



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Simulación mediante Psim de algoritmos de
seguimiento del punto de máxima potencia en
sistemas fotovoltaicos**

Autor: Víctor Paredes Cordero

Tutor: José Miguel Ruiz González

Fecha: 4 de Julio de 2014



Universidad de Valladolid

Título:

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos.

Resumen:

El proyecto se centra en el estudio de los diferentes algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos.

El objetivo principal es la descripción de los tipos de algoritmos que existen y el análisis mediante simulación de algunos de ellos, en los que se definen como evoluciona y qué acciones tiene que realizar el circuito de control de los sistemas fotovoltaicos, para que estos trabajen en el punto de máxima potencia.

El objetivo secundario del proyecto es la realización de una plataforma que nos permita el conocimiento de las partes del algoritmo y conocer cómo afectan las acciones que realiza en los sistemas fotovoltaicos. Estos circuitos de simulación están preparados para su simulación en el entorno Psim.

Palabras clave:

Algoritmos MPPT en sistemas fotovoltaicos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



0. Índice de Imágenes:	5
1. Introducción y objetivos del proyecto:	8
1.1 Introducción:	8
1.2 Objetivos del proyecto:	8
2. Energía solar y aplicaciones:	11
2.1 Energía Solar:.....	11
2.2 Paneles solares:.....	13
2.3 Célula fotovoltaica:.....	15
2.3.1 Descripción de la célula fotovoltaica:	15
2.3.2 Modelo de una célula fotovoltaica:	16
2.3.3 Parámetros eléctricos que definen cada célula:	18
2.3.4 Curvas P-V y I-V:	19
2.3.5 Conexión de las células:	21
2.3.5.1 Conexión en serie:.....	21
2.3.5.2 Conexión en paralelo:	21
2.3.6 Efectos de la temperatura y radiación solar:	22
2.3.6.1 Efectos de la radiación solar:	22
2.3.6.2 Efecto de la temperatura:	23
2.3.7 Condiciones estándar y TONC:.....	24
3. Resumen y objetivo del proyecto:	29
4. Convertidores de potencia CC/CC:	33
4.1 Convertidor Buck:.....	33
4.1.1 Relación entre tensión y corriente:.....	33
4.1.1.1 Análisis con el interruptor cerrado:	35
4.1.1.2 Análisis con el interruptor abierto:	37
4.1.1.3 Rizado de la tensión de salida:	39
4.1.1.4 Funcionamiento en modo de conducción discontinua:.....	41
4.2 Convertidor Buck-Boost:	44
4.2.1 Relaciones entre tensión y corriente:	46
4.2.1.1 Análisis con interruptor cerrado:	46
4.2.1.2 Análisis con el interruptor abierto:	47
4.2.1.3 Rizado de la tensión de salida:	51



5. Clasificación de los métodos de búsqueda del punto de máxima potencia:	53
5.1 Control indirecto:	54
5.1.1 Curve-Fitting:	54
5.1.2 Look-up Table:	55
5.1.3 Método de la tensión en circuito abierto del GFV:	55
5.1.4 Método de la corriente de cortocircuito del GFV.	56
5.1.5 Método de la tensión a circuito abierto de una célula de prueba:	56
5.1.6 Método β :	57
5.1.7 Conclusiones de los métodos indirectos:	57
5.2 Control directo:	58
5.2.1 Métodos de muestreo:	58
5.2.1.1 Método de la diferenciación:	58
5.2.1.2 Método de la tensión realimentada o tensión constante:	58
5.2.1.3 Método de Perturbar y Observar:.....	59
5.2.1.4 Método de la conductancia incremental (IncCond):.....	60
5.2.1.5 Método de la capacidad parásita:.....	61
5.2.2 Métodos por modulación:	62
5.2.2.1 Método de oscilación forzada:.....	62
5.2.2.2 Método de la lógica difusa:.....	63
6. Análisis de los posibles estados y zonas de funcionamiento de los algoritmos	
MPPT:	65
7. Algoritmo MPPT conductancia incremental.....	69
7.1 Introducción:	69
7.2 Análisis del algoritmo:	69
7.3 Posibles casos:.....	70
7.4 Diagrama de bloques:	75
8. Algoritmo MPPT: Perturbación y observación:	77
8.1 Introducción:	77
8. 2 Análisis del algoritmo:	77
8.3 Posibles casos:.....	78
8.4 Diagrama de bloques:	81
9. Algoritmo MPPT: diferencial de primer orden.	85
9.1 Introducción:	85



9.2 Análisis del algoritmo:	85
9.3 Posibles casos:	86
10. Prácticas:	93
10.1 Introducción:	93
10.2 Práctica 1: Algoritmo MPPT: Perturbación & Observación	97
10.2.1 Circuito de simulación:	97
10.2.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:	97
10.2.3 Resultados y observaciones:	98
10.3 Práctica 2: Algoritmo MPPT: Diferencial de primer orden.....	99
10.3.1 Circuito de simulación:	99
10.3.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:	99
10.3.3 Resultados y observaciones:	100
10.4 Práctica 3: Algoritmo MPPT: Conductancia incremental.	101
10.4.1 Circuito de simulación:	101
10.4.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:	101
10.4.3 Resultados y observaciones:	102
10.5 Comparación de los algoritmos:.....	103
10.5.1 Criterios de comparación:	103
10.5.2 Comparación y evaluación de los algoritmos MPPT:	103
11. Conclusiones y líneas futuras:	105
11.1 Conclusiones:	105
11.2 Líneas futuras:	106
12. Bibliografía:	109
Bibliografía:	109
13 Anexos:	111
13.1 ANEXO 1: Práctica PERTURBACIÓN & OBSERVACIÓN.....	111
13.2 ANEXO 2: Práctica DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN	114
13.3 ANEXO 3: Práctica CONDUCTANCIA INCREMENTAL	118
13.3 Anexo 4: Glosario.....	122



0. Índice de Imágenes:

Figura 1. Radiación solar promedio.....	11
Figura 2. Sistema de generación fotovoltaica.....	13
Figura 3. Célula solar de Silicio amorfo	14
Figura 4. Célula solar de Silicio monocristalino.....	14
Figura 5. Célula solar policristalina.....	15
Figura 6. Esquema y curvas características de una célula solar fotovoltaica.....	16
Figura 7. Esquema eléctrico de una célula solar fotovoltaica.....	17
Figura 8. Curva I-V + recta de carga.	18
Figura 9. Curvas características P-V e I-V de una célula solar fotovoltaica.....	20
Figura 10. Curva característica I-V de una célula solar con diferentes rectas de carga.....	20
Figura 11. Conexión en serie de células solares fotovoltaicas. Curva I-V.	21
Figura 12. Conexión en paralelo de células solares fotovoltaicas. Curva I-V.....	22
Figura 13. Curva I-V. Efecto de la irradiancia.	23
Figura 14. Curva I-V. Efecto de la temperatura.....	24
Figura 15. Elementos de un sistema de generación fotovoltaica.	29
Figura 16. Diagrama de bloques, algoritmo de control MPPT de A.F. Boehringer.	30
Figura 17. a) Convertidor reductor (Buck), b) Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado, c) Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto.....	34
Figura 18. Formas de onda del convertidor reductor (Buck). a) V_L Tensión en la bobina, b) i_L Corriente que circula por la bobina, c) i_C Corriente que circula por el condensador.	36
Figura 19. Formas de onda del convertidor reductor (Buck). a) i_C Corriente que circula por el condensador, b) Tensión de rizado en el condensador.	40
Figura 20. Formas de onda del convertidor reductor en modo de conducción discontinuo (MCD). a) i_L Corriente que circula por la bobina, b) i_S Corriente en el generador, c) v_L Tensión en la bobina.....	42
Figura 21. V_o en función del ciclo de servicio para un convertidor reductor.....	44
Figura 22. a) Esquema del convertidor reductor-elevador (Buck-boost). b) Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado. c) Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto.	45
Figura 23. Formas de onda del convertidor reductor-elevador (Buck-Boost). a) i_L Corriente en la bobina, b) v_L Tensión en la bobina, c) i_D Corriente en el diodo, d) i_C Corriente en el condensador de salida.	49
Figura 24. Algoritmos de búsqueda MPPT. Control indirecto.....	53
Figura 25. Algoritmos de búsqueda MPPT. Control directo.....	53
Figura 26. Curva de ejemplo de posibles estados P-V de un PV.	65
Figura 27. Funcionamiento del control MPPT.....	66
Figura 28. Curva P-V. Situados en el punto de máxima potencia (MPP).	71
Figura 29. Curva P-V. Situados a la izquierda del MPP (Acercándonos a MPP).	71
Figura 30. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (acercándonos a MPP)	72
Figura 31. Curva P-V. Situados en el punto de máxima potencia (MPP).	73
Figura 32. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (Acercándonos a MPP).....	73
Figura 33. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (acercándonos al MPP).	74



Figura 34. Diagramas de bloques del algoritmo MPPT: Conductancia Incremental. a) Diagrama hace referencia al aumento o disminución del ciclo de servicio D. b) Diagrama hace referencia al aumento o disminución de V_{ref} 75

Figura 35. Curva P-V. Situado a la derecha del MPP (acercándonos a MPP). 78

Figura 36. Curva P-V. Situados a la derecha de MPP (acercándonos a MPP). 79

Figura 37. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (alejándonos del MPP). 80

Figura 38. Curva P-V. Situado a la izquierda del MPP (alejándonos del MPP). 80

Figura 39. Diagrama de bloques del algoritmo P&O. a) Diagrama hace referencia a el aumento o disminución del ciclo de servicio D. b) Diagrama hace referencia al aumento o disminución de V_{ref} 82

Figura 40. Curva P-V, I-V. Situado a la izquierda del MPP (acercándonos al MPP). 87

Figura 41. Curva P-V, I-V. Situado a la derecha del MPP (acercándonos al MPP). 87

Figura 42. Curva P-V, I-V. Situados en el MPP. 88

Figura 43. Curva P-V, I-V. Situado a la derecha del MPP (alejándonos del MPP). 89

Figura 44. Curva P-V, I-V. Situado a la izquierda del MPP (alejándonos del MPP). 89

Figura 45. Curva P-V, I-V. Situado en el MPP. 90

Figura 46. Esquema del algoritmo diferencial de primer orden. 91

Figura 47. Características del panel solar fotovoltaico simulado. 94

Figura 48. P-V, I-V. Psim Renewable Energy (Solar Power). 95

Figura 49. Circuito de simulación Perturbación Y Observación. 97

Figura 50. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (P&O). 98

Figura 51. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (P&O) (detalle). 98

Figura 52. Circuito de simulación: diferencial de primer orden. 99

Figura 53. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Diferencial de primer orden). 100

Figura 54. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Diferencial de primer orden) (detalle). 100

Figura 55. Circuito de simulación Conductancia Incremental. 101

Figura 56. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Conductancia Incremental). ... 101

Figura 57. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Conductancia incremental) (detalle). 102



1

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



1. Introducción y objetivos del proyecto:

1.1 Introducción:

Dentro de las energías renovables, una de las más importantes junto con la energía eólica, es la energía solar. Esta es una fuente de energía obtenida por el aprovechamiento de la radiación electromagnética originada en el Sol. Será necesario un sistema de recogida de esa energía disponible, para su aprovechamiento.

En la actualidad, para aprovechar el calor y la luz del Sol es necesario el uso de sistemas de captadores como células fotovoltaicas, colectores térmicos o helióstatos. La energía solar es una energía limpia, barata y que siempre dispondremos de ella, lo que supone un beneficio a largo plazo.

Dentro de los sistemas que tratan del aprovechamiento de energía solar cabe destacar los sistemas solares fotovoltaicos, los cuales se basan en un grupo de paneles solares unidos a un convertidor de potencia. Este convertidor puede ser CC/CC, si la carga a la que unimos el convertidor son unas baterías o CC/CA si la aplicación es la de sistemas fotovoltaicos unidos a la red eléctrica.

1.2 Objetivos del proyecto:

En el control de los sistemas solares fotovoltaicos de modo eficiente se exige un conocimiento preciso de las curvas características P-V e I-V de los paneles fotovoltaicos. El conocimiento de estas curvas permite localizar el punto de máxima potencia, y con ello el uso del panel en su punto más eficiente y más productivo.

Los objetivos del proyecto el estudio de los diferentes tipos de control que nos permiten localizar y trabajar con el punto de máxima potencia de los paneles solares fotovoltaicos.

Una vez comprendido los sistemas de control que nos permiten localizar y trabajar en el punto de máxima potencia de los paneles fotovoltaicos, otro objetivo del proyecto es la realización de una plataforma para la simulación y comprensión de los mismos. De tal manera que cualquier interesado en el conocimiento de los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia, sea capaz con la lectura del proyecto y la realización de las prácticas de la comprensión y entendimiento de dichos algoritmos.

El programa software a utilizar es el entorno de simulación Psim (Power simulation). Con este programa somos capaces de realizar las simulaciones de los algoritmos y obtener las pruebas necesarias para verificar su funcionamiento y la comparación entre unos algoritmos y otros.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Psim es uno de los principales programas de simulación y diseño de circuitos y sistemas de electrónica. El interfaz es fácil de utilizar y de fácil aprendizaje lo que permite que el usuario no sea un experto en este tipo de programas para llevar a cabo las tareas que requiera.



2

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ENERGÍA SOLAR Y APLICACIONES

2. Energía solar y aplicaciones:

2.1 Energía Solar:

Información relevante a la energía solar que obtenemos del Sol:

La Tierra recibe 170 petavatios de radiación solar entrante desde la capa más alta de la atmósfera. De esta radiación el 30% vuelve al espacio, mientras la demás radiación la absorbe las nubes, los océanos y la zona terrestre.

La potencia de la radiación que incide sobre la Tierra varía en función de las condiciones ambientales en lugar de la instalación. En general, la potencia equivalente es de 1000W/m^2 en la superficie. Esta potencia se llama irradiancia, que se define como la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Medido en W/m^2 .

En electromagnetismo, la irradiancia se define como el valor de la intensidad de energía promedio de una onda electromagnética en un punto dado. Irradiancia: espectro de irradiación solar sobre la atmósfera y en la superficie. Magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

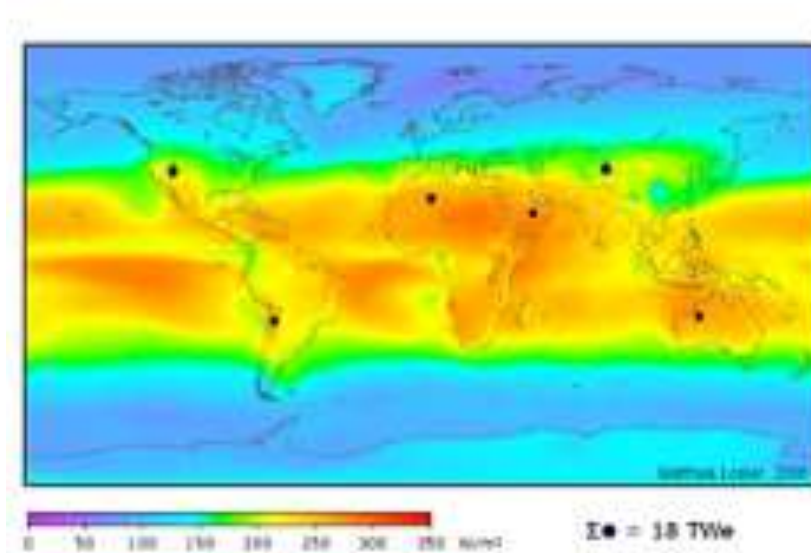


Figura 1. Radiación solar promedio.

Aplicaciones de la producción de energía solar fotovoltaica:

- Obtención de energía eléctrica en casa aislada donde la red eléctrica no llega por razones del terreno.
- Calentamiento de agua sanitaria, calefacción y climatización de piscinas. Este aporte de energía reduce hasta el 65% del consumo.



- Riego: se utilizan bombas solares que permite el aprovechamiento óptimo en lugares remotos.
- Alumbrado de exteriores y señalización.
- La aplicación más importante de la energía solar es la producción de energía. En este campo se puede diferenciar dos grandes grupos: almacenamiento de energía y conexión a red. La última aplicación es de las más novedosas, y consiste en la instalación de módulos fotovoltaicos y un inversor capaz de transformar la energía que suministra el panel para inyectarla a la red eléctrica.

Ventajas de la energía solar fotovoltaica:

- La principal ventaja es que este tipo de energía es una fuente de energía renovable, limpia que no produce ninguna emisión.
- Los costes de operación una vez instalada el sistema son muy bajos. Tiene un sencillo mantenimiento.
- Los módulos fotovoltaicos tiene una larga ciclo de vida, estos llegan a los 20 años ofreciendo su máximo rendimiento.
- Se incluyen en las nuevas estructuras como edificios nuevos e grandes instalaciones. La fabricación de módulos se realiza en tamaños específicos para cada aplicación.

Desventajas de la energía solar fotovoltaica:

- Los costes de inversión inicial e instalación son muy altos.
- Los lugares más idóneos para la colocación de sistemas son lugares desérticos y aislados de la civilización.
- Para la obtención de energía eléctrica a gran escala se necesitan grandes parcelas de terreno.
- La eficiencia de la energía solar es baja, debido a que es una energía difusa y su aprovechamiento depende de las condiciones ambientales.

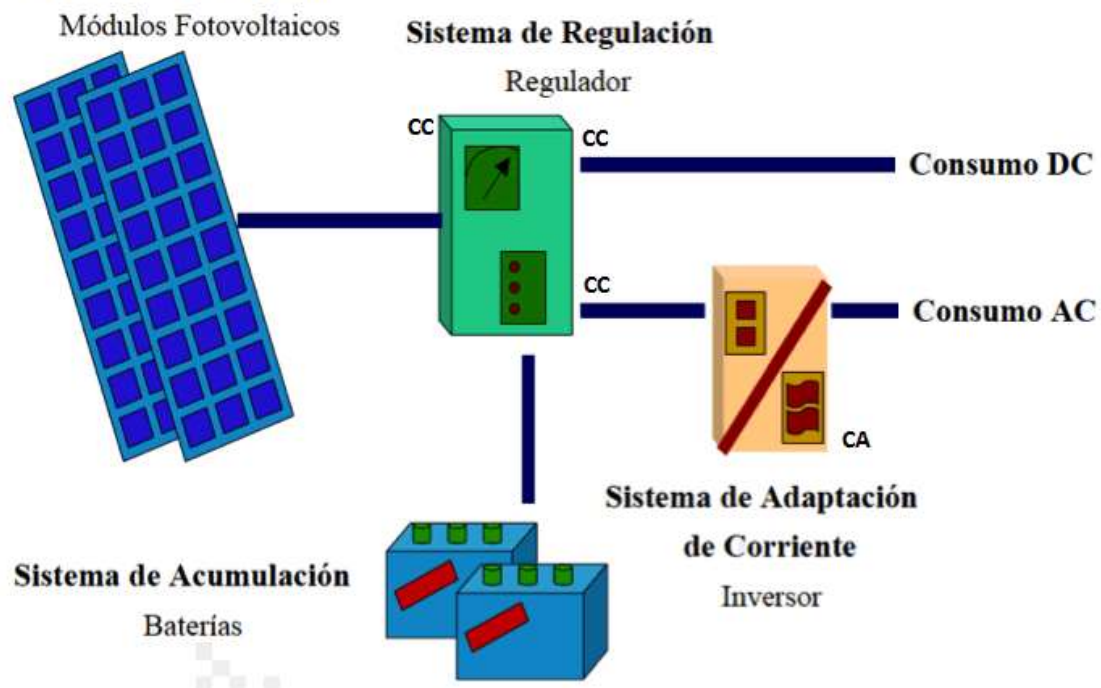


Figura 2. Sistema de generación fotovoltaica.

En la figura 2, podemos ver las distintas aplicaciones de usos de los sistemas de generación fotovoltaica. La aplicación que se desarrolla en el proyecto es la de sistemas de acumulación de energía y la obtención de la máxima potencia de los paneles solares.

2.2 Paneles solares:

El desarrollo del proyecto se centra en el análisis de los diferentes algoritmos para la búsqueda del punto de máxima potencia de paneles fotovoltaicos. Para empezar tenemos que describir la estructura y los componentes que se encuentran en el sistema, entre ellos podemos definir 4 grupos: generador fotovoltaico, convertidor CC/CC, circuito de algoritmo de búsqueda del MPPT y la carga de salida.

El panel fotovoltaico consiste en una asociación de células, las cuales están encapsuladas entre dos capas de etileno vinilo y acetato (EVA), entre una lámina frontal y una capa posterior de polímero. Toda la estructura está recubierta de aluminio para que el conjunto tenga una mayor rigidez mecánica y facilitar el montaje y su mantenimiento.

Las células fotovoltaicas empleadas en los módulos están formadas de silicio. Tipos de células fotovoltaicas:

- Células de silicio amorfo:

Son las células fotovoltaicas más sencillas y las más baratas. Se emplean en aplicaciones solares de relojes y calculadoras.



Figura 3. Célula solar de Silicio amorfo

- Células de silicio monocristalino:

Formadas por un único cristal de silicio. Son células de un color azul oscuro uniforme.



Figura 4. Célula solar de Silicio monocristalino.

- Células de silicio policristalino:
Constituidas por un conjunto de cristales de silicio, esto significa que el rendimiento es algo más bajo que las monocristalinas.



Figura 5. Célula solar policristalina.

2.3 Célula fotovoltaica:

En este apartado del proyecto definiremos los parámetros eléctricos y características de una célula solar fotovoltaica, también describiremos el posible tipo de conexiones entre ellas para formar el panel fotovoltaico y los efectos que producen las condiciones ambientales de temperatura y radiación solar incidente de radiación solar.

Seguidamente estudiaremos los parámetros que utilizamos para realizar las simulaciones en Psim.

2.3.1 Descripción de la célula fotovoltaica:

La célula solar fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica, la mayoría de las células fabricadas que están disponibles en mercado son de silicio monocristalino y policristalino.

La célula fotovoltaica más común está construida con un material semiconductor (Silicio), formado por la unión PN. Es muy similar al diodo solo que la célula es sensible a los fotones que provienen de la luz del Sol.

Los fotones son absorbidos por cada célula y una vez que supera la energía de barrera. El efecto que se produce dentro del material es que el electrón de la capa de valencia rompe el enlace y se forma un electrón hueco, esto produce una diferencia de potencial entre los terminales del semiconductor. Cuanto mayor sea la irradiancia (intensidad de radiación) mayor será la formación de electrones hueco y en consecuencia la diferencia de potencial.

2.3.2 Modelo de una célula fotovoltaica:

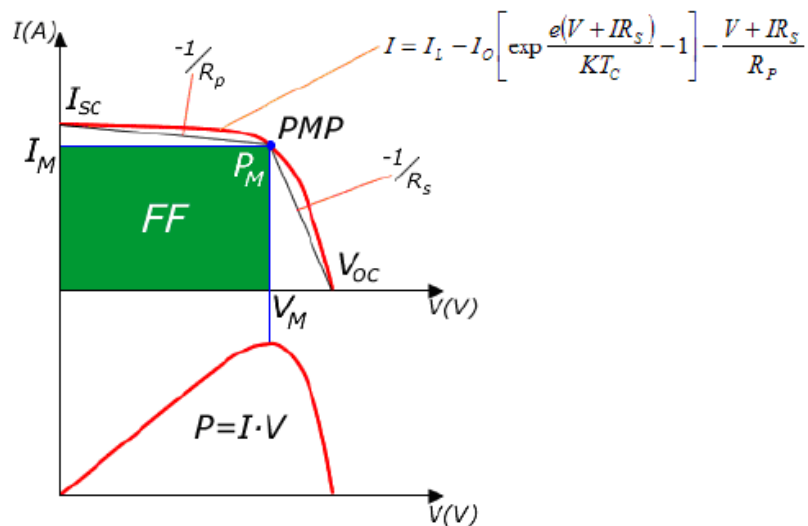
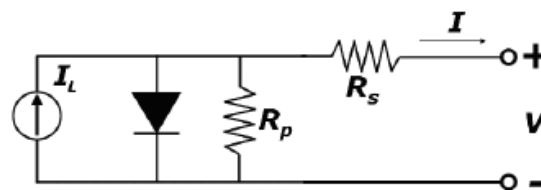
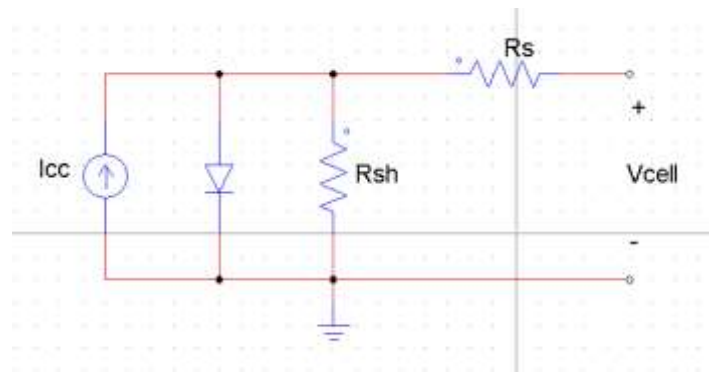


Figura 6. Esquema y curvas características de una célula solar fotovoltaica.

La corriente de cada célula que entrega a la carga es el resultado de las dos componentes internas de corriente que se oponen:

- I_L (Intensidad de iluminación o fotogenerada). La corriente es producida por la generación de portadores que se produce por la incidencia de los fotones. Fuente de corriente.
- I_0 (Corriente de oscuridad o del diodo). Corriente que se produce debido a la recombinación de portadores en la oscuridad.

$$I_{cell} = I_L - I_D$$

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1 \right)$$

Estas ecuaciones representan el modelo básico de la célula, pero resulta incompleto debido a las corrientes de fuga que atraviesan la unión PN. Además de estas corrientes de fuga, existe una caída de tensión proporcional a la intensidad que circula debida al cableado y los contactos que forman cada célula.

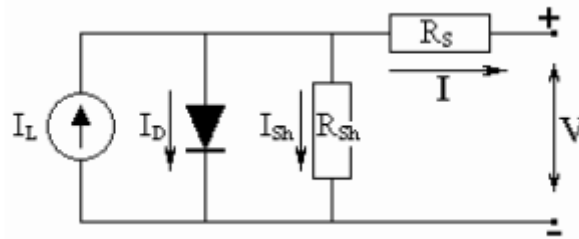


Figura 7. Esquema eléctrico de una célula solar fotovoltaica.

$$I_{cell} = I_L - I_D - I_{sh}$$

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Sabiendo que:

$$V_t = \frac{KT_c}{q}$$

Y sustituyendo, obtenemos la siguiente expresión que nos ofrece la intensidad de la célula fotovoltaica:

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{(V+IR_s)}{AV_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Donde A es el factor ideal de la célula, R_s es la resistencia en serie y V_t es el voltaje térmico (k constante de Boltzman, T temperatura de la célula en grados Kelvin y q es la carga del electrón).

2.3.3 Parámetros eléctricos que definen cada célula:

- Tensión de circuito abierto (V_{oc}):

Es la tensión máxima a corriente cero. Cuando la célula está en circuito abierto (corriente a la carga nula), esta se polariza con una tensión que soporta la región de generación. Esta tensión depende de la radiación solar incidente.

$$I = 0$$

$$V = V_{oc} = A \cdot V_t \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) + 1$$

Generalmente el valor de V_{oc} por célula de Silicio es de 0.6V.

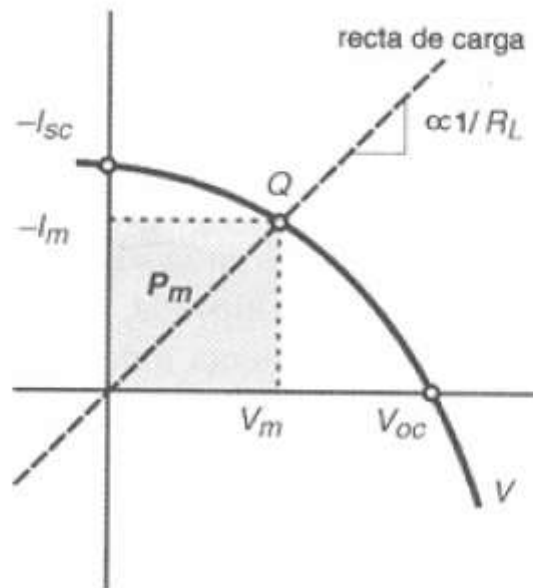


Figura 8. Curva I-V + recta de carga.

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}):

La corriente de cortocircuito al unir los bornes de la célula fotovoltaica, tensión $V=0$. La corriente que nos ofrece la célula es I_{sc} .

$$I_{sc} = I - I_0 \left(e^{\frac{IR_s}{AV_t}} - 1 \right)$$

Debido a que la célula tiene una resistencia en serie debido al cableado es muy pequeña, hasta que V no alcanza un cierto valor, la célula funciona como una fuente de corriente constante.

A mayor tensión el término ya no será despreciable y dejará de funcionar como fuente de corriente constante.

- Tensión y corriente de máxima potencia (V_m y I_m):

En la figura xx, se muestra la salida de intensidad en función de la tensión. Hay un punto en el que la potencia es máxima. La cual responde a la siguiente ecuación:

$$P_m = V \cdot I = V_m \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_t}} - 1 \right) \right]$$

- Factor de forma (FF):

Es la relación que existe entre la potencia máxima que obtenemos de cada célula (P_m) y la potencia que corresponde al producto de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) y la tensión de circuito abierto (V_{oc}).

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

- Rendimiento de cada célula (η):

Definimos el rendimiento como el porcentaje de la luz solar absorbida por un panel que se convierte en energía eléctrica, cuando la célula solar fotovoltaica está conectada a un circuito eléctrico.

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot A_c}$$

Donde P_m es la potencia máxima, G es la irradiancia que llega a la celda (W/m^2), bajo las condiciones estándar (STC) y el área superficial de la célula solar (m^2).

2.3.4 Curvas P-V y I-V:

Curvas que representan la intensidad y la potencia en función de la tensión. Un GFV está definido eléctricamente por la curva funcional I-V, la cual depende de las características constructivas (número de células, tipo de proceso de fabricación, tipo de conexión entre ellas) y las condiciones ambientales (temperatura e irradiación).

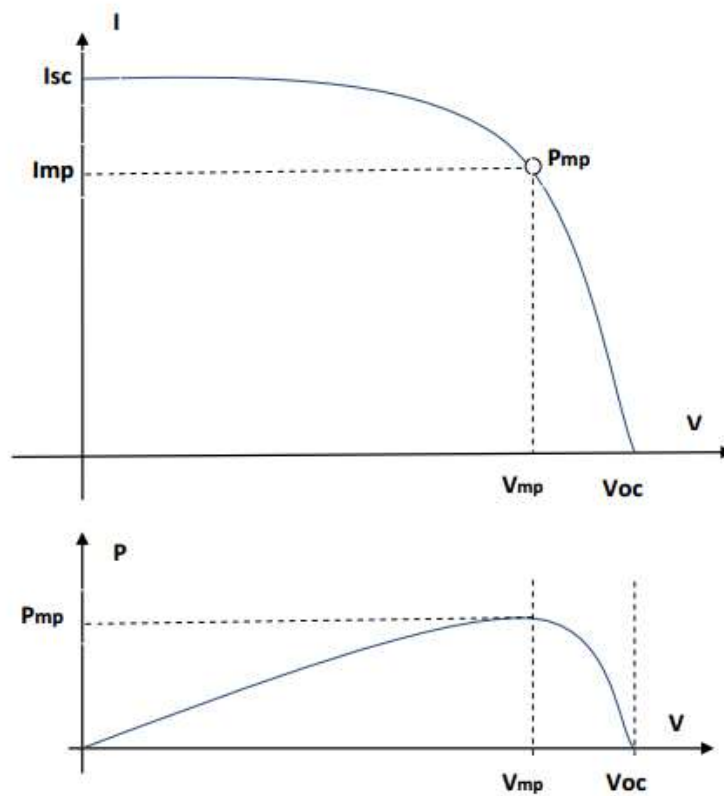


Figura 9. Curvas características P-V e I-V de una célula solar fotovoltaica.

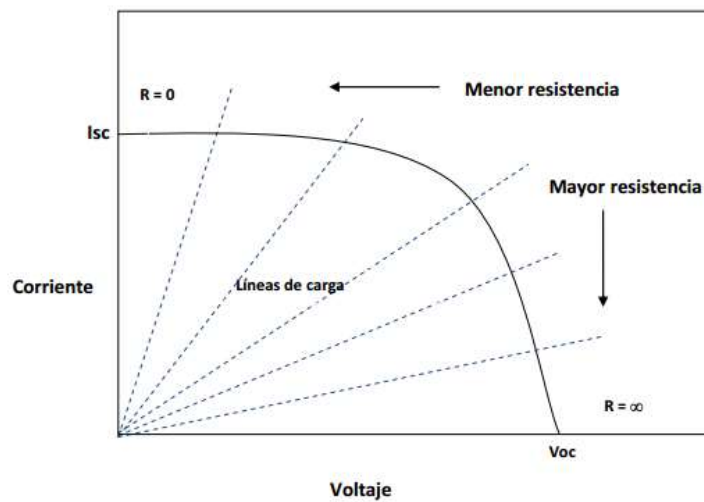


Figura 10. Curva característica I-V de una célula solar con diferentes rectas de carga.

2.3.5 Conexión de las células:

Para formar los paneles solares se juntan células solares, de manera que la intensidad y tensión que ofrecen sean mayores y nos ofrezcan los requisitos que pedimos. Existen dos tipos de conexiones: conexión en serie y conexión en paralelo.

2.3.5.1 Conexión en serie:

Al conectar las células en serie (n_s), el valor del voltaje de circuito abierto es el siguiente:

$$V_{oc} = V_{oc}^l \cdot n_s$$

La corriente de cortocircuito no se ve afectada en relación con la corriente de cortocircuito de una sola célula.

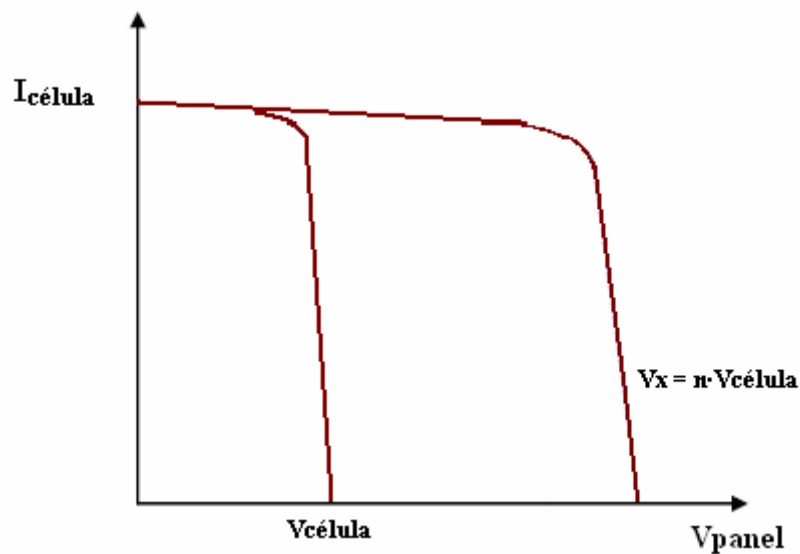


Figura 11. Conexión en serie de células solares fotovoltaicas. Curva I-V.

2.3.5.2 Conexión en paralelo:

Al conectar las células en paralelo (n_p), la intensidad que se obtiene es la multiplicación por el número de las células asociadas.

$$I_{sc} = I_{sc}^l \cdot n_p$$

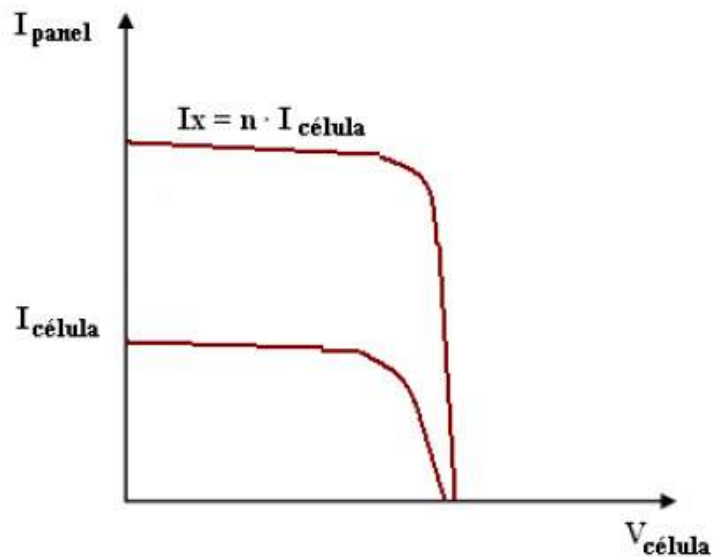


Figura 12. Conexión en paralelo de células solares fotovoltaicas. Curva I-V.

En este caso, al conectar en paralelo un nº de células (n) la variación de la tensión en circuito abierto respecto a la tensión en circuito abierto es despreciable.

2.3.6 Efectos de la temperatura y radiación solar:

La potencia que podemos extraer depende en gran medida de las condiciones ambientales de temperatura a la que esta y de la radiación incidente sobre la célula solar. Las curvas I-V y P-V, varían mucho dependiendo de las condiciones de temperatura y radiación, por esta razón es necesario un circuito de búsqueda del punto de máxima potencia, de manera que trabajemos en el punto óptimo del panel.

2.3.6.1 Efectos de la radiación solar:

La radiación afecta directamente en el rendimiento de la célula solar. Una variación en este parámetro modifica la curva característica que describe la célula solar fotovoltaica.

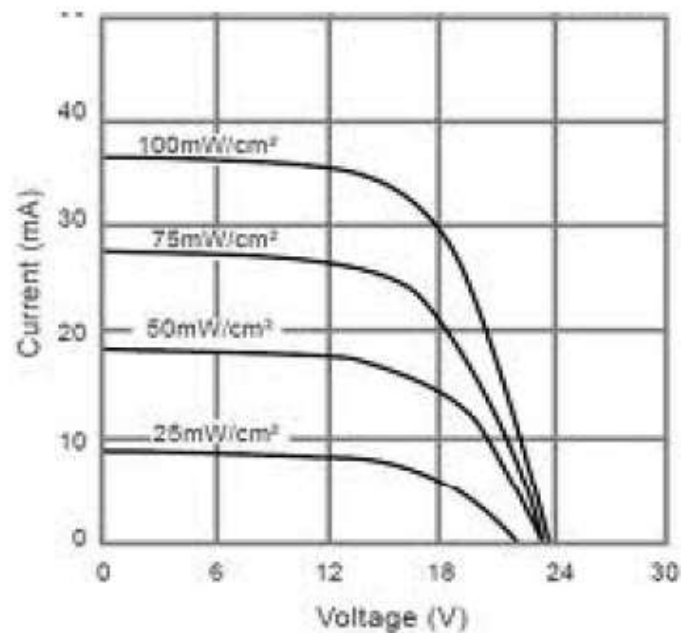


Figura 13. Curva I-V. Efecto de la irradiancia.

La tensión de circuito abierto casi no varía una vez que se modifica la radiación solar incidente, sin embargo, la corriente de cortocircuito se ve afectada de la siguiente manera:

- Al aumentar la radiación solar incidente (irradiancia) la corriente de cortocircuito aumenta.
- En el caso de que disminuya la radiación solar incidente, la corriente de cortocircuito disminuye.

2.3.6.2 Efecto de la temperatura:

La temperatura es un factor muy importante a la hora de establecer un sistema de generación fotovoltaica, debido a que esta tiene un gran efecto en el comportamiento de cada célula.

En la figura 10, se muestra el efecto que tiene la temperatura en la curva que describe la célula solar fotovoltaica I-V.

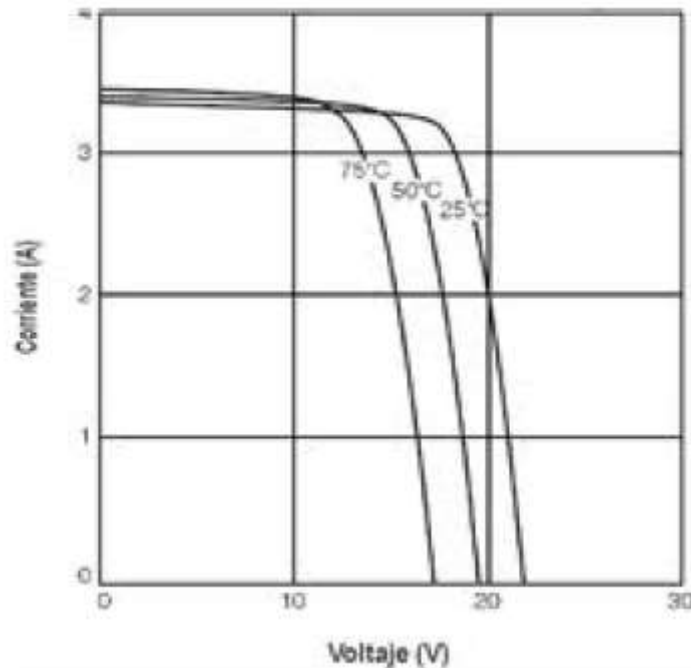


Figura 14. Curva I-V. Efecto de la temperatura.

La temperatura afecta directamente a la tensión en circuito abierto de la célula fotovoltaica, de manera que el punto óptimo de funcionamiento varía según la temperatura que tenga la célula solar.

- A medida que la temperatura disminuye la potencia aumenta.
- En el caso contrario, cuando la temperatura aumenta la tensión y la potencia que ofrece la célula fotovoltaica disminuye.

2.3.7 Condiciones estándar y TONC:

Definimos también las condiciones estándar a las que tenemos que hacer referencia y a las que tenemos que comparar las células fotovoltaicas para definir cual nos ofrece mejor rendimiento.

Condiciones estándar de medida:

- Irradiancia: 100 mW/cm²
- Distribución espectral: AM1.5
- Temp. de célula: 25 °C



Temperatura que alcanza la célula cuando se somete a las siguientes condiciones de operación:

- Irradiancia: 80 mW/cm² (800 W/m²)
- Distribución espectral AM1.5
- Temp. Ambiente 20 °C
- Velocidad del viento: 1 m/sg

Funcionamiento en condiciones cualquiera de operación:

Los fabricantes suelen incluir curvas I-V a varias condiciones de iluminación, temp,.... Si no existe información del fabricante puede caracterizarse mediante los parámetros TONC, Pmax, Iscm y Vocm, con las hipótesis de irradiancia G y temp. Ambiente Ta.

La corriente de cortocircuito dependerá única y linealmente de la irradiancia:

$$I_{SC}(G) = C_1 G ; C_1 = \frac{[I_{SC} \text{ a } 100 \text{ mw/cm}^2]}{100 \text{ mw/cm}^2}$$

La temperatura de trabajo de las células depende exclusivamente y linealmente de la irradiancia y de la temperatura ambiente.

$$T_c - T_a = C_2 G ; C_2 = \frac{[TONC(^{\circ}C) - 20]}{80 \text{ mw/cm}^2}$$

La tensión de circuito abierto depende exclusivamente de la temperatura de sus células solares.

Para una célula:

$$\frac{dV_{OC}}{dT_c} = -2.3 \text{ mV/}^{\circ}C$$

Para n células:

$$\frac{dV_{OC}}{dT_c} = -2.3 \cdot n \text{ mV/}^{\circ}C$$



La resistencia serie es una característica de las células independientemente de las condiciones particulares de operación.

Los cálculos se basan en que todas las células y módulos iguales y trabajan en las mismas condiciones de funcionamiento. La realidad no es tan sencilla y las células y módulos exhiben una cierta dispersión en nuestras características por:

- Dispersión natural de los parámetros.
- Diferentes condiciones de operación.

Efectos de la dispersión:

- La potencia máxima que pueda entregar el generador es inferior a la suma de las potencias máximas de sus módulos. Pérdidas de dispersión.
- En determinadas circunstancias algunas células pueden llegar a convertirse en cargas y a disipar energía generada por los demás por lo que se eleva su temperatura. Si la temperatura sobrepasa determinado límite (85-100 °C) los materiales se dañan de forma irreversible. Punto caliente.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



3

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

RESUMEN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

3. Resumen y objetivo del proyecto:

Debido a las diferentes configuraciones de los paneles solares y las distintas curvas de funcionamiento debido en gran medida a las condiciones ambientales, tales como la temperatura y la radiación solar incidente en el panel (irradiancia), es necesario que tengamos un sistema que nos permita tener en la salida unas condiciones de tensión e intensidad controladas.

Para ello es necesario un sistema de generación fotovoltaica capaz de controlar la tensión que ofrecemos a la carga de manera que no afecten las condiciones cambiantes que afectan a la curva I-V del panel. Será necesario un circuito de control que busque el punto de máxima potencia del panel y un convertidor de potencia ya sea CC/CC o CC/CA (dependiendo de su aplicación) para obtener el máximo rendimiento posible.

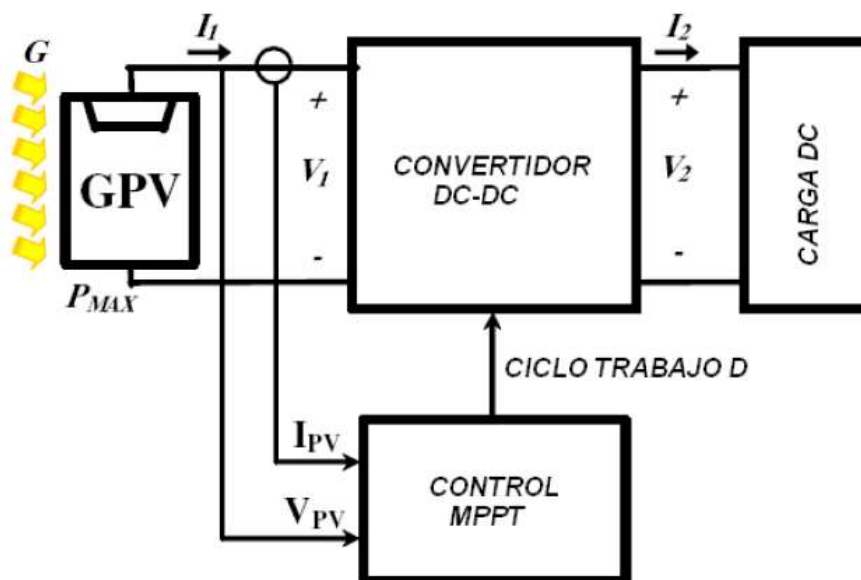


Figura 15. Elementos de un sistema de generación fotovoltaica.

El objetivo principal del proyecto será la simulación de los diferentes algoritmos y la creación de unas prácticas para su comprensión. Vamos a simular un SGV (Sistema de generación fotovoltaica) en que alimentamos una carga, que en nuestro caso será una batería.

El sistema estará constituido por:

- Conjunto de células solares que forman un panel solar fotovoltaico.
- Convertidor CC/CC. En nuestro caso puede ser un reductor (Buck) o reductor-elevador (Buck-Boost).
- Circuito de control del MPPT.
- Carga: batería de 2.24V o 12V.

El circuito de control MPPT tiene la función de variar el ciclo de servicio D del convertidor de tal manera la potencia que obtenemos del panel fotovoltaico sea la máxima posible. El algoritmo de búsqueda se basa generalmente en la variación del ciclo de servicio del convertidor para ajustarse al punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, en función de la variación de los parámetros de salida del panel fotovoltaico.

El primer algoritmo de control MPPT que fue aplicado a la fotovoltaica fue descrito por A.F Boehringer. El control que describe está basado en el control adaptativo, el cual permite mantener el sistema en el punto de máxima potencia. El control adaptativo se define en el diagrama de bloques de la figura 16:

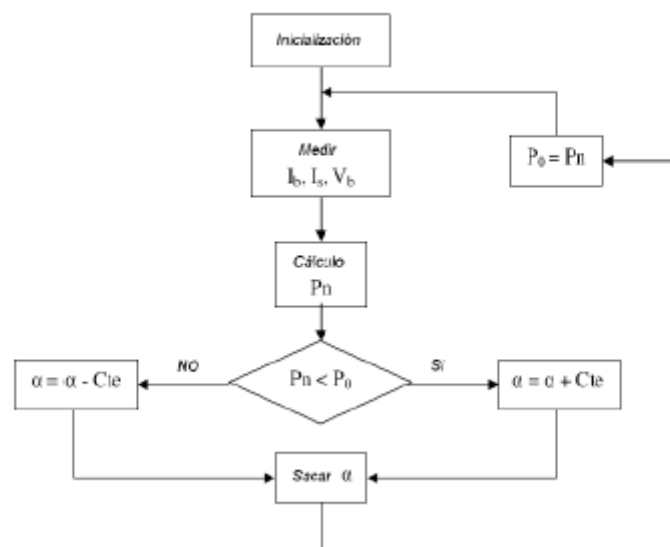


Figura 16. Diagrama de bloques, algoritmo de control MPPT de A.F. Boehringer.

La primera parte del proyecto consiste en definir los diferentes convertidores que se van a utilizar para la simulación del sistema de generación fotovoltaica, en



Universidad de Valladolid

nuestro caso serán los convertidores Buck o reductor y Buck-Boost o reductor-elevador.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



4

Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

Convertidores de potencia CC/CC



4. Convertidores de potencia CC/CC:

4.1 Convertidor Buck:

En aplicaciones de generación fotovoltaica es necesario controlar la componente continua de salida. Una manera de obtener una salida continua en el circuito es introducir un filtro paso bajo después del polo de potencia. Se muestra un filtro paso bajo con una bobina y un condensador (L-C), añadido al convertidor básico. El diodo proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor (polo de potencia) está cerrado. Este tipo de circuitos se denomina convertidor reductor, porque la tensión de salida es menor que la entrada.

4.1.1 Relación entre tensión y corriente:

Consideramos el filtro paso bajo con un compartimento ideal, la tensión de salida es la media de la tensión de entrada del filtro. La entrada del filtro V_x en la figura x, siendo V_s cuando el interruptor está cerrado y cero cuando está abierto, siempre que la corriente por la bobina sea positiva y el diodo conduzca. Si el interruptor se cierra de forma periódica con un ciclo de servicio de trabajo D , la tensión media en la entrada del filtro es $V_s D$.

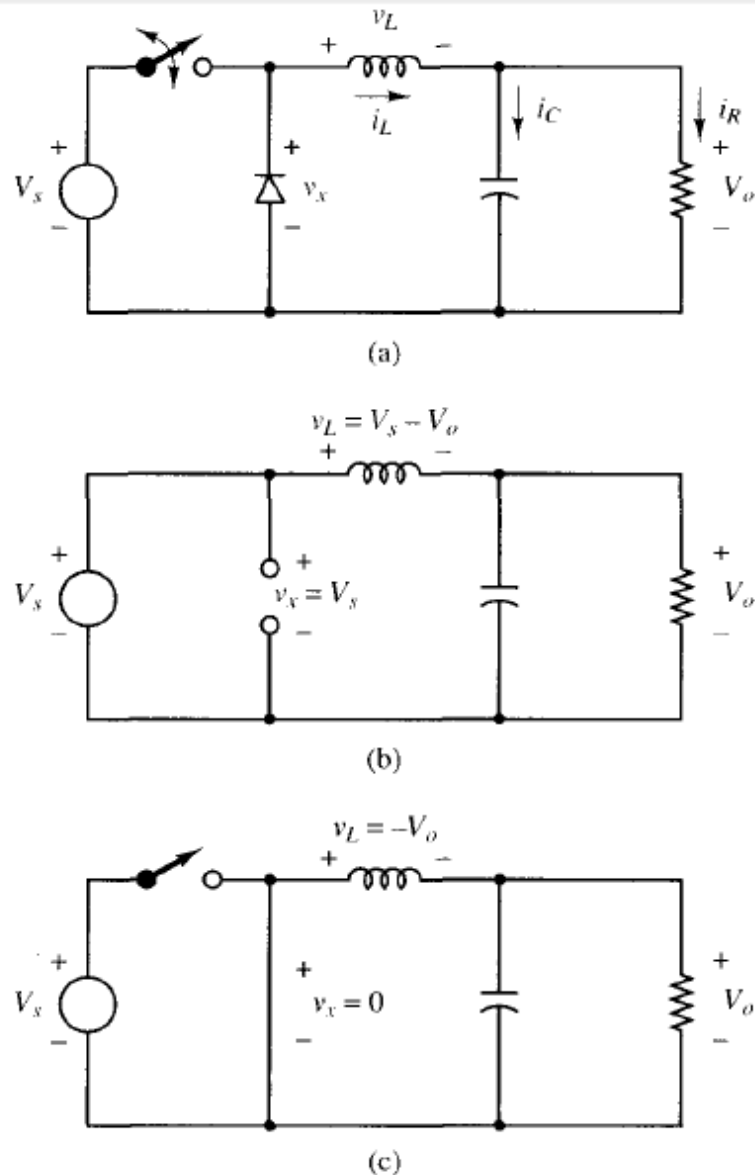


Figura 17. a) Convertidor reductor (Buck), b) Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado, c) Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto.

Para este análisis suponemos que el diodo está polarizado en directa siempre que el interruptor está abierto, y que la corriente que circula por la bobina es positiva. Una corriente en la bobina que sea positiva en todo el intervalo de conmutación se denomina corriente permanente. Por el contrario, el modo de corriente discontinua se caracteriza porque la corriente de la bobina pasa por cero en cada periodo.

Otra forma de analizar el funcionamiento del convertidor reductor o buck es examinar la tensión y la corriente de la bobina.



Propiedades del convertidor reductor cuando funciona en modo de conducción continua:

1. La corriente en la bobina es periódica:

$$i_L(t + T) = i_L(t)$$

2. La tensión de la bobina media es cero:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L d\lambda = 0$$

3. La corriente media por el condensador es cero:

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C d\lambda = 0$$

4. La potencia entregada a la fuente es igual a la suministrada a la carga.

$$P_S = P_o$$

Para analizar el convertidor reductor suponemos lo siguiente:

1. El circuito opera en modo de conducción continua.
2. La corriente por la bobina es permanente (la corriente es siempre positiva).
3. El valor del condensador es lo suficientemente grande, para que la tensión de salida se mantiene constante a una tensión V_o .
4. El periodo de conmutación es T :
 - a. El interruptor está cerrado un tiempo DT .
 - b. El interruptor está abierto el resto del tiempo $(1-D)T$.
5. Todos los componentes del convertidor son ideales.

4.1.1.1 Análisis con el interruptor cerrado:

Cuando el interruptor está cerrado en el convertidor reductor. El diodo se polariza en inversa y el circuito equivalente es el mostrado en la figura 17. La tensión en la bobina es:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

De esta ecuación obtenemos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

Como la derivada de la corriente es una corriente positiva, la corriente aumenta linealmente como se muestra en la figura 18. La variación de corriente cuando el interruptor está cerrado se calcula modificando la ecuación anterior:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT$$

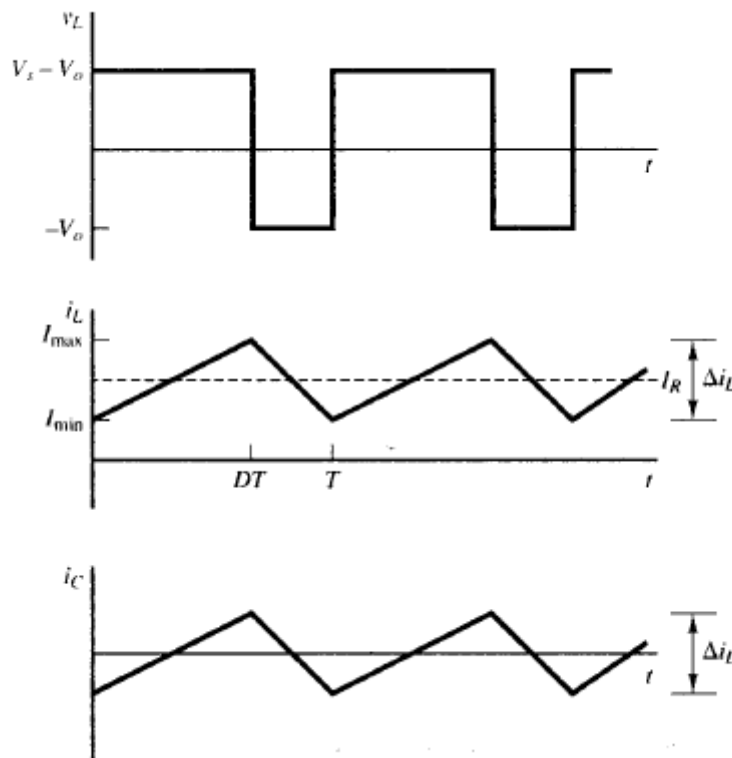


Figura 18. Formas de onda del convertidor reductor (Buck). a) v_L Tensión en la bobina, b) i_L Corriente que circula por la bobina, c) i_C Corriente que circula por el condensador.



4.1.1.2 Análisis con el interruptor abierto:

Cuando el interruptor está abierto, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina y se aplica el circuito equivalente de la figura xx. Cuando el interruptor está abierto, la tensión en la bobina es:

$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

De esta ocasión obtenemos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L}$$

La derivada de la corriente en la bobina es una constante negativa, y la corriente disminuye linealmente como se muestra en la figura. La variación de la corriente en la bobina cuando el interruptor está abierto es:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{abierto} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T$$

Cuando trabajamos en régimen permanente es necesario que la corriente por la bobina sea la misma al final que al principio de cada ciclo de conmutación, por lo que la variación de la corriente en cada periodo debería ser nula. Para ello se debe cumplir:

$$(\Delta i_L)_{cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0$$

Utilizando las ecuaciones anteriores:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0$$

Si despejamos la tensión de salida V_o :

$$V_o = V_s \cdot D$$



Se observa que la tensión de salida solo depende de la entrada y del ciclo de trabajo D . Si la tensión de entrada fluctúa o varía, la tensión de salida puede regularse ajustando el ciclo de servicio adecuadamente. Para ello se precisa de un bucle de realimentación para muestrear la tensión de salida, compararla con la referencia y definir el ciclo de servicio D del conmutador.

La corriente media en la bobina debe ser igual a la corriente media en la resistencia de carga, porque la corriente media en el condensador debe ser nula cuando opera en modo de conducción continua (MCC):

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R}$$

Como la variación de corriente se puede calcular utilizando las ecuaciones anteriores, de manera que los valores mínimo y máximo de la corriente en la bobina se calculará de la siguiente manera:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{L} (1 - D) T \right] = V_0 \left[\frac{1}{R} + \frac{(1 - D)}{2Lf} \right]$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_0}{L} (1 - D) T \right] = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1 - D)}{2Lf} \right]$$

Siendo $f = 1/T$, la frecuencia de conmutación del polo de potencia. f [Hz].

Para que el análisis anterior sea válido, la corriente por la bobina tiene que ser permanente. Una forma sencilla es de comprobar es calcular la corriente mínima en la bobina utilizando la ecuación anterior. El valor mínimo de corriente en la bobina debe ser positivo durante todo el ciclo. La corriente no puede ser negativa, debido al diodo. Si la corriente se anula entonces el convertidor funciona en modo de conducción discontinua, pero el análisis anterior del convertidor no será válido.

Para determinar la combinación de L y frecuencia f que producirá corriente permanente. Como la $I_{Lmin}=0$ es el límite entre el modo de conducción continua (MCC) y (MCD).



$$I_{min} = 0 = V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

$$(Lf)_{min} = \frac{(1-D)R}{2}$$

Si fijamos la frecuencia de conmutación del polo de potencia deseada, el valor de la inductancia mínimo para que el convertidor trabaje en MCC es:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$

4.1.1.3 Rizado de la tensión de salida:

En el análisis anterior hemos supuesto que el valor del condensador es muy grande para que la tensión de salida sea constante. En la práctica es imposible mantener la salida con un valor constante ya que el valor del condensador es finito. La variación de la tensión de salida o rizado, se calcula a partir de la relación entre la tensión y la corriente del condensador.

La corriente del condensador es:

$$i_C = i_L - i_R$$

El condensador se cargará mientras sea positiva la corriente. Aplicando la definición de capacidad del condensador:

$$Q = CV_0$$

$$\Delta Q = C\Delta V_0$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C}$$

La variación de la carga (ΔQ), es el área del triángulo situado por encima del eje de tiempos:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8}$$

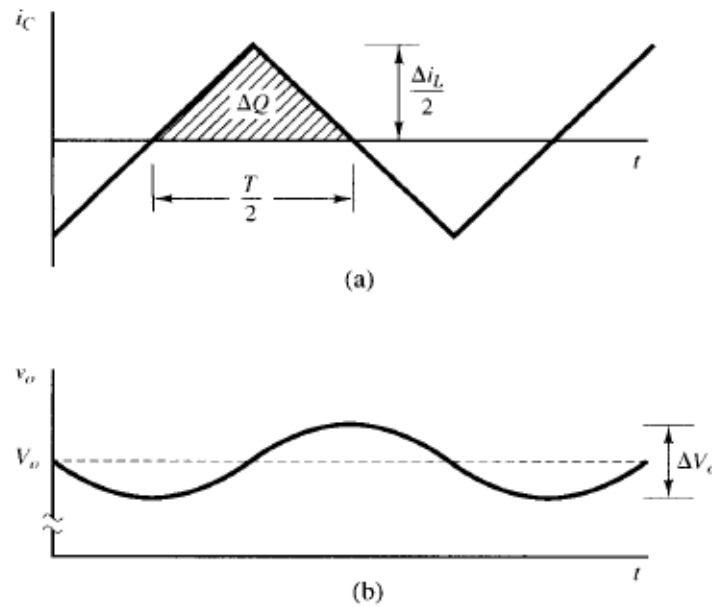


Figura 19. Formas de onda del convertidor reductor (Buck). a) i_c Corriente que circula por el condensador, b) Tensión de rizado en el condensador.

Obtenemos:

$$\Delta V_0 = \frac{T \Delta i_L}{8C}$$

Sustituyendo el valor Δi_L :

$$\Delta V_0 = \frac{T}{8C} \cdot \frac{V_0}{L} (1 - D) T = \frac{V_0 (1 - D)}{8LC f^2}$$

En esta ecuación ΔV_0 , es la tensión de rizado pico a pico de la salida. También es útil expresar el rizado con una fracción de la tensión de salida:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1 - D}{8LC f^2}$$

Si el rizado no es muy grande, podemos suponer que la tensión de salida es constante, y el análisis anterior será válido.



Dado que suponemos todos los componentes del convertidor son ideales, la potencia entregada debe ser igual a la potencia absorbida por la carga de salida (resistencia de carga):

$$P_s = P_0$$

$$V_s I_s = V_0 I_0$$

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{I_s}{I_0}$$

La relación anterior es similar a la relación tensión-corriente de un transformador en las aplicaciones de alterna. Lo que determina que el convertidor reductor es equivalente a un transformador de continua.

4.1.1.4 Funcionamiento en modo de conducción discontinua:

El análisis anterior del convertidor CC-CC Buck se ha supuesto que la corriente que circula por la bobina era permanente. Cuando la corriente es permanente, la corriente en la bobina será positiva durante todo el periodo de conmutación. No es necesario que la corriente sea continua pero el análisis si es diferente.

Analizando las tensiones de salida y de entrada teniendo en cuenta que la tensión media en la bobina es nula en régimen permanente.

A partir de la tensión en la bobina:

$$(V_s - V_0)DT - V_0 D_1 T = 0$$

$$(V_s - V_0)D = V_0 D_1$$

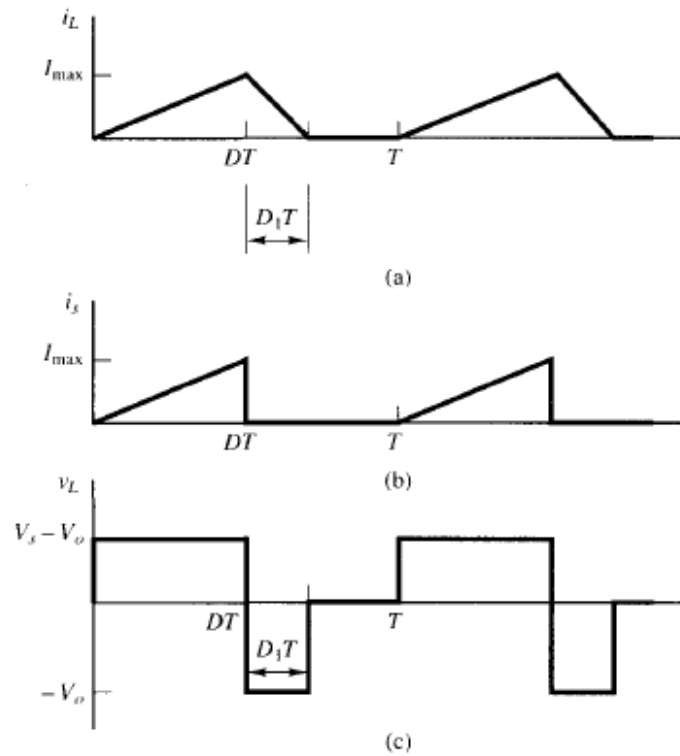


Figura 20. Formas de onda del convertidor reductor en modo de conducción discontinuo (MCD). a) i_L Corriente que circula por la bobina, b) i_s Corriente en el generador, c) v_L Tensión en la bobina.

Si reorganizamos los términos, obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{V_0}{V_s} = \left(\frac{D}{D + D_1} \right)$$

La corriente media en la bobina es igual a la corriente media en la carga, ya que la corriente media en el condensador es cero. Suponemos que la tensión de salida es constante:

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R}$$

La corriente media en la bobina:

$$I_L = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{2} I_{max} DT + \frac{1}{2} I_{max} D_1 T \right) = \frac{1}{2} I_{max} (D + D_1)$$



De manera que obtenemos:

$$\frac{1}{2} I_{max}(D + D_1) = \frac{V_0}{R}$$

Como la corriente por la bobina en el punto inicial del ciclo es nula, la variación de corriente que se produce en la bobina cuando el interruptor está cerrado es igual a la corriente máxima. Cuando el polo de potencia está cerrado, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_s - V_0$$

De manera que obtenemos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_0}{L} = \frac{I_{Lmax}}{DT}$$

Despejando I_{Lmax} :

$$I_{Lmax} = \Delta i_L = \left(\frac{V_s - V_0}{L} \right) DT = \frac{V_0 D_1 T}{L}$$
$$\frac{1}{2} I_{max}(D + D_1) = \frac{1}{2} \left(\frac{V_0 D_1 T}{L} \right) (D + D_1) = \frac{V_0}{R}$$

Obtenemos:

$$D_1^2 + DD_1 - \frac{2L}{RT} = 0$$

Al despejar D_1 :

$$D_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}}{2}$$

Si sustituimos D_1 , tenemos que la tensión de salida:

$$V_0 = V_s \left(\frac{D}{D + D_1} \right) = V_s \left(\frac{2D}{D + \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}} \right)$$

El límite entre el modo de conducción continua y el modo conducción discontinua se produce cuando $D_1 = 1 - D$. En la figura se muestra cual es la relación entre la tensión de salida y ciclo de servicio del convertidor.

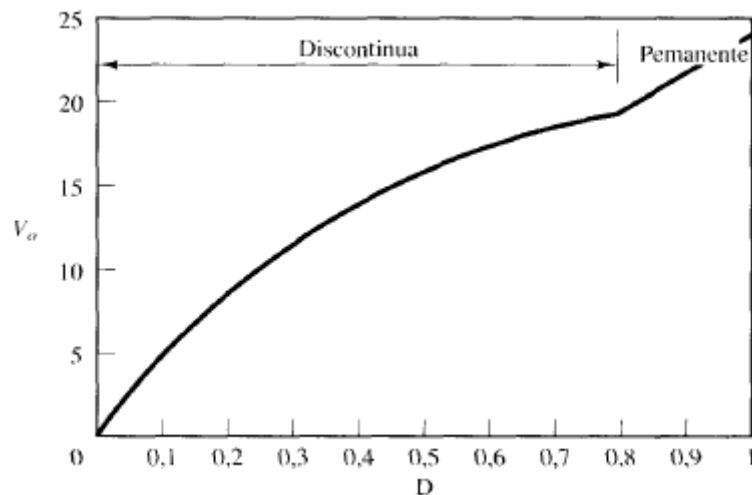


Figura 21. V_o en función del ciclo de servicio para un convertidor reductor.

Observar que la relación es lineal entre la salida y la entrada cuando la corriente no se anula, es decir, que estamos trabajando en modo de conducción continua y la relación es no lineal cuando la corriente por la bobina se anula, es decir, que estamos trabajando en modo de conducción discontinua.

4.2 Convertidor Buck-Boost:

Otro convertidor básico que utilizamos para los sistemas de generación fotovoltaica es el convertidor reductor-elevador, de manera que la tensión de salida puede ser mayor o menor que la tensión de entrada.

Consideramos que la tensión de entrada del convertidor procedente del panel fotovoltaico se encontrará en un rango comprendido 16V-24V, puesto que la tensión de operación varía dependiendo de la temperatura y la radiación solar. Conectado a la salida del sistema tenemos una batería de 12V. El convertidor más utilizado en estos sistemas es el Buck-Boost, utilizado para realizar una reducción o un aumento de la tensión en la salida, todo depende del ciclo de servicio que utilizamos en el convertidor.

El convertidor consiste en una unión en cascada de un convertidor reductor (Buck) con otro elevador (Boost). El esquema del convertidor es el que se muestra en la figura 10.

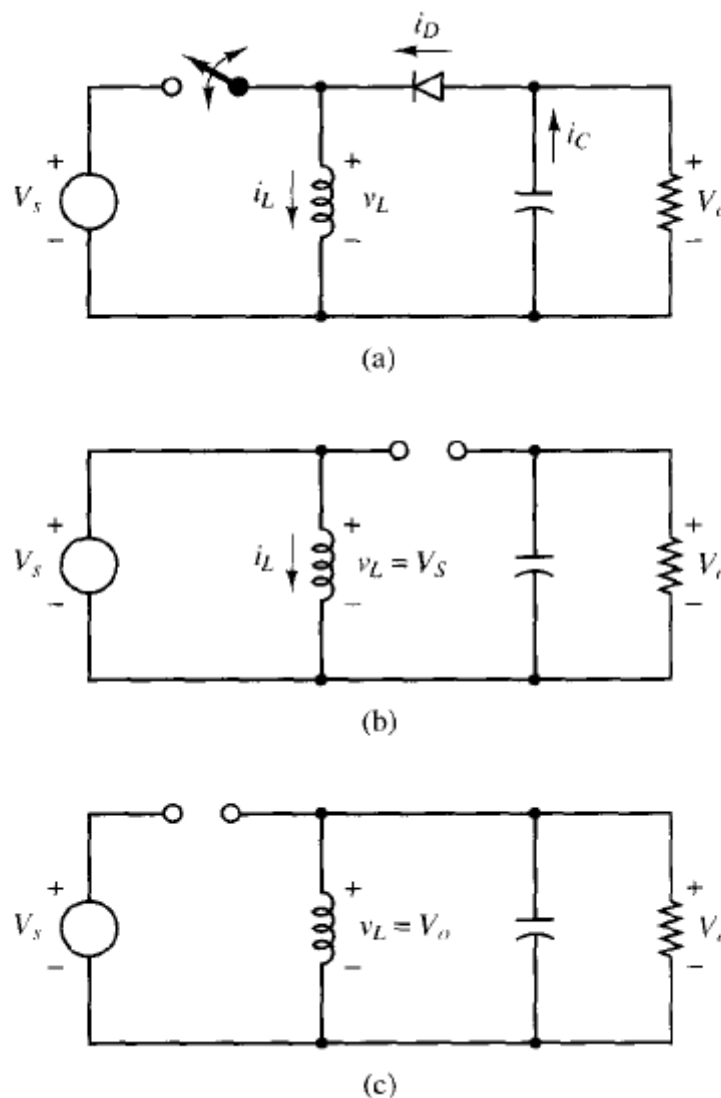


Figura 22. a) Esquema del convertidor reductor-elevador (Buck-boost). b) Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado. c) Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto.



4.2.1 Relaciones entre tensión y corriente:

Se realizarán las siguientes suposiciones acerca del modo de operación del convertidor:

1. El circuito opera en MCC.
2. La corriente por la bobina es permanente.
3. El valor del condensador es lo suficientemente grande, para que la tensión de salida se mantiene constante a una tensión V_o .
4. El periodo de conmutación es T :
 - a. El interruptor está cerrado un tiempo DT .
 - b. El interruptor está abierto el resto del tiempo $(1-D)T$.
5. Todos los componentes del convertidor son ideales.

4.2.1.1 Análisis con interruptor cerrado:

Cuando el polo de potencia (interruptor) está cerrado, la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

Como la variación de la corriente en la bobina es constante, por lo que la corriente en ella aumenta linealmente. La ecuación anterior la podemos representar la siguiente manera:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L}$$

Calculamos la variación de la intensidad en la bobina con el interruptor cerrado es:

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{V_s DT}{L}$$



4.2.1.2 Análisis con el interruptor abierto:

Cuando el interruptor (polo de potencia) está abierto, la corriente que circula por la bobina no puede variar instantáneamente, por lo que el diodo estará polarizado en directa y la corriente pasará a la carga y el condensador. Cuando se da esta condición, la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_o = L \frac{di_L}{dt}$$
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L}$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es constante, y la variación de corriente es:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L}$$

Despejando de la ecuación Δi_L :

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{V_o(1-D)T}{L}$$

Cuando el circuito funciona en modo de conducción continua, la variación neta de la corriente durante el periodo es nula. Utilizando las ecuaciones anteriores obtenemos que:

$$(\Delta i_L)_{cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0$$

$$\left(\frac{V_s DT}{L}\right) + \left(\frac{V_o(1-D)T}{L}\right) = 0$$



$$V_0 = -V_s \left[\frac{D}{1-D} \right]$$

La tensión media en la bobina es cero cuando el convertidor opera en modo de conducción continua MCC.

$$V_L = V_s D + V_0(1 - D) = 0$$

La ecuación anterior muestra que la polaridad de la tensión de salida es opuesta a la tensión de entrada de la fuente de alimentación. La magnitud de salida del convertidor Buck-Boost puede ser menor o mayor que la tensión de entrada, en función del ciclo de servicio D .

- Si $D < 0.5$ la salida será menor que la entrada.
- Si $D > 0.5$ la salida será mayor que la entrada.

Este circuito combina las características de los convertidores reductor (buck) y elevador (boost). Sin embargo, la inversión de la polaridad de la tensión puede ser una desventaja en alguna de las aplicaciones del convertidor.

Tenemos en cuenta que en el convertidor reductor-elevador, la fuente nunca se conecta directamente a la carga. La energía se almacena en la bobina cuando el interruptor está cerrado y se entrega a la carga cuando está abierto. Denominamos el convertidor reductor-elevador como indirecto.

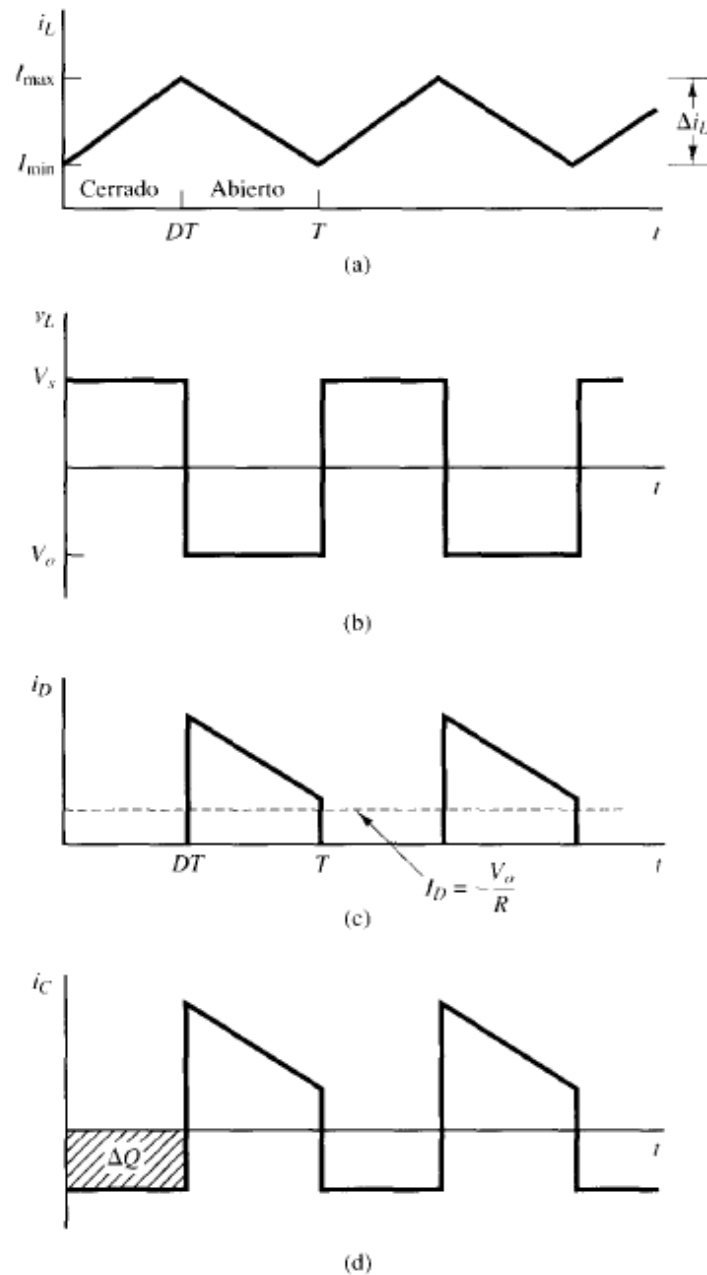


Figura 23. Formas de onda del convertidor reductor-elevador (Buck-Boost). a) i_L Corriente en la bobina, b) v_L Tensión en la bobina, c) i_D Corriente en el diodo, d) i_C Corriente en el condensador de salida.

La potencia absorbida por la carga debe ser igual a la que entrega la fuente de alimentación:

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R}$$

$$P_s = V_s I_s$$



$$\frac{V_0^2}{R} = V_s I_s$$

La corriente media en la bobina de la fuente se relaciona con la corriente en la bobina:

$$I_s = I_L D$$

De manera que se obtiene:

$$\frac{V_0^2}{R} = V_s I_L D$$

Si despejamos I_L y sustituimos V_0 :

$$I_L = \frac{V_0^2}{V_s R D} = \frac{P_0}{V_s D} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2}$$

Con la ecuación anterior y la variación de la intensidad en la bobina, calculamos la corriente máxima y mínima:

$$I_{Lmin} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2} + \frac{V_s D T}{2L}$$

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s D}{R(1-D)^2} - \frac{V_s D T}{2L}$$

Para que las ecuaciones anteriores sean válidas la corriente por la bobina tienen que ser permanente y no anularse durante el periodo. Calculamos los valores de L y la frecuencia de manera que I_{Lmin} sea igual a cero, para determinar el límite entre el modo de conducción continua y modo de conducción discontinua.

$$(Lf)_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2}$$



Si definimos la frecuencia de conmutación de los polos de potencia f [Hz], obtenemos el valor mínimo de la inductancia para que trabajemos con el convertidor en modo de conducción continua (MCC):

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2f}$$

4.2.1.3 Rizado de la tensión de salida:

El rizado de la tensión de salida del convertidor reductor-elevador (buck-boost), se calcula a partir de la forma de onda de la corriente en el condensador, por la definición de la capacidad tenemos que:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_0}{R}\right) DT = C \Delta V_0$$

Si despejamos la ΔV_0 :

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 DT}{RC} = \frac{V_0 D}{RCf}$$

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{D}{RCf}$$

El valor del condensador de salida:

$$\Delta V_0 = \frac{I_{0max} D_{max} T}{C} \Rightarrow \frac{I_{0max}}{\Delta V_0} T D_{max}$$

Una vez elegido el condensador de salida para que cumpla las especificaciones exigidas del rizado de la tensión de salida y el valor de la inductancia de manera que el convertidor trabaje en modo de conducción continua podemos comenzar con la simulación del convertidor.

Una vez definidos los convertidores de potencia que vamos a utilizar, es necesario hacer una introducción de los diferentes algoritmos que varían el ciclo de servicio del convertidor y que nos permiten trabajar en el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico.



5

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

CLASIFICACIÓN DE LOS ALGORITMOS MPPT

5. Clasificación de los métodos de búsqueda del punto de máxima potencia:

Esquema de los principales métodos o algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia de un sistema de generación fotovoltaica:

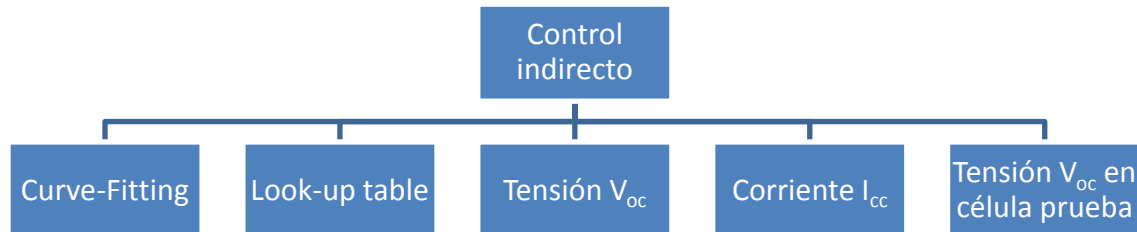


Figura 24. Algoritmos de búsqueda MPPT. Control indirecto.

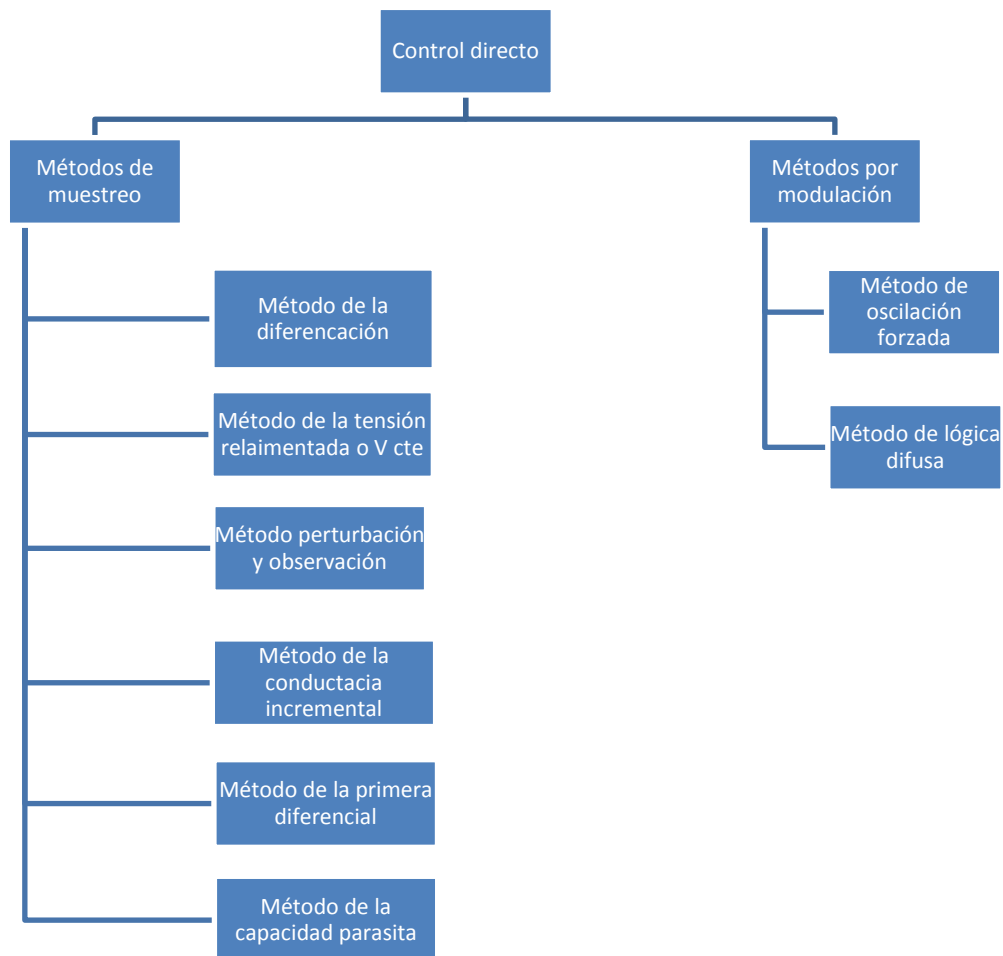


Figura 25. Algoritmos de búsqueda MPPT. Control directo.



Descripción de los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia:

5.1 Control indirecto:

Los métodos indirectos se fundamentan en la utilización de una base de datos que incluye parámetros y datos como las curvas de las características del generador FV a diferentes irradiaciones y temperaturas o bien la utilización de funciones matemáticas obtenidas a partir de datos empíricos para estimar el punto de máxima potencia (MPP). Normalmente en la mayoría de los casos es necesario evaluar previamente las características del generador FV o bien mediante relaciones matemáticas obtenidas a partir de datos empíricos, que no se cumplen para las condiciones medioambientales.

Tipos:

- Curver-fitting.
- Look-up table.
- Tensión a circuito abierto del SGFV.
- Corriente de cortocircuito del SGFV.
- Tensión de circuito abierto de una célula de prueba.

5.1.1 Curve-Fitting:

Este método utiliza una relación matemática para descubrir las características de salida del generador, mediante sensores de corriente y tensión se obtienen m valores al hacer un muestreo de V_{fv} e I_{fv} en intervalos deseados. Después se calcula un valor de la tensión en la cual la potencia es máxima utilizando la función que se muestra a continuación, donde a , b y c son coeficientes.

$$P_{vf} = aV_{fv}^3 + bV_{fv}^2 + cV_{fv} + d$$

$$P_{vf} = aV_{fv}^2 + bV_{fv} + c$$

Este método tiene como desventaja de que se requiere una capacidad de memoria grande para poder realizar el cálculo de las ecuaciones matemáticas pudiendo no ser adecuado para cambios bruscos de irradiación (ejemplo vehículo solar).



En este caso, los valores medidos de corriente y tensión del generador se comparan con los que se encuentran almacenados en una tabla (dentro del sistema de control), que corresponden a la operación del punto máximo. Las desventajas de este modo son la gran capacidad de memoria necesaria para poder almacenar los datos y que la implementación de cada control debe ajustarse para cada panel específico.

5.1.3 Método de la tensión en circuito abierto del GFV:

La base de este algoritmo es la observación de las curvas V_{fv} y I_{fv} para diferentes condiciones de irradiación y de temperatura, de esta manera se puede deducir que la razón entre el valor de la tensión en circuito abierto del generador V_{oc} y V_{MPP} , tensión en el punto de máxima potencia es aproximadamente constante.

$$k_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}} \approx \text{constante} < 1$$

Temporalmente se ha de aislar el GFV, de acuerdo con el ciclo de trabajo del convertidor, para medir V_{oc} . Después de realizar esta tarea se calcula el MPP y se ajusta la tensión de operación del generador (Este proceso se ha de repetir periódicamente). Aunque el método es simple, es difícil seleccionar el valor óptimo de la constante k_1 . Los valores normales son $k=0.76$ y $T=15$ mseg.

La exactitud del ajuste de la tensión de funcionamiento al voltaje de máxima potencia, V_{MPP} depende de la elección de la fracción ajustada a la tensión en circuito abierto del GFV.

Ventajas:

- Solución simple y económica y que únicamente utiliza un lazo de control.

Inconvenientes:

- No tiene en cuenta la potencia real extraída de los paneles en la selección del MPP y que asume que con una tensión de circuito abierto dada, se determina con exactitud el MPP.
- Si este es incorrecto o inexacto la potencia de salida no será máxima.



5.1.4 Método de la corriente de cortocircuito del GFV.

Este método es similar al algoritmo anterior. Se basa en el hecho empírico de una dependencia lineal entre la corriente en el MPP y la de cortocircuito, cumpliendo la siguiente relación:

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{sc}} \approx \text{constante} < 1$$

La estimación del valor de K_2 con este método suele ser de 0.85. Este método tiene las mismas ventajas e inconvenientes que el sistema de control anterior.

5.1.5 Método de la tensión a circuito abierto de una célula de prueba:

Para poder evitar las desventajas de estar aislando el GFV cada cierto tiempo se ha propuesto como alternativa el uso adicional de una célula de prueba. De esta manera con la estrategia seguida en los dos métodos anteriores (diferencia que las medidas de V_{oc} se realizan sobre una célula eléctricamente independiente del resto del sistema). Los valores de k obtenidos resultan de la extrapolación al generador FV.

Ventajas:

- Solución simple y económica.
- Solo se utiliza un lazo de control.
- Evita las interrupciones realizadas al conjunto de paneles fotovoltaicos.

Inconvenientes:

- Supone las propiedades de una célula de prueba son idénticas a cada una de las del GFV por lo que si el punto de funcionamiento calculado no es exacto no estaremos extrayendo la máxima potencia
- Puede no ser apropiado para aplicaciones con limitación de superficie.



Este método se basa en el seguimiento del coeficiente β . Tiene la ventaja de que es rápido y tiene un seguimiento preciso. El análisis de las características I,V de un panel FV nos define el coeficiente β :

$$\beta = \ln\left(\frac{I_{FV}}{V_{FV}}\right) - cxV_{FV} = \ln(I_0xc)$$

Donde I_0 es la corriente inversa de saturación y c ($c=q/\eta kTN_s$) es la corriente del diodo que irá en función de su rendimiento, el número de células en serie. El valor de β permanece dentro de un estrecho intervalo a medida que se aproxima al MPP, por lo que este control siempre nos dará una aproximación, no el punto de máxima potencia exacto.

5.1.7 Conclusiones de los métodos indirectos:

Ventajas:

- Son simples y económicos.
- Casi todos solo tienen un lazo de control.

Inconvenientes:

- Para algunos se necesita una gran capacidad de memoria y el mantenimiento de una gran base de datos.
- No son totalmente versátiles con respecto a la carga.
- La búsqueda del MPP es independiente de la variación de los parámetros del panel solar, la implementación ha de ser la que se ajuste para cada sistema específico y ha de actualizarse y revisar durante el tiempo. Necesita mantenimiento.



En el control directo se incluyen aquellos algoritmos que emplean medidas de tensión y corriente de entrada o salida, a partir de las cuales, y teniendo en cuenta la variación de los puntos de funcionamiento del generador FV, se determina el punto de operación óptimo. Estos algoritmos tienen la ventaja de ser independientes de las características del generador FV. A su vez dentro de esta categoría se puede establecer otra clasificación entre los métodos de muestreo y modulación.

5.2.1 Métodos de muestreo:

En estos procedimientos se realiza un muestreo de los valores de tensión y corriente en bornes del generador FV. Después mediante diferentes estrategias se obtendrá la potencia extraída de dicho generador, P_{fv} . Este muestreo tiene como finalidad determinar la evolución relativa de dicha variable. Se realiza una comparación entre los diferentes valores de potencia obtenidos de manera que se dará la información necesaria para que el circuito de control correspondiente aumente o disminuya el ciclo de trabajo del convertidor para aproximarse al MPP. Bajo este principio se distinguen los siguientes métodos:

5.2.1.1 Método de la diferenciación:

Esta técnica se basa en la propiedad de que el punto de potencia se localiza resolviendo la ecuación:

$$\frac{dP_{fv}}{dt} = I_{fv} \frac{dV_{fv}}{dt} + V_{fv} \frac{dI_{fv}}{dt}$$

No obstante, su resolución requiere de al menos nueve operaciones (entre cálculos y mediciones) además de la suma final no es cero se debe hacer una nueva operación para determinar el signo de la suma indicando así la dirección a la que el punto de funcionamiento debe ajustarse para alcanzar el MPP.

5.2.1.2 Método de la tensión realimentada o tensión constante:

Si en el sistema no hay ninguna batería, para mantener la tensión del bus constante, puede aplicarse un control simple. De esta manera puede usarse la



realimentación del voltaje de los paneles y su comparación con una tensión de referencia constante de referencia para ajustar el ciclo de trabajo del convertidor.

Desventajas:

- Tenemos un sistema que es incapaz de adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes, irradiación y/o temperatura.
- Si en el sistema hay baterías, se suele comparar la tensión del GFV con una tensión de referencia constante que se corresponde a la V_{MPP} con unas condiciones ambientales específicas.

La señal de referencia resultante se utiliza para controlar el convertidor.

Ventajas:

- La implementación es sencilla y económica y solo utiliza un lazo de control. Pero no tiene en cuenta el efecto de la irradiación y temperatura de los paneles fotovoltaicos.

No se puede aplicar con generalidad en sistemas cuyo método de almacenamiento no sean baterías. No se puede seguir los MPP cuando existen variaciones de irradiación y temperatura. Es un control indicado solo para el uso bajo condiciones constantes de irradiación (sistemas de satélites).

5.2.1.3 Método de Perturbar y Observar:

El método de perturbar y observar es el más utilizado por la mayoría de los autores. Es un método iterativo de aproximación al MPP que 'perturba' el punto de funcionamiento del generador FV para encontrar la dirección de cambio. El control se alcanza forzando que la derivada de la potencia del generador sea cero. El primer escrito sobre el control external fue realizado por Leblanc para la búsqueda de un pico de resonancia de un sistema electromecánico. En el caso concreto de un panel solar, el control MPPT extremal obliga a acercarse al punto de funcionamiento del PV al MPP y a oscilar alrededor de él indefinidamente.

Para ello se altera periódicamente el voltaje de salida del generador FV, siendo esto 'Perturbar' y se compara la potencia de salida del mismo con la obtenida en el ciclo anterior actuando en consecuencia, 'Observar' el sistema. La lógica de este algoritmo se explicita en la siguiente tabla:



$\Delta P_{fv}(t_2)$	$V_{fv}(t_3)$
>0	+
<0	-

Podemos tener problemas con este tipo de control si hay variaciones rápidas de irradiación y temperatura ya que puede ir alejándose del MPP. Se puede mejorar la respuesta incrementando la velocidad de ejecución del algoritmo de control.

Ventajas:

- No requiere de conocimiento previo de las características del generador FV y que es relativamente simple.

Ramon Leyva ha hecho un estudio analítico desde el punto de vista de la estabilidad de este control, que es utilizado para la búsqueda del MPP de un GFV con la ayuda de un convertidor DC. La estabilidad global del sistema se ha demostrado con la ayuda de la técnica de Lyapunov. El algoritmo extremal es aplicado en un contexto de búsqueda del MPP de un PV alcanzado el comportamiento en régimen estable caracterizado por una oscilación del MPP. El algoritmo evalúa los valores de las tensiones y las corrientes del PV hacia el valor del MPP por una variación positiva o negativa lineal de las tensiones del PV a lo largo del tiempo. Este tipo de algoritmo se puede encontrar también en una versión digital.

5.2.1.4 Método de la conductancia incremental (IncCond):

Alternativa a la estrategia Perturbador y Observador se desarrolló el algoritmo del incremento de conductancia. Se basa en el hecho de que la derivada de la potencia respecto a la tensión del generador FV (“pendiente” de la curva característica P-V), dP_{fv}/dV_{fv} , se anula en el punto de potencia máxima.

$$\frac{dP_{fv}}{dV_{fv}} = I_{fv} \frac{dV_{fv}}{dV_{fv}} + V_{fv} \frac{dI_{fv}}{dV_{fv}} = 0 \Rightarrow -\frac{I_{fv}}{V_{fv}} = \frac{dI_{fv}}{dV_{fv}}$$

El miembro de la parte izquierda representa el opuesto de la conductancia incremental, mientras que el derecho constituye la conductancia instantánea. Las variaciones incrementales pueden aproximarse a los incrementos que hayan sufrido la V_{fv} e I_{fv} , para compararlos con los valores actuales medidos con los



valores medidos en el instante anterior. Por tanto, analizando la derivada se puede comprobar si el generador FV opera en su punto MPP o fuera de este.

$$\frac{dP_{fv}}{dV_{fv}} > 0 ; V_{fv} < V_{PPM} ; \frac{dP_{fv}}{dV_{fv}} = 0 ; V_{fv} = V_{PPM} ; \frac{dP_{fv}}{dV_{fv}} < 0 ; V_{fv} > V_{MPP}$$

Ventajas:

- Las ventajas que ofrece este algoritmo son que ofrece un buen rendimiento bajo condiciones atmosféricas cambiantes.
- Consigue una oscilación menor alrededor del MPP.

Inconveniente:

- Requiere un circuito de control complejo que puede conllevar un elevado coste del sistema.

5.2.1.5 Método de la capacidad parásita:

Este método es similar al del crecimiento de conductancia, al que se le incluye la capacidad c_{fv} de la unión parásita p-n de las células fotovoltaicas. De manera que utilizando el rizado generado por el convertidor, se procesa para eliminar dicha capacidad parásita.

El análisis de este algoritmo se a partir de la ecuación de la potencia instantánea del GFV. Se intenta expresar la corriente como función de V_{fv} de manera que toda la ecuación nos dependa de éste. Teniendo en cuenta que la condición del MPP del sistema se cumple cuando la derivada de la potencia respecto a la tensión del generador es cero podemos obtener una relación entre conductancias.

Si c_{fv} es igual a cero la ecuación se simplifica al método del incremento de conductancia. Como inconveniente tenemos que este requiere de dos multiplicadores con además de filtros pasa altos y pasa bajos para eliminar componentes de continua y de rizado por lo que hace que el sistema de control sea más complejo.



5.2.2 Métodos por modulación:

En los métodos discutidos anteriormente, la derivada de la potencia se ha utilizado de diversas formas para determinar la ubicación relativa del punto de máxima potencia MPP. El ajuste apropiado de dicha tensión finalmente produce un punto de operación cercano y oscilante alrededor del MPP. Estas oscilaciones son entonces generadas automáticamente por el control de realimentación utilizado. Sin embargo, hay métodos que añaden una oscilación.

5.2.2.1 Método de oscilación forzada:

Este método introduce un pequeño rizado de tensión de 100 Hz que se añade a la tensión de operación del GFV. Esto conlleva un rizado de potencia, cuya amplitud y fase son dependientes de la localización relativa del punto de operación al MPP.

Si dicha modulación transcurre en la parte izquierda de MPP el rizado de tensión y de la potencia estará en fase. En cambio, si la modulación se realiza en parte derecha del MPP, el rizado de la potencia de salida estará 180° desfasado con respecto a la tensión. En el caso de que el punto de operación coincida con el MPP, rizado de la potencia de salida tendrá dos veces la frecuencia del rizado de la tensión con una amplitud muy pequeña.

Ventajas:

- El análisis de la amplitud y la fase proporcionan información sobre la ubicación del MPP.
- Además, la señal de salida converge lentamente hacia cero, cuando el punto de operación se acerca al MPP.

Esto permite que la tensión de operación V sea lentamente ajustada hacia el V_{MPP} . Con ello no habrá ninguna oscilación continua alrededor del MPP ocasionado por un ciclo de trabajo fijo. La única oscilación que ocurre, son los 100 Hz de la modulación de la tensión de operación.

Desventajas:

- la complejidad de su implementación
- así como la evaluación de las señales de amplitudes muy bajas.



5.2.2.2 Método de la lógica difusa:

Controles de lógica difusa midiendo dos variables. Las ventajas de estos controles sobre los convencionales se pueden resumir en que no necesitan modelos matemáticos exactos y pueden trabajar con entradas imprecisas además de poder manejar no linealidades.

Estos algoritmos se implementan en dispositivos lógicos programables. La idea básica es sintetizar lógicamente el controlador en un conjunto de ecuaciones booleanas y se forma la tabla de búsqueda del controlador. Esto supone, en la mayoría de los casos, una sintetización compleja.

El control tiene 3 etapas:

1. Ambigüedad: los valores numéricos son convertidos en valores “difusos”. Por ejemplo: ‘muy grande’, ‘grande’, ‘medio’, ‘pequeño’ o ‘muy pequeño’.
2. Búsqueda de los valores en tablas: se selecciona un valor de salida respecto a los valores difusos de entrada.
3. No ambigüedad: el valor difuso de salida de la tabla lo convertimos en un valor numérico

Una vez definido los tipos de algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia MPP de paneles solares fotovoltaicos, nos centramos en los tres algoritmos más utilizados para su simulación y desglose de manera que cualquier alumno mediante la realización de las prácticas sea capaz de comprender su funcionamiento.

De todos los algoritmos nos centraremos en tres:

- Conductancia incremental.
- Perturbación y observación.
- Algoritmo de la primera diferencial.



6

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ANÁLISIS DE ALGORITMOS MPPT Y ZONAS DE FUNCIONAMIENTO (P-V)

6. Análisis de los posibles estados y zonas de funcionamiento de los algoritmos MPPT:

Antes de empezar a definir en profundidad los algoritmos es conveniente tener una idea de que zonas de funcionamiento tenemos y sus implicaciones.

Partimos de la curva característica P-V, que obtenemos del panel fotovoltaico, como ya sabemos esta curva depende de la configuración que tenga el panel (proceso de fabricación de las células y unión entre ellas) y de las condiciones ambientales (temperatura y radiación solar incidente). Analizamos los posibles estados y su dirección de movimiento en la curva:

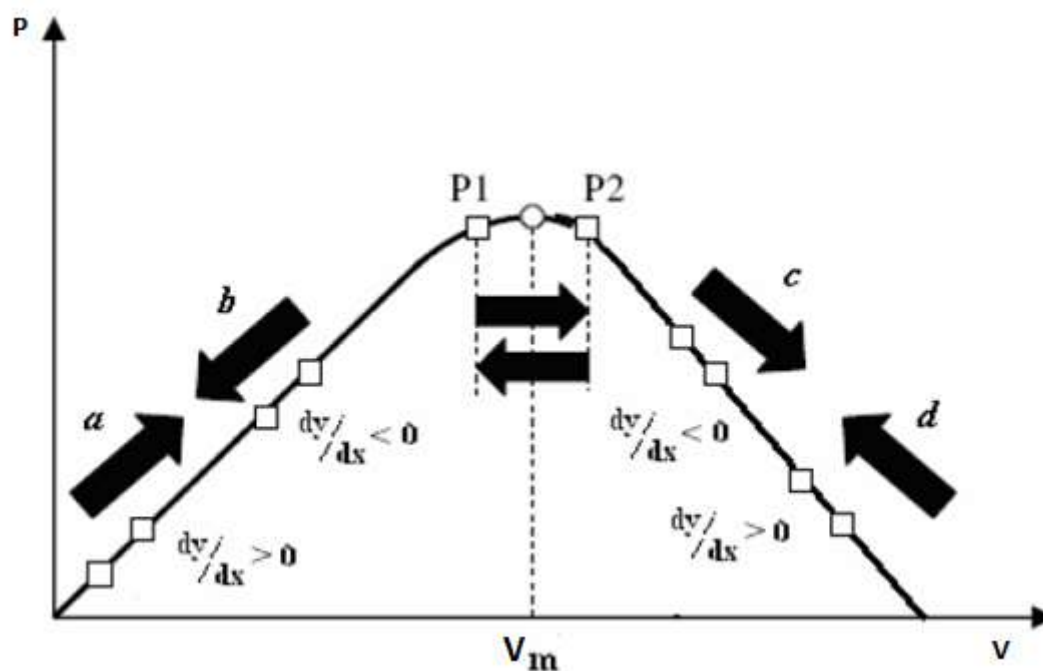


Figura 26. Curva de ejemplo de posibles estados P-V de un PV.

Caso a:

Aumento tanto de potencia como de tensión, esto implica que la $\frac{dP}{dV} > 0$, es decir que la pendiente es positiva. Trayectoria de aproximación al punto de máxima potencia por la izquierda.

Caso b:

Disminuye tanto la potencia como la tensión, esto implica que la $dP/dV < 0$, es decir pendiente negativa. Corresponde a una trayectoria que se aleja del punto de máxima potencia.

Caso c:

La tensión aumenta, pero la potencia disminuye, esto implica que $dP/dV < 0$, es decir que la pendiente es negativa. Nos alejamos del punto de máxima potencia por la derecha.

Caso d:

La tensión disminuye, pero la potencia aumenta, esto implica que $dP/dV > 0$, es decir que la pendiente es positiva. Nos acercamos al punto de máxima potencia por la derecha.

Caso de oscilación alrededor del MPP:

Otro posible caso es que hayamos encontrado el punto de máxima potencia y el algoritmo oscile entre los puntos P1 y P2.

En el caso de una configuración real tendremos el siguiente caso de evolución a lo largo de la curva P-V que describe el panel solar fotovoltaico.

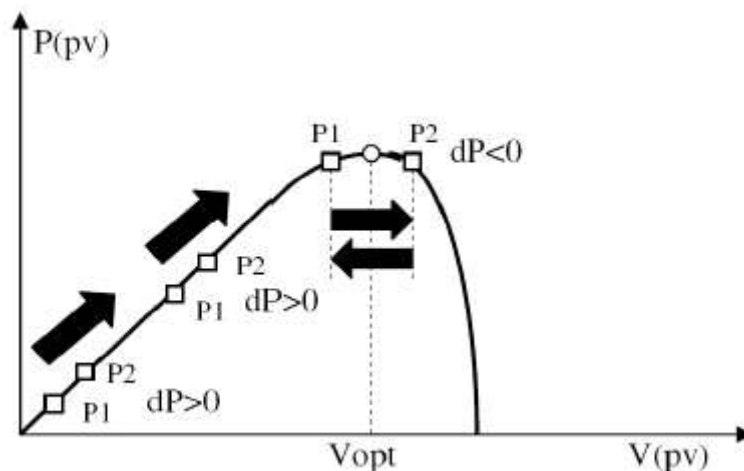
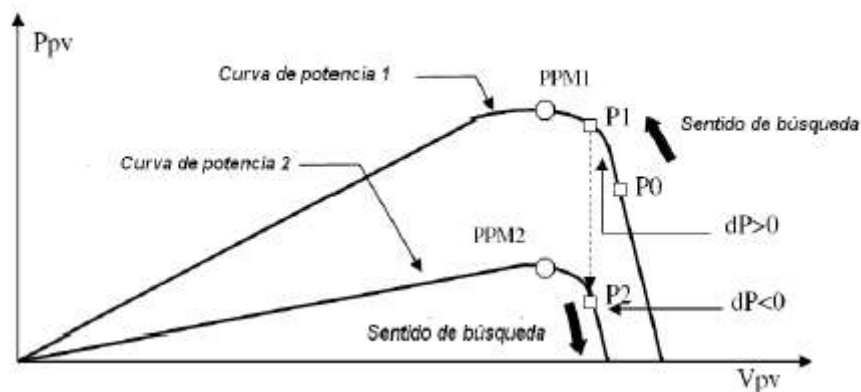


Figura 27. Funcionamiento del control MPPT.

Para la búsqueda del punto de máxima potencia se comparan los puntos de potencia P2 (Potencia actual) y P1 (Potencia en el instante anterior). De manera que si $P1 < P2$ la derivada de la potencia $\frac{dP}{dV} > 0$, lo que implica que nos acercamos al punto de máxima potencia del panel. Por el contrario si es negativa nos alejamos de dicho punto.

Para que un algoritmo de búsqueda MPPT funcione correctamente las condiciones no deben variar bruscamente ya este podría ser muy lento o incluso no llegar a obtener el punto de máxima potencia.

Los cambios en las condiciones ambientales o los cambios en la carga pueden ocurrir espontáneamente y no son previsibles. El control tendrá que ir adaptándose para seguir y poder trabajar con el punto de máxima potencia que nos ofrece el panel solar fotovoltaico. Una posible situación es la siguiente:



Debido a que la radiación solar ha disminuido el punto P2 es menor que P1, lo que implica que nos alejamos del punto de máxima potencia. De manera que el algoritmo MPPT pierde la referencia del punto de máxima potencia y se produce una inversión de sentido en la búsqueda del MPP.

Este es el mayor problema al que se enfrentan los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia en paneles solares fotovoltaicos.



7

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ALGORITMOS MPPT: CONDUCTANCIA INCREMENTAL



7. Algoritmo MPPT conductancia incremental

7.1 Introducción:

Este método se basa en el criterio de que el punto de máxima potencia es constante, para unas determinadas condiciones de irradiación y temperatura, y en la conductancia. La conductancia es la propiedad de transportar, mover o desplazar uno o más electrones en su cuerpo, es decir la facilidad de un objeto para conducir corriente eléctrica entre dos puntos. Es la propiedad inversa a la resistencia eléctrica.

7.2 Análisis del algoritmo:

Sabemos que:

La derivada de la potencia en el punto de máxima potencia es nula.

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

En la parte izquierda de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

En la parte derecha de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} < 0$$

Sabiendo que la potencia es igual $P=V \cdot I$, tenemos que:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$



$\frac{dI}{dV}$ representa el incremento de la conductancia o cambio instantáneo

$\frac{I}{V}$ representa la conductancia en un instante de tiempo

Para definir el algoritmo necesitamos realizar las comparaciones siguientes:

En el punto de máxima potencia (MPP):

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$$

En la parte izquierda de la curva P-V:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$$

En la parte derecha de la curva P-V:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$$

Al realizar esta comparación, mediante mediciones de tensión e intensidad, somos capaces de determinar en qué posición de la curva nos encontramos respecto al punto de máxima potencia del panel (MPP).

7.3 Posibles casos:

- $\Delta V \neq 0$ y $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$:

La acción de control será la de mantener la tensión de referencia, ya que estamos en el punto de máxima potencia.

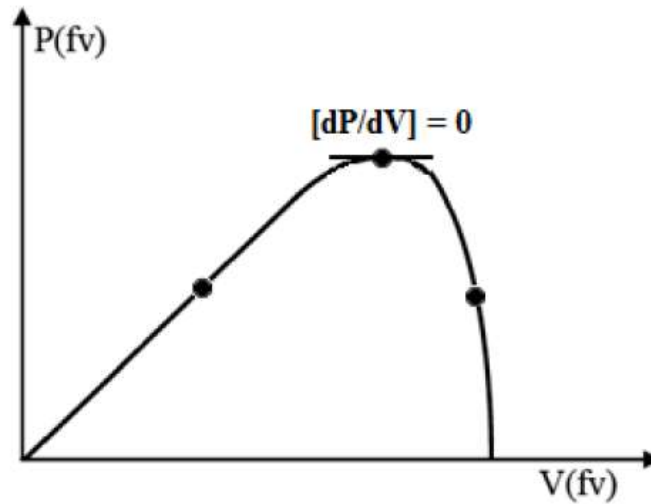


Figura 28. Curva P-V. Situados en el punto de máxima potencia (MPP).

- $\Delta V \neq 0$ y $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$, esto quiere decir que $\frac{dP}{dV} > 0$:

El incremento de tensión es distinto de cero y el incremento de la conductancia mayor que el valor en un instante de la misma, la acción que tiene que realizar es aumentar la tensión de referencia, hasta que lleguemos al punto de máxima potencia.

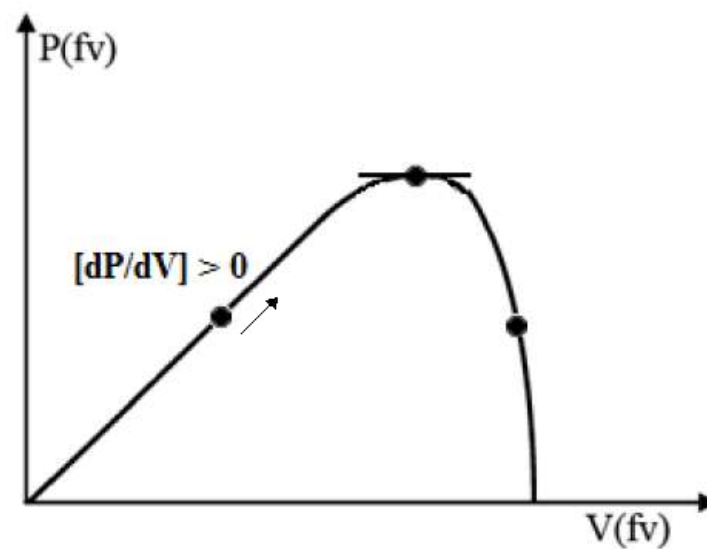


Figura 29. Curva P-V. Situados a la izquierda del MPP (Acercándonos a MPP).

- $\Delta V \neq 0$ y $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$, esto quiere decir que $\frac{dP}{dV} < 0$:

El incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico es distinto de cero y el incremento de la conductancia es menor que el valor en un instante de la misma, la acción que tiene realizar el control será disminuir la tensión de referencia, hasta que lleguemos al punto de máxima potencia.

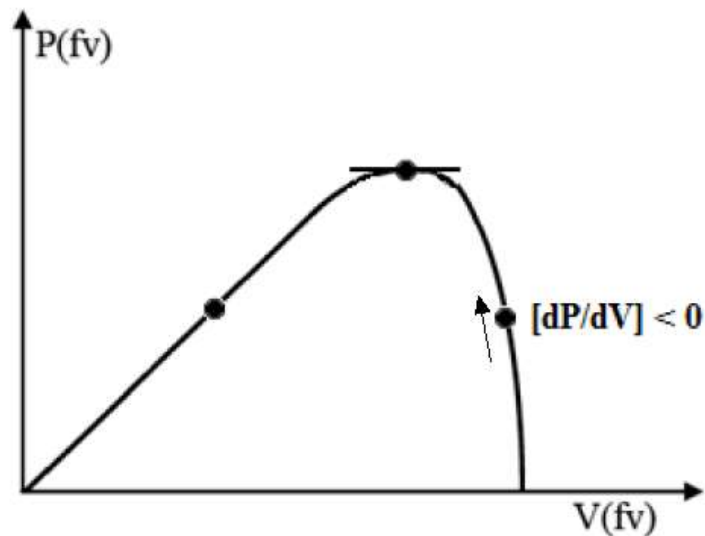


Figura 30. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (acercándonos a MPP)

- $\Delta V = 0$ y $\Delta I = 0$:

El incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico es igual a cero y el incremento de la conductancia en ese instante es igual a cero también, la acción que tiene que realizar el control será la de mantener la tensión de referencia en el mismo valor, ya que estaremos en el punto de máxima potencia.

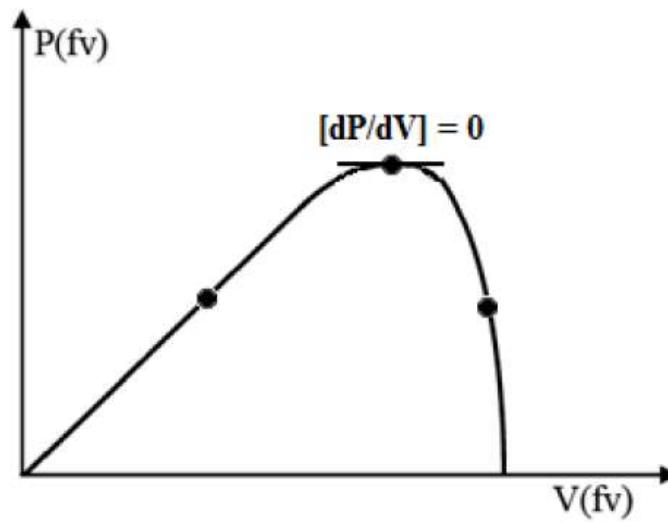


Figura 31. Curva P-V. Situados en el punto de máxima potencia (MPP).

- $\Delta V = 0$ y $\Delta I > 0$, es decir que $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$:

El incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico es igual a cero y el incremento de la conductancia es mayor que el valor en un instante de la misma. La acción que realiza el control es aumentar la tensión de referencia, hasta que lleguemos al punto de máxima potencia.

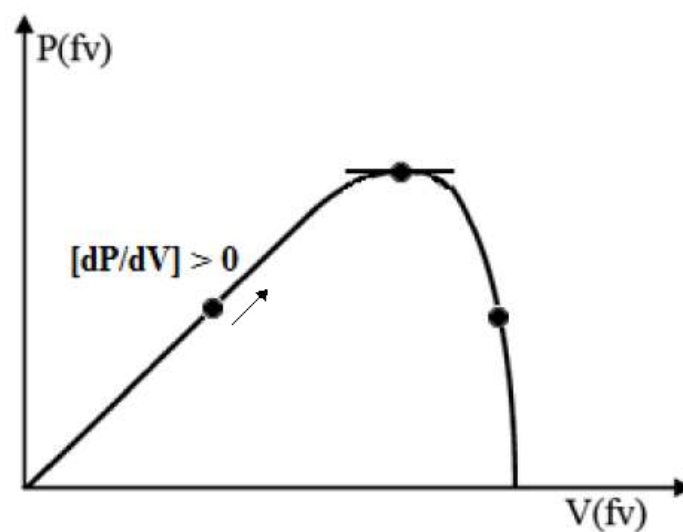


Figura 32. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (Acercándonos a MPP).

- $\Delta V = 0$ y $\Delta I < 0$, es decir que $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$:

El incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico es igual a cero y el incremento de la conductancia es menor que el valor en un instante de la misma. La acción que realiza el control es disminuir la tensión de referencia, hasta que lleguemos al punto de máxima potencia.

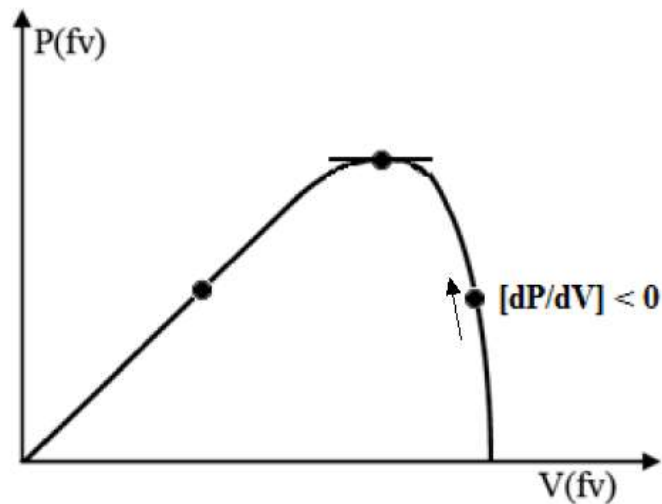


Figura 33. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (acercándonos al MPP).

7.4 Diagrama de bloques:

El algoritmo lo podemos definir con el siguiente diagrama de bloques:

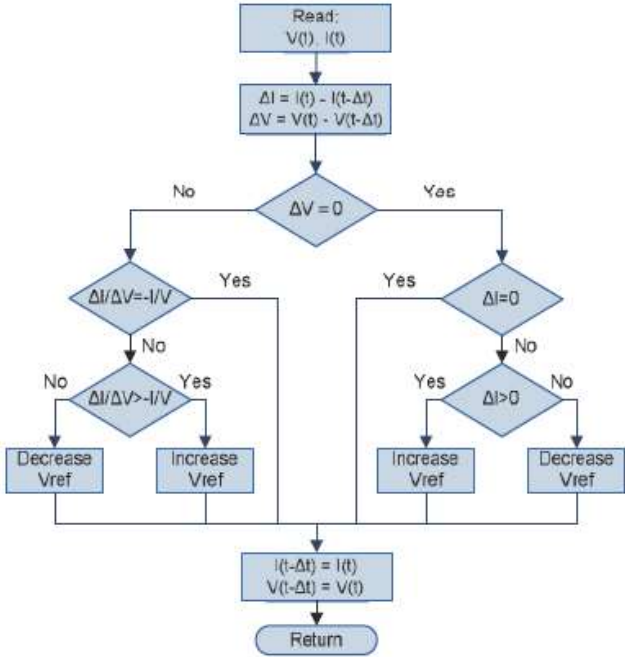
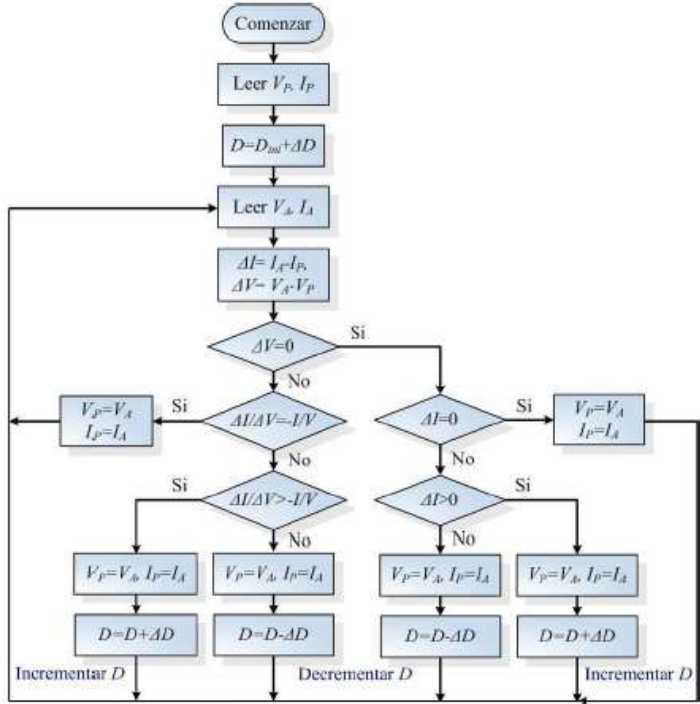


Figura 34. Diagramas de bloques del algoritmo MPPT: Conductancia Incremental. a) Diagrama hace referencia al aumento o disminución del ciclo de servicio D. b) Diagrama hace referencia al aumento o disminución de Vref.



8

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ALGORITMOS MPPT: PERTURBACIÓN Y OBSERVACIÓN



8. Algoritmo MPPT: Perturbación y observación:

8.1 Introducción:

Este método se basa en perturbar el punto de funcionamiento del generador fotovoltaico para encontrar la dirección en la que nos tenemos que mover de la curva P-V para alcanzar el punto de máxima potencia.

El procedimiento consiste en perturbar periódicamente (ya sea incrementando o decrementando el punto de funcionamiento) la tensión del panel fotovoltaico y observar la potencia resultante.

Este método se basa en la comparación de potencias. Para ello muestreamos las tensiones y en consecuencia la potencia para encontrar el MPP. Se puede dar los siguientes casos del funcionamiento del algoritmo:

8.2 Análisis del algoritmo:

La lógica de este algoritmo se explicita en la siguiente tabla:

$\Delta P_{fv}(t_2)$	$V_{fv}(t_3)$
>0	+
<0	-

Podemos tener problemas con este tipo de control si hay variaciones rápidas de irradiación y temperatura ya que puede ir alejándose del MPP. Se puede mejorar la respuesta incrementando la velocidad de ejecución del algoritmo de control.

Ventajas:

- No requiere de conocimiento previo de las características del generador FV y que es relativamente simple.

Una vez alcanzado el punto de máxima potencia, el controlador sigue el comportamiento de régimen estable, caracterizado por una oscilación entorno al MPP. El algoritmo evalúa los valores de las tensiones y las corrientes del PV hacia el

valor del MPP por una variación positiva o negativa lineal de las tensiones del PV a lo largo del tiempo.

Requisitos de implementación del algoritmo de Perturbación y Observación:

Para la utilización del algoritmo se requiere el uso de dos sensores, uno de tensión y otro de intensidad. De manera que a partir de ellos obtengamos la potencia. Lo mejor para la implementación es el uso de DSPs (microcomputador de control).

8.3 Posibles casos:

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V > 0$:

La variación de la potencia es mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

El incremento de tensión también es positivo, con lo que la acción de control será la disminuir el ciclo de servicio D, de forma que aumente la tensión y alcancemos el punto de máxima potencia por la izquierda.

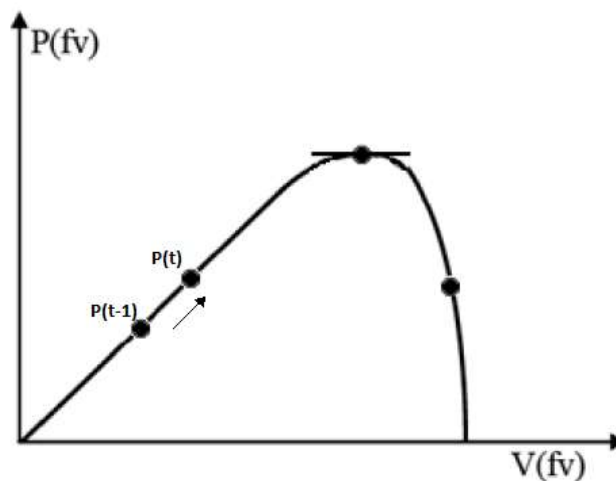


Figura 35. Curva P-V. Situado a la derecha del MPP (acercándonos a MPP).

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V < 0$:

La variación de la potencia es mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

El incremento de tensión es negativo, con lo que la acción de control será la aumentar el ciclo de trabajo D, de forma que disminuya la tensión de salida y alcancemos el punto de máxima potencia por la derecha.

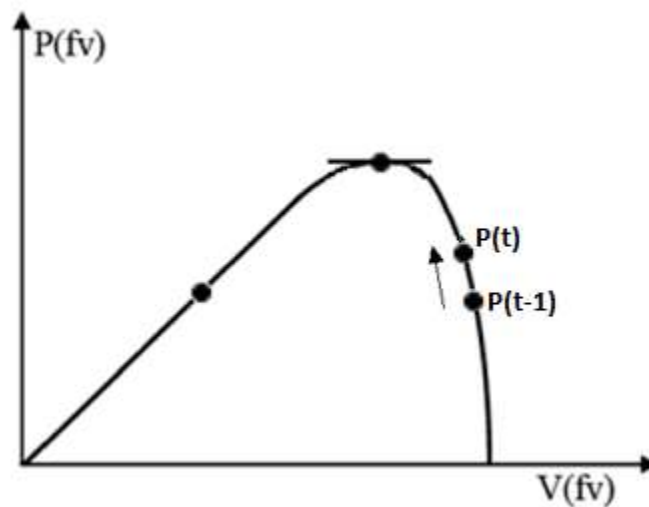


Figura 36. Curva P-V. Situados a la derecha de MPP (acercándonos a MPP).

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V = 0$:

La variación de la potencia es mayor que 0, indica que en el muestreo anterior la perturbación continúa en la misma dirección.

Al ser el incremento de la tensión nulo, significa que nos encontramos en el punto de máxima potencia, con lo que la acción de control será la de mantener el ciclo de servicio constante.

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V > 0$:

La variación de potencia es menor que 0, indica que en la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

El incremento de tensión es positivo, con lo que la acción de control será la de aumentar el ciclo de servicio D , de esta manera la tensión disminuirá hasta que alcancemos el punto de máxima potencia por la derecha.

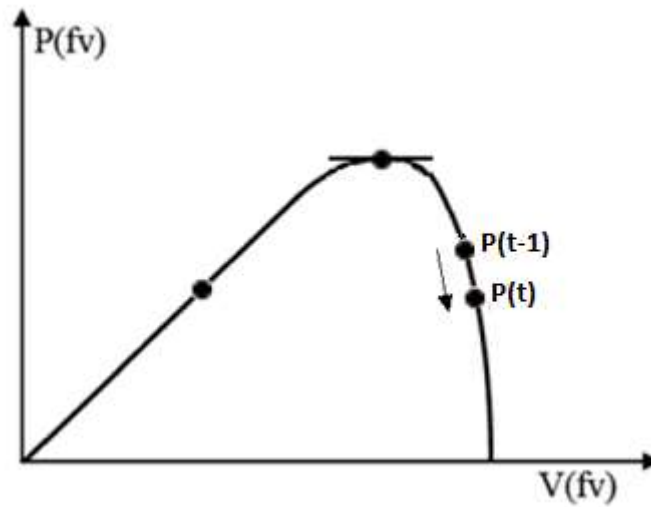


Figura 37. Curva P-V. Situados a la derecha del MPP (alejándonos del MPP).

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V < 0$:

La variación de potencia es menor que 0, indica que en la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

El incremento de tensión es negativo, con lo que la acción de control será la de disminuir el ciclo de servicio D, de manera que aumente la tensión y acercarnos al punto de máxima potencia por la izquierda.

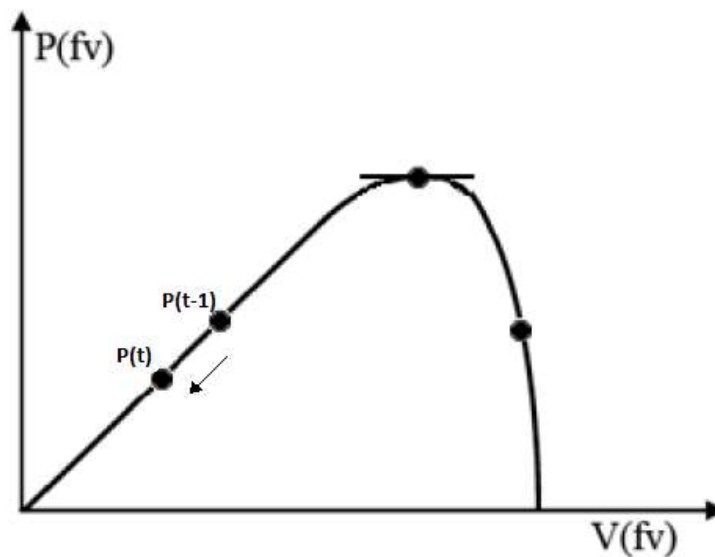


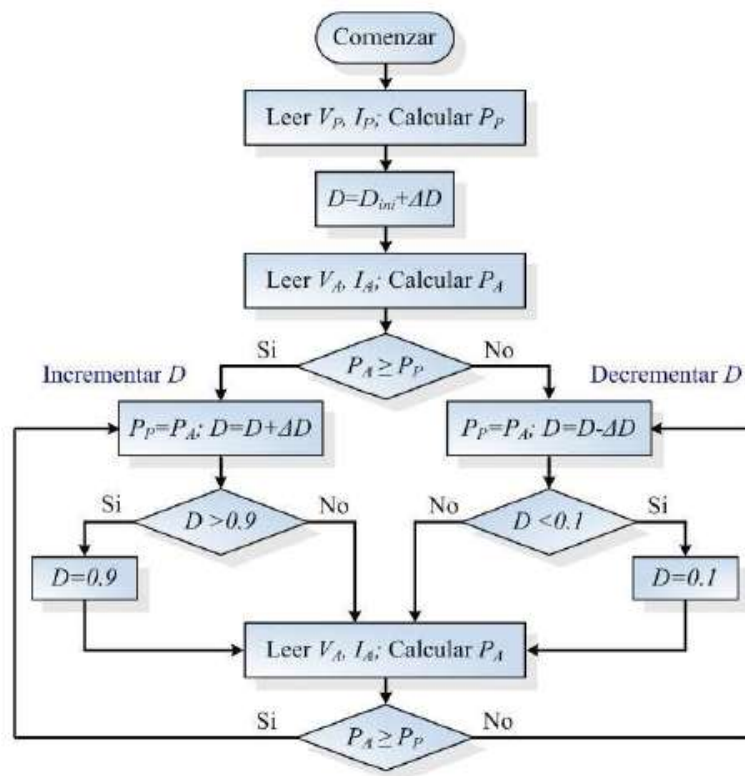
Figura 38. Curva P-V. Situado a la izquierda del MPP (alejándonos del MPP).

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V = 0$:

La variación de potencia es menor que 0, indica que en la perturbación deberá ir en sentido contrario al muestreo anterior.

Al ser el incremento de la tensión nulo, significa que nos encontramos en el punto de máxima potencia, con lo que la acción de control será la de mantener el ciclo de servicio constante.

8.4 Diagrama de bloques:



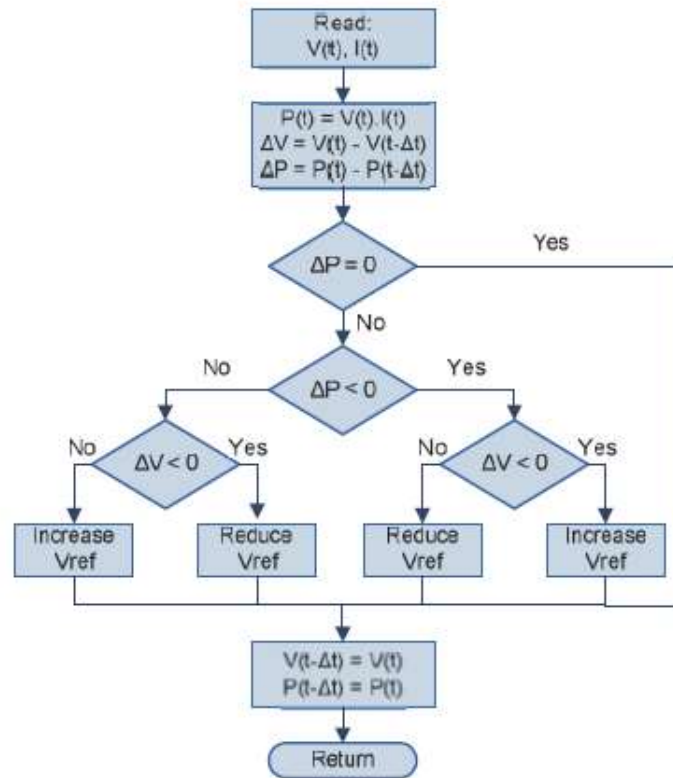


Figura 39. Diagrama de bloques del algoritmo P&O. a) Diagrama hace referencia a el aumento o disminución del ciclo de servicio D. b) Diagrama hace referencia al aumento o disminución de Vref.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



9

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ALGORITMOS MPPT: DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN



9. Algoritmo MPPT: diferencial de primer orden.

9.1 Introducción:

Este método se basa en el criterio de que el punto de máxima potencia es constante, para unas determinadas condiciones de irradiación y temperatura.

Para el cálculo del punto de máxima potencia es necesario conocer en este algoritmo las variaciones de tensión e intensidad que sufre el panel entre dos instantes de muestreo. Una vez tengamos las diferencias y el valor de la tensión e intensidad instantánea, deberemos comprobar en qué punto de la curva P-V del panel nos encontramos y cuál es la dirección de la variación.

9.2 Análisis del algoritmo:

Sabemos que:

La derivada de la potencia en el punto de máxima potencia es nula.

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

En la parte izquierda de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

En la parte derecha de la curva P-V:

$$\frac{dP}{dV} < 0$$

Sabiendo que la potencia es igual $P=V \cdot I$, tenemos que:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$$



$$V \cdot dI = -I \cdot dV$$

Para definir el algoritmo necesitamos realizar las comparaciones siguientes:

En el punto de máxima potencia (MPP):

$$V \cdot \Delta I = -I \cdot \Delta V$$

En la parte izquierda de la curva P-V:

$$V \cdot \Delta I > -I \cdot \Delta V$$

En la parte derecha de la curva P-V:

$$V \cdot \Delta I < -I \cdot \Delta V$$

Al realizar esta comparación, mediante mediciones de tensión e intensidad, somos capaces de determinar en qué posición de la curva nos encontramos respecto al punto de máxima potencia del panel (MPP).

9.3 Posibles casos:

- $\Delta P > 0$: $\Delta V > 0$ y $\Delta I < 0$:

El incremento de tensión es mayor que cero y el incremento de intensidad es menor que cero, esto implica que $V \cdot \Delta I > -I \cdot \Delta V$. La acción que tiene que realizar es aumentar la tensión de referencia (aumentando el ciclo de servicio D), hasta que llegemos al punto de máxima potencia (MPP).

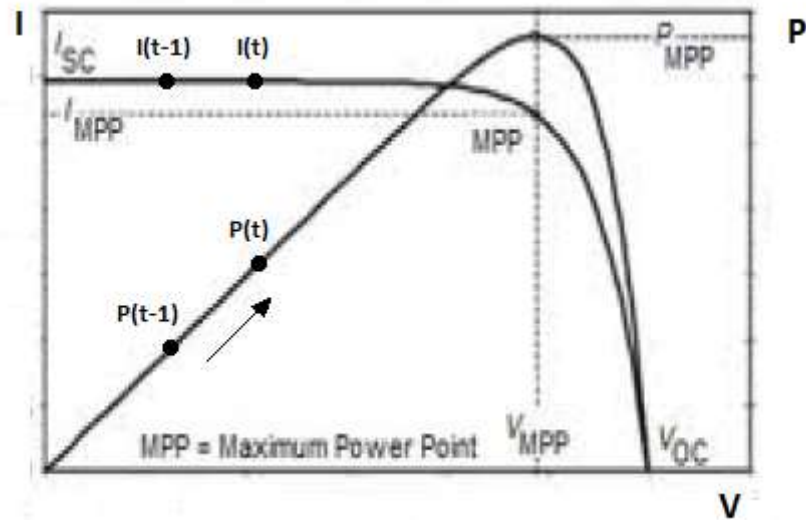


Figura 40. Curva P-V, I-V. Situado a la izquierda del MPP (acercándonos al MPP).

- $\Delta P > 0$: $\Delta V < 0$ y $\Delta I > 0$:

El incremento de tensión es negativo y el incremento de intensidad es mayor que cero, esto implica que $V \cdot \Delta I < -I \cdot \Delta V$, ya que el incremento de potencia es mayor que cero. La acción que tiene que realizar el controlador es la disminuir la tensión de referencia (disminuyendo el ciclo de servicio D), hasta que alcanzamos el punto de máxima potencia (MPP).

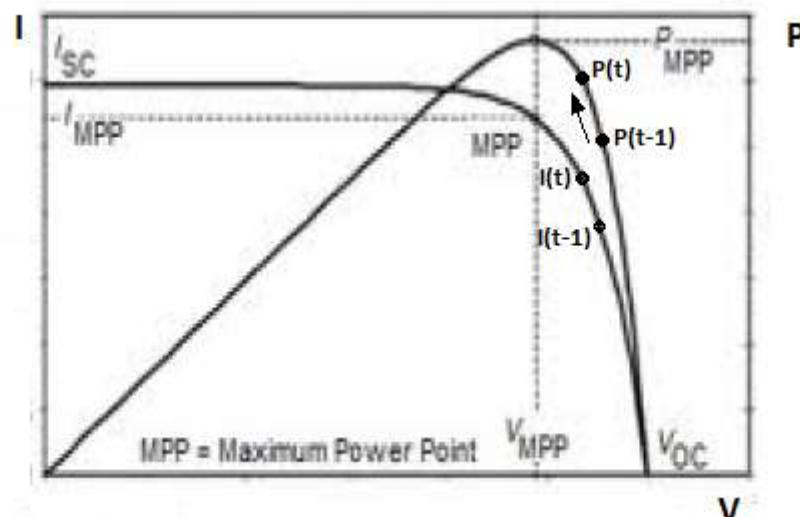


Figura 41. Curva P-V, I-V. Situado a la derecha del MPP (acercándonos al MPP).

- $\Delta P > 0$: $\Delta V = 0$ y $\Delta I = 0$:

Al ser los incrementos de tensión e intensidad igual a cero significa que estamos en el punto de máxima potencia (MPP). Con lo que la acción del controlador será la de mantener la tensión de referencia, y mantener el ciclo de servicio D.

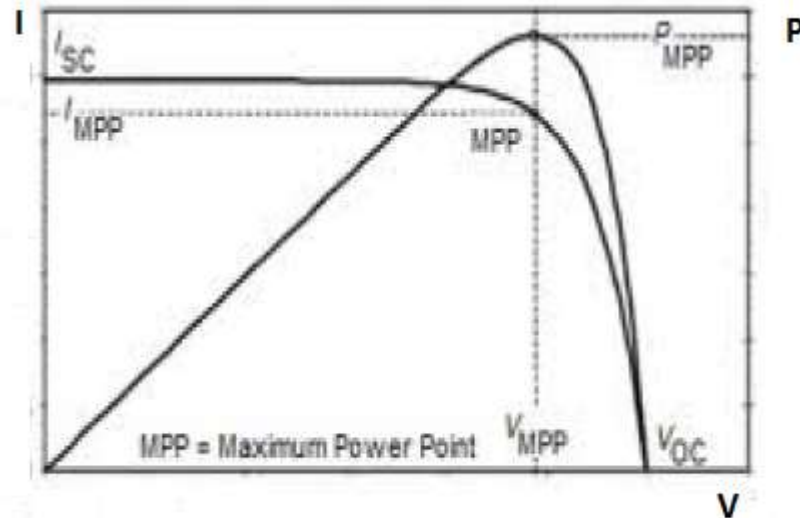


Figura 42. Curva P-V, I-V. Situados en el MPP.

- $\Delta P < 0$: $\Delta V > 0$ y $\Delta I < 0$:

El incremento de tensión es mayor que cero y el incremento de intensidad es menor que cero, al ser el incremento de potencia menor que cero $V \cdot \Delta I < -I \cdot \Delta V$. con lo que la acción del controlador tiene que ser la de disminuir la tensión, para ello reducimos el ciclo de servicio D.

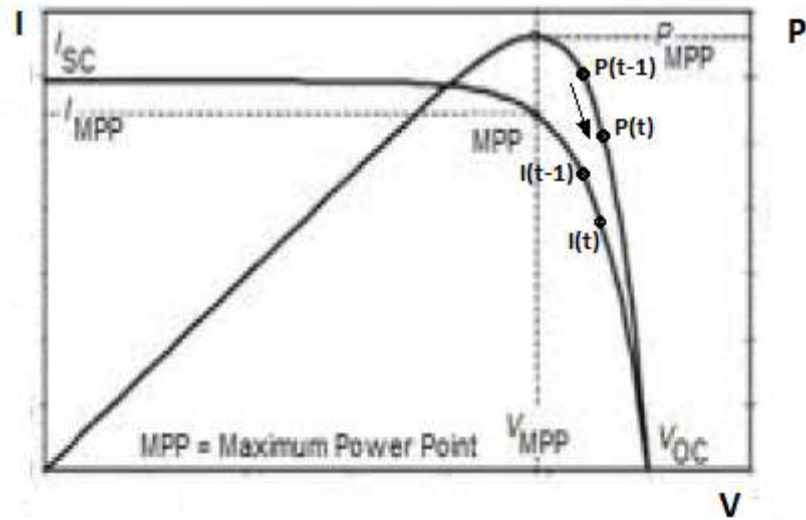


Figura 43. Curva P-V, I-V. Situado a la derecha del MPP (alejándonos del MPP).

- $\Delta P < 0$: $\Delta V < 0$ y $\Delta I > 0$:

El incremento de tensión es menor que cero y el incremento de intensidad es mayor que cero, al ser el incremento de potencia menor que cero $V \cdot \Delta I > -I \cdot \Delta V$. Con lo que la acción del controlador tiene que ser la de aumentar la tensión, para ello aumentamos el ciclo de servicio D.

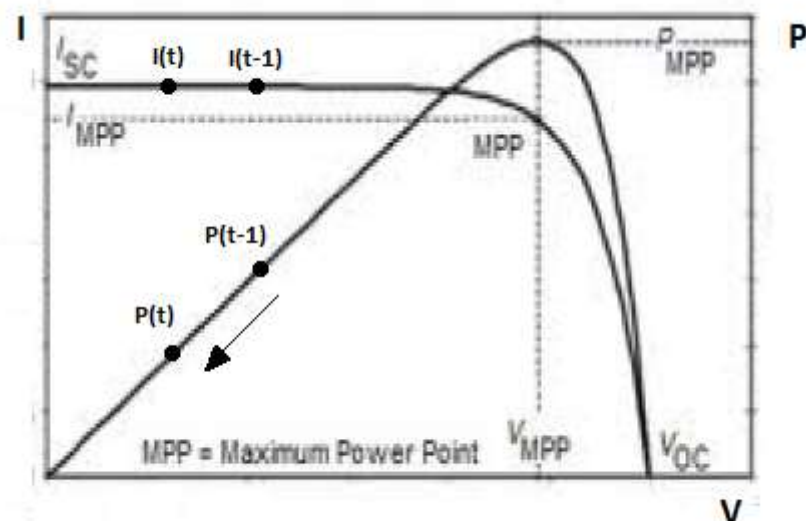


Figura 44. Curva P-V, I-V. Situado a la izquierda del MPP (alejándonos del MPP).

- $\Delta P < 0$: $\Delta V = 0$ y $\Delta I = 0$:

Al ser los incrementos de tensión e intensidad igual a cero significa que estamos en el punto de máxima potencia (MPP). Con lo que la acción del controlador será la de mantener la tensión de referencia, y mantener el ciclo de servicio D.

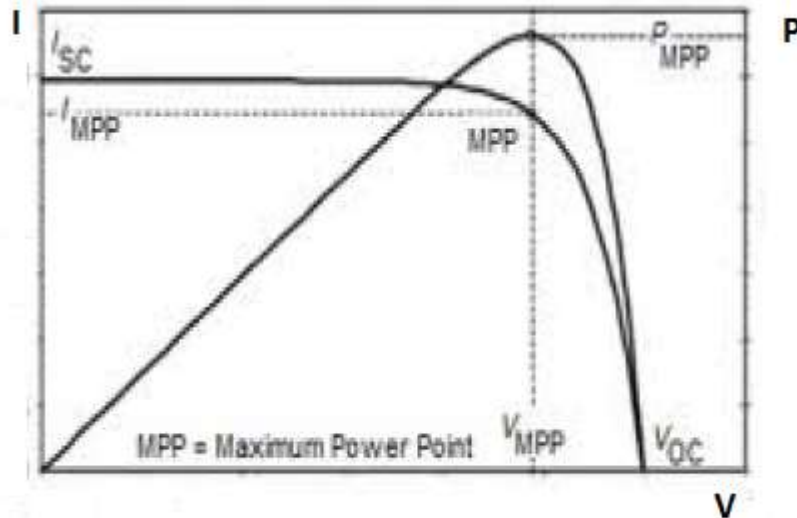


Figura 45. Curva P-V, I-V. Situado en el MPP.

Sabemos que esta es la condición de que estemos en el punto de máxima potencia. Al aplicar la transformada de Laplace tenemos que:

$$V(s) \cdot I(s)s = -I(s) \cdot V(s)s$$

De manera que el algoritmo los definimos con el siguiente esquema para la simulación:

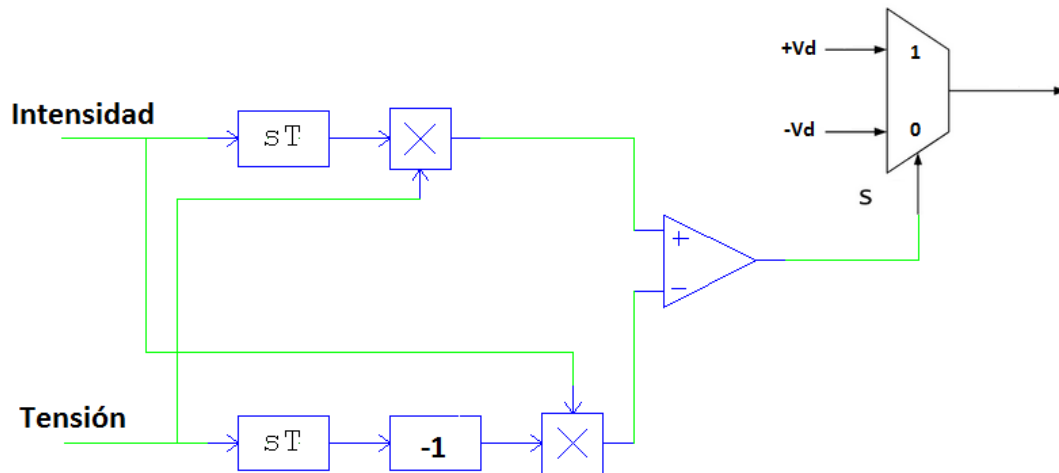


Figura 46. Esquema del algoritmo diferencial de primer orden.

Visto cómo funciona el algoritmo, este tiene como ventajas que es muy sencillo de implementar, ya que necesita un multiplexor, un comparador de señales y dos circuitos previos de multiplicación de las señales de tensión e intensidad.

El problema que tiene es que como el algoritmo de la conductancia incremental, necesita un sistema de control complejo y que requiere alta carga computacional, ya que tiene que guardar los puntos actuales y anteriores, para el cálculo de la acción correctora que nos lleva al punto de máxima potencia.



10

Simulación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

PRÁCTICAS



10.1 Introducción:

Una vez definido y estudiado los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos, definido como uno de los objetivos, es la realización de unas prácticas para la simulación de dichos algoritmos.

De manera que cualquier interesado en el ampliar el conocimiento en energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones pueda conocer en profundidad los algoritmos utilizados para un mayor aprovechamiento de los paneles solares fotovoltaicos.

Estas prácticas consisten en el desglose y conocimiento del algoritmo parte por parte de manera, que su realización llegue a la comprensión del algoritmo.

Las prácticas realizadas están como anexos a este proyecto ([véase Anexos](#)).

Para las prácticas hemos utilizado la simulación de panel solar fotovoltaico que tiene las siguientes características:

Manufacturer Datasheet		
Number of Cells Ns:	36	
Maximum Power Pmax:	60	(W)
Voltage at Pmax:	17.1	(V)
Current at Pmax:	3.5	(A)
Open-Circuit Voltage Voc:	21.1	(V)
Short-Circuit Current Isc:	3.8	(A)
Temperature Coeff. of Voc:	-0.38	(%/oC or oK)
Temperature Coeff. of Isc:	0.065	(%/oC or oK)
Standard Test Conditions:		
Light Intensity S0:	1000	W/(m*m)
Temperature Tref:	25	(oC)
dv/di (slope) at Voc: (if available)	-0.68	(V/A)

Model Parameters (defined)		
Band Energy Eg:	1.12	(eV)
Ideality Factor A:	1.2	
Shunt Resistance Rsh:	1000	(Ohm)
Coefficient Ks:	0	

Model Parameters (calculated)		
<input type="button" value="Calculate Parameters"/>		
Series Resistance Rs:	0.008	(Ohm)
Short Circuit Current Isc0:	3.8	(A)
Saturation Current Is0:	2.16e-8	(A)
Temperature Coefficient Ct:	0.0024	(A/K)

Operating Conditions		
Light Intensity S:	1000	W/(m*m)
Ambient Temperature Ta:	25	(oC)

Figura 47. Características del panel solar fotovoltaico simulado.

Las condiciones de operación en las que se realizarán las simulaciones son las siguientes:

- S (irradiancia) = 1000 W/m².
- T (temperatura) = 25 °C.

El panel utilizado tiene las siguientes características, para ello podemos realizar una simulación en el que intervenga solo el panel solar fotovoltaico y dar todas las posibles condiciones de tensión o podemos utilizar una aplicación que nos ofrece el programa Psim, Renewable Energy(Solar Power). Esta última es la opción óptima ya que aparte de las gráficas P-V e I-V, muestra el punto de máxima potencia.

Universidad de Valladolid

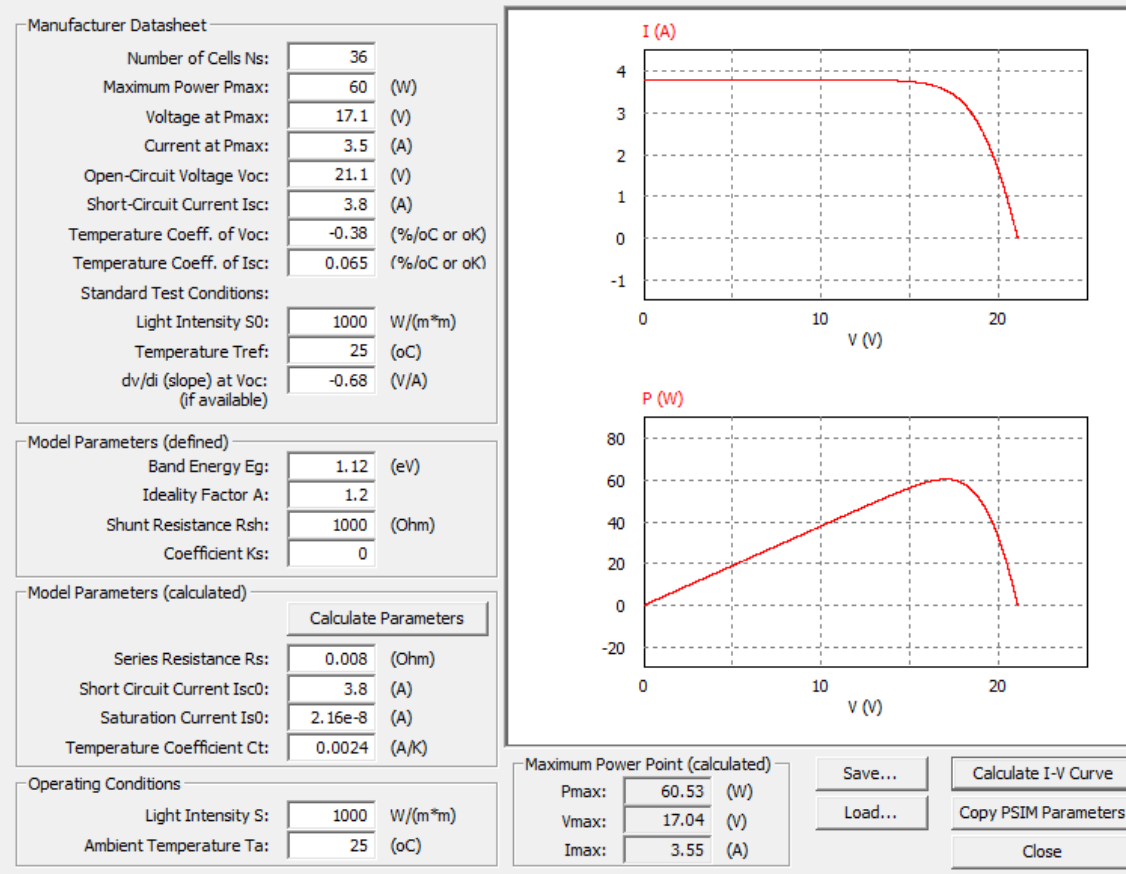


Figura 48. P-V, I-V. Psim Renewable Energy (Solar Power).

Mediante esta interfaz de simulación podemos variar las condiciones de operación. De esta manera podemos ver como varia el punto de máxima potencia (tensión e intensidad del panel) para distintas irradiancias o temperaturas.

Todos los circuitos de simulación constan de tres partes diferenciadas:

- Panel solar fotovoltaico.
- Convertidor de potencia CC/CC + Carga (en este caso una batería).
- Circuito de control (algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia).

Cada parte la podemos interpretar como un bloque, el cual tiene unas señales entradas y unas salidas:

Panel solar fotovoltaico:

Como entradas tiene:

- Señal que simula la irradiancia incidente.
- Señal que simula la temperatura a la que trabaja el panel.



- Intensidad que nos ofrece el panel. El panel solar es una fuente de corriente, para trabajar con el convertidor de potencia lo tenemos que convertir en una fuente de tensión, de ahí el condensador en la entrada del convertidor.

Convertidor CC/CC:

Como entradas tiene:

- Tensión de entrada al convertidor proveniente del condensador.
- Señal de activación del polo de potencia. Esta controla el paso de corriente de la entrada a la salida del convertidor. (Ciclo de servicio D).

Como salidas tiene:

- Tensión e intensidad a la carga. En este caso al ser la carga una batería, la tensión en la salida es constante con lo que solo varía la intensidad en la salida, como consecuencia también la potencia.

Circuito de control (Algoritmo MPPT):

Como entradas tiene:

- Tensión del panel solar (condensador de entrada del convertidor).
- Intensidad del panel solar fotovoltaico.

Como salidas tiene:

- Señal de activación del polo de potencia del convertidor. Dependiendo de las condiciones de operación la tensión en la salida siempre tiene que ser la misma, de manera que el control ajusta el ciclo de servicio para que así sea.



10.2 Práctica 1: Algoritmo MPPT: Perturbación & Observación

10.2.1 Circuito de simulación:

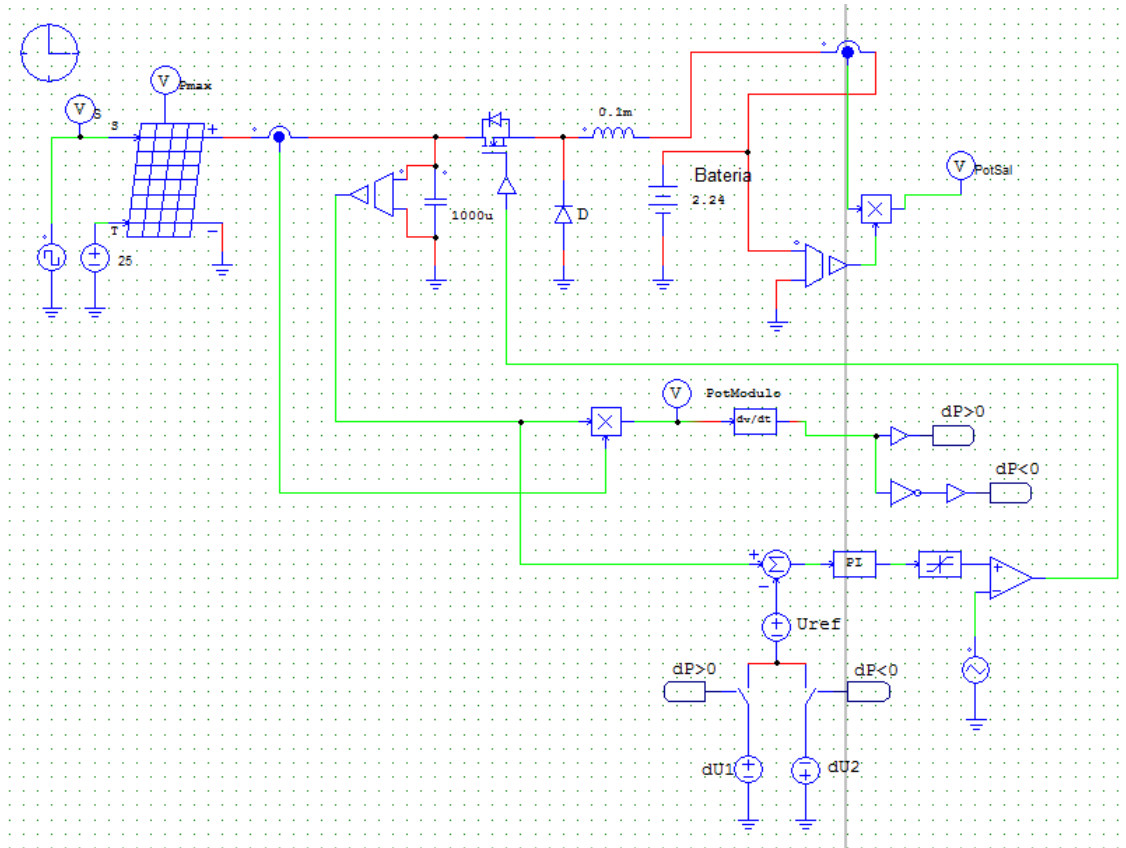


Figura 49. Circuito de simulación Perturbación Y Observación.

10.2.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:

En este apartado simulamos el circuito de manera que podamos observar ante un cambio en la irradiancia incidente, la potencia que nos da el panel y la potencia de salida del convertidor:

- S (Irradiancia)
- Potsalida y Pmax
- Potmodulo y Pmax

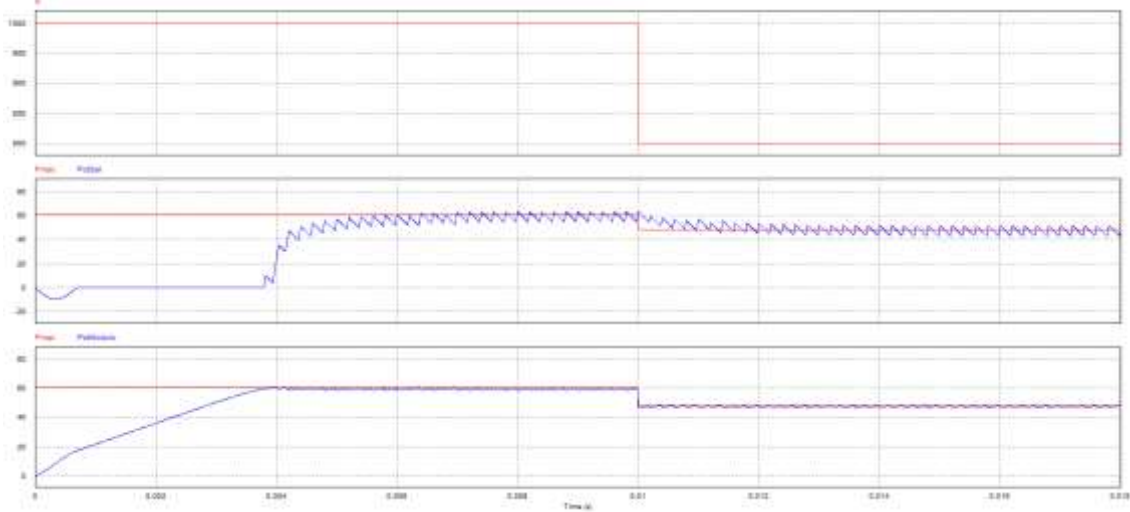


Figura 50. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (P&O).

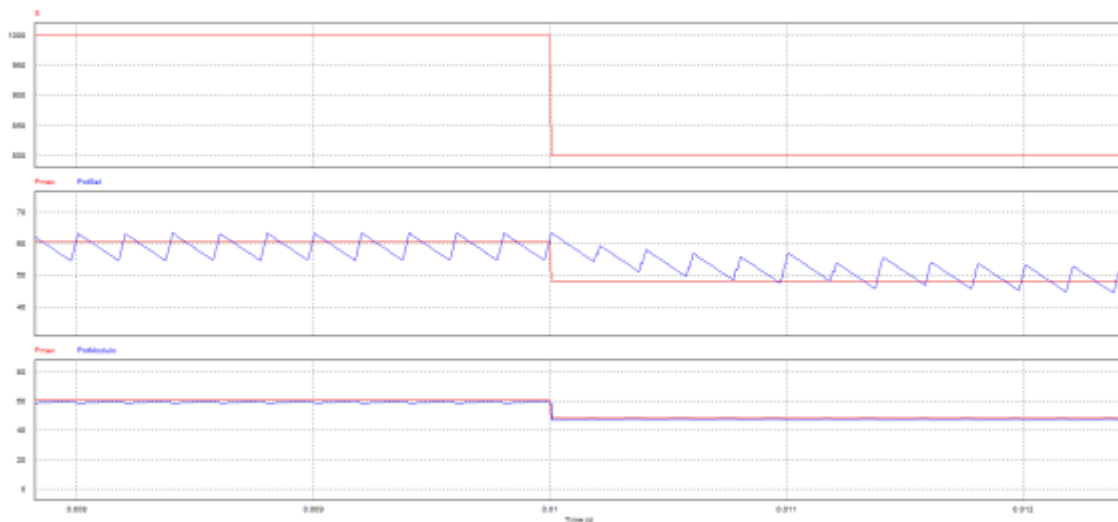


Figura 51. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (P&O) (detalle).

10.2.3 Resultados y observaciones:

Como podemos observar la potencia que ofrece el panel se ajusta a la potencia máxima que ofrece. Sabemos que el punto de máxima potencia varía, pero la tensión se mantiene prácticamente constante ante una variación de la irradiancia incidente en el panel, con lo que es la intensidad la que varía.

La potencia de salida se ajusta pero tiene un pequeño retardo, el algoritmo es el encargado del ajuste. Este algoritmo es el más sencillo de implementar por lo que es el más utilizado en las instalaciones. El problema que tiene es el ajuste del incremento en la tensión de referencia. Posibles casos:

- Si el incremento en la tensión de referencia es grande:
 - El ajuste ante una variación de las condiciones de operación del panel es muy rápida, pero una vez que llega al punto de máxima potencia (para

dichas condiciones) el control hace que fluctúe en gran medida entorno a dicho punto y las pérdidas de potencia son elevadas.

- Si el incremento en la tensión de referencia es pequeño:
 - El ajuste ante una variación de las condiciones de operación del panel es muy lenta, pero una vez que llega y se mantienen las condiciones, las pérdidas son mínimas.

Por esto tenemos que llegar a un compromiso de pérdidas de potencia reducidas y una actuación rápida ante las perturbaciones o cambios en las condiciones de operación.

10.3 Práctica 2: Algoritmo MPPT: Diferencial de primer orden

10.3.1 Circuito de simulación:

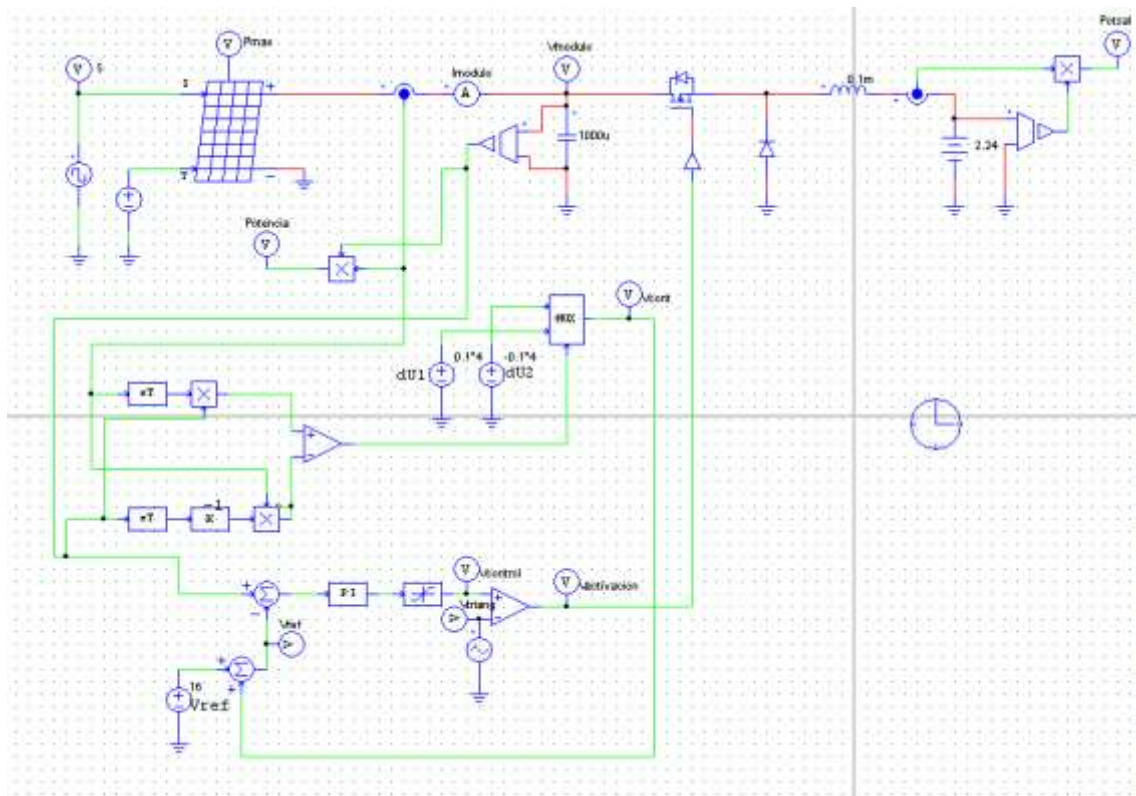


Figura 52. Circuito de simulación: diferencial de primer orden

10.3.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:

En este apartado simulamos el circuito de manera que podamos observar ante un cambio en la irradiancia incidente, la potencia que nos da el panel y la potencia de salida del convertidor:

- S (Irradiancia)
- Ptsalida y Pmax
- Potmodulo y Pmax

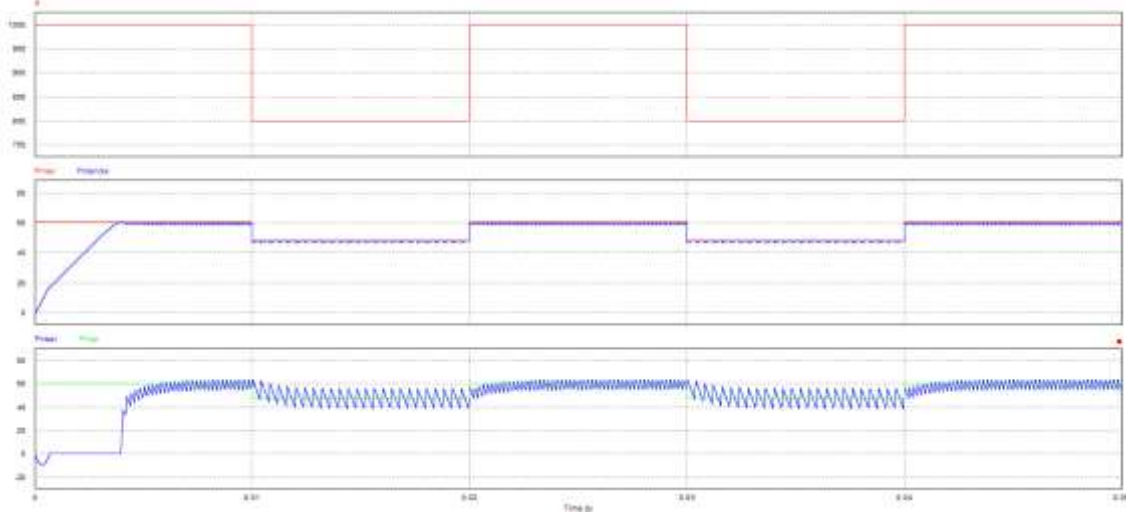


Figura 53. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Diferencial de primer orden).

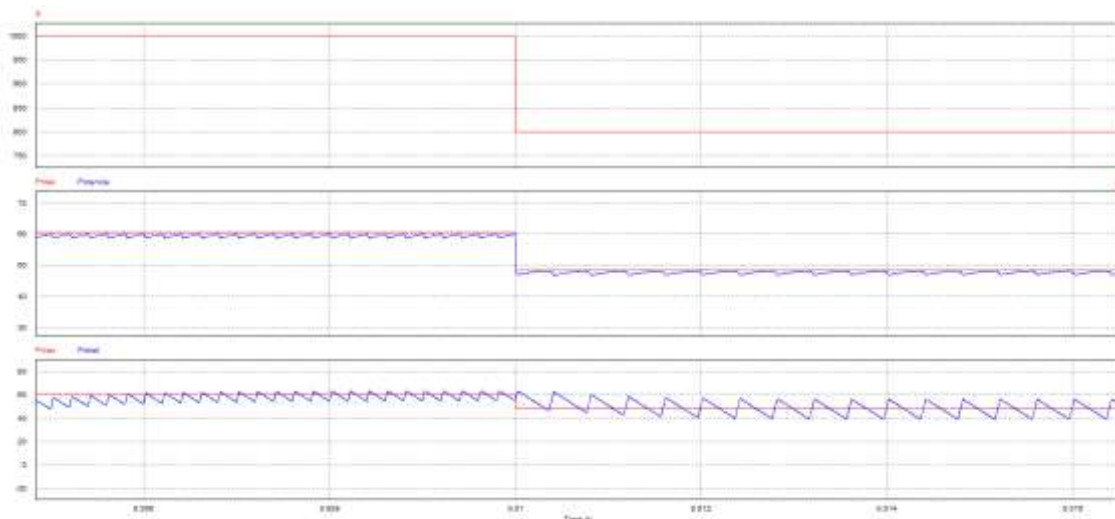


Figura 54. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Diferencial de primer orden) (detalle).

10.3.3 Resultados y observaciones:

Como podemos observar la potencia que ofrece el panel se ajusta a la potencia máxima que podemos obtener del panel en esas condiciones. El punto de funcionamiento se mantiene constante una vez hemos alcanzado el transitorio. La tensión del panel se mantiene prácticamente constante ante una variación de la irradiancia incidente, de manera que es la intensidad la que varía.

Para condiciones estándar de funcionamiento el panel con este algoritmo funciona de manera óptima ($S=1000\text{W/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$). Es cuando la irradiancia disminuye cuando se muestran los defectos que tiene este algoritmo.

Como vemos en la gráfica la potencia de salida cuando la irradiancia es máxima tiene muy poco rizado y se ajusta bien, pero cuando la irradiancia disminuye, sabiendo

que es la intensidad la que varía, las pérdidas de potencia se incrementan (en mayor medida cuanto menos irradiancia reciba el panel).

Aunque el retardo de ajuste de la potencia de salida es relativamente pequeño comparado con los algoritmos comparados.

10.4 Práctica 3: Algoritmo MPPT: Conductancia incremental.

10.4.1 Circuito de simulación:

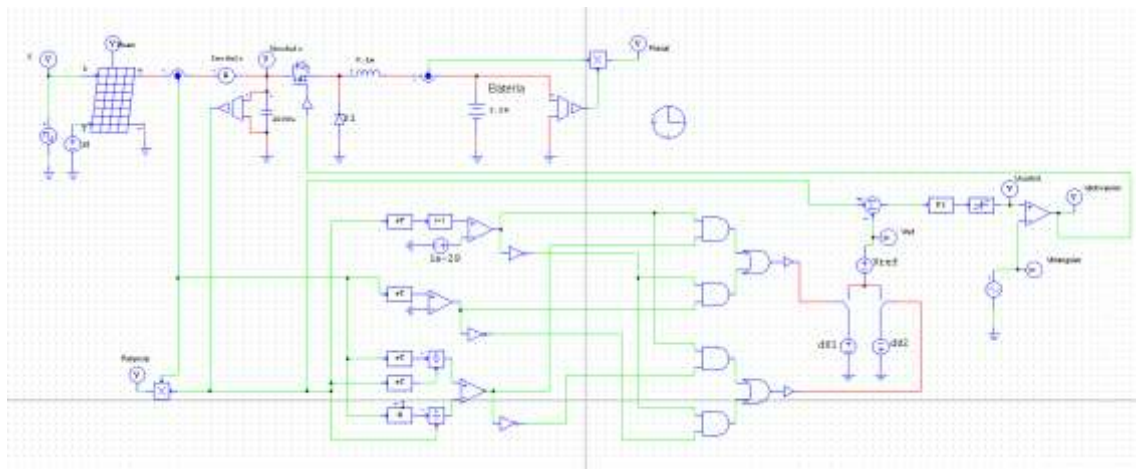


Figura 55. Circuito de simulación Conductancia Incremental.

10.4.2 Gráficas que muestran el comportamiento del algoritmo:

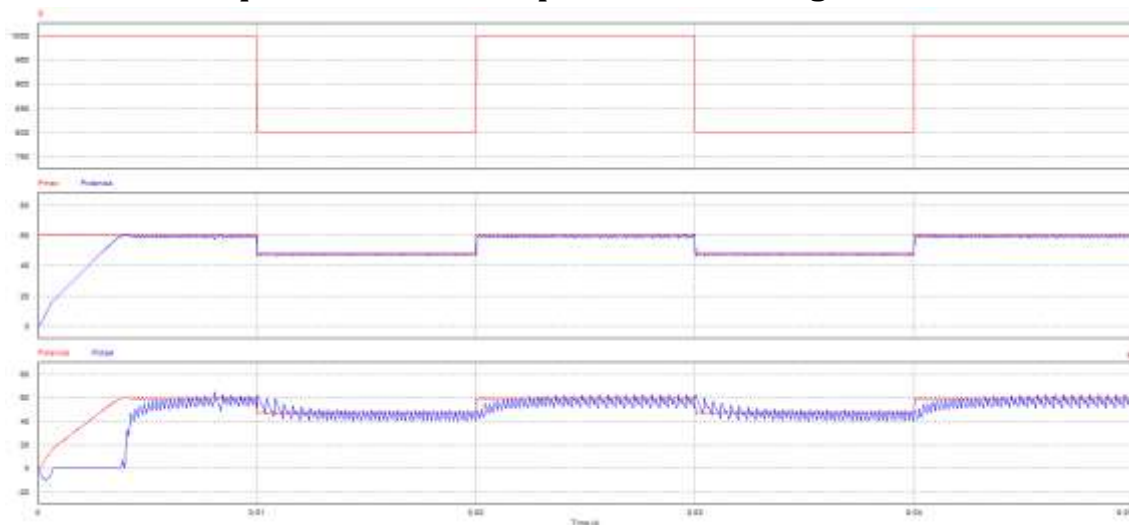


Figura 56. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Conductancia Incremental).

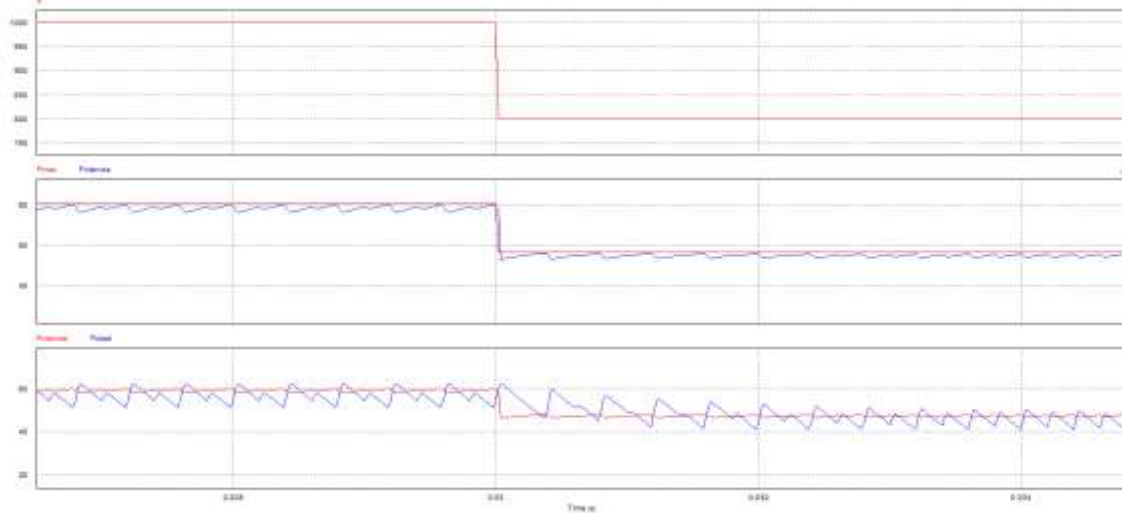


Figura 57. Gráficas irradiancia y potencia de entrada y salida (Conductancia incremental) (detalle).

10.4.3 Resultados y observaciones:

Como podemos observar la potencia que ofrece el panel se ajusta a la potencia máxima que ofrece. Sabemos que el punto de máxima potencia varía, pero la tensión se mantiene prácticamente constante ante una variación de la irradiancia incidente en el panel, con lo que es la intensidad es la que varía.

La potencia de salida se ajusta pero tiene un pequeño retardo, el algoritmo es el encargado del ajuste. Este algoritmo realiza la búsqueda del punto de máxima potencia mediante la mediación de la tensión e intensidad que nos ofrece el panel. El algoritmo no utiliza estas señales directamente, sino que utiliza la conductancia incremental e instantánea del panel.

Este algoritmo tiene una carga computacional mayor que los dos anteriores, ya que tiene que calcular la conductancia tanto incremental como instantánea a partir de los valores de la tensión e intensidad del panel. El algoritmo se basa en que el punto de máxima potencia es constante, con lo que una vez que llega al punto de máxima potencia la oscilación es mínima.

El problema que tiene es que ante cambios en las condiciones de operación, cambio en el punto de máxima potencia, el algoritmo es lento y el retardo produce la mayoría de las pérdidas de potencia.

Para sistemas que estén colocados en zonas donde las condiciones de operación de los sistemas solares fotovoltaicos sea constante y las variaciones sean mínimas, este es el algoritmo óptimo para el mayor aprovechamiento de potencia.



10.5 Comparación de los algoritmos:

10.5.1 Criterios de comparación:

Como hemos visto existen bastantes algoritmos de control para la búsqueda del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. Para diferenciarlos es necesario tener unos criterios de evaluación que nos permita compararlos.

Existen dos tipos de criterios, unos criterios son para el comportamiento del sistema en estado estacionario y otro para los sistemas cuando trabajan entre variaciones de las condiciones, es decir en el transitorio o estado dinámico.

Existen otros criterios de evaluación que a la hora de establecer un circuito de control u otro son los más importantes, que son la sencillez de la implementación y su coste.

Los diferentes rendimientos de los algoritmos los podemos basar en su rendimiento:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P(t)dt}{\int_0^t P_{max}(t)dt}$$

Para probar los algoritmos fuera de la simulación tiene que realizar el siguiente test. Para diferentes variaciones de irradiancia y temperatura se simula 20 min, 4 veces cada simulación.

10.5.2 Comparación y evaluación de los algoritmos MPPT:

En nuestro caso según las simulaciones realizadas y los criterios designados, el mejor algoritmo es el de la conductancia incremental, si las condiciones ambientales y de operación del sistema solar fotovoltaico se mantienen constantes. Ya que este algoritmo una vez que alcanza el punto de máxima potencia, no tiene variaciones ni fluctúa alrededor de este.

La desventaja de este algoritmo es su implementación y su alta carga computacional, sobre todo para sistemas sencillos y pequeños no es recomendable. Tampoco es recomendable para usos en zonas donde las condiciones de operación (irradiancia y temperatura) varíen de manera brusca. Ya que este algoritmo es más lento en estabilizarse que otros.

Por este motivo y de carácter general el algoritmo más utilizado por los fabricantes, ya que es el más sencillo y barato de implementar y tiene unas características aceptables para cualquier uso o aplicación, es el algoritmo MPPT de Perturbación y Observación.



11

Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

CONCLUSIONES



11. Conclusiones y líneas futuras:

11.1 Conclusiones:

Dentro de los sistemas de generación fotovoltaica, una parte muy importante que va relacionada directamente con la eficiencia de estos es el sistema de control, que nos permite trabajar bajo cualquier condición de operación en el punto de máxima potencia. La eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos está relacionada en gran medida con el seguimiento del punto de máxima potencia.

En este proyecto se ha analizado los diferentes tipos de algoritmos que nos permiten el seguimiento del punto de máxima potencia. Cabe destacar que en el proyecto se centra en métodos de control directo, es decir, algoritmos que emplean medidas de tensión y corriente de entrada o salida, a partir de las cuales (teniendo en cuenta la variación de los puntos de funcionamiento del panel solar fotovoltaico), se determina el punto óptimo de funcionamiento.

Dentro de los métodos de control directo, el proyecto se centra en métodos de muestreo de tensión y corriente en los bornes del panel. Después mediante las diferentes estrategias se obtendrá el punto de máxima potencia del panel y el punto en el que está trabajando y los ajustes que tiene que realizar para alcanzar el MPP.

Con este estudio se cumple uno de los objetivos del proyecto. Con ello se obtiene una visión clara de cómo funcionan estos algoritmos, que necesitan para funcionar de manera óptima y cual son las acciones que realizan para cada posible caso de operación.

Para la simulación de los algoritmos, dentro del proyecto hay tres prácticas que concluyen la realización de este. Estas prácticas son una plataforma para la simulación mediante el programa Psim de tres de los algoritmos antes definidos: Perturbación y Observación, Diferencial de Primer Orden y conductancia incremental.

Con estas prácticas se cumple el segundo objetivo del proyecto que es consecuencia del primero, ya que cualquiera interesado en el estudio de los algoritmos y su simulación, puede entender su funcionamiento y su aplicación en sistemas de generación fotovoltaica.



Las posibles líneas por las que se puede seguir este proyecto son las siguientes:

- Estudio y realización de circuitos para la simulación de los algoritmos en los que no se ha centrado el proyecto.
- Desarrollo del algoritmo de perturbación y observación y sus posibles mejoras. Al ser el algoritmo más utilizado y más sencillo está abierto a mejoras para ser más eficiente y hacer que el aprovechamiento de energía de los paneles se máximo. Algoritmo de perturbación y observación modificado, orientado.
- Estudio y simulación de los algoritmos cuando la carga no son baterías. Como por ejemplo el uso de inversores para la conexión a red de los sistemas de generación fotovoltaica o la conversión de CC/CA para su consumo.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



12

Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía:

- ❖ A.F. Boehinger “Self adaptative DC converter for solar spacecraft power supply” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, AES-4, nº1, pag 102-111.
- ❖ Daniel W. Hart. “Electrónica de potencia”, Ed. Prentice. Capítulo 6. ‘Convertidores CC-CC’.
- ❖ Energía solar y energía solar fotovoltaica. Fecha de la última modificación 28 de Junio de 2014, de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar
- ❖ Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. Ruiz C. Luis J., Beristáin J. José A., Sosa T. Ian M. y Hernández L. Jesús H. Revista de Ingeniería eléctrica, electrónica y computación, Vol. 8, Nº 1, Diciembre de 2010.
- ❖ Rashid Muhammad H. and Lana Char “Solar Power Conversion” Power Electronics Handbook, Capitulo 26, pag 661/672, Academic Press, Segunda edición 2007.
- ❖ Trishan Eram, Patrick L. Chapman, “Comparison of pv array maximum power point tracking techniques”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.22, June 2007.

Algoritmos de búsqueda:

- ❖ N. Toshihiko, S. Togashi, and N. Ryo, Short-current Pulse based Maximum-Power-Point. Tracking Method for Multiple Photovoltaic – and Converter Module System, IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol 49. nº 1, February 2002.
- ❖ K. Kobayashi, H. Matsuo and Y. Sekine, An Excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system, IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol 53, nº 2. April 2006.
- ❖ V. Salas “Nuevo método de seguimiento del punto de máxima potencia a partir de la corriente del generador fotovoltaico: estudio teórico, simulación y verificación experimental” Leganés 2004, Tesis doctoral universidad Carlos III de Madrid, departamento de tecnología electrónica.
- ❖ I. Van der Merwe, G.J. Van der Merve, “Maximum Power Point Tracking algorithms using an experimental, programmable Maximum power point tracking test bed” 2000 IEEE.
- ❖ N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli “Optimizing Duty-cycle Perturbation of P&O MPPT Technique” Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 2004. 35th Annual. vol. 3, pp 1939 – 1944, 20 – 25 Junio 2004.



13

Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

ANEXOS



13.1 ANEXO 1: Práctica PERTURBACIÓN & OBSERVACIÓN

PRÁCTICA 1: Seguimiento del punto de máxima potencia: Perturbación y Observación.

1. En PSIM, abrir el archivo Circuito1A.psimsch.

2. Simular y analizar las distintas variables del circuito.

¿La señal de Activación es periódica?. Si es así, ¿Cuál es su periodo y como se establece en el circuito?. ¿Cuál es el ciclo de servicio?. ¿Qué valores deberá adoptar la Tensión de control para obtener un ciclo de servicio nulo? ¿Y para un ciclo de servicio máximo = 1?

- Establecer la relación existente entre la Señal de activación y V_a .

3. En PSIM, cerrar el archivo anterior y abrir el archivo Circuito1B.psimsch.

4. Simular y analizar las distintas variables del circuito. Comentar razonadamente la función que realiza el conjunto propuesto.

5. Análisis del sistema de control:

5.1. En PSIM, cerrar el archivo anterior y abrir el archivo Circuito2.psimsch.

5.2 Simular y representar las siguientes variables del circuito:

- Potencia.
- dP .
- Tensión y V_{ref} .
- SalReg y Triangular.
- Activación.

Comentar razonadamente los resultados obtenidos. Analizar la función que realiza el conjunto propuesto.

- En los ensayos siguientes se simulará un módulo fotovoltaico cuyas características a condiciones estándar S (irradiancia) = 1000 W/m^2 y T (temperatura) = $25 \text{ }^\circ\text{C}$ se muestran en la figura.

6.1 En PSIM, cerrar el archivo anterior y abrir el archivo Circuito3A.psim.sch.

Manufacturer Datasheet		
Number of Cells Ns:	36	
Maximum Power Pmax:	60	(W)
Voltage at Pmax:	17.1	(V)
Current at Pmax:	3.5	(A)
Open-Circuit Voltage Voc:	21.1	(V)
Short-Circuit Current Isc:	3.8	(A)
Temperature Coeff. of Voc:	-0.38	(%/oC or oK)
Temperature Coeff. of Isc:	0.065	(%/oC or oK)
Standard Test Conditions:		
Light Intensity S0:	1000	W/(m*m)
Temperature Tref:	25	(oC)
dv/di (slope) at Voc: (if available)	-0.68	(V/A)

Model Parameters (defined)		
Band Energy Eg:	1.12	(eV)
Ideality Factor A:	1.2	
Shunt Resistance Rsh:	1000	(Ohm)
Coefficient Ks:	0	

Model Parameters (calculated)		
<input type="button" value="Calculate Parameters"/>		
Series Resistance Rs:	0.008	(Ohm)
Short Circuit Current Isc0:	3.8	(A)
Saturation Current Is0:	2.16e-8	(A)
Temperature Coefficient Ct:	0.0024	(A/K)

Operating Conditions		
Light Intensity S:	1000	W/(m*m)
Ambient Temperature Ta:	25	(oC)

6.2 Simular y representar las siguientes variables:

- Imódulo y Vmódulo.
- Activación.
- Vref y Vmódulo.
- PotSalida y Pmax.
- PotModulo y Pmax.

Comentar razonadamente las gráficas anteriores.



7. Análisis estacionario:

7.1 En PSIM, cerrar el archivo anterior y abrir el archivo Circuito3B.psimsch.

7.2 Simular y representar las siguientes variables:

- Vmódulo.
- Imódulo.
- Isalida.
- Activación.
- Vref y Vmódulo.
- PotSalida y Pmax.
- PotModulo y Pmax.

Comentar razonadamente las gráficas anteriores.

8. ¿Qué convertidor de potencia se utiliza?. Clasificar el convertidor y razonar su función básica.

9. Comentar el conjunto del sistema propuesto y las diferentes partes que lo componen, así como la forma básica de funcionamiento.

10. En PSIM, cerrar el archivo anterior y abrir el archivo Circuito4.psimsch.

11. Simular y representar las siguientes variables:

- S (irradiancia).
- Potsalida y Pmax.
- PotModulo y Pmax.

Comentar razonadamente las gráficas anteriores.

12. Analizar y comentar, en detalle el funcionamiento del sistema.



13.2 ANEXO 2: Práctica DIFERENCIAL DE PRIMER ORDEN

PRÁCTICA 2: Seguimiento del punto de máxima potencia: Diferencial de primer orden.

1. En PSIM, abrir el archivo circuito1.psim.sch.
2. Simular y analizar las distintas variables del circuito.
 - ¿La señal de activación es periódica?
 - En caso de que sea así ¿Cuál es su periodo? ¿Cuál es el ciclo de servicio?
 - Valor que tendrá el la tensión de control ($V_{control}$) para que el ciclo de servicio sea nulo y cual será para que sea máximo el ciclo de servicio.
 - ¿Cuál es la relación que existe entre la señal de activación y la señal V_a ? ¿Qué representa esta relación?
3. En PSIM, abrir el archivo circuito 1B.psim.sch.
 - ¿La señal de activación es periódica?
 - Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - $V_{control}$ y $V_{triangular}$
 - $V_{activacion}$
 - Analizar e interpretar las formas de onda.
4. En PSIM, abrir el archivo circuito2A.psim.sch.

Representamos la tensión e intensidad que nos ofrece el panel mediante dos generadores de señal. El punto de máxima potencia se logra cuando:

$$\frac{dP}{dV} = 0 ; P = V \cdot I$$

$$\frac{d(V \cdot I)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + \frac{dV}{dV} \cdot I = 0$$

$$V \cdot dI = -I \cdot dV$$

Al aplicar la transformada de Laplace:

$$V(s) \cdot I(s) \cdot s = -I(s) \cdot V(s) \cdot s$$



- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Señal de la tensión de entrada y la señal que utilizamos de selección.
 - Señal de salida del multiplexor.
- Representar en una tabla las entradas y posibles salidas del multiplexor.

5. En PSIM, abrir el archivo circuito2B.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Señal de la tensión de entrada y la señal que utilizamos de selección.
 - Señal de salida del multiplexor.
- ¿Qué diferencia existe entre las formas de onda del ejercicio anterior?

6. En PSIM, abrir el archivo circuito3.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Tensión de entrada, s (señal de entrada del multiplexor) y V_{cont} (señal de salida del multiplexor).
 - Tensión de referencia.
 - Tensión de control y la tensión triangular ($V_{triangular}$).
 - $V_{activación}$. Señal de activación.
- Comentar razonadamente los resultados obtenidos. Analizar la función que realiza el circuito.

7. En PSIM, abrir el archivo circuito4.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Tensión de entrada, s (señal de entrada del multiplexor) y V_{cont} (señal de salida del multiplexor).
 - Tensión de referencia y V_{pi}
 - Tensión de control y la tensión triangular ($V_{triangular}$).
 - $V_{activación}$. Señal de activación.
- Comentar razonadamente los resultados obtenidos. Analizar la función que realiza el circuito.
- Comparar los resultados obtenidos con el ejercicio anterior, al aplicar un control PI, cuando comparamos la tensión de entrada con la referencia.

Una vez identifica y comprendido el algoritmo aplicamos este a un panel solar y un convertidor CC/CC (ya sea un Buck Chopper o un Buck-Boost) y como carga colocaremos una batería.

Las características del panel son las siguientes:

Manufacturer Datasheet		
Number of Cells Ns:	36	
Maximum Power Pmax:	60	(W)
Voltage at Pmax:	17.1	(V)
Current at Pmax:	3.5	(A)
Open-Circuit Voltage Voc:	21.1	(V)
Short-Circuit Current Isc:	3.8	(A)
Temperature Coeff. of Voc:	-0.38	(%/oC or oK)
Temperature Coeff. of Isc:	0.065	(%/oC or oK)
Standard Test Conditions:		
Light Intensity S0:	1000	W/(m*m)
Temperature Tref:	25	(oC)
dv/di (slope) at Voc: (if available)	-0.68	(V/A)

Model Parameters (defined)		
Band Energy Eg:	1.12	(eV)
Ideality Factor A:	1.2	
Shunt Resistance Rsh:	1000	(Ohm)
Coefficient Ks:	0	

Model Parameters (calculated)		
<input type="button" value="Calculate Parameters"/>		
Series Resistance Rs:	0.008	(Ohm)
Short Circuit Current Isc0:	3.8	(A)
Saturation Current Is0:	2.16e-8	(A)
Temperature Coefficient Ct:	0.0024	(A/K)

Operating Conditions		
Light Intensity S:	1000	W/(m*m)
Ambient Temperature Ta:	25	(oC)

8. En PSIM, abrir el archivo circuito5.psim.sch.

Las condiciones de operación en las que se simulará el modulo fotovoltaico son las siguientes (Tal como se muestra en la figura):S (irradiancia) = 1000 w/m² y T (temperatura) = 25 °C

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:



- V_{modulo} y I_{modulo} . Tensión e intensidad de salida del módulo fotovoltaico.
 - V_{modulo} y V_{ref} .
 - V_{control} y $V_{\text{triangular}}$.
 - Vactivación.
 - P_{max} y Potencia.
- Comentar y analizar las formas de onda, analizar la función de cada parte del sistema y cómo afecta en la potencia de salida.

9. En PSIM, abrir el archivo circuito6.psimsch.

Las condiciones de operación varían durante el tiempo, con lo que el sistema debe modificar el punto en el que trabaja el convertidor para obtener la máxima potencia. S (irradiancia) pasa de 800 W/m^2 a 1000 W/m^2 .

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - V_{modulo} y I_{modulo} . Tensión e intensidad de salida del módulo fotovoltaico.
 - V_{modulo} y V_{ref} .
 - V_{control} y $V_{\text{triangular}}$.
 - Vactivación.
 - P_{max} y Potencia.
- Comentar y analizar las formas de onda, analizar la función de cada parte del sistema y cómo afecta en la potencia de salida.
- Simular y analizar el transitorio cuando la irradiancia pasa de 800 a 1000 W/m^2 .

10. En PSIM, abrir el archivo circuito7.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - S (irradiancia).
 - P_{postal} (potencia de salida) y P_{max} (Potencia máxima que genera el módulo fotovoltaico).
 - Potencia (Potencia que genera el módulo fotovoltaico) y P_{max} (Potencia máxima que genera el módulo fotovoltaico).
- Comentar y analizar las gráficas y las formas de onda.

11. ¿Qué convertidor de potencia se utiliza? Clasificar el convertidor y describir las ecuaciones que describen el funcionamiento.



13.3 ANEXO 3: Práctica CONDUCTANCIA INCREMENTAL

PRÁCTICA 3. Seguimiento del punto de máxima potencia: Conductancia incremental.

1. En PSIM, abrir el archivo circuito1A.psimsch.

2. Simular y analizar las distintas variables del circuito:

- ¿La señal de activación es periódica?
- En el caso de que sea así, ¿Cuál es su periodo? ¿Cuál es el ciclo de servicio?
- Valor que tendrá la tensión de control ($V_{control}$) para que el ciclo de servicio sea nulo y cual será para que sea máximo el ciclo de servicio.
- ¿Cuál es la relación que existe entre la señal de activación y la señal V_a ? ¿Qué representa esta relación?

3. En PSIM, abrir el archivo circuito 1B.psimsch.

- ¿La señal de activación es periódica?
- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - $V_{control}$ y $V_{triangular}$
 - $V_{activacion}$
- Analizar e interpretar las formas de onda.

4. En PSIM, abrir el archivo circuito2.psimsch.

Representamos la tensión e intensidad que nos ofrece el panel fotovoltaico mediante dos generadores de señal. El punto de máxima potencia se logra cuando:

$$\frac{dP}{dV} = 0 ; P = V \cdot I$$

$$\frac{d(V \cdot I)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + \frac{dV}{dV} \cdot I = 0$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

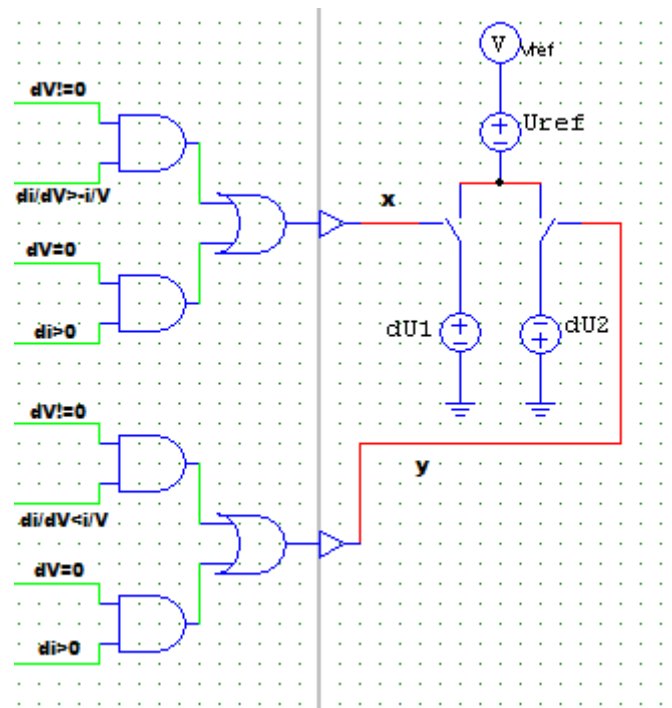
Al aplicar la transformada de Laplace:

$$\frac{I(s) \cdot s}{V(s) \cdot s} = -\frac{I(s)}{V(s)}$$

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Señal de la intensidad y tensión de entrada.
 - Las señales de salida del circuito, siendo:
 - $V1 \Rightarrow dV \neq 0$
 - $V2 \Rightarrow dV = 0$
 - $V3 \Rightarrow di > 0$
 - $V4 \Rightarrow di < 0$
 - $V5 \Rightarrow di/dV > -i/V$
 - $V6 \Rightarrow di/dV < -i/V$
- Realizar la simulación y representar las siguientes variables del circuito.

5. En PSIM, abrir el archivo circuito circuito3A.psim.sch.

- Simular y representar las diferentes variables del circuito:
 - Tensión e intensidad de entrada.
 - V_{ref} (Tensión de referencia)
- Realizar la misma simulación abriendo el archivo circuito3B.psim.sch.
- En una tabla, identificar como varía la tensión de referencia:





$dV=0$	$dV \neq 0$	$di > 0$	$di < 0$	$di/dV > -i/v$	$di/dV < -i/v$	x	y	Vref

6. En PSIM, abrir el archivo circuito4A.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - $V_{control}$ y $V_{triangular}$.
 - $V_{activación}$ (señal de activación del polo de potencia)
- Comentar razonadamente los resultados obtenidos. Analizar la función que realiza el circuito.
- Realizar la misma simulación con el archivo circuito4B.psimsch. Comentar las diferencias con la simulación anterior.

7. En PSIM, abrir el archivo circuito5A.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito, cuando aplicamos en el control un PI:
 - $V_{control}$ y $V_{triangular}$.
 - $V_{activación}$ (señal de activación del polo de potencia).
- Comentar los resultados obtenidos. Analizar la función que realiza en el circuito de control.
- Realizar el mismo análisis con el archivo circuito5B.psimsch.

Una vez analizado y comprendido el algoritmo aplicamos este a un panel solar y un convertidor CC/CC, como carga de salida del convertidor colocaremos una batería.

El panel tiene las siguientes características:

Manufacturer Datasheet		
Number of Cells N_s :	36	
Maximum Power P_{max} :	60	(W)
Voltage at P_{max} :	17.1	(V)
Current at P_{max} :	3.5	(A)
Open-Circuit Voltage V_{oc} :	21.1	(V)
Short-Circuit Current I_{sc} :	3.8	(A)
Temperature Coeff. of V_{oc} :	-0.38	(%/oC or oK)
Temperature Coeff. of I_{sc} :	0.065	(%/oC or oK)
Standard Test Conditions:		
Light Intensity S_0 :	1000	W/(m ² m)
Temperature T_{ref} :	25	(oC)
dv/di (slope) at V_{oc} : (if available)	-0.68	(V/A)

Model Parameters (defined)		
Band Energy E_g :	1.12	(eV)
Ideality Factor A :	1.2	
Shunt Resistance R_{sh} :	1000	(Ohm)
Coefficient K_s :	0	

Model Parameters (calculated)		
<input type="button" value="Calculate Parameters"/>		
Series Resistance R_s :	0.008	(Ohm)
Short Circuit Current I_{sc0} :	3.8	(A)
Saturation Current I_{s0} :	2.16e-8	(A)
Temperature Coefficient C_t :	0.0024	(A/K)

Operating Conditions		
Light Intensity S :	1000	W/(m ² m)
Ambient Temperature T_a :	25	(oC)

8. En PSIM, abrir el archivo circuito6.psimsch.

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - V_{modulo} (V_{cell}) y I_{modulo} (I_{cell}). Tensión e intensidad de salida del módulo fotovoltaico.
 - $V_{módulo}$ y V_{ref} .
 - $V_{control}$ y $V_{triangular}$.
 - $V_{activacion}$.
 - P_{max} y Potencia.
- Comentar y analizar las formas de onda, analizar la función de cada parte del sistema y cómo afecta en la potencia de salida.



9. En PSIM, abrir el archivo circuito7.psim.sch.

Simulación del sistema cuando las condiciones de irradiancia varían a lo largo del tiempo. S(irradiancia) pasa de 1000 W/m^2 a 800 W/m^2 .

- Simular y representar las siguientes variables del circuito:
 - Vmodulo (Vcell) y Imodulo (Icell). Tensión e intensidad de salida del módulo fotovoltaico.
 - Vmódulo y Vref.
 - Vcontrol y Vtriangular.
 - Vactivacion.
 - Pmax y Potencia.
- Comentar y analizar las formas de onda, analizar la función de cada parte del sistema y cómo afecta en la potencia de salida.
- Simular y analizar el transitorio cuando la irradiancia pasa de 1000 a 800 W/m^2 .

10. ¿Qué convertidor de potencia se utiliza? Clasificar y analizar el convertidor y definir las formas las ecuaciones que describen su funcionamiento.

13.3 Anexo 4: Glosario

Psim	Power simulation software
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Seguidor del punto de máxima potencia)
MPP	Maximum Power Point (Punto de máxima Potencia)
P	Potencia
V	Tensión
I	Intensidad
TONC	Temperatura de Operación Nominal de la Célula
AM	Air mass (masa de aire)
CC/CC	Convertidor continua-continua
CC/CA	Convertidor continua-alterna
GFV	Generador fotovoltaico



FV	Fotovoltaico
V _{ref}	Tensión de referencia
P&O	Perturbación y Observación
W/m ²	vatios/metro ²
I _L	Intensidad en la bobina del convertidor
I _o	Intensidad de salida del convertidor
V _{oc}	Tensión en circuito abierto en un panel solar
I _{sc}	Corriente de cortocircuito en un panel solar
V _m	Tensión en el punto de máxima potencia
I _m	Corriente en el punto de máxima potencia
FF	Factor de forma
η	Rendimiento
V _s	Tensión de la Fuente de tensión de entrada del convertidor
V _o	Tensión de salida del convertidor
L	Inductancia de la bobina
C	Capacidad del condensador
R	Resistencia
D	Ciclo de trabajo del convertidor
T	Periodo
P _o	Potencia de salida
P _s	Potencia de entrada de la Fuente de tensión
V _{MPP}	Tensión en el punto de máxima potencia
I _{MPP}	Corriente en el punto de máxima potencia
S	Irradiancia
T ^a	Temperatura
dI/dV	Conductancia instantánea
I/V	Conductancia