

# **Algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia de paneles fotovoltaicos (Psim):**

## **Perturbación & Observación**

**Víctor Paredes Cordero**

**4 de Julio de 2014**

## 1. Circuito 1 A:

El circuito estudiado es el siguiente:

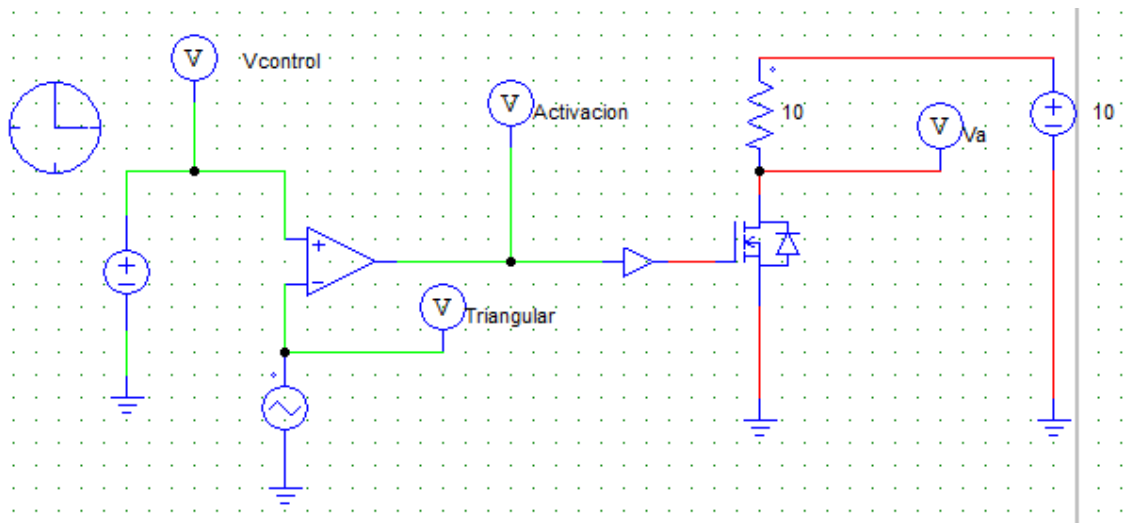


Figura 1

En él se observa el funcionamiento y el control de un polo de potencia. En la siguiente gráfica se muestran las distintas señales que interviene en nuestro circuito:

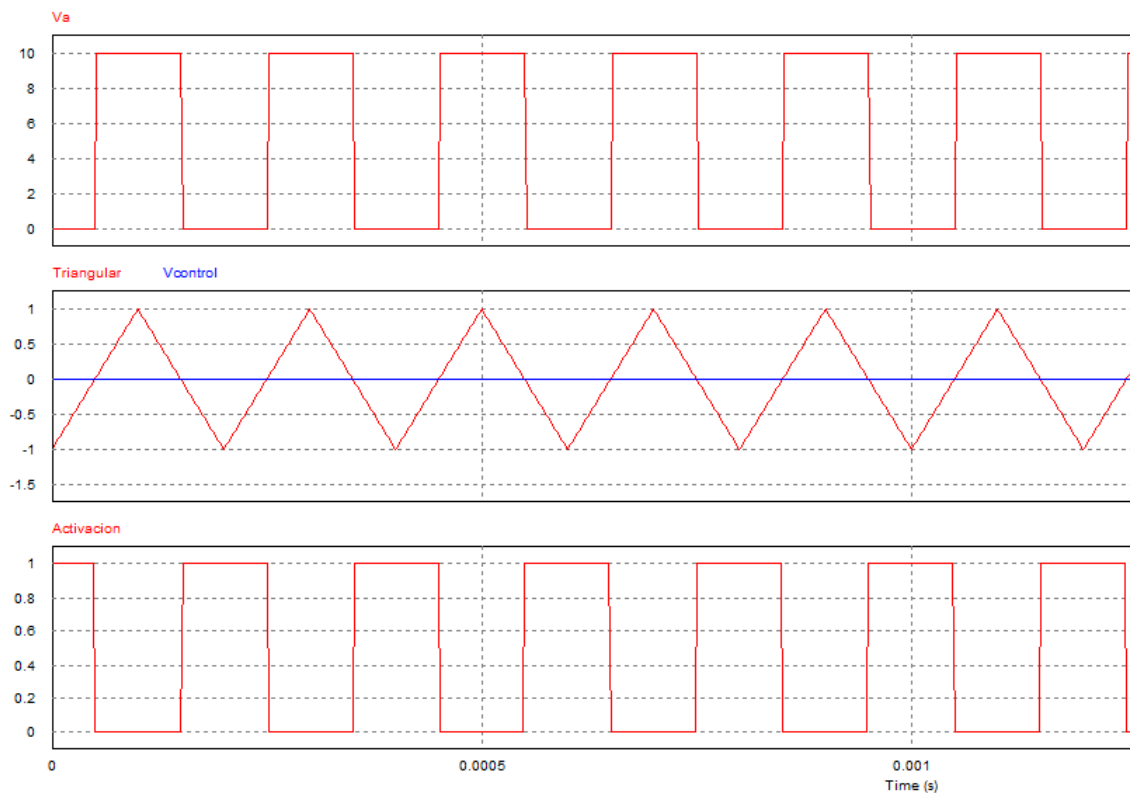


Figura 2

### Comentario de resultados:

Como podemos ver, de la comparación de  $V_{control}$  y Triangular, surge una onda cuadrada, generada por un comparador, que es la que introducimos por la base del polo de potencia.

El resultado de esto, es la tensión  $V_a$ , que como se puede observar, es complementaria a Activación. (Ver en gráfica)

La señal de activación es periódica, ya que se genera por comparación de una señal periódica (Triangular) y una señal continua, y por tanto, el período es el mismo que el que tiene la señal triangular.

En el caso estudiado, el valor concreto de este período para una frecuencia de 5000 Hz, es de 0.0002, valor obtenido como  $T=1/f$ , y verificado en la grafica.

El ciclo de servicio del polo, dependerá de  $V_{activación}$ . Por tanto, cuanto mayor sea  $V_{control}$ , mayor tiempo está a nivel alto  $V_{activación}$ , y menor tiempo está a nivel alto  $V_a$ . (Recordar que son complementarias). Si definimos  $D=ton/T$ , entonces cuanto mayor sea  $V_{control}$ , más pequeño será el ciclo de servicio del polo.

Con estas conclusiones extraídas, podemos decir que para obtener un ciclo de servicio nulo ( $V_a=0$ ),  $V_{control}$  deberá ser mayor o igual que 1V, y que para tener un ciclo de servicio de 1,  $V_{control}$  deberá ser menor o igual que 0. (Teniendo en cuenta que la amplitud de la señal triangular es de 2V de pico a pico).

## 2. Circuito 1 B:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente. El único cambio es que la tensión de control ahora es también una señal triangular, de menor frecuencia que  $V$  triangular.

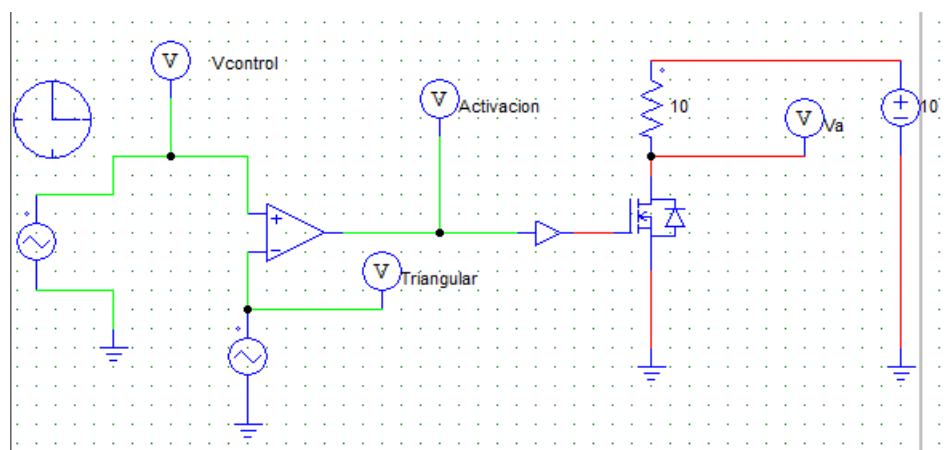


Figura 3

Y estos son los resultados obtenidos:

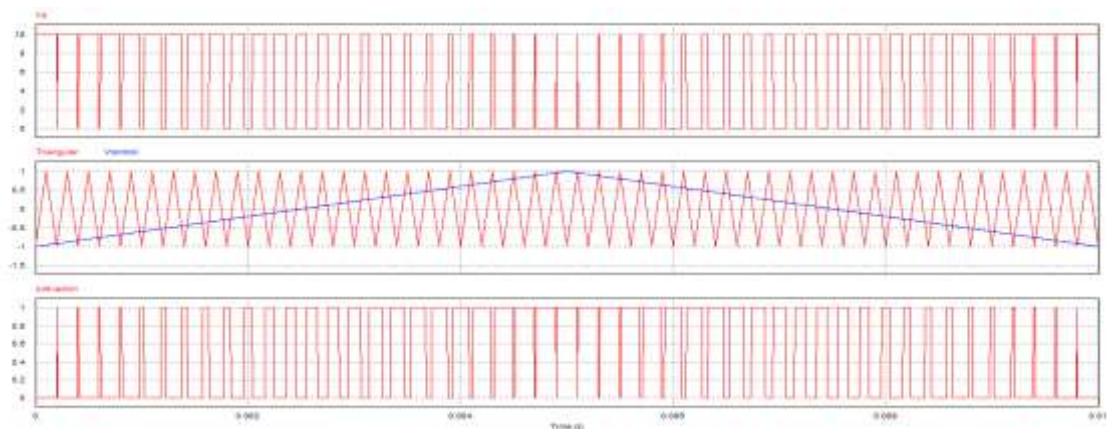


Figura 4

### Comentario de resultados:

Como vemos, al igual que antes, cuando  $V_{control}$  es mayor que  $V$  triangular, introducimos señal al polo de potencia y por tanto cortocircuitamos la salida. Como antes, cuanto mayor es  $V_{control}$ , menor es  $V_a$ .

En este circuito, ya podemos ver cómo  $V_a$  está formada por pulsos de duración variable, resultado de una comparación entre dos señales triangulares. Estamos aproximándonos a un control PWM.

### Circuito 2:

El siguiente circuito estudiado es el siguiente:

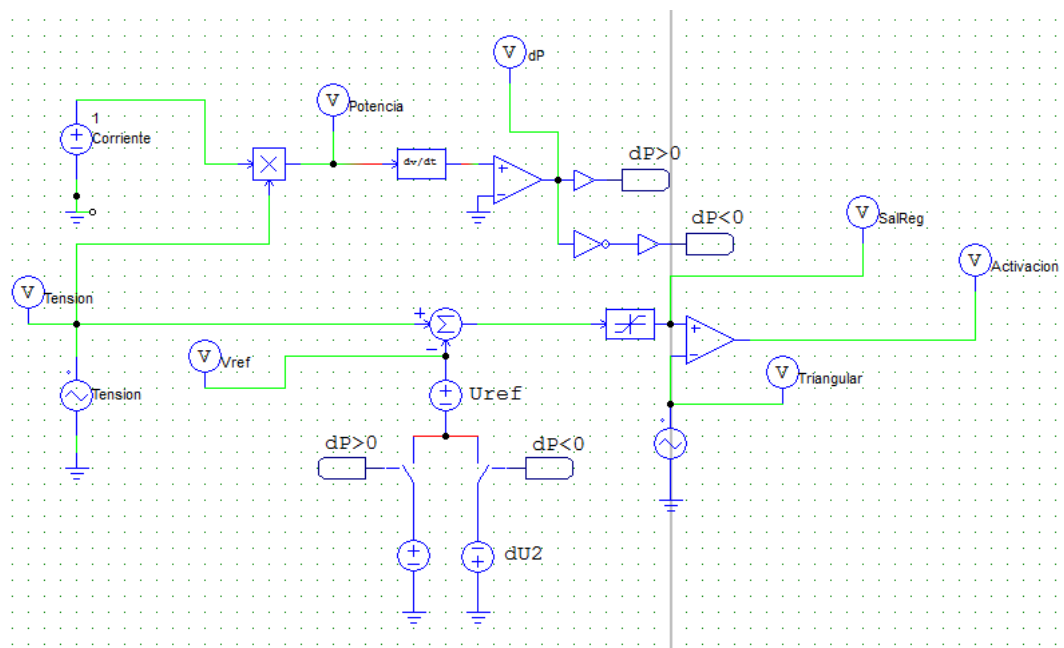


Figura 5

Las distintas variables del circuito son las que se muestran a continuación:

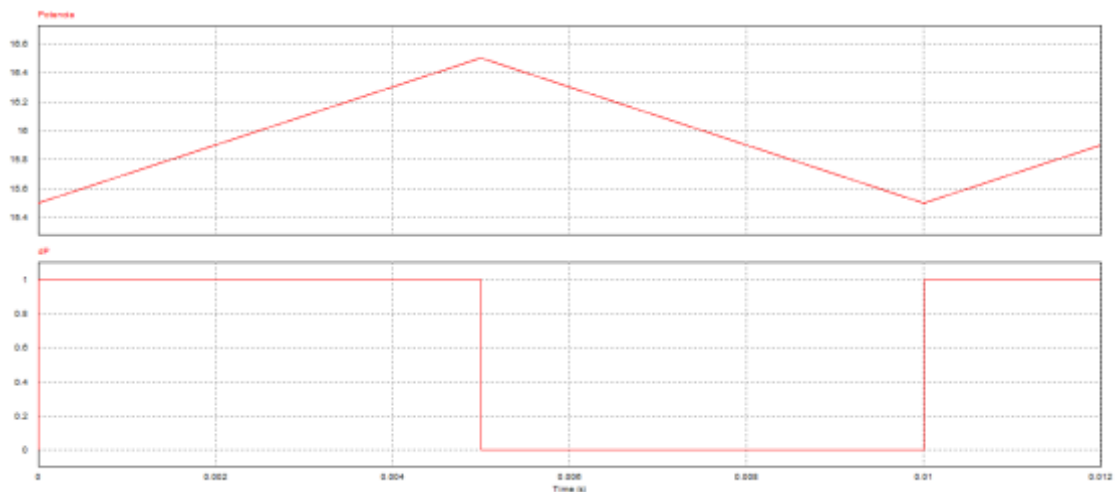


Figura 6

En la figura 6 vemos la potencia en la parte superior. En la parte inferior vemos su derivada, que es una señal que usaremos para controlar el polo de potencia.

En la figura 7 podemos observar las señales tensión, Vref, Triangular y activación.

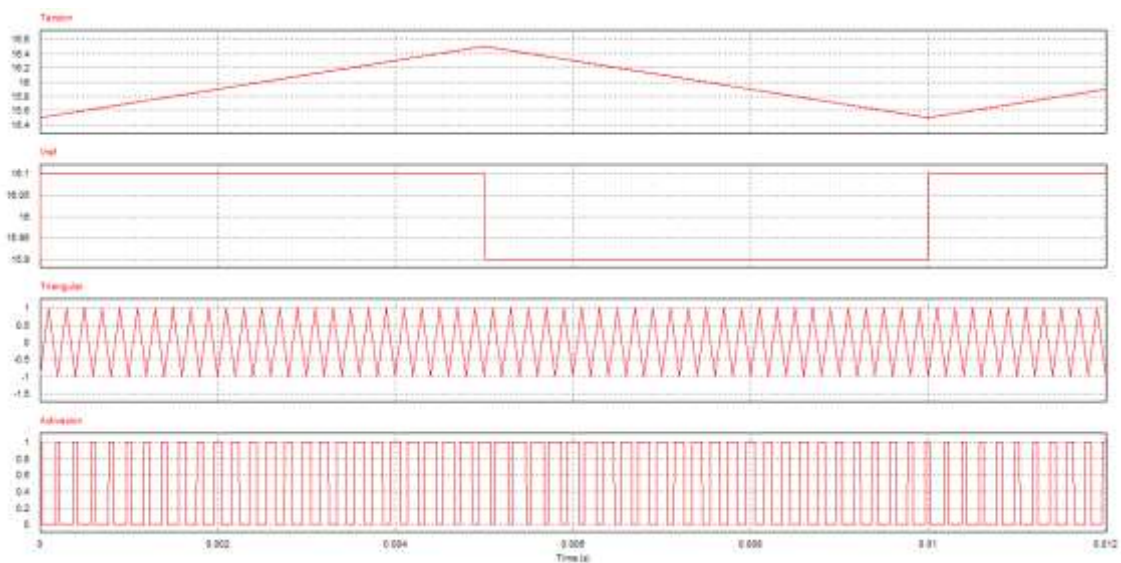


Figura 7

### Comentario de resultados:

Este nuevo circuito, es una nueva aproximación a un algoritmo de control real.

Fijándonos en el esquema del circuito de la figura 5, multiplicamos la tensión y la intensidad del panel para obtener la potencia. Esta potencia se pasa por un bloque derivador, que genera una señal lógica que vale 1 si dP es positiva o 0 en caso contrario. En función de esa señal, a la tensión de referencia Uref, que vale 16 V, se le suma o se le baja un pequeño valor, en este caso 0.1 V. El resultado de esa suma o de esa resta, que se llama Vref, se compara con la tensión que ofrece el módulo, y la diferencia, acotada entre -1 y 1 (SalReg) la usamos como señal de control, que comparada con una señal triangular, genera la señal de activación del polo de potencia.

En la práctica, Uref+0.1 y Uref-0.1 se asociará al intervalo de tensiones en el que se encuentran los puntos de máxima potencia. Normalmente estos intervalos son pequeños, por eso aquí se ha supuesto un intervalo de 0.2 V.

Por tanto, cuando dP es positiva, la tensión del panel sufre una resta, generando un error más pequeño. Esto provoca que Activación esté menos tiempo a nivel alto (ya que se compara con una señal triangular), lo que origina que el polo este más tiempo abierto y por tanto la tensión de salida del sistema aumente.

Al contrario, cuando dP es negativa, la tensión del panel sufre una suma, generando un error más grande. Esto provoca que Activación esté más tiempo a nivel alto (ya que se compara con una señal triangular), lo que origina que el polo este más tiempo cerrado y por tanto la tensión de salida del sistema disminuya.

Todas estas conclusiones se pueden observar en las gráficas de las figuras 6 y 7.

Posibles casos:

dP>0:

Vpanel	$\epsilon = V_p - (U_{ref} + 0.1)$	D (ciclo de servicio)
<15.1	<-1	0
15.1	-1	0
15.1%17.1	-1%1	0%1
>17.1	>1	1

dP<0:

Vpanel	$\varepsilon = V_p - (U_{ref} - 0.1)$	D (ciclo de servicio)
<14.9	<-1	0
14.9	-1	0
14.9%16.9	-1%1	0%1
>16.9	>1	1

En los circuitos siguientes se simulará un módulo fotovoltaico cuyas características a condiciones estándar:  $S(\text{irradiancia})=1000\text{w/m}^2$  y  $T(\text{temperatura})= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Circuito 3A:

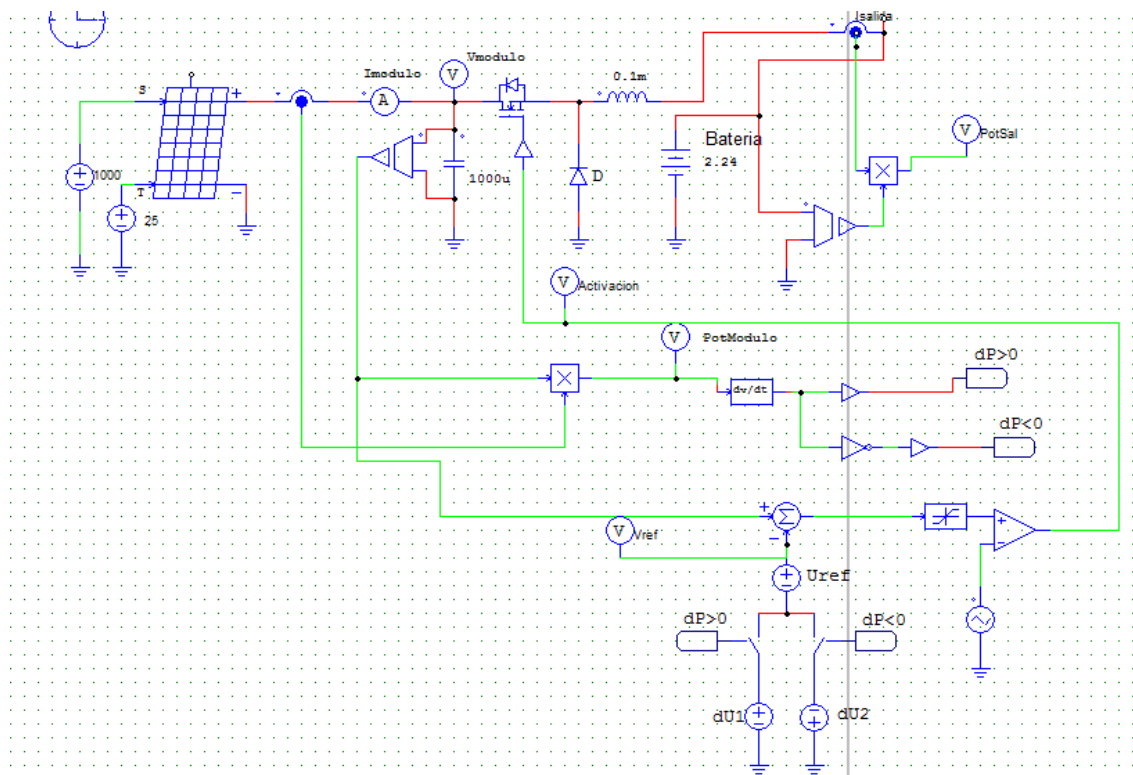


Figura 8

En este circuito 3, ya introducimos finalmente el panel real.

Las gráficas de las señales son las siguientes:

*I*modulo y *V*modulo:

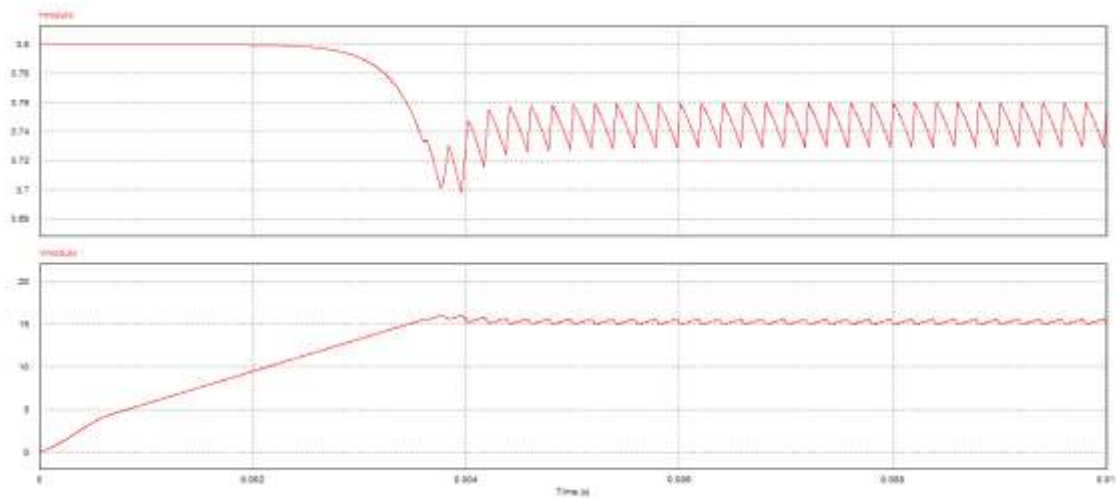


Figura 9

Como vemos, la intensidad varía tan poco que puede considerarse constante, en cambio, la tensión va subiendo poco a poco hasta alcanzar un valor más o menos constante. Este valor será el valor de tensión que nos da la potencia máxima.

Activación, *V*ref y *V*modulo:

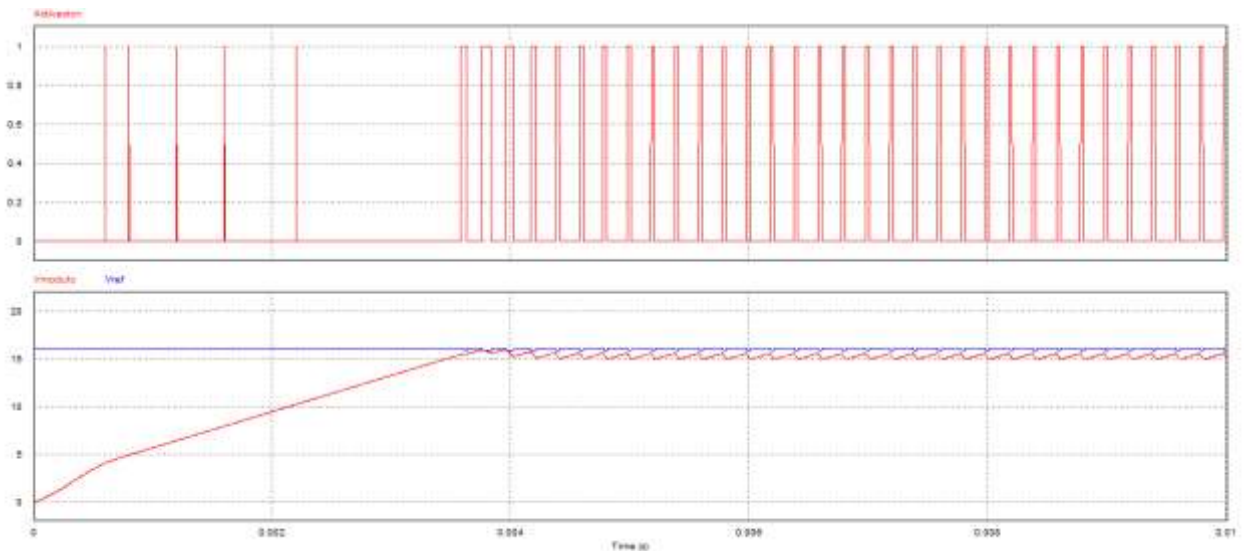
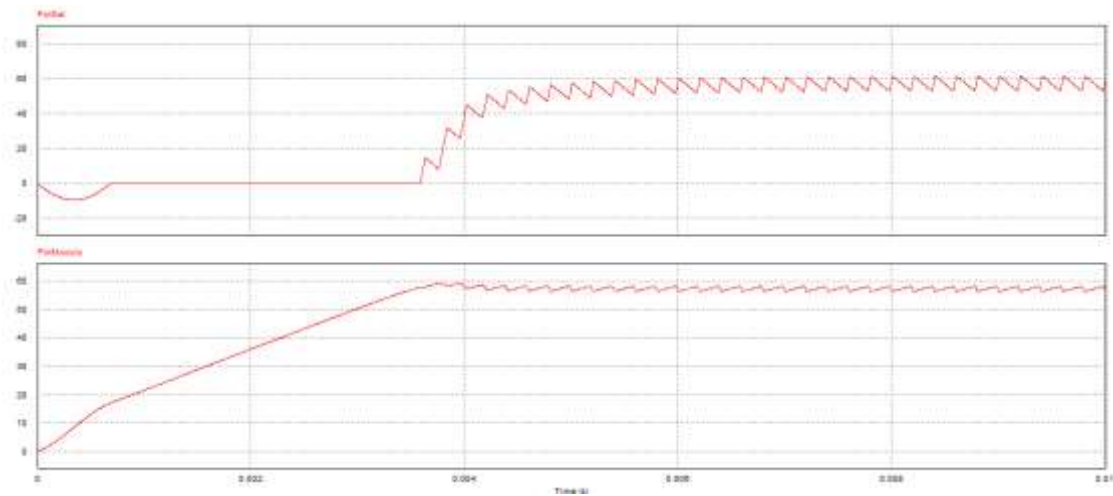


Figura 10

En estas dos gráficas se puede observar muy bien el mecanismo explicado en el anterior circuito. El sistema va aumentando su tensión de salida hasta alcanzar un valor en el que varía poco, y esto es consecuencia de que la señal de activación está todo el tiempo a nivel bajo.



Veamos qué pasa con las potencias:



*Figura 11*

Como bien habíamos predicho, la potencia que se intenta mantener es la potencia máxima del panel.

En las gráficas anteriores, vemos cómo la potencia del módulo va subiendo según vamos aumentando la tensión, y como mantenemos posteriormente esta potencia.

La potencia de salida es cero hasta un determinado punto, que coincide con el punto en el que el condensador se ha cargado y se comienza a entregar potencia.

### Circuito 3B:

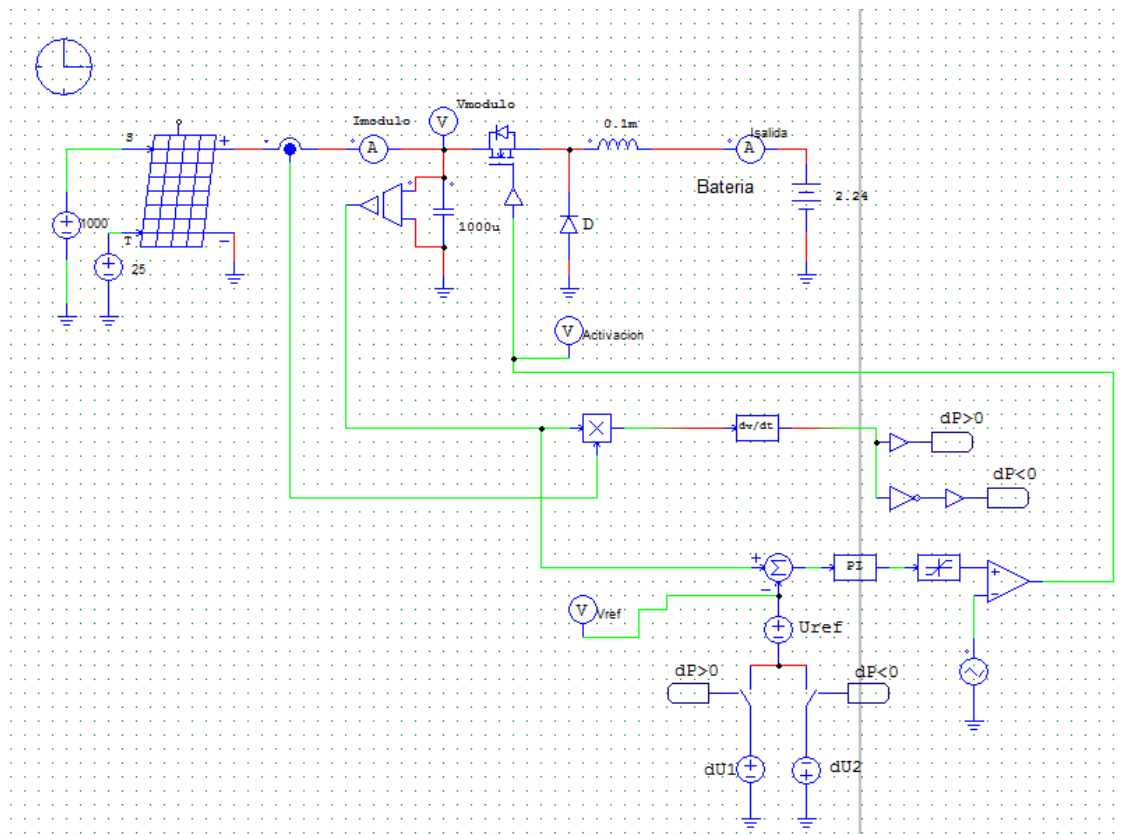


Figura 12

Circuito 3B, en el introducimos un controlador PI (Proporcional-Integral).

- Vmodulo
- Imodulo
- Isalida
- Activacion

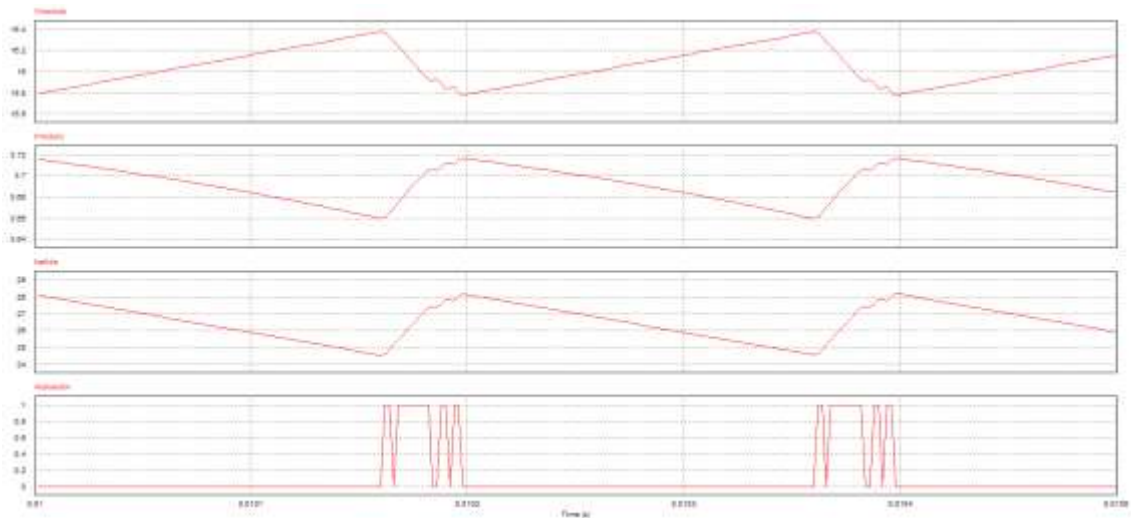


Figura 13

En estas gráficas se muestra la variación de la tensión del módulo fotovoltaico y su intensidad. La intensidad de salida es proporcional a la intensidad de entrada, aunque esta última varía entre valores muy próximos, entre 3.66 y 3.72 A, mientras que la intensidad de salida lo hace entre 24 y 28 A.

La señal de activación se modifica, como está explicado en ejercicios anteriores, entre 0 y 1, modo de señal cuadrada (PWM). Cuando la señal esta activa (1V) el polo de potencia se cierra y descarga el condensador. El condensador se está cargando por medio de la energía que da el módulo. Cuando la señal esta en off (0V) el polo de potencia está abierto y no permite el paso a la salida, aislando la entrada de la salida.

- $V_{control}$  y  $V_{ref}$
- $P_{modulo}$

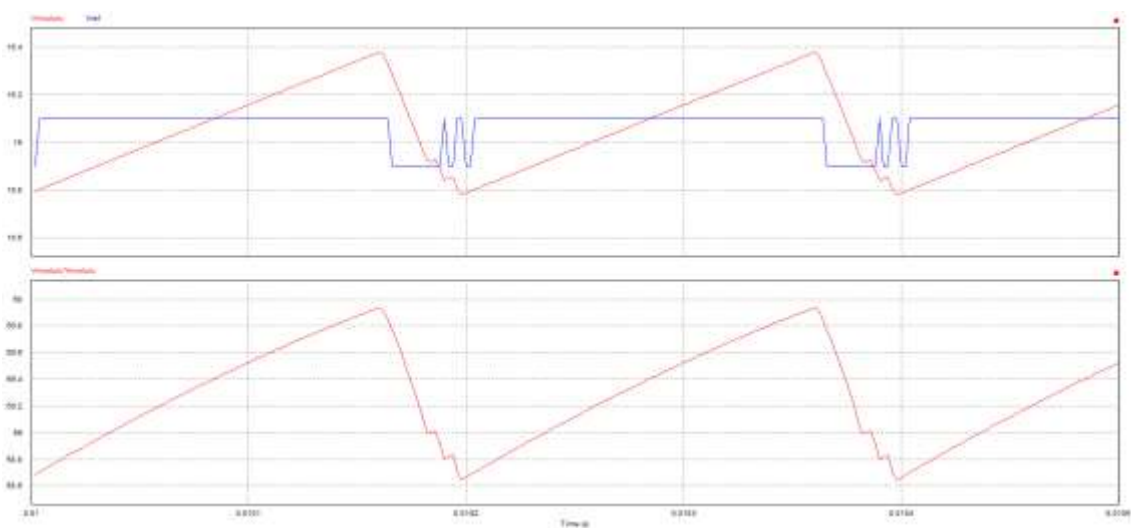


Figura 14

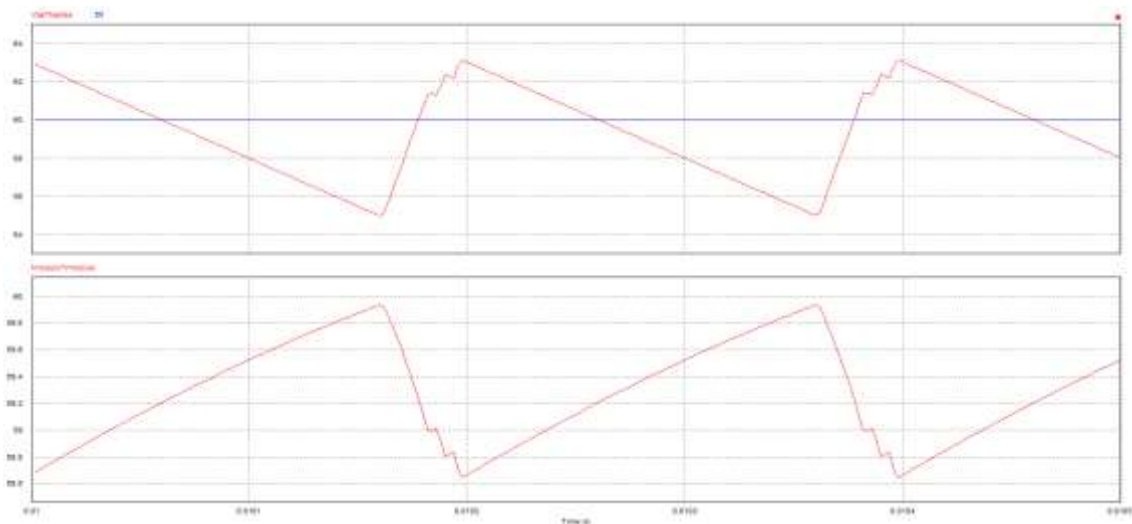
En la figura 14, se puede ver como varía la tensión de referencia en función de que la potencia:

- Cuando  $dP > 0$ :  $V_{ref} = V_{ref0} + 0.1$
- Cuando  $dP < 0$ :  $V_{ref} = V_{ref0} - 0.1$

Esto afecta al error entre la tensión del módulo y esta tensión de referencia. La señal de error se introduce en un regulador- controlador PI (el funcionamiento de este se explicará más adelante).

El uso de  $(V_{ref} + \Delta V)$ . Cuanto mayor sea la variación  $\Delta V$  más rápido se llega al punto óptimo de funcionamiento, pero varía o fluctúa mucho entorno a ese punto. Si  $\Delta V$  es más pequeño, el circuito tarda más en llegar al punto de funcionamiento pero variará poco entorno a dicho punto.

- $P_{salida}$
- $P_{modulo}$



*Figura 15*

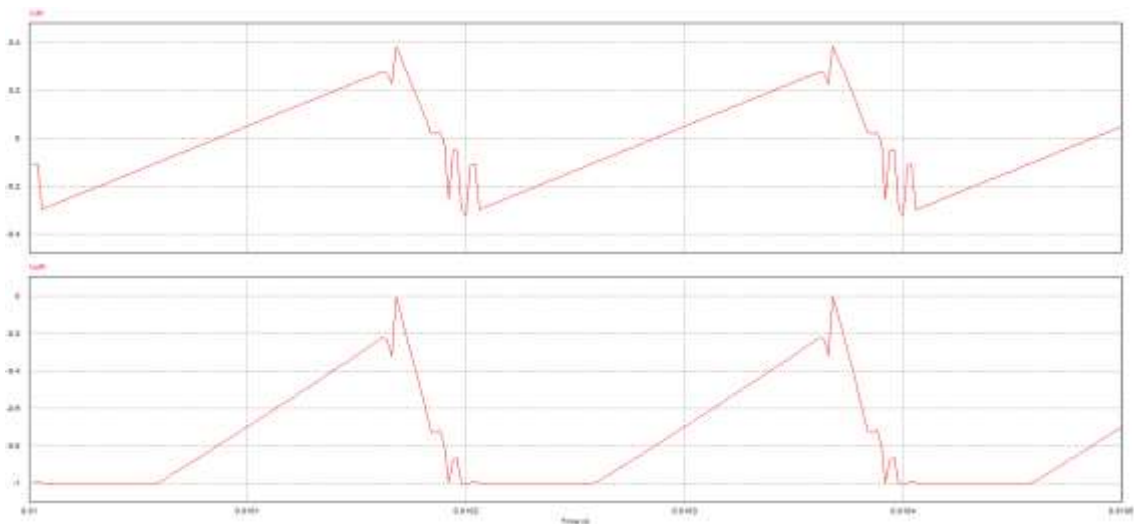
La potencia de salida del circuito esta entorno a la máxima potencia que es capaz de ofrecer el módulo fotovoltaico.  $P_{max}=60W$ . Como podemos observar la variación de potencia en el módulo y en la salida son complementarias, cuando la potencia de la entrada disminuye la potencia en la salida aumenta y viceversa. Esto solo ocurre cuando en el circuito está variando en el punto óptimo de funcionamiento.

En este circuito se muestra el funcionamiento de un controlador PI y su resultado en el circuito. Este controlador se utiliza como regulador para que las variaciones no sean bruscas y el proceso de cambio sea suave y lo más continuo posible.

El controlador tiene dos partes:

1. Parte proporcional (P): Sirve para aumentar o disminuir según necesitemos en la salida. Normalmente se aumenta la señal para que sea más rápida. El problema es que si solo tenemos parte proporcional tendremos un error estacionario que iremos acumulando llevando al circuito a un punto de mal funcionamiento.
2. Parte integral (I): Se utiliza para reducir y eliminar el error estacionario, con el tiempo este error se hace cero. Esta parte del regulador hace las variaciones bruscas en la entrada suaves en la salida. Cuando la señal de entrada es constante y de repente se hace cero, la integral mantiene su valor, para que se haga cero la integral tiene que entrar una señal menor que cero, es decir de signo contrario.

Para ver su funcionamiento en el circuito, colocamos dos visualizadores de tensión en la entrada y la salida del PI.

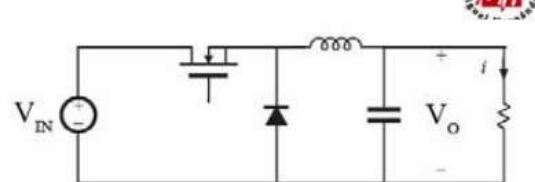
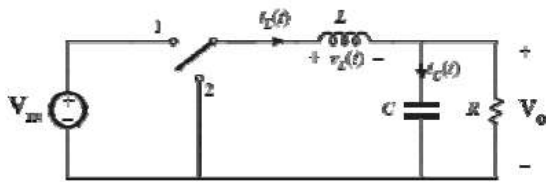


*Figura 16*

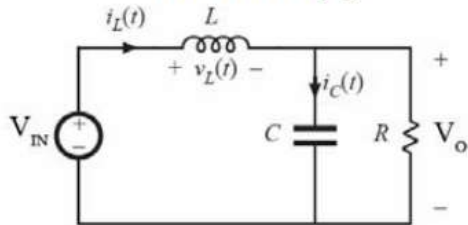
La figura muestra el funcionamiento del PI, con constantes  $k=2$  y  $1/T=0.001$ . El regulador presenta un pequeño retraso en las variaciones debido a la parte integral.

Convertidor:

Convertir BUCK.



SWITCH ON (D)

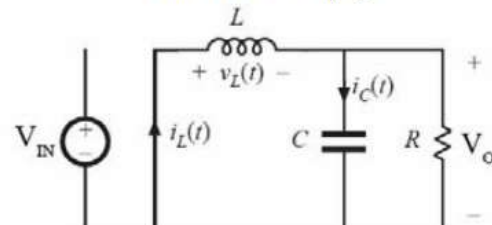


$$v_L(t) = V_{IN} - v_o(t) \approx V_{IN} - V_O$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} > 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{IN} - V_O}{L}$$

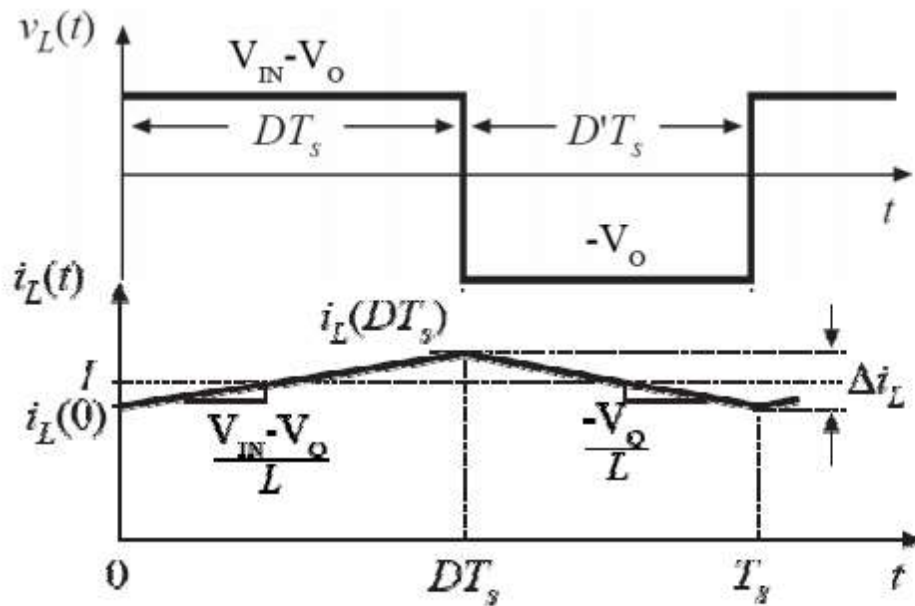
SWITCH OFF (D')



$$v_L(t) = 0 - v_o(t) \approx -V_O$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} < 0$$

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



$$(V_{IN} - V_O) \cdot DT_s = V_O D' T_s \quad D' = 1 - D$$

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{DT_s}{T_s} = D \quad P_O = P_{IN} \Rightarrow \frac{I_{IN}}{I_O} = D$$

$$\Delta i_L = \frac{(V_{IN} - V_O)}{L} DT_s = \frac{V_O}{L} (1 - D) T_s$$

El convertidor trabaja en modo de conducción continua ya que la corriente que circula por la bobina nunca se anula. En este caso la tensión de salida es constante ya que está definida por una batería de 2.24 V.

### **Comentarios del sistema propuesto.**

Primero definimos las partes en las que se divide el sistema propuesto. Por una parte tenemos el módulo fotovoltaico, al que se le introduce el valor de la temperatura y el valor de la irradiancia. El panel carga un condensador del que las demás partes del circuito extraen las demandas de tensión.

Entre el módulo y el condensador, sacamos la tensión de módulo y la corriente a la que está funcionando. Con estas obtenemos otras dos partes del sistema.

Por un lado, multiplicamos estas señales y obtenemos la potencia del módulo. Esto servirá para calcular su derivada y conocer si la potencia crece o decrece.

Por otro lado, utilizamos la tensión para compararla con la tensión de referencia. El error obtenido de la diferencia de ambas la introducimos en un regulador PI y por un saturador de valores mínimo y máximo de -1 y 1V. La señal de salida la comparamos con una señal triangular como en los circuitos anteriores, obteniendo así la señal de activación del polo de potencia.

Por el polo de potencia, según sea la señal de activación pasamos la energía del condensador al convertidor, para cargar las baterías.

Todo el funcionamiento se resume en cargar las baterías de la energía del módulo, y trabajando en el punto óptimo de funcionamiento de éste.

## Circuito 4:

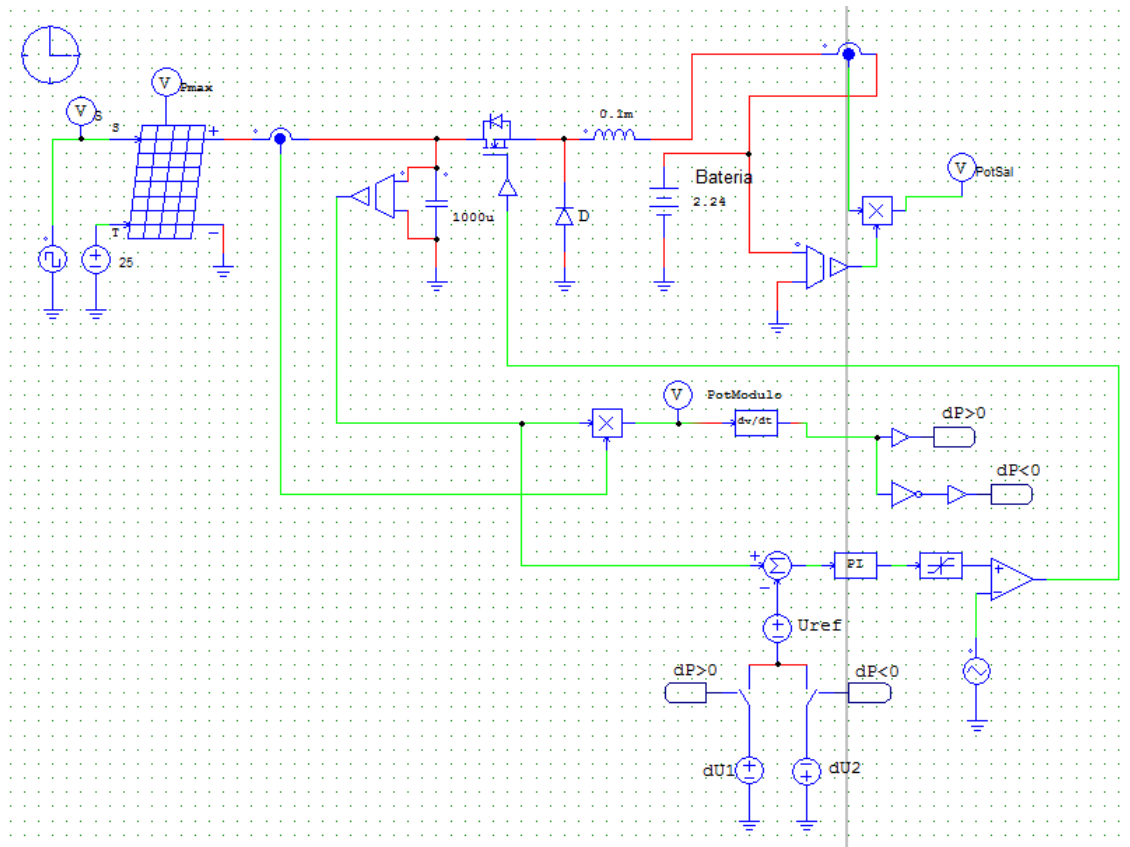


Figura 17

Este circuito se diferencia del anterior, en que la irradiancia no es constante. Esta varía como resultado se modifica las demás señales.

Previo al comentario de las gráficas decir que la variación del punto de funcionamiento de máxima potencia no varía mucho con la variación de la irradiancia. Con lo que el valor de referencia que utilizamos sigue siendo el mismo.

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



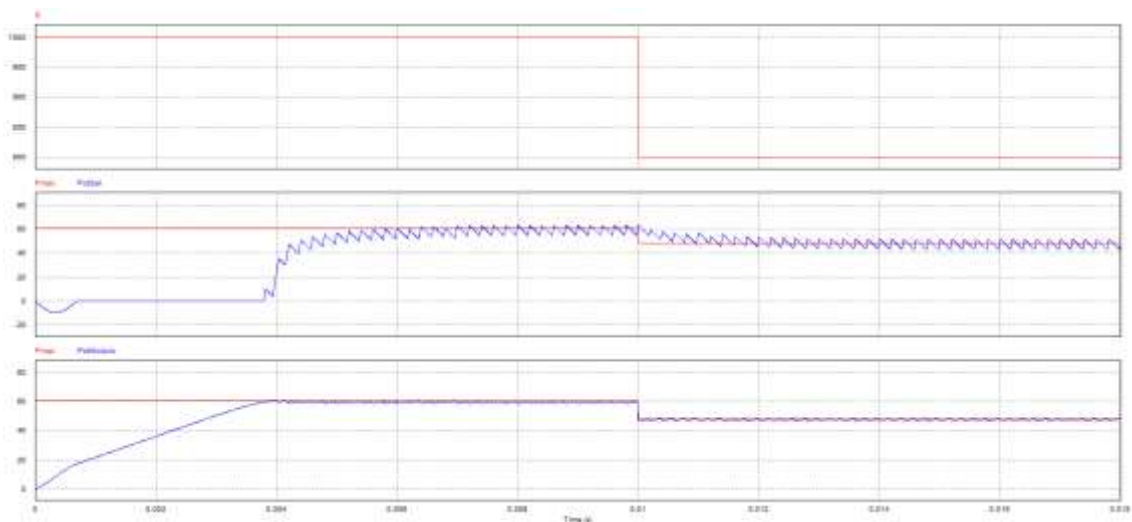


Figura 18

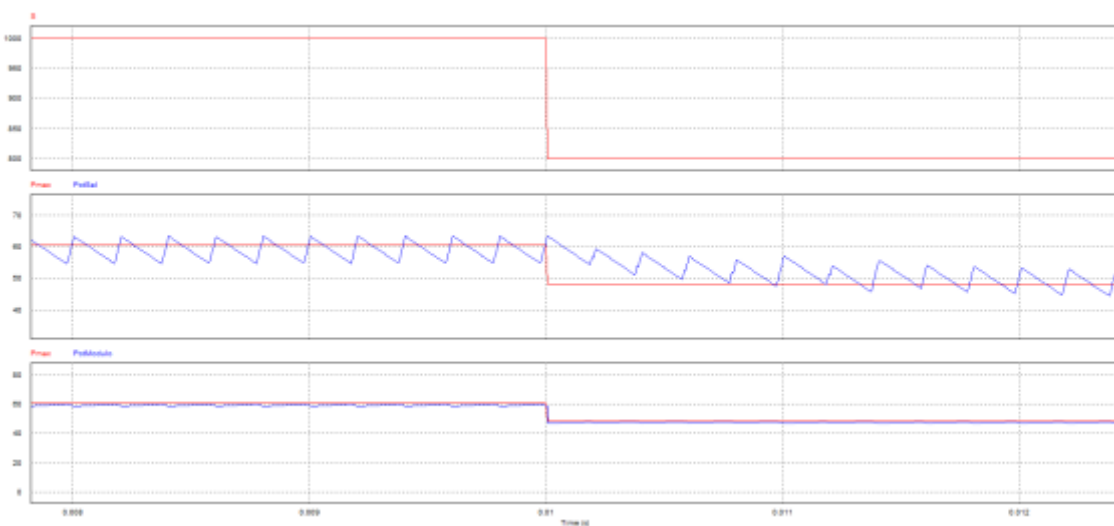


Figura 19

En la figura 18, se muestra la variación de la irradiancia de forma escalón desde  $1000\text{W/m}^2$  a  $800\text{W/m}^2$  y cómo afecta este hecho a las potencias, tanto de entrada como de salida.

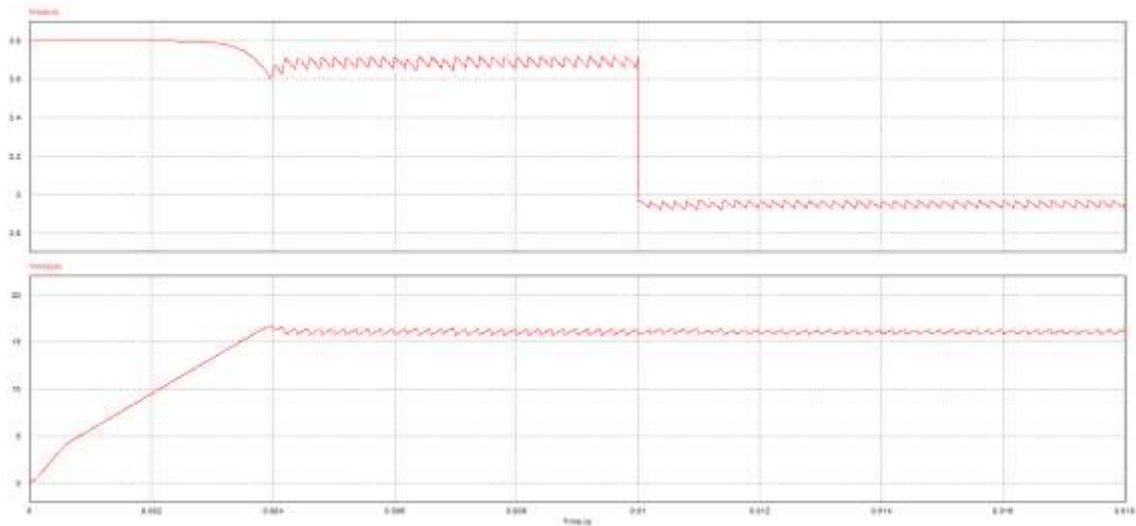
¿Qué ocurre si la irradiancia disminuye?

La potencia que ofrece el módulo fotovoltaico disminuye. Esto no afecta en gran medida la tensión máxima que aporta el módulo pero si la intensidad que ofrece. Con lo que la potencia en la salida disminuirá.

Para ver mejor el cambio en la zona de cambio, la figura 19 está ampliando los resultados obtenidos. En esta se ve de manera clara que la variación de potencia del módulo es inmediata ante el cambio de irradiancia, mientras que el cambio en la

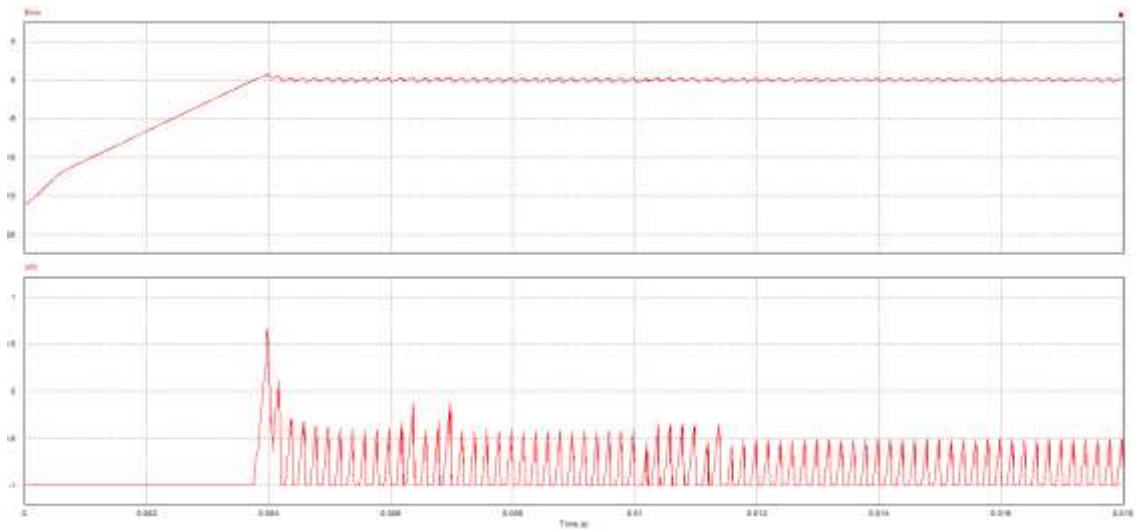
potencia de salida se realiza de manera más suave, tarda unos 0.02s en volver a estabilizarse. Un vez en esa posición fluctuará arriba y abajo entorno a la potencia máxima con  $S=800 \text{ W/m}^2$ .

Para ver con más detalle el funcionamiento del sistema, mostramos otras gráficas que expliquen el cambio en el sistema.



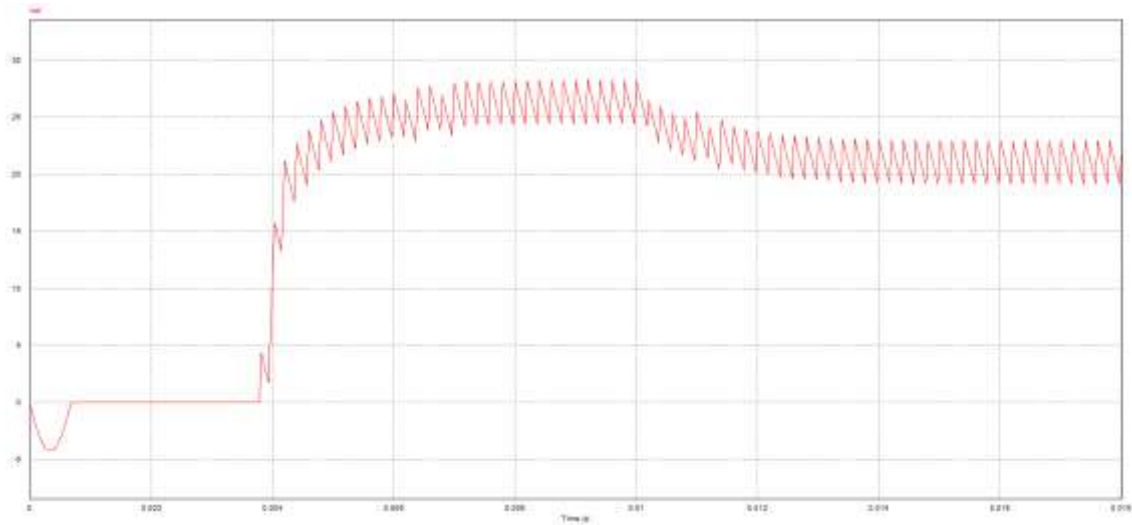
*Figura 19*

Como observamos la variación de la irradiancia afecta a la intensidad, mientras que la tensión se mantiene prácticamente constante.



*Figura 20*

Lo que vemos en la figura 20, es la señal de error al comparar la tensión del módulo con la referencia y la señal de salida del PI, que compararemos con la señal triangular para obtener la señal de activación del polo de potencia.



*Figura 21*

Lo que vemos en la figura 21 es la variación de la intensidad de salida, ya que es lo único que varía, la tensión de salida viene definida por la batería, igual a 2.24V.

En todas las gráficas anteriores del circuito 4, se muestra un pequeño transitorio. Este transitorio es debido a que el panel comienza su funcionamiento en  $V=0V$ . Hasta que el condensador no se carga lo suficiente como para empezar el ciclo de funcionamiento, el sistema no envía energía al circuito de salida.