSP o microcontroladores, debido a las medidas de corriente y voltaje y el grupo de decisiones que se ejecutan en el algoritmo y no puede rastrear el máximo global. [12]

### 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

Las características no lineales que exhiben los paneles solares, en conjunto a las dificultades que existen en torno a las pruebas experimentales, hacen necesario la búsqueda de una metodología alternativa para la implementación de algoritmos y circuitos que extraigan la máxima potencia disponible. Para poder realizar un sistema MPPT es necesario analizar el comportamiento del panel solar.

En la tabla 1 se muestra la especificación técnica del panel que se propone para este proyecto:

#### PANEL SOLAR SOLAREX SX-20U

Pout	20Watts	Potencia de salida
Voc	20.1V	Voltaje circuito abierto
Isc	1A	Corriente corto circuito
Vpmax	16.8V	Voltaje salida máxima potencia
Ipmax	1.19 A	Corriente de salida máxima potencia

*Tabla 1. Especificaciones Técnicas*

La tabla 1 proporciona algunos datos, para la construcción de gráficas y caracterización del panel solar por medio de una herramienta informática como PSIM 9.0. Este software es utilizado en electrónica de potencia para simulaciones y es importante para este proyecto, ya que incluye módulos de paneles solares y una opción para poder compartir recursos o simulaciones con Matlab. La simulación es realizada para ver una aproximación del comportamiento de voltaje, corriente y potencia en el panel solar. La figura 3 muestra el circuito desarrollado para la construcción de las gráficas, en este módulo de celdas solares se introducen todos los datos correspondientes a las especificaciones técnicas del panel y permite variar sus características para simular perturbaciones como la entrada de temperatura y de radiación que puede afectar el comportamiento del voltaje, corriente y potencia reflejada en el panel.

El circuito presentado en la figura 3 funciona, conectando una fuente ideal de voltaje de barrido triangular en paralelo al panel con los datos del panel real, con el fin de realizar un barrido en el tiempo y poder visualizar el comportamiento de la potencia del panel, dicho de otra manera, este montaje extrae la curva P-V del panel simulado.

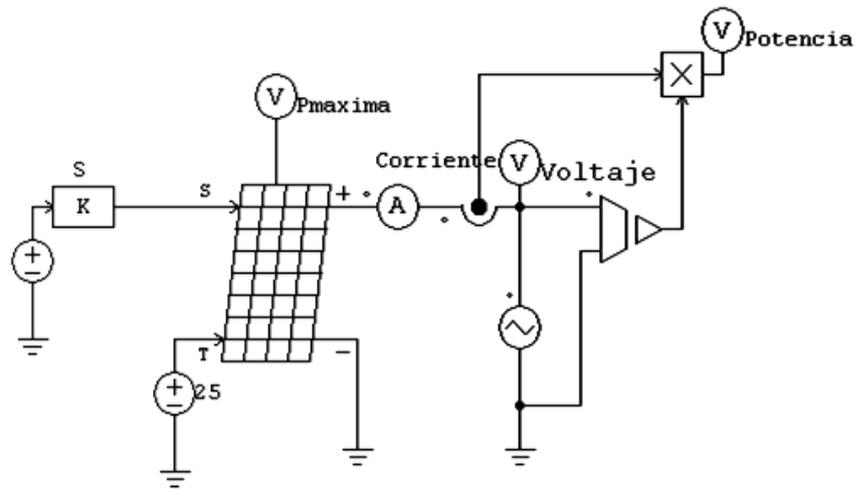


Figura 3. Circuito montado en PSIM para obtener las curvas P-V del panel fotovoltaico.

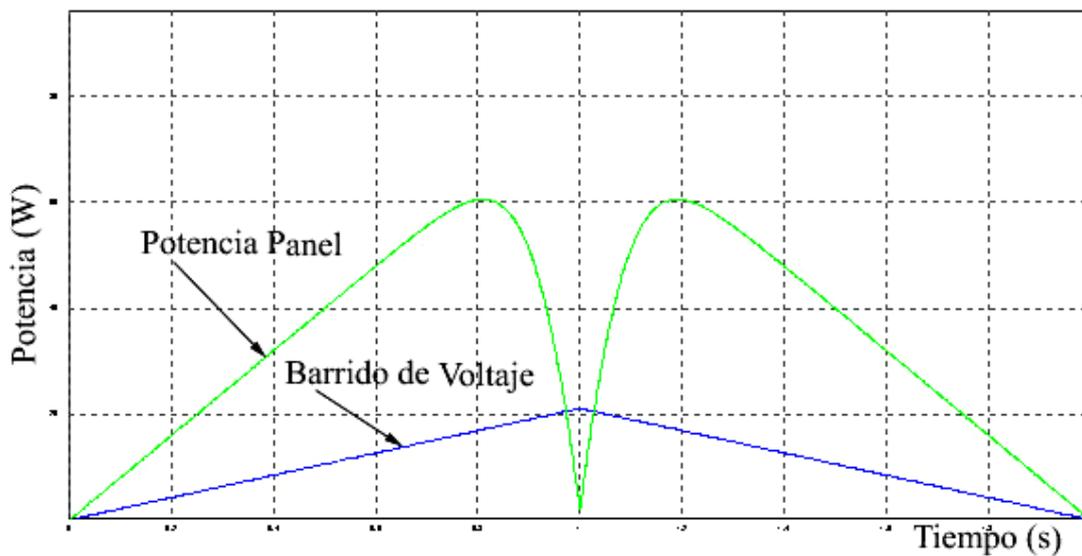


Figura 3.1 Análisis de las curvas del panel por medio de la simulación

Al observar la figura 3.1 se puede analizar el comportamiento del panel solar simulado con los datos del panel solar referenciado en la tabla 1, en los paneles solares el máximo punto de potencia se encuentra aproximadamente el 75% del voltaje de circuito abierto. Para este caso en particular, su punto de máxima potencia esta aproximadamente entre el 80 y 83%, 80% para condiciones de radiación máxima y 83% para condiciones de radiación mínima. Es por esto que muchos diseños emplean el método del VOC cercano a este valor para extraer el MPP del panel. Esto es válido sólo para condiciones de radiación uniforme, ya que suele variar muy poco. Visto de otra manera cuando el panel solar está cerca de su voltaje de circuito abierto, es

allí donde la potencia máxima puede ser obtenida. Sin embargo cuando las condiciones climáticas dejan de ser tan favorables, otro tipo de situaciones impiden que el panel reciba radiación solar uniforme. El método del VOC ya no es válido y se plantean nuevas interrogantes para la extracción del MPP.

Cuando se trabaja en la búsqueda del MPPT, se intenta simular un panel individual en condiciones de sombreado parcial, pero esto en cualquier software de simulación es imposible. Por esta razón es necesario acudir a representaciones de otro tipo, que ayuden a entender como es el nuevo comportamiento del panel. La simulación de paneles en condiciones de sombreado no uniforme se puede obtener mediante la interconexión en serie o en paralelo de distintos paneles, cada uno sometido a una radiación diferente para generar una aproximación en condiciones de perturbación. La figura 3.2 muestra un circuito para la simulación de 5 paneles en serie.

Esta conexión permite realizar diferentes variaciones asumiendo el conjunto de todos los paneles como uno solo. Por ejemplo en uno de los paneles podemos variar temperatura, diferente radiación y con esto obtener las gráficas correspondientes a estas alteraciones generalizadas sobre un panel solar. De igual manera la potencia del panel puede aumentar o disminuir dependiendo la cantidad de paneles que se tengan en serie.

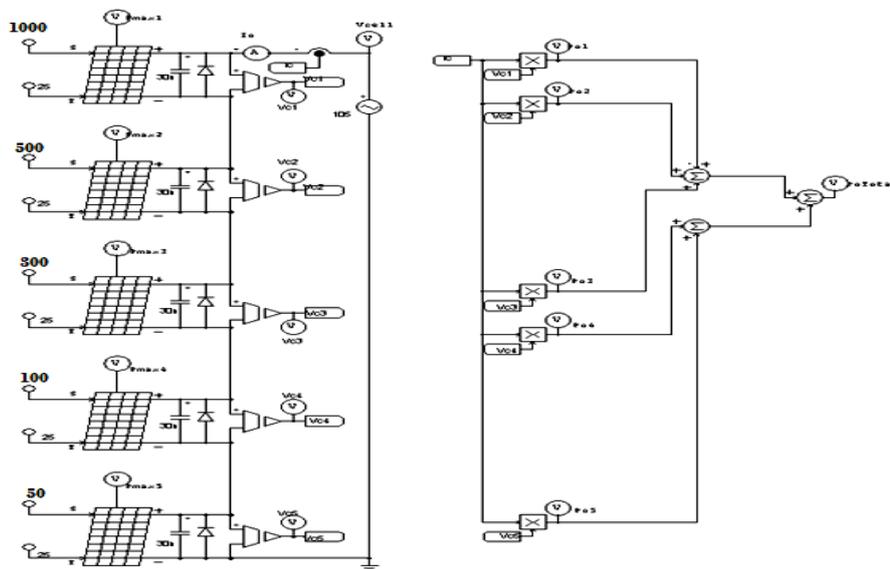
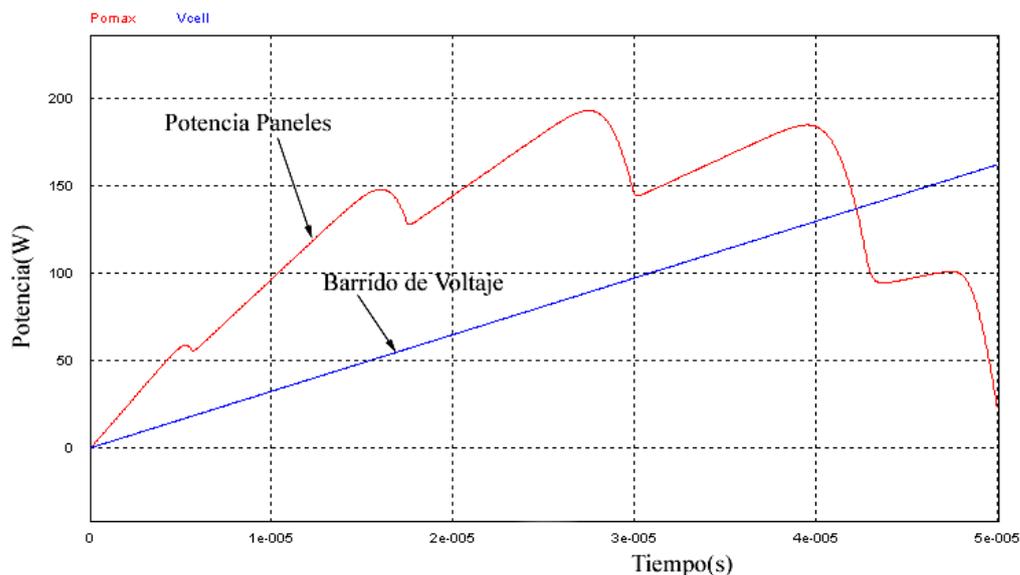


Figura 3.2 Conexión varios paneles para simular diferentes perturbaciones.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de potencia vs voltaje, y las variaciones que se obtienen en el momento de trabajar varios paneles y con diferentes valores de radiación.



*Figura 3.3 Construcción de graficas con diferentes radiaciones*

Los resultados de la figura 3.3, nos permite llevar una aproximación del panel solar con diferentes parámetros de perturbación y caracterizar el panel de 20W para la implementación del algoritmo de búsqueda MPPTSC.

### **3.1 Selección del algoritmo**

Se realizan pruebas entre varios algoritmos el de perturbación & observación, el método diferencial y el conductancia incremental. Estos algoritmos son simulados por medio de PSIM, para poder analizar comportamiento frente a variaciones dadas por el panel.

En la figura 3.4 se puede ver el circuito que simula cada algoritmo con el convertidor Boost el cual fue propuesto para analizar los comportamientos de potencia y de esta manera definir el mejor, se debe aclarar que estas perturbaciones son realizadas solo con un panel, lo cual nos lleva a tener variaciones de radiación uniformes y esto no genera parámetros de potencia con múltiples picos, pero es un muy buen comienzo, para trabajar en el seguimiento del máximo punto de potencia con condiciones sombreadas.

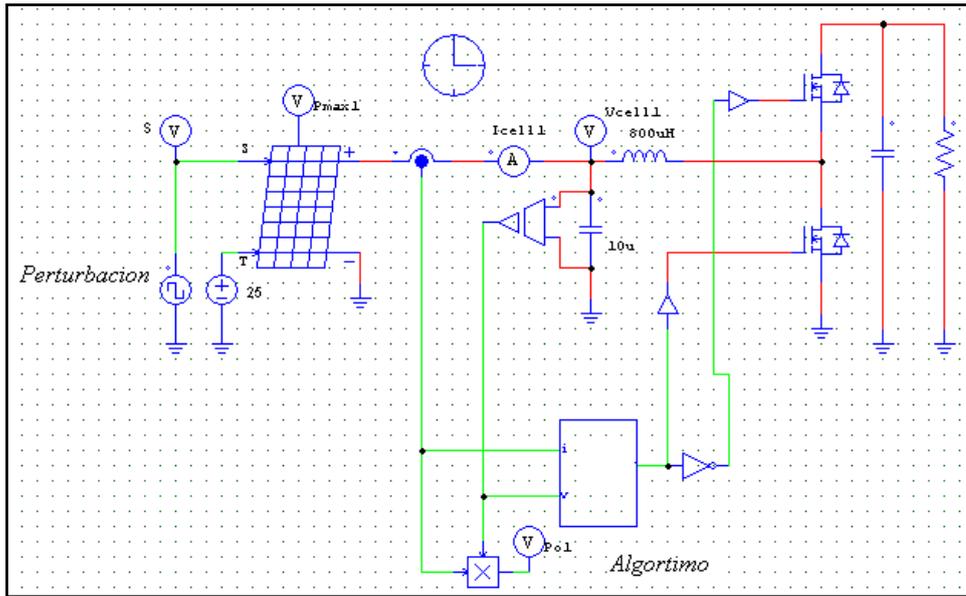


Figura 3.4 Simulación de diferentes Algoritmos con Radiación Uniforme.

En la figura 3.4 se puede ver la perturbación que se realiza al panel simulando diferentes de parámetros de radiación con una señal cuadrada, Cada uno de los algoritmos es comprimido en un bloque para tener mejor manejo de las variables y organizar mejor el circuito.

Las gráficas obtenidas se muestran en la figura 3.5 y son analizadas para definir los respuesta de los tres el algoritmos.

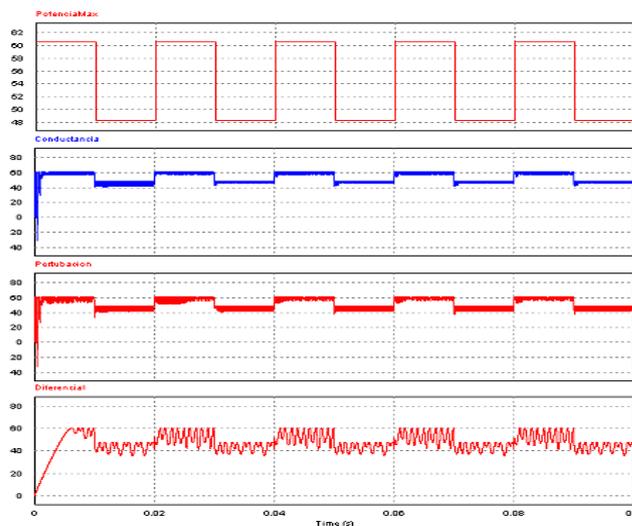


Figura 3.5 Simulación diferentes algoritmos Potencia vs Tiempo.

En la figura 3.5 se analiza como el algoritmo de Conductancia Incremental tiene menor oscilación frente a los cambios de potencia generados por los cambios a entrada del panel, mientras que los algoritmos de perturbación y de método diferencial oscilan y generan mayores cambios frente a las variaciones de potencia.

### 3.2 Algoritmo de Conductancia Incremental

Después de analizar diferentes algoritmos se desarrolla el de conductancia incremental. Este algoritmo tiene ventajas como: Precisión para llegar al máximo punto de potencia, poca oscilación alrededor del punto de máxima potencia y mayor eficiencia frente a las variaciones y perturbaciones generadas por fenómenos ambientales [13], [14].

El algoritmo parte de la medición del voltaje y corriente organizando los valores actuales de corriente  $I_f$ , como corriente final y los valores de corrientes anteriores como  $I_o$ , corriente inicial. Con estos valores se analiza el delta de corriente es decir,  $dI = I_f - I_o$  y se aplica el mismo concepto para el voltaje como voltaje final menos el voltaje inicial  $dV = V_f - V_o$ . Estos parámetros dan inicio al algoritmo y definen la conductancia incremental como  $\frac{dI}{dV}$ .

La finalidad de este diferencial es comparar sus valores con los generados de manera instantánea, es decir con la conductancia instantánea  $-\frac{I}{V}$ .

Para la búsqueda del MPP (*Máximo Punto de Potencia*) en el algoritmo se calcula la potencia como  $P = V \cdot I$ , y se relaciona al igual que con los parámetros de voltaje y corriente, el delta de potencia como  $dP = dP_f - dP_o$ . Los valores definidos por medio de los diferenciales se pueden expresar por medio de la derivada y con estos la pendiente de una recta que ubicada sobre la grafica de la figura 3.6 muestra que el máximo punto de potencia se cumple cuando su valor es igual a cero.

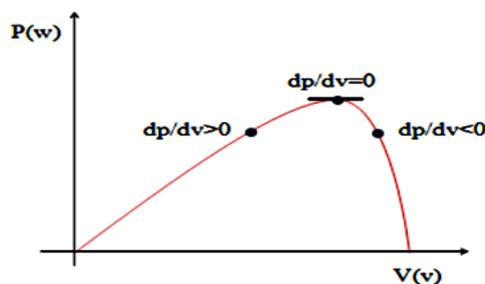


Figura 3.6 Análisis alrededor del punto máximo de potencia

Para poder definir mejor el algoritmo se tiene como prioridad tres condiciones:

- a) La conductancia Incremental debe ser igual a la conductancia instantánea
- b) Se debe calcular el delta de potencia.
- c) El máximo punto de potencia se cumple cuando las derivadas generadas sobre estos valores es igual a 0.

Entonces,

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (1)$$

Si tomamos el diferencial de la potencia con respecto al voltaje y derivamos parcialmente, demostramos como los valores de la conductancia incremental son iguales a la conductancia instantánea.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V*I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad \text{Igualando a cero } I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad \text{entonces } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2)$$

Cuando estas condiciones no se cumplen, se analizan los puntos alrededor del valor máximo de la siguiente manera:

$$\text{Si } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, \text{ entonces } \frac{dP}{dV} > 0 \quad (3)$$

$$\text{Si } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, \text{ entonces } \frac{dP}{dV} < 0 \quad (4)$$

Estos cambios de potencia dependen de las perturbaciones sobre el panel solar y se ven reflejadas en las variaciones que tiene la corriente alrededor del punto de máxima potencia. Este es el punto de partida para el MPPTSC (Maximum Power Point Tracker Shaded).

El diagrama de flujo de la figura 3.6.1 muestra el método inicial para calcular el máximo punto de potencia. En este diagrama se observan los condicionales de voltaje y corriente para poder variar el ciclo útil D.

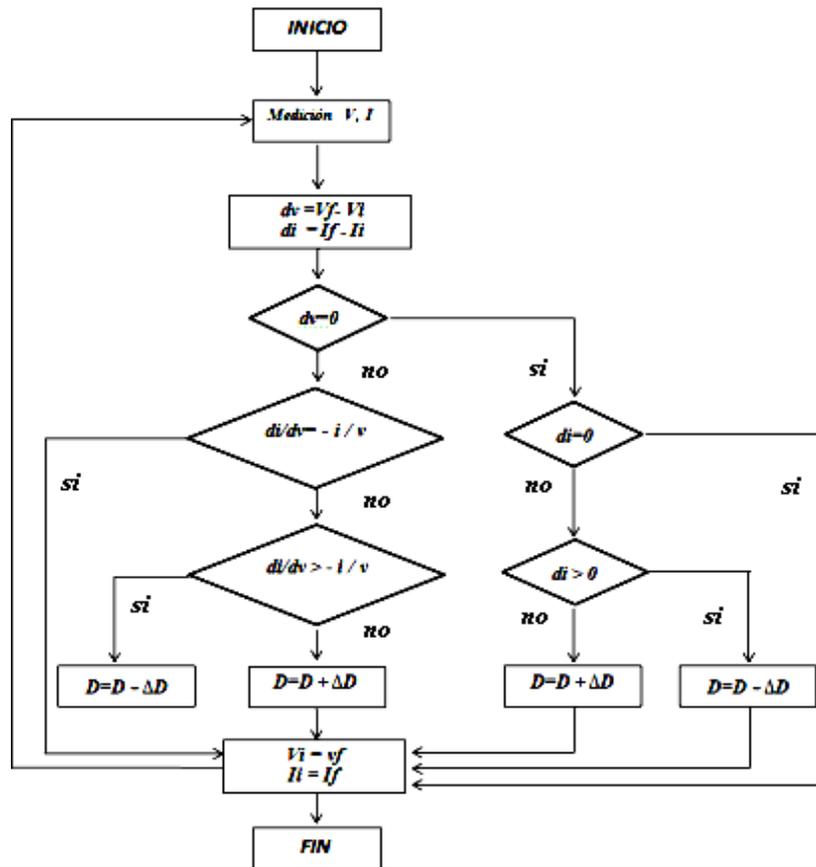


Figura 3.6.1 Diagrama de flujo algoritmo.

### 3.3 Simulación Algoritmo

Para analizar el algoritmo se toma la decisión de trabajar con dos herramientas de simulación como Matlab y Psim. En Matlab se desarrolla todo el algoritmo de conductancia incremental por medio de Simulink.

Dentro del algoritmo que se implementa para diferentes variaciones sobre el panel, se tiene en cuenta no solo de Conductancia Incremental, también se hace una mejora la cual funciona mejorando el criterio de búsqueda del algoritmo analizado anteriormente.

Esta mejora consiste en realizar también una condición para la potencia y direccionarla según las condiciones sobre el algoritmo actual.

El diagrama de flujo del anexo 3 muestra los parámetros adicionales al algoritmo encontrado con el fin de mejorar la búsqueda con diferentes variaciones de potencia.

En PSIM se genera la simulación del panel solar ya que este software dispone de un bloque específico de energías alternativas y nos permite variar las condiciones del panel como temperatura, radiación, tensión etc., para poder realizar las pruebas necesarias y analizar el comportamiento en el control del ciclo útil del convertidor.

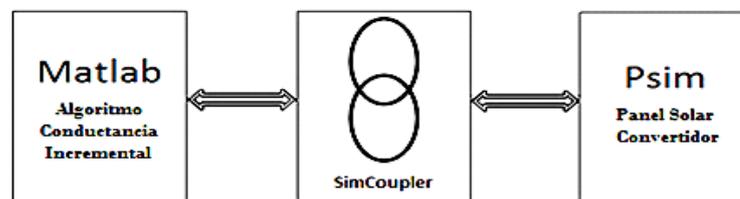
*Nota: El convertidor DC será analizado en próximos capítulos.*

### 3.3.1 Enlace PSIM- Matlab

Para comprobar el algoritmo se desarrolla la comunicación entre PSIM-Matlab esto es posible utilizando el bloque SimCoupler, este módulo proporciona una interfaz para la co-simulación entre estos dos programas.

El módulo SimCoupler Matlab / Simulink permite implementar y simular circuitos de potencia en su forma original, así en gran medida la reducción del tiempo de configurar y simular un sistema que incluye elementos de energías alternativas [15 ],[16 ].

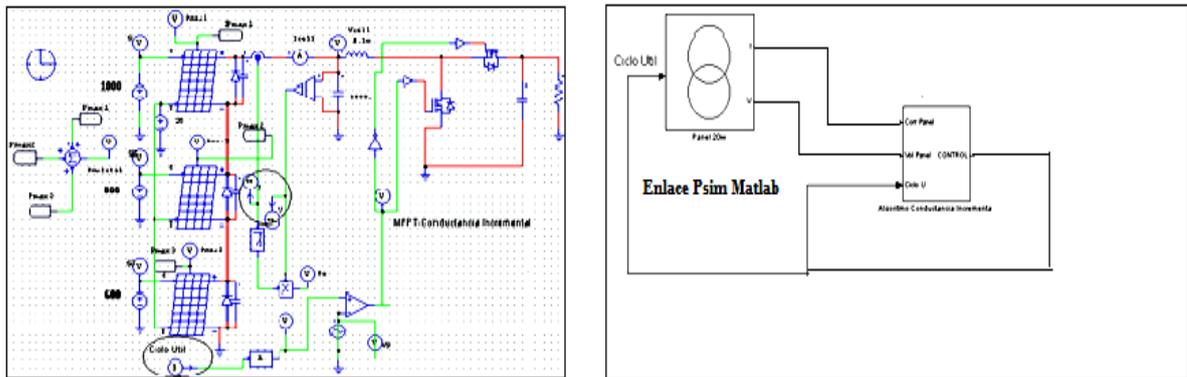
El diagrama de la figura 3.7 nos permite ver el bloque específico para realizar esta co-simulación. Este bloque se encuentra en Simulink o se puede descargar para poder ejecutarlo dentro del aplicativo. Su configuración depende de la cantidad de variables de entrada y salida que sean necesarias y su comunicación es bidireccional, es decir, se puede tener lectura desde Matlab a PSim y lectura de Psim hacia Matlab.



*Figura 3.7 Diagrama de bloques SimCoupler*

A continuación se muestra la conexión del algoritmo realizado en Matlab y el convertidor simulado por medio de Simulink.

El diagrama de la fig 3.8 muestra la conexión , lectura del convertidor y las variables de voltaje y corriente provenientes de los paneles. La respuesta a estas variables dadas por el algoritmo de MPPT se reflejan en el Ciclo Util, realimentado en Psim para analizar el comportamiento directamente sobre la planta. Este esquema permite simular y realizar diferentes análisis por medio de las gráficas de potencia, voltaje y corriente.



*Figura 3.8 Conexión Modulo Psim-Matlab*

Para ver el comportamiento sobre el convertidor se muestra la Figura 3.9 en el esquema se implementa la conexión de tres paneles solares en serie, con el fin de realizar variaciones de radiación y temperatura. Se muestra la interface dada en Psim por medio de sensores de corriente y de tensión para comunicarlo con Matlab, tambien se puede ver la recepción del ciclo util que se adecua para la modulación necesaria sobre el convertidor.

Las graficas que se ven en la parte inferior corresponden al comportamiento que se tiene en potencia , voltaje y corriente. Para este ejemplo la radiancia sobre el primer panel es de  $1000\text{w/m}^2$ , en el segundo de  $800\text{w/m}^2$  y el tercero de  $600\text{w/m}^2$ . Estos niveles de radiacion muestran cambios sobre las graficas generando diferentes puntos de potencia o multiples picos.

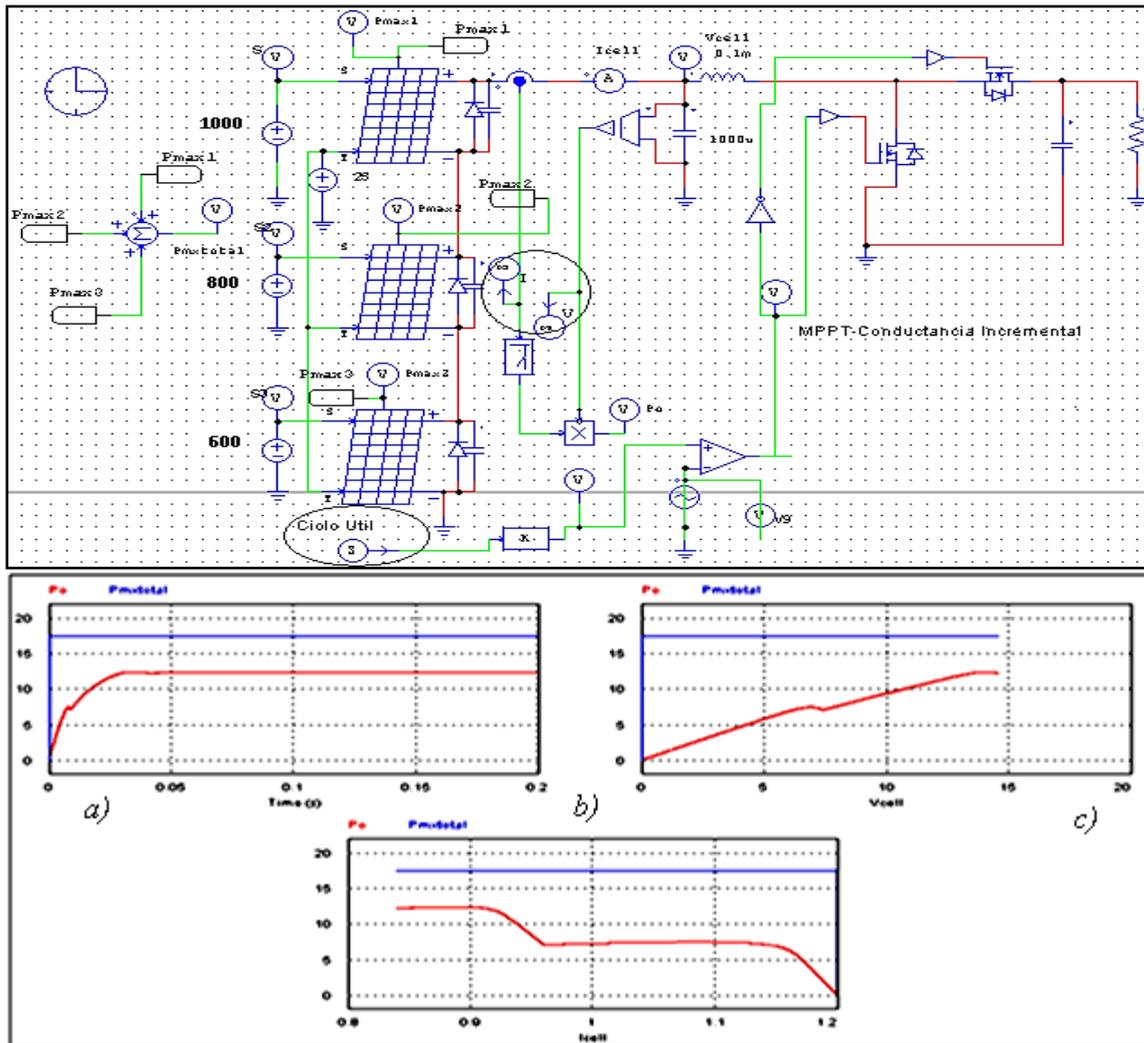
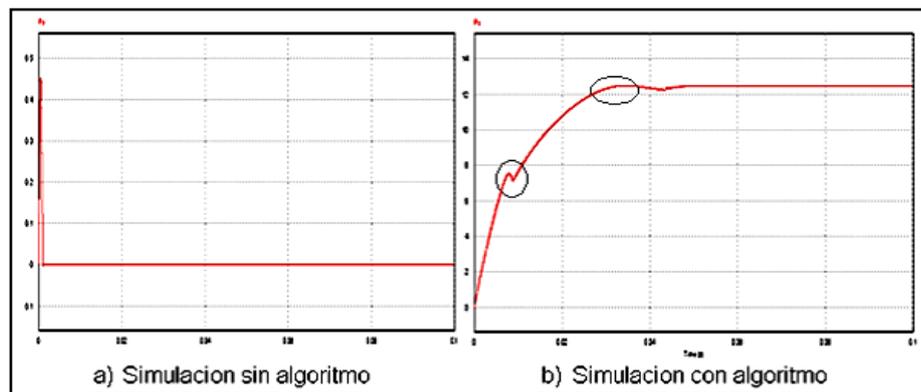


Figura 3.9 Diagrama de simulación en Psim a) Potencia vs Tiempo, b) Potencia vs Corriente, c) Potencia vs Voltaje.

Después del análisis del comportamiento del panel y el enlace Psim-Matlab, se puede simular el algoritmo, obteniendo una aproximación del comportamiento del panel. La potencia máxima generada por medio de estas perturbaciones se muestra en la figura 3.10 comparando el comportamiento del panel sin controlador y luego implementando el algoritmo.



*Figura 3.10 Simulación del algoritmo*

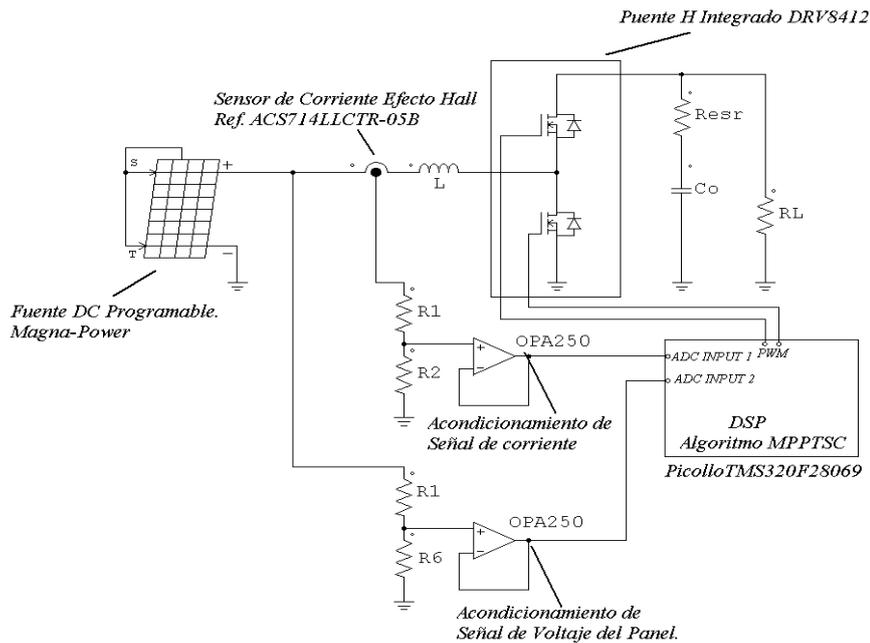
La figura 3.10 muestra el comportamiento de la Potencia vs el Tiempo con rango de potencia hasta 14 W. La grafica a), permite ver el circuito simulado sin control llevando la potencia a cero. En la grafica b), se implementa el algoritmo desarrollado en Matlab mostrando el aumento de potencia y como el algoritmo pasa por uno de los dos puntos ubicándose sobre el máximo, llegando a una valor aproximado de 12.45W esto muestra que el MPPTSC funciona.

### 3.4 Hardware e Implementación

Para realizar pruebas del algoritmo propuesto en este trabajo, se realiza un montaje experimental compuesto de las siguientes partes:

- a) Fuente de Voltaje DC, que emula el comportamiento del panel solar.  
DSP (El algoritmo MPPTSC propuesto es programado en C++ dentro de este dispositivo)
- b) Convertidor DC/DC Boost (Que procesa la potencia disponible en el panel y la entrega a una carga mediante un voltaje constante).
- c) Sensores de las variables análogas (Voltaje y Corriente) necesitadas por el algoritmo MPPTSC.4
- d) Carga. (Ajustada para obtener la máxima potencia disponible de la fuente de voltaje DC emulando el comportamiento del panel solar en diferentes condiciones)

A continuación se muestra en la figura 3.11, el diagrama general del montaje experimental, y posteriormente se realiza el diseño necesario para poder probar el algoritmo.



*Figura 3.11 Montaje Experimental para prueba del algoritmo Propuesto.*

El hardware es realizado con un convertidor Boost cuya topología permite elevar la tensión. El panel solar es emulado mediante una fuente programable de potencia Magna-Power Electronics. La adquisición de datos y el algoritmo está implementada mediante un DSP Piccolo TMS320F28069 de Texas Instruments.

### 3.4.1 Selección del DSP

Después de realizar diferentes pruebas, se toma la decisión de trabajar con el DSP TMS320F28069, analizando algunas características y ventajas para la implementación del algoritmo como:

- a) Capacidad de procesamiento de 90Mhz.
- b) Unidad de punto flotante.
- c) Facilidad para el manejo de PWM.
- d) Puerto USB.

El algoritmo es implementado en este micro-controlador y se configura para poder trabajar la frecuencia del convertidor Boost en este caso a 100Khz, dos puertos de entrada y un puerto de salida. Los puertos de entrada son utilizados para tomar los datos del sensado de corriente y

voltaje provenientes del emulador Magna-Power. Estos datos son utilizados para realizar el  $dI = I_o - I_f$  y  $dV = V_o - V_f$  que son los parámetros principales para comparar los valores de conductancia incremental con la conductancia inicial, es decir  $dI / dV = - I / V$ . El puerto de salida es conectado al convertidor y es utilizado para el control del PWM

### 3.4.2 Selección del Convertidor

Para realizar pruebas del algoritmo se hace necesario un convertidor DC-DC, teniendo en cuenta las características del panel solar y diferentes aplicaciones que se pueden tener a futuro como alimentación de motores, cargadores de baterías etc. Se toma la decisión de implementar un convertidor Boost.

### 3.4.3 Diseño del Convertidor

El diseño del convertidor DC-DC involucra la selección de sus componentes principales, capacitores de entrada y salida, el dimensionamiento de los switches de potencia y la inductancia de filtrado.

El convertidor está conectado entre la salida del panel solar y la carga predefinida, para este caso son 20W a 40VDC, aprox. 220OHM como el punto de operación de máxima potencia de salida. Se ha escogido para aumentar la eficiencia tradicional del convertidor Boost, la topología medio puente o dos switches para el diseño. También denominado boost síncrono.

A continuación se muestra la tabla 2 de condiciones para el diseño del convertidor boost síncrono:

Voltaje Entrada Mínimo	10 VDC
Voltaje Entrada Máximo	25 VDC
Voltaje de Salida	40 VDC 1% Ripple 0,5A Corriente Salida
Voltaje de Caída en los switches en estado de Saturación o cierre.	0VDC (Considerando que no hay pérdida);

	VDS(sat) =0;
Dmax	Ciclo útil del convertidor DC-DC en estado de mínimo voltaje de entrada.  Nota: (El Voltaje de entrada al convertidor es el voltaje del panel)
Dmin	Ciclo útil del convertidor DC-DC en estado de máximo voltaje de entrada.  Nota: (El Voltaje de entrada al convertidor es el voltaje del panel)
IL	Corriente que circula por la inductancia del convertidor L y que es igual a la corriente de salida del panel.  IL=0.5A
ILripple corriente de Entrada IL.	El ripple de corriente de entrada depende del valor de la inductancia L de filtrado y se escoge por lo general para que sea de un 10% del valor de IL.  ILripple= 0.05A
Fs	Frecuencia de switcheo del convertidor.  Fs=100kHz
Resr	Resistencia Equivalente serie de la capacitancia de salida que conforma el filtro del convertidor DC-DC
Co	Capacitancia de Salida del convertidor
Dmin	Ciclo útil del convertidor DC-DC en estado de máximo voltaje de entrada.  Nota: (El Voltaje de entrada al convertidor es el voltaje del panel)

*Tabla 2 Condiciones para el diseño del convertidor boost*

Se procede a diseñar la inductancia del filtrado de corriente L. Teniendo en cuenta los voltajes de entradas y salidas máximas y mínimas, a partir de la siguiente ecuación se diseña.

$$D_{max} = \frac{V_o + V_d - V_{in(min)}}{V_o + V_d - V_{DS(sat)}} \quad (5)$$

Siendo la topología del convertidor en medio puente configurado como un Boost síncrono, y la potencia máxima igual a 20W, se puede aproximar en la ecuación  $V_d=0$  y  $V_{DS(Sat)}=0$  quedando la ecuación:

$$D_{max} = \frac{V_o - V_{in(min)}}{V_o} = \frac{30V - 10V}{30V} = \frac{20V}{30V} = 0,66 \quad (6)$$

Ahora se calcula Dmin a partir de la siguiente ecuación:

$$D_{min} = \frac{V_o - V_{in(max)}}{V_o} = \frac{30V - 25V}{30V} = \frac{5V}{30V} = 0,16 \quad (7)$$

El cálculo del valor de la inductancia se realiza mediante la ecuación (8) asignando un porcentaje de variación para IL. El porcentaje asignado es del 10%, por tanto  $\Delta I_L = 0.05A$ , y empleando el valor para el peor caso del voltaje de entrada es decir,  $V_i=10V$ .

$$L_{min} = \frac{V_{in(min)} * D_{max}}{f_s * \Delta I_L} = \frac{10V * 0.66}{100kHz * 0.05A} = \frac{6,6V}{5000} = 1200\mu H \quad (8)$$

Para la implementación del convertidor Boost síncrono se utiliza un Puente H integrado en configuración medio puente de Texas Instrument, ref. DRV8412, que incluye características, como operación hasta 52V con corriente máxima de 2A.

El Puente H integrado puede operar hasta 500kHz de frecuencia de switcheo, tiene protección por exceso de corriente ciclo a ciclo y prevención contra conducción de los dos switches del medio puente usado para el Boost síncrono.

El cálculo del capacitor de salida controla el ripple del voltaje presente en la salida, y se determina por medio de la ecuación (9).

$$\Delta V_o = \frac{I_o(max) * (1 - D_{min})}{f_s * C_o} + I_p * Resr \quad (9)$$

Despejando para  $C_o$  y eliminando los efectos de resistencia serie equivalente  $Resr$  del Capacitor al escoger uno de bajo ESR se obtiene:

$$C_o = \frac{I_o(max)*(1-D_{min})}{f_s*\Delta V_o} \quad (10)$$

$$C_o = \frac{1A*(1-0.16)}{100kHz*0.3V} = \frac{(0.84)}{30000} = 28\mu F \quad (11)$$

En la figura 3.12 se muestra el circuito implementado por medio del DRV8412 donde reemplaza el Diodo de las configuraciones típicas en los convertidores Boost por un mosfet con el fin de generar sincronía en su conmutación.

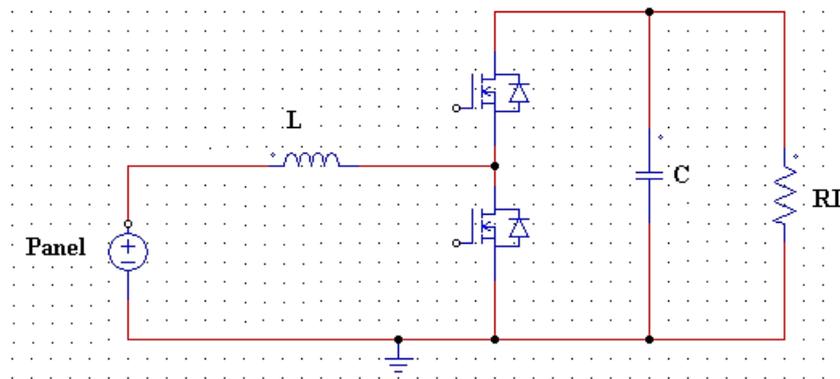


Figura 3.12 Topología convertidor Boost Síncrono

#### 3.4.4 Acondicionamiento de las señales de los sensores del Sistema MPPT para el DSP.

Al implementar el algoritmo de manera experimental es necesario adecuar las señales de Voltaje del panel solar y la corriente en la inductancia del convertidor Boost para ser llevadas a las entradas ADC del DSP que sólo permiten 3.3VDC máximo. Estas variables luego son ingresadas al DSP a través de sus módulos ADC y procesadas por el algoritmo MPPT para la localización del Máximo Global.

#### 3.4.5 Diseño del amplificador no inversor para la señal de Voltaje

Las señales de voltaje aceptadas por el DSP tienen un rango permitido entre 0 y 3.3V. El rango de voltaje en el que puede variar la fuente de emulación está entre 0 y 25VDC, por tanto es necesario un circuito de interfaz entre el voltaje en el panel y el rango de voltaje aceptado por

las entradas ADC del DSP. Se implementará un amplificador no inversor con ganancia menor a 1A continuación se muestra la topología del circuito (Figura 3.13).

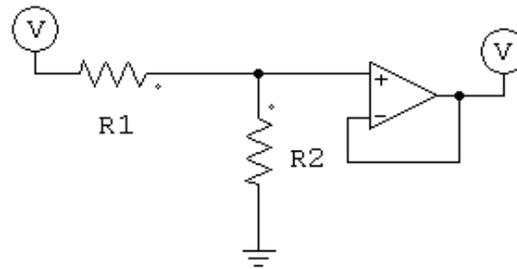


Figura 3.13. Amplificador No Inversor.

Para el diseño de este circuito se tienen en cuenta las siguientes condiciones de diseño:

$$V_i(\min)=0, V_i(\max)=30V, V_{sal}(\min)=0, V_{sal}(\max)=3.3VDC.$$

La ecuación que gobierna el comportamiento en estado estable del amplificador no inversor es:

$$V_o = m \times V_{in} \quad (17)$$

El valor de m depende de la siguiente ecuación:

$$m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (18)$$

De las condiciones de diseño se obtiene que  $m=0.11$ , los valores de  $R_1$  y  $R_2$  por tanto quedan como:

$$R_1=13k\Omega \text{ y } R_2=1.6k\Omega.$$

A continuación se muestra el diseño resultante correspondiente al voltaje del panel (Ver figura 3.14.)

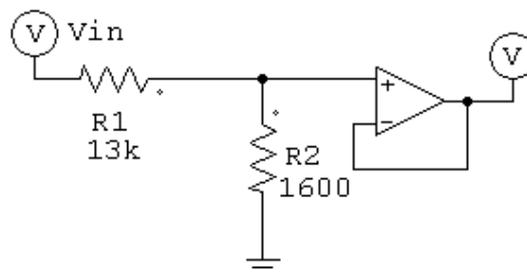


Figura 3.14 Diseño Amplificador no inversor como sensor del voltaje del panel.

### 3.4.6 Diseño del amplificador no inversor para la señal de corriente

Para la detección y medición de la corriente del panel se tienen en cuenta las mismas condiciones mencionadas previamente para el diseño del sensor de voltaje. El rango de corriente en que pueden variar la corriente de la fuente emuladora está entre 0 y 2A, por tanto es necesario un circuito de interfaz entre la corriente en el panel y el rango de voltaje aceptado por las entradas ADC del DSP. El sensor de corriente lineal de efecto hall de baja resistencia interna es el escogido para esta aplicación ref. ACS714LLCTR-05B-T, el cual tiene un rango de medición de +/- 5A el cual es apropiado para esta aplicación.

A continuación se muestra la configuración básica del sensor (Figura 3.15):

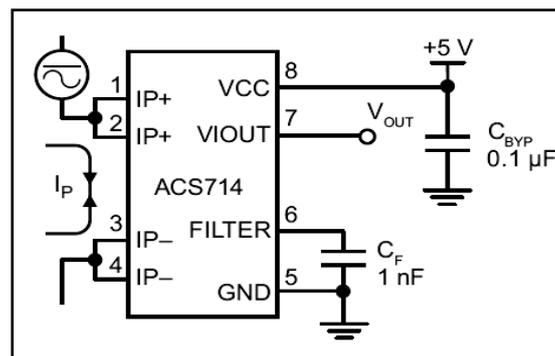


Figura 3.15 Circuito de aplicación del Sensor lineal de corriente de efecto Hall

ACS714LLCTR-05B

El voltaje de salida del sensor mide corrientes AC y DC simultáneamente, cuando el sensor no está midiendo ninguna corriente el voltaje de salida es 2.5VDC, en los casos de mínima y máxima corriente el sensor en la salida tiene 0 y 5VDC respectivamente. De nuevo es necesario ajustar este rango de voltaje al rango de entrada permitido por el ADC del DSP. Se diseña un circuito amplificador no inversor con las siguientes condiciones de diseño:

$$V_i(\min)=0, V_i(\max)=5V, V_{Sal}(\min)=0, V_{sal}(\max)=3.3VDC.$$

La ecuación que gobierna el comportamiento en estado estable del amplificador no inversor es:

$$V_o = m \times V_{in} \quad (19)$$

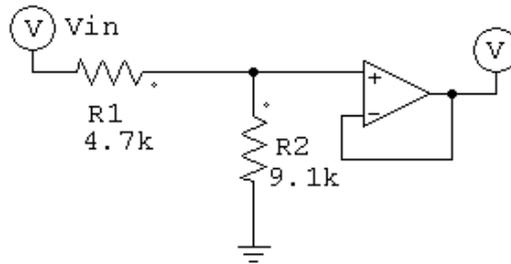
El valor de m depende de la siguiente ecuación:

$$m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (20)$$

De las condiciones de diseño se obtiene que  $m=0.66$ , los valores de  $R_1$  y  $R_2$  por tanto quedan como:

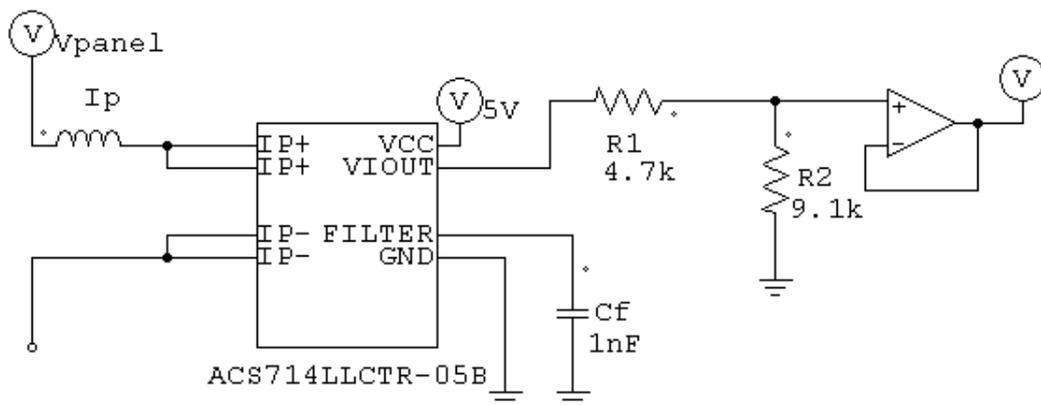
$R_1=4,7k\Omega$  y  $R_2=9.1k\Omega$

A continuación se muestra el diseño resultante correspondiente al amplificador no inversor para acondicionar la señal de corriente entregada por el sensor de corriente de efecto Hall. (Ver figura 3.16)



*Figura 3.16 Diseño Amplificador no inversor para salida del sensor de corriente del panel.*

El circuito completo incluyendo el sensor de corriente se muestra en la figura 3.17.



*Figura 3.17 Sensor de corriente completo con amplificador no inversor.*

### 3.5 Función de Transferencia

La función de transferencia se calcula analizando las respectivas de mallas y nodos del convertidor Boost en los dos estados de conmutación.

En la figura 3.18 se detallan los estados de conmutación del convertidor y los circuitos equivalentes, posteriormente se muestran las ecuaciones necesarias para hallar la función de transferencia por medio del promedio móvil.

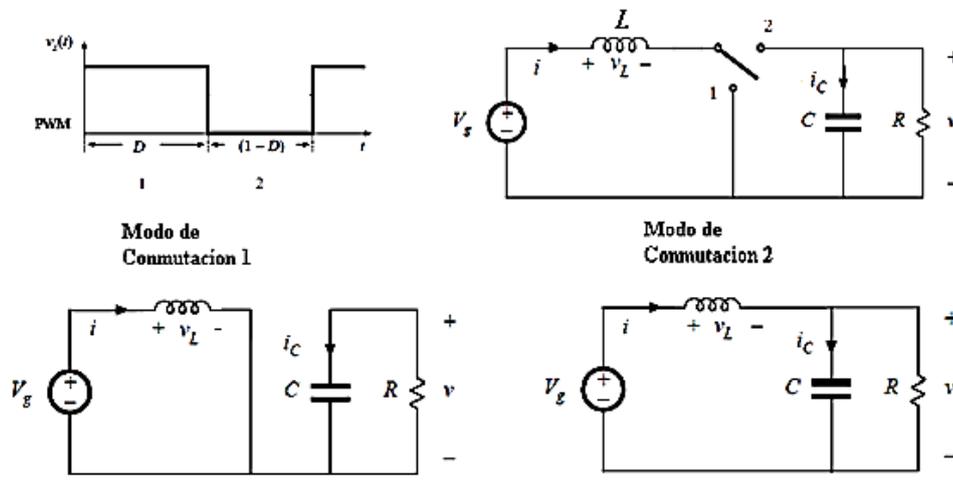


Figura 3.18 Modos de Conmutación convertidor boost.

Las ecuaciones analizadas en cada uno de los intervalos son:

Modo de conmutación 1 ( $D$ )

Modo de Conmutación 2 ( $D' = 1 - D$ )

$$V_L = \langle Vg \rangle, \quad i_C = -\frac{\langle v \rangle}{R} \quad v_L = \langle Vg \rangle - \langle v \rangle, \quad i_C = \langle i \rangle - \frac{\langle V \rangle}{R} \quad (12)$$

Para  $\langle v_L \rangle$  sumamos los términos en conmutación 1 y conmutación 2:

$$\langle v_L \rangle = D \langle Vg \rangle + D' \langle Vg \rangle - D' \langle v \rangle \quad (13)$$

Simplificando la expresión tenemos

$$\frac{d\langle i \rangle}{dt} = \frac{\langle Vg \rangle - D' \langle v \rangle}{L} \quad (14)$$

Para  $\langle I_C \rangle$  sumamos los términos de conmutación 1 y conmutación 2:

$$\langle i_C \rangle = -D \frac{\langle v \rangle}{R} + D' \langle i \rangle - D' \frac{\langle v \rangle}{R} \quad (15)$$

Simplificando la expresión tenemos

$$\frac{d\langle v \rangle}{dt} = \frac{D' \langle i \rangle - D' \frac{\langle v \rangle}{R}}{C} \quad (16)$$

Estas ecuaciones se utilizan para trabajar mediante Matlab con el programa del Anexo 2, el cual linealiza aplicando el método del Jacobiano y determina las ecuaciones de estado y la función de transferencia mediante el comando tf.

Las ecuaciones de estado para definir la función de transferencia y determinar el tiempo de respuesta del convertidor son:

$$\text{Para } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \text{ por tanto } \dot{\mathbf{x}} = \dot{\begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}} \text{ entonces} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (17)$$

$$\text{Para } \mathbf{u} = \mathbf{Vg} \text{ y } \mathbf{y} = \mathbf{v} \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (18)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & (D - 1) \\ -(D - 1)/C_0 & -1/(C_0 * R) \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} v/L \\ -1/C_0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{0} \quad \mathbf{1}) \quad \mathbf{D} = \mathbf{0} \quad (20)$$

A continuación se muestra el comando de linealización, ecuaciones de estado y función de transferencia en Matlab:

### 3.5.1 Linealización y Jacobiano

```
syms i v g L Co R D
f1 = (vg/L)-(v*(1-D)/L)
f2 = (i*(1-D)/Co)-(v/(R*Co))
f = [f1;f2]
x = [i;v]
u = [D]
```

```

y = [v]

A1=jacobian(f,x)

B1=jacobian(f,u)

C1=jacobian(y,x)

R=22;

vg=12;

i=2;

v=24;

Co=15e-6;

L=75e-6;

h=0.75;

A=eval(A1);

B=eval(B1);

C=eval(C1);

D=[0];

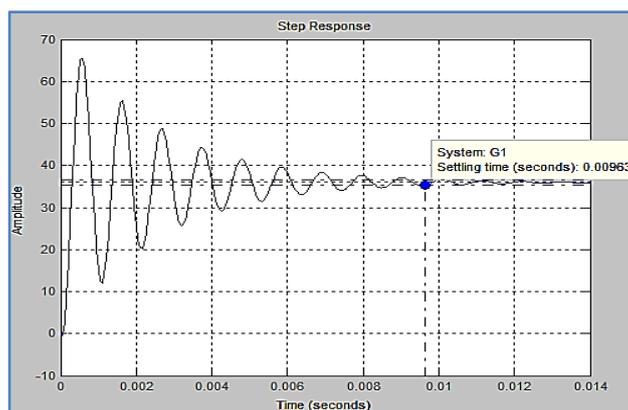
sys=ss(A,B,C,D);

G1=tf(sys)

step(G1)

```

El análisis para el tiempo de establecimiento del convertidor se determina por medio de la función paso de Matlab, este criterio es desarrollado para tener una referencia de tiempo del comportamiento sobre el algoritmo. En la figura 3.18 se muestra la amplitud como comportamiento del voltaje del convertidor en función del tiempo.



*Figura 3.18 Tiempo de respuesta convertidor*

### 3.6 Fuente Emuladora de Tensión DC

El emulador Magna-Power es una fuente programable DC que realiza variaciones de voltaje y corriente con una interfaz gráfica o panel de control para encontrar las condiciones deseadas. Esta fuente permite ajustar diferentes características como  $V_{co}$ ,  $I_{sc}$  y temperatura proveniente de los parámetros dados por los fabricantes en los paneles, también permite alterar sus condiciones iniciales de manera simultánea con el fin de asemejar las posibles perturbaciones que se pueden dar en uno o varios paneles solares.

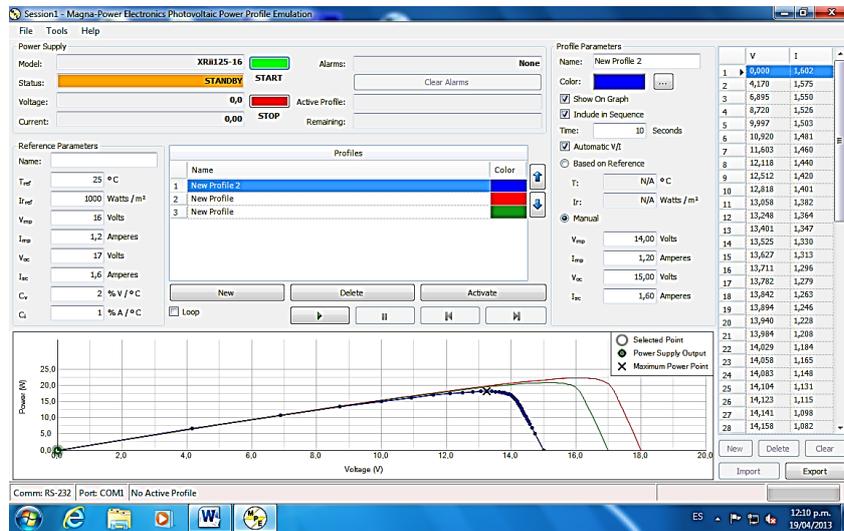
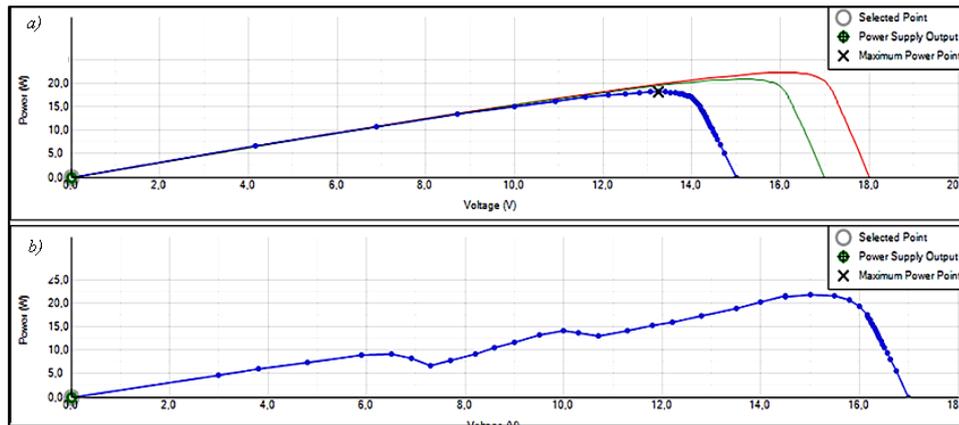


Figura 3.19 Fuente Magna Power y emulador fotovoltaico [17]

#### 3.6.1 Construcción de gráficas para pruebas del algoritmo

Aprovechando el fácil manejo de la Emulador Magna-Power, se generan los valores de voltajes y corrientes para la construcción de potencia con múltiples picos, estas graficas junto con el convertidor Boost nos permiten ver el comportamiento del algoritmo. Las gráficas para realizar las respectivas pruebas y análisis se muestran en la figura 3.20. En esta figura se puede ver la potencia en función del voltaje.



*Figura 3.20 Caracterización de potencia con diferentes picos*

El emulador Magna-Power permite un máximo de cincuenta valores de voltaje y corriente diferentes para la construcción de las gráficas. La grafica en la figura 3.20 a), se construye por medio de las características del panel solar como  $V_{co}$  (voltaje de circuito abierto),  $I_{sc}$  (corriente de corto circuito) que se configuran en el panel de control mencionado anteriormente.

La grafica de la figura 3.20 b) es construida manipulando los valores de voltaje y corriente para poder simular diferentes puntos máximos y así poder realizar pruebas del algoritmo.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Al conectar varios paneles solares en serie y cambiar las condiciones de radiación sobre cada uno, es posible analizar los diferentes valores de potencia que se pueden generar en sistemas fotovoltaicos. Cuando se generan estos valores se evidencian múltiples picos, los cuales pueden ser interpretados para extraer el máximo punto de potencia.

La co-simulación entre PSIM y MATLAB es una herramienta poco conocida pero de gran utilidad en la investigación de algoritmos MPPT, ya que su funcionamiento es sencillo y facilita estas aplicaciones debido a los módulos de energía solar que contiene PSIM.

El algoritmo de conductancia incremental analizado cumple solo con las variaciones en condiciones de radiación uniforme, este fue el punto de partida para modificarlo y encontrar otra alternativa con múltiples picos, analizando no solo la conductancia, también, la potencia logrando que sea de mayor utilidad para futuras aplicaciones de MPPTSC.

Los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo se pueden observar en la figura 4.2. En esta grafica se realiza la construcción de las graficas con diferentes variaciones y se prueba el algoritmo logrando diferenciar y seleccionar el MPPTSC propuesto en este proyecto.

La primer grafica corresponde a tres de las curvas programadas en la fuente Magna-Power, estas curvas son generadas con diferentes valores de  $V_{co}$  y de  $I_{sc}$  en el panel de control. El punto verde que se muestra en las curvas pertenece al MPP, esto en condiciones de radiación uniforme.

La segunda grafica muestra dos picos de potencia y es construida modificando los valor de voltaje y corriente generados por la fuente Magna-Power. El punto verde es el MPPTSC implementado pues en la curva se puede ver que el algoritmo tiene que diferenciar entre los dos puntos y ubicarse sobre el mayor.

La tercer grafica es nuevamente modificada y el algoritmo MPPTSC, se visualiza con el punto verde sobre uno de los máximos.

La cuarta grafica nuevamente es construida modificando los valores de voltaje y corriente para poder emular tres picos y se implementa el algoritmo MPPTSC, ubicando el punto verde como el máximo de los tres picos existentes.

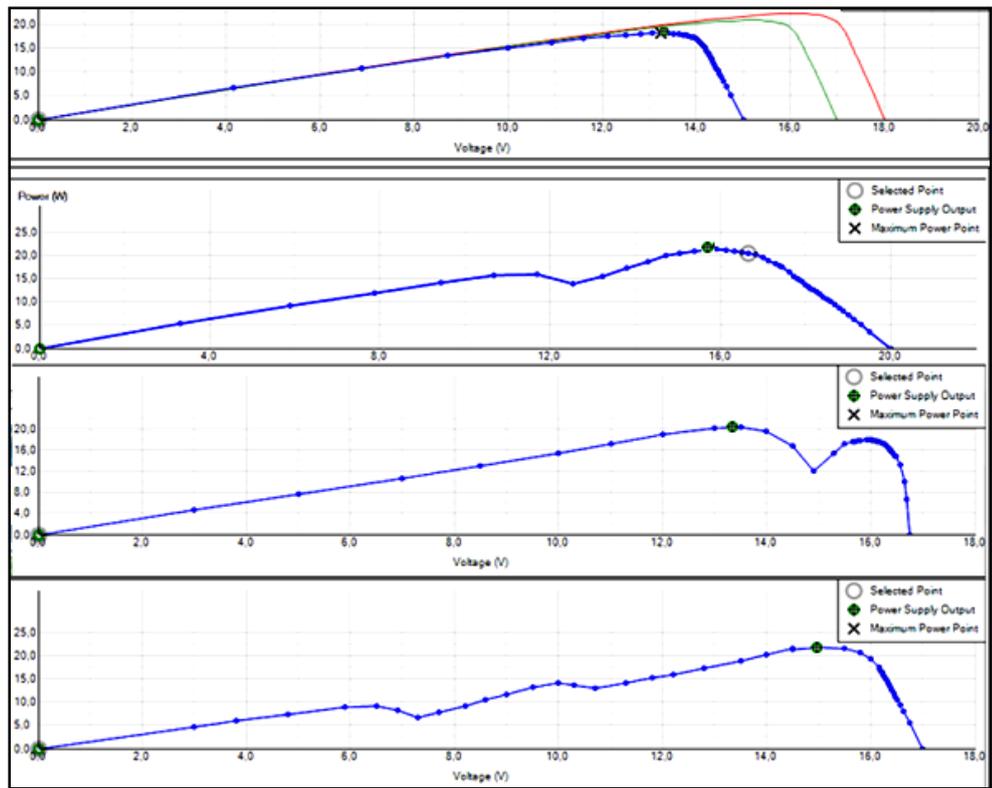


Fig. 4.1 Punto de Máxima Potencia sobre las Graficas de P vs V Implementando el algoritmo.

## 5. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo de investigación realizado para la implementación de un algoritmo MPPTSC, se puede concluir que al comparar el algoritmo de conductancia incremental con otros algoritmos, este algoritmo es más preciso debido a su poca oscilación alrededor del máximo punto de potencia.

Debido a la complejidad que se tuvo para tomar las mediciones de voltaje y corriente en el panel solar por las variaciones en el clima, la fuente DC Magna Power es la mejor herramienta que existe para este tipo de investigaciones.

La co-simulación realizada entre Psim y Matlab es de gran utilidad y se recomienda para otras aplicaciones.

El algoritmo de conductancia incremental es más completo cuando se hace un análisis no solo de la conductancia, sino de potencia, cuando se generan múltiples picos.

El análisis y los resultados sobre las simulaciones realizadas con el promedio móvil, evidenciaron este método como una alternativa para futuros algoritmos.

## 6. TRABAJOS A FUTURO

Durante el desarrollo de este proyecto, se desarrollaron diferentes métodos para definir un buen algoritmo. Se implemento un algoritmo con control difuso, este algoritmo falló en su intento por ubicar el punto de máxima potencia con múltiples picos. Entonces, al analizar el comportamiento de las graficas que generan múltiples picos, se analiza el concepto de promedio móvil como una alternativa.

El promedio móvil consiste en obtener un valor futuro de la variable de estudio a partir de una serie histórica de los valores de la variable. El procedimiento obtiene una media aritmética eligiendo de antemano el tamaño de la muestra e incorporando al promedio obtenido el valor de la variable siguiente hasta completar toda la serie histórica. [18].

Con base en esta definición, se piensa en implementar este concepto como una alternativa para el algoritmo MPPTSC.

Matemáticamente podemos definir el promedio como

$$\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

Entonces llevamos este concepto a una simulación tanto en Psim como en Matlab y los resultados que se muestran abren una alternativa para poder trabajar sobre este criterio en futuros algoritmos. En la grafica de la figura 6.1 se muestra la simulación de la derivada del promedio móvil sobre el comportamiento del panel.

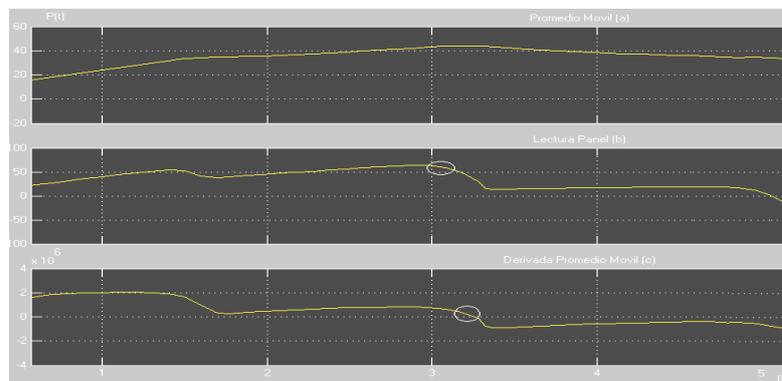
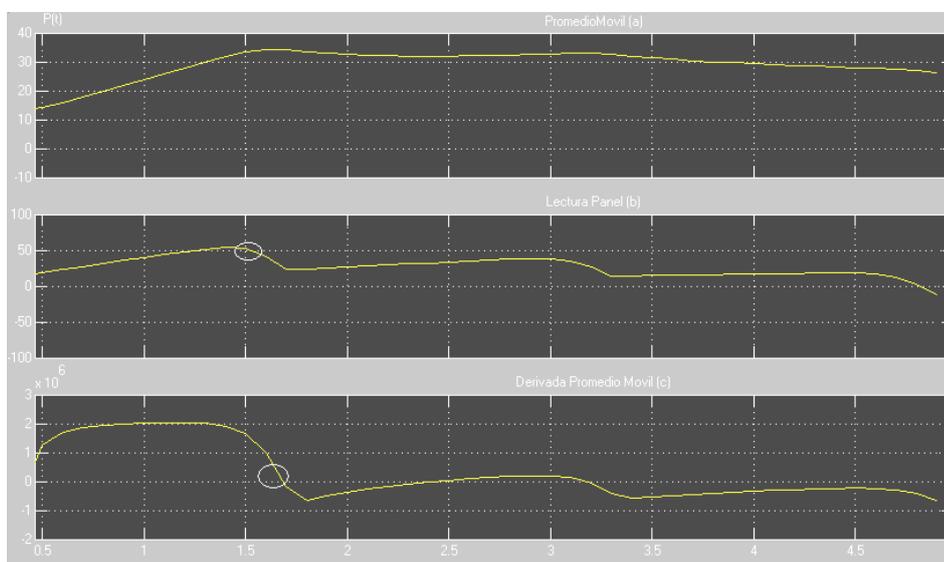


Figura 6.1 Comportamiento de promedio móvil

La figura 6.1 muestra la potencia de los paneles simulados en función del tiempo, la grafica a), permite ver el promedio móvil, en la grafica b), se observan los múltiples picos generados por variaciones sobre los paneles solar y en la grafica c) se muestra la derivada del promedio móvil. Los círculos que encierran a las graficas b) y c) muestran como la derivada cuando es cero, se aproxima al máximo valor de potencia de los múltiples picos.

En la figura 6.2 se varían las condiciones de los paneles para generar nuevas gráficas del comportamiento de los paneles y se analiza nuevamente como la derivada cuando se vuelve cero se aproxima al máximo punto de potencia.



*Figura 6.2 Resultado Análisis promedio móvil*

Estos resultados muestran como el promedio móvil puede ser un método utilizado para nuevos algoritmos que busquen el MPPTSC [18].

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

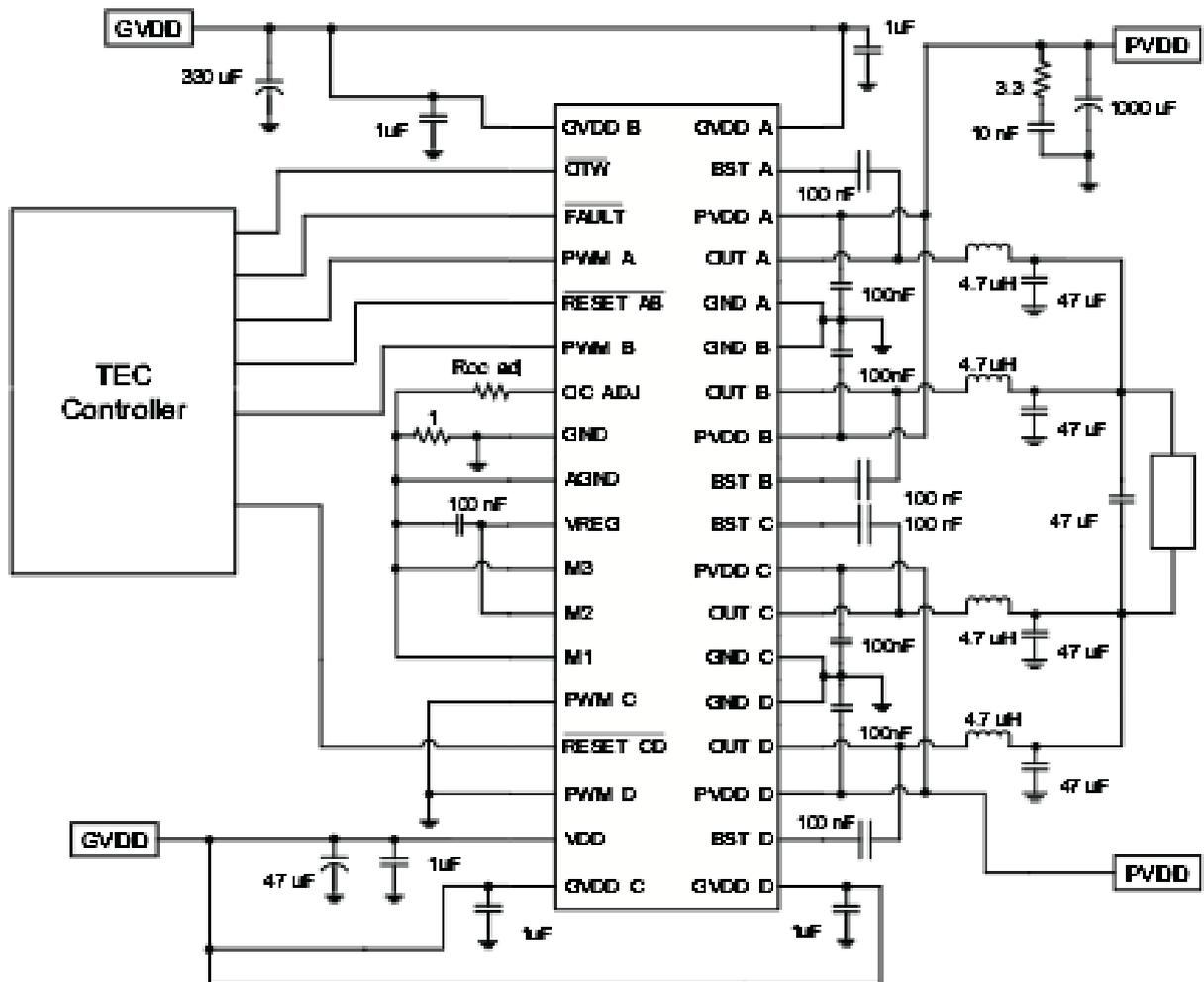
- [1] Humberto Rodríguez Murcia. Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects. #28 revista de ingeniería, Universidad de los Andes 2008.
- [2] Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. OWERENG '09. International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/POWERENG.2009.4915139.
- [3] Anand R.S. (2000). Photovoltaic: Technology of Next Millennium, Indian Institute of Technology Kanpur, 2000.
- [4] J. Barros, A. Mota “Maximum Power Point Tracker Applied in Batteries Charging with PV Panels” Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on Digital Object Identifier: 10.1109/ISIE.2008.4676969  
Publication Year: 2008 , Page(s): 202 - 207
- [5] Koutroulis, E.; Kalaitzakis, K.; Voulgaris, N.C “*Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System*” Power Electronics, IEEE transactions on , Volume: 16 , Issue: 1  
Digital Object Identifier: 10.1109/63.903988  
Publication Year: 2001 , Page(s): 46 – 54
- [6] Iov, F.; Blaabjerg, F, “*Power Engineering, Energy and Electrical Drives*”, 2009. OWERENG '09. International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/POWERENG.2009.4915139  
Publication Year: 2009.
- [7] Young-Hyok Ji; Doo-Yong Jung; Chung-Yuen Won; Byoung-Kuk Lee; Jin-Wook Kim; “*Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition*” Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/ECCE.2009.5316212  
Publication Year: 2009, Page(s): 307 – 312.
- [8] SALA PANO GABRIEL, GRUPO NAP. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. Madrid, España 2010 .ISBN 978-84-935049-6-0.

- [9] <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>.
- [10] <http://www.scribd.com/doc/45845512/10/%E2%80%93ALGORITMO-MPPT-DE-PERTURBACION-Y-OBSERVACION> (Libro) KNOPF, Hannes. Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a solar Powered Vehicle. Portland State University (1999).
- [11] Control characteristics of a fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded Miyatake, Masafumi ; Inada, Takeshi ; Hiratsuka, Isao ; Zhao, Hongyan ; Otsuka, Hisayo ; Nakano, Motomu Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. The 4th International Volume: 2 Publication Year: 2004, Page(s): 816 - 821 Vol.2
- [12] Comparison of Photovoltaic array maximum power point tracking technique - Patrick L Chapman, Trishan Eram.
- [13] Trishan Eram, Patrick L. Chapman (2007) "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking techniques", IEEE Transactions on energy conversion, vol 22 (2).
- [14] Bailon Buendía (2011) "Aspectos normativos para la conexión de generación fotovoltaica a la red en España e implementación de algoritmos MPPT" [Tesis de grado], Madrid, España, Universidad Carlos III de Madrid.
- [15] <http://www.powersimtech.com/index.php?name=simcoupler>
- [16] <http://www.powersimtech.com/manual/Tutorial%20-%20Simcoupler%20Module.pdf>
- [17] Fuente Magna-Power 200
- [18] <http://rosebelprobabilidadyestadistica.blogspot.com/2011/04/promedio-movil.html>
- [19] <http://www.censolar.es/menu2.htm>

## 8. ANEXOS

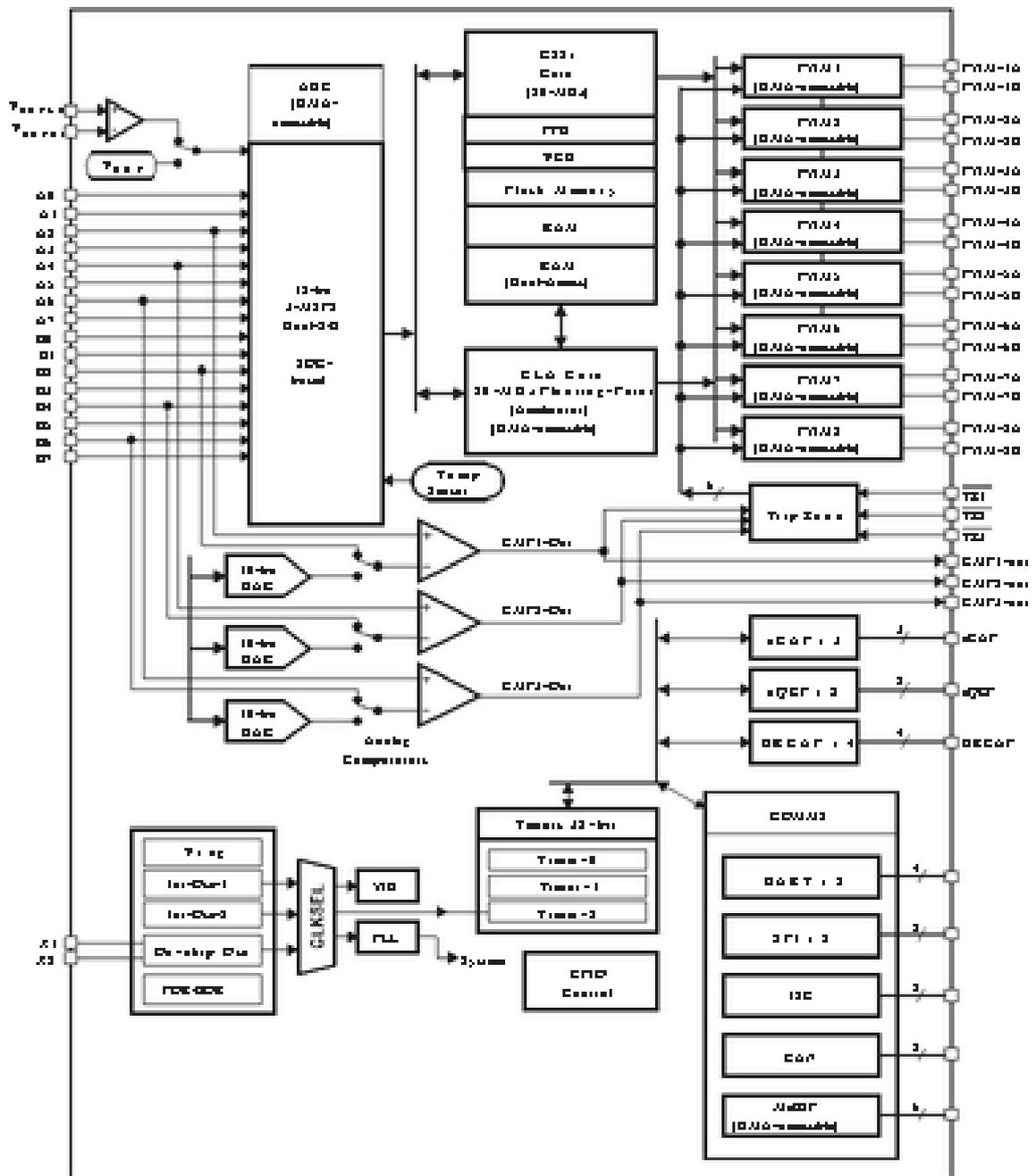
### Anexo 1

Diagrama Esquemático del Circuito Integrado DRV8412



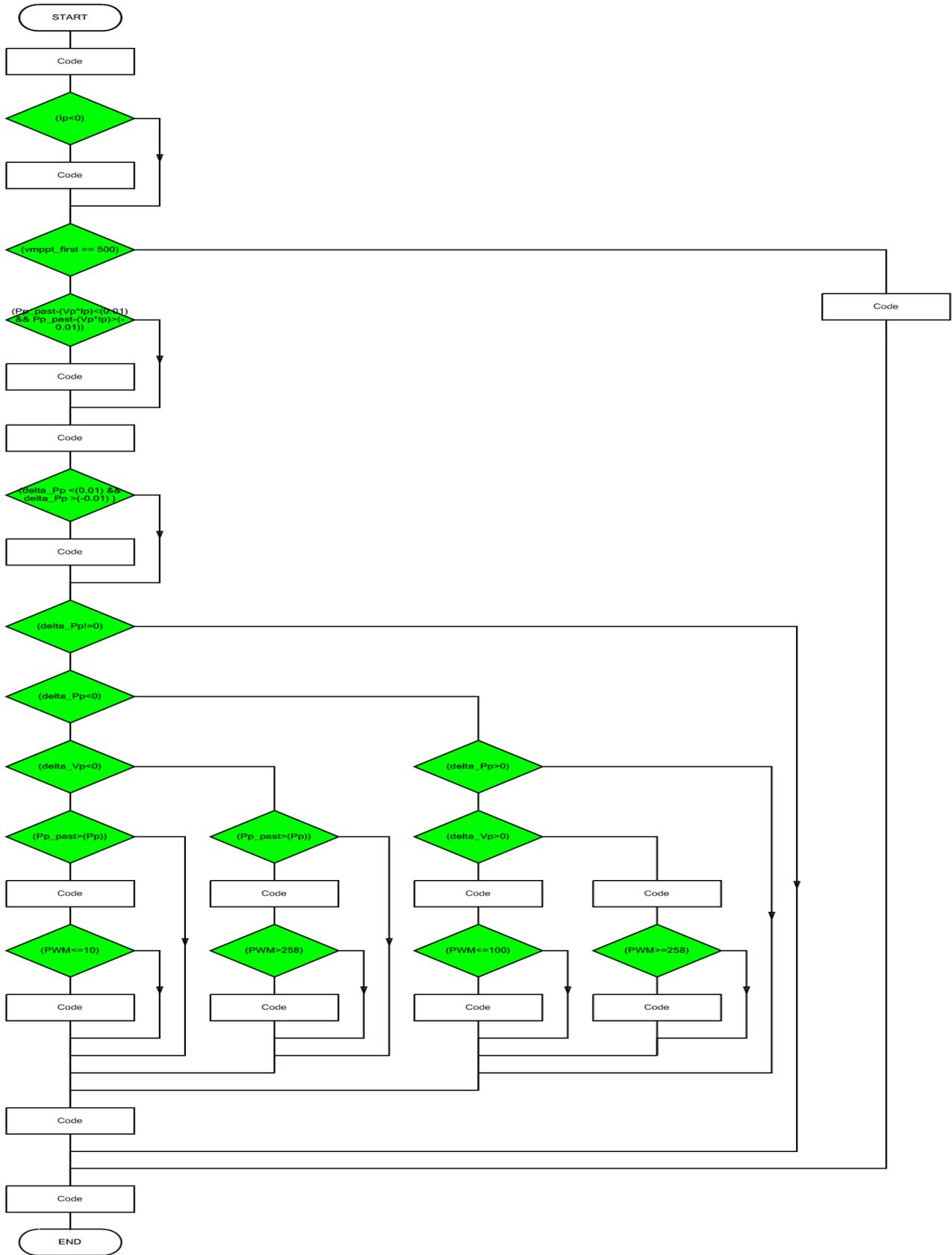
## Anexo 2

Diagrama de Bloques DSP TMS320F28069



### Anexo 3

#### ALGORITMO IMPLEMENTADO EN EL DSP TMS320F28069



## Anexo 4

### SISTEMA INTEGRADO

