

**Algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia
de paneles fotovoltaicos (Psim):
Diferencial de primer orden**

Víctor Paredes Cordero

4 de Julio de 2014

1. Circuito 1 A:

El circuito estudiado es el siguiente:

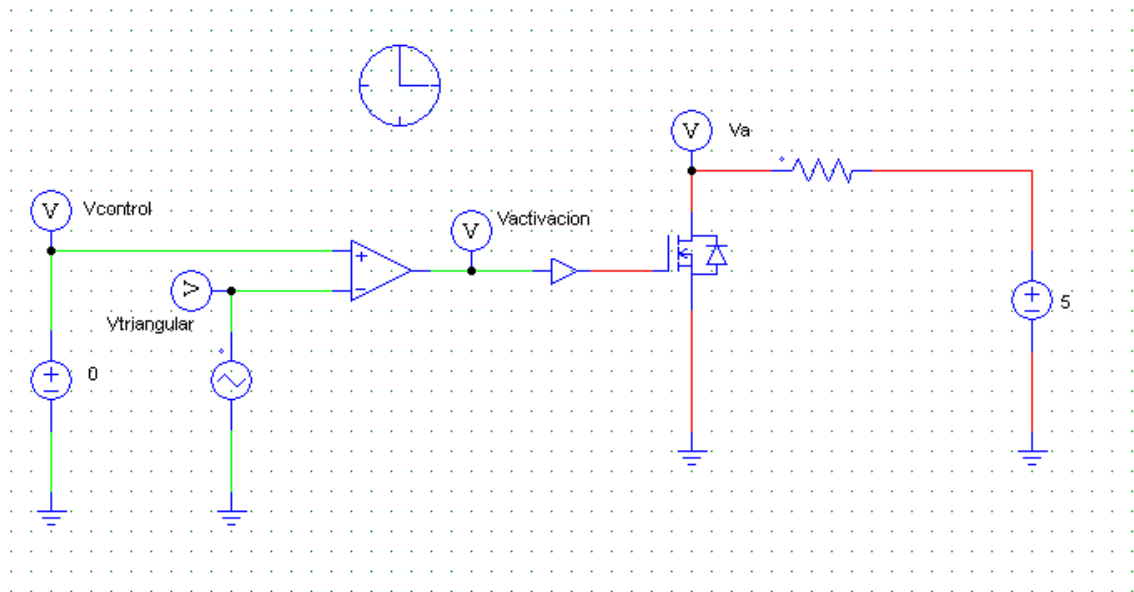


Figura 1.

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:

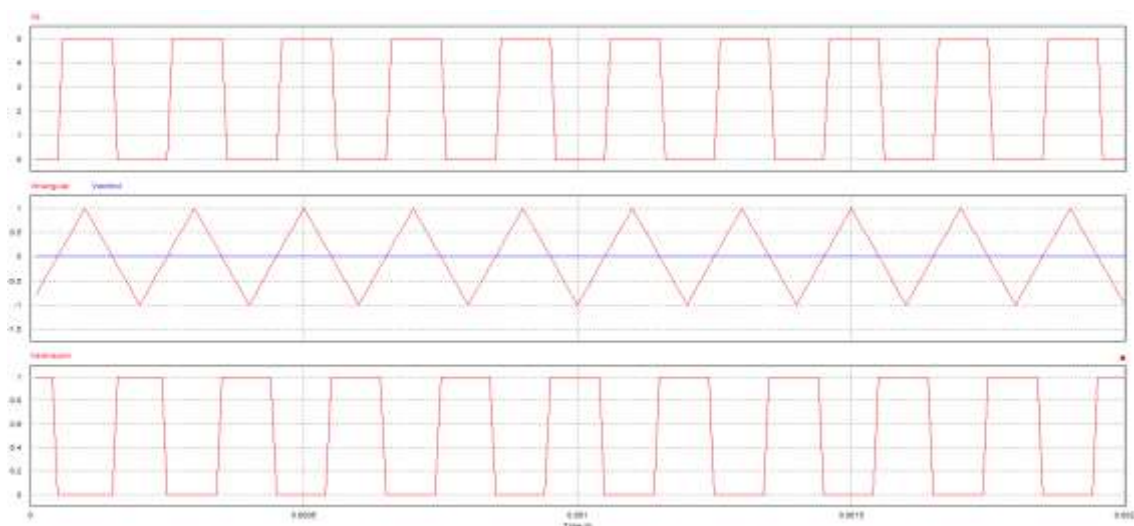


Figura 2

Comentarios de los resultados:

Como podemos ver, de la comparación de $V_{control}$ y $V_{triangular}$, 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 gráfica.

El ciclo de servicio del polo, dependerá de $V_{\text{activación}}$. Por tanto, cuanto mayor sea V_{control} , mayor tiempo está a nivel alto $V_{\text{activación}}$, y menor tiempo está a nivel alto V_a . (Recordar que son complementarias). Si definimos $D=\text{ton}/T$, 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 1B:

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 $V_{\text{triangular}}$.

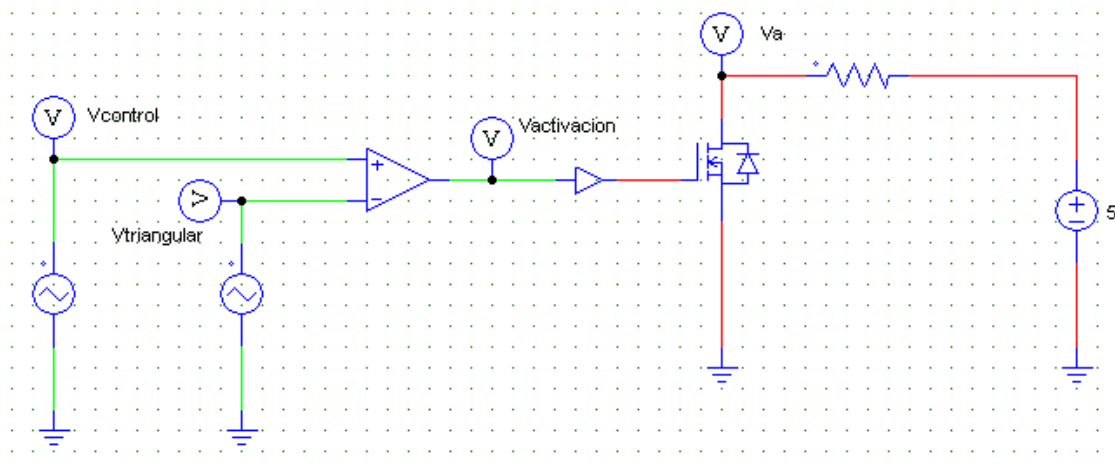


Figura 3

Estos son los resultados obtenidos:

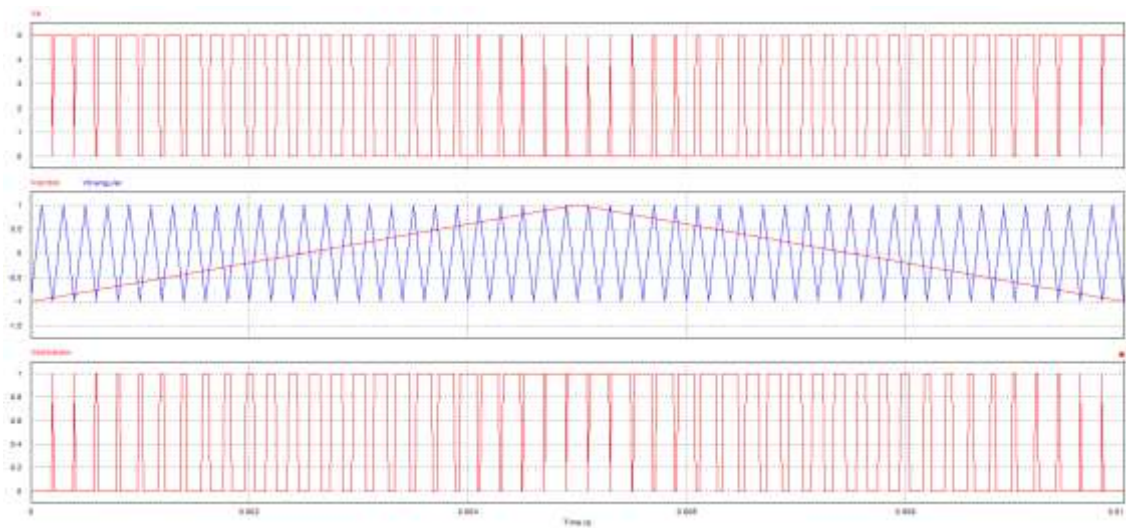


Figura 4

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 2A:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente. En este circuito la señal de la intensidad la consideramos constante de manera que veamos cómo afecta la variación de la tensión en el algoritmo:

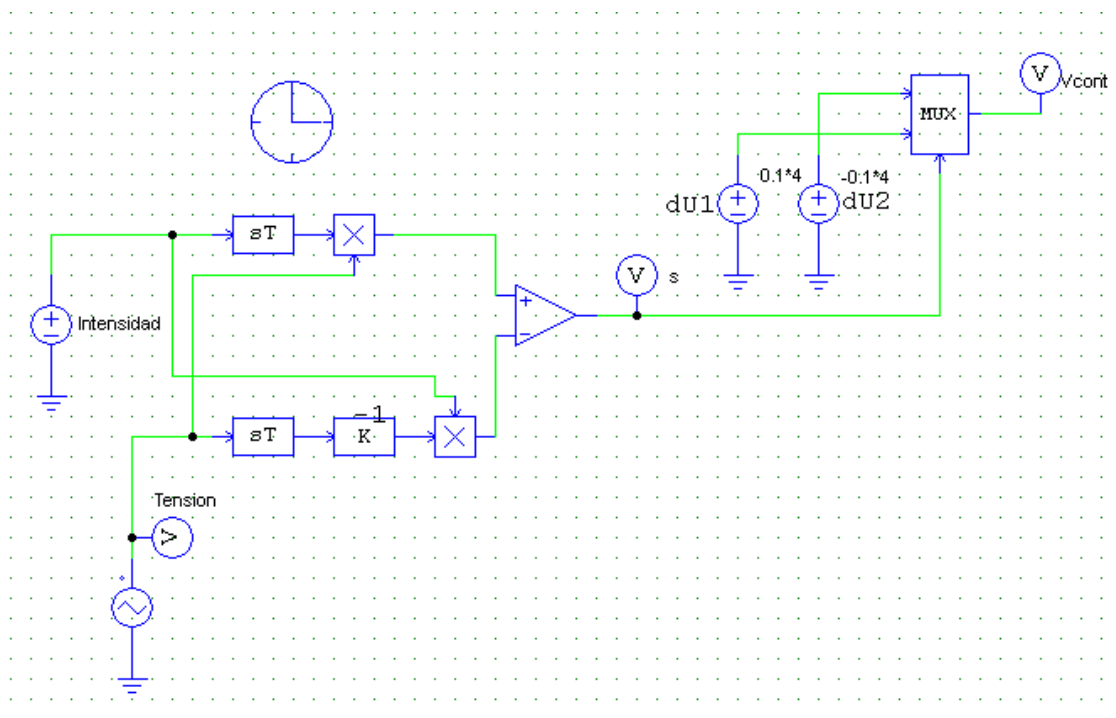


Figura 5

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:

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

El circuito de la figura 5 representa el algoritmo. Las distintas variables son la que se muestran a continuación:

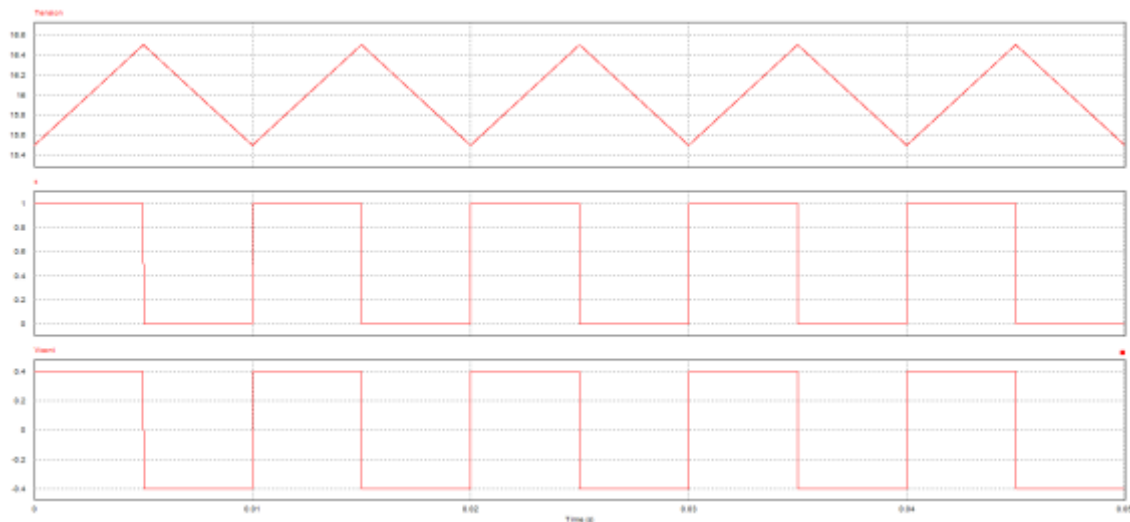


Figura 6

Comentario de resultados:

Este circuito es una aproximación de un algoritmo de control real.

El algoritmo se divide en dos miembros que tenemos que comparar. Como resultado (ver figura 5) tenemos el circuito de comparación. Esta señal de salida del comparador tendrá dos posibles valores 0 o 1, dependiendo de las entradas a este.

Dependiendo de esta señal de activación, la cual se asocia a un multiplexor como la señal de selección, tendremos en la salida una señal de entrada u otra.

En nuestro caso tendremos lo siguiente:

ΔV	ΔI	s	Vcont
<0	0	0	-V
>0	0	1	+V

Con lo que si $\Delta V > 0$, tendremos que aumentar la señal de referencia, y en caso contrario, de que $\Delta V < 0$, tendremos que disminuir la señal de referencia.

Circuito 2B:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente: En este caso tanto la señal de tensión como la de intensidad varían de forma triangular en el tiempo, solo que la frecuencia es diferente entre ellas. Se hace esto para poder ver todas las posibles opciones y casos en los que nos podemos encontrar.

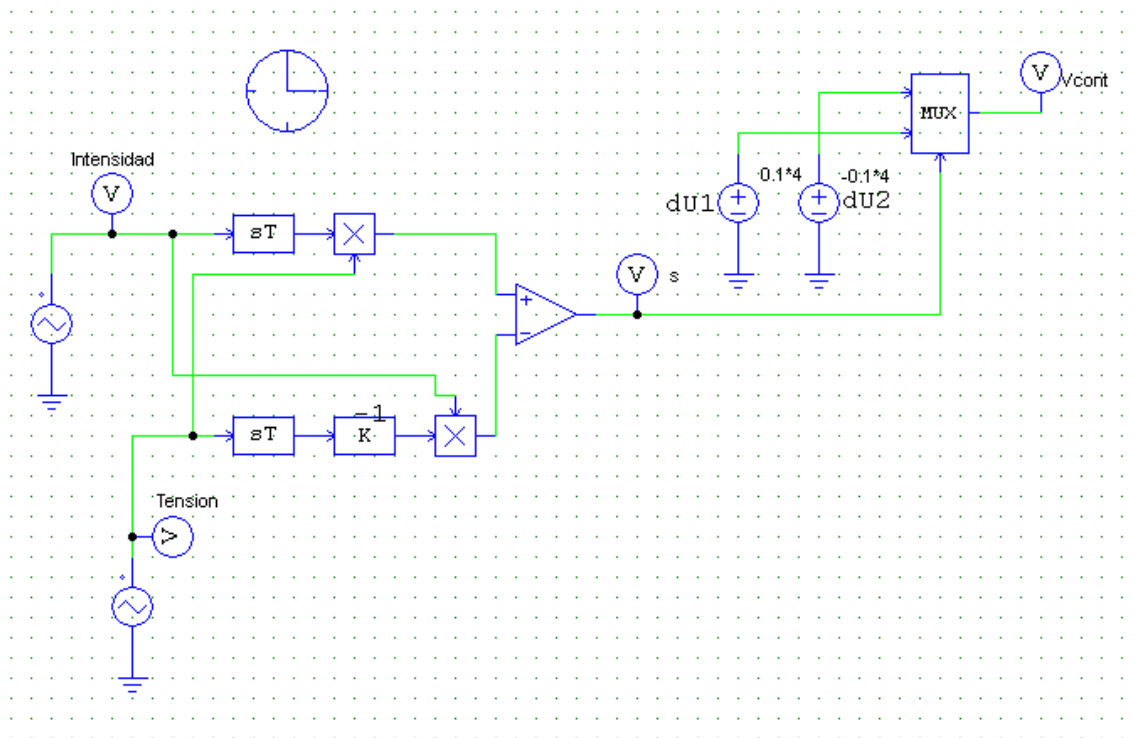


Figura 7

Las distintas variables son la que se muestran a continuación:

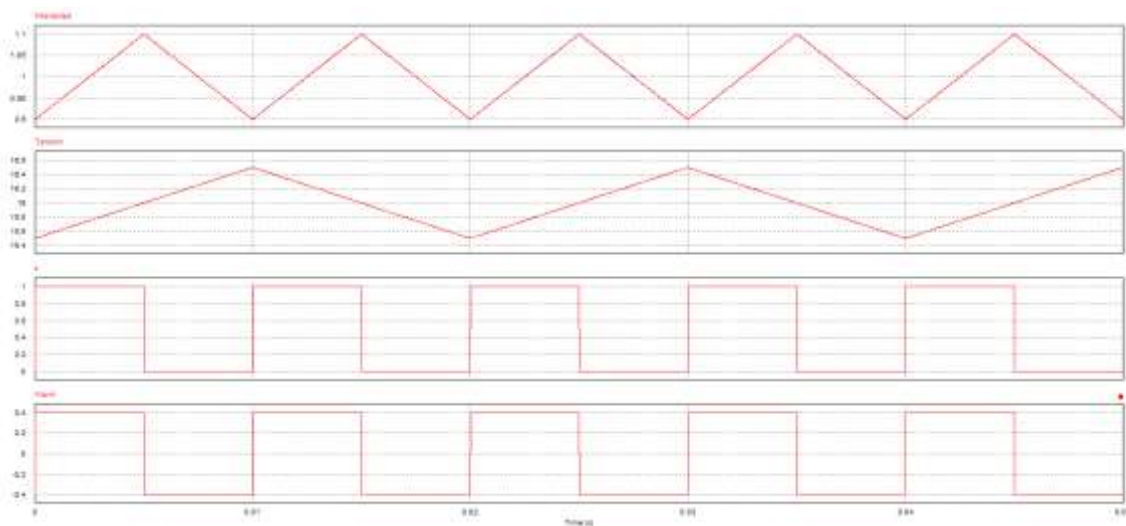


Figura 8

Comentario de resultados:

Este circuito es una aproximación de un algoritmo de control real.

Este circuito es similar al anterior solo que la intensidad varia con el tiempo en vez de ser constante. Esta variación afecta a la señal de salida.

La señal de selección depende del algoritmo de control definido:

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

Dependiendo de los casos vistos en la simulación anterior podemos definir en una tabla las diferentes opciones:

ΔV	ΔI	s	Vcont
<0	<0	0	-V
<0	>0	1	+V
>0	<0	0	-V
>0	>0	1	+V

Circuito 3:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente:

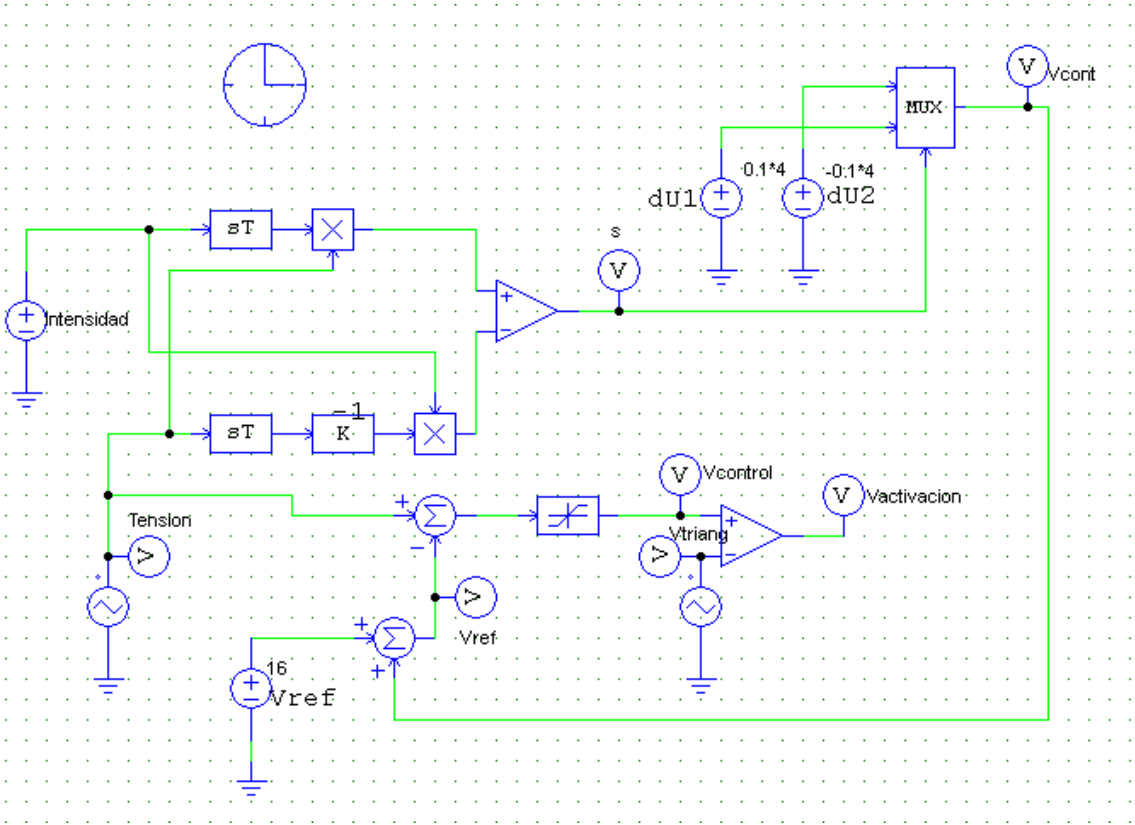


Figura 9.

Para describir el circuito realizamos las siguientes simulaciones:

La primera simulación es similar a la del ejercicio anterior en la que vemos como varia la tensión y cómo afecta en la salida del multiplexor.

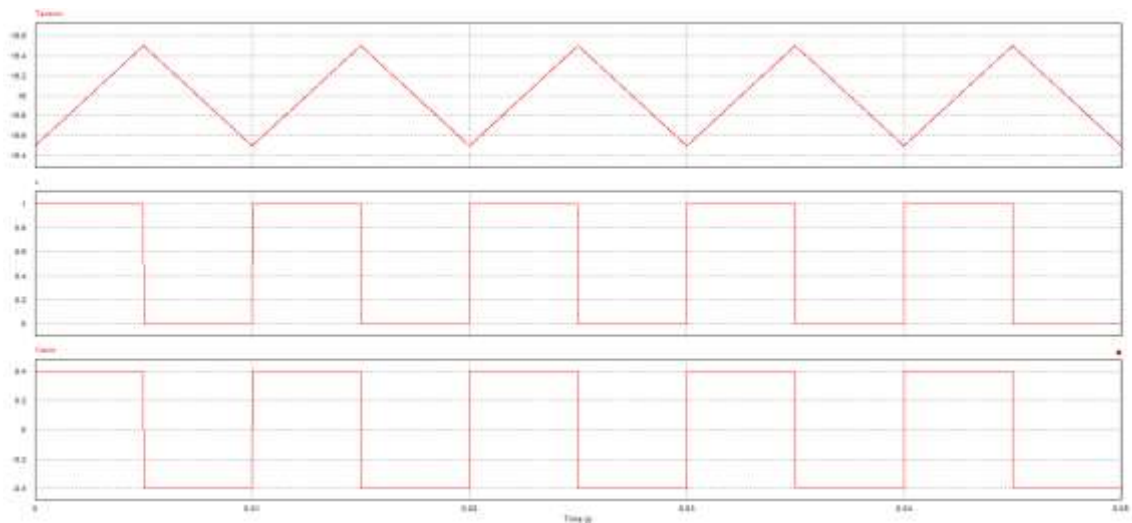


Figura 10

Simulación en la que representamos la señal de salida del multiplexor y la variación en la tensión de referencia que comparamos con la tensión de entrada:

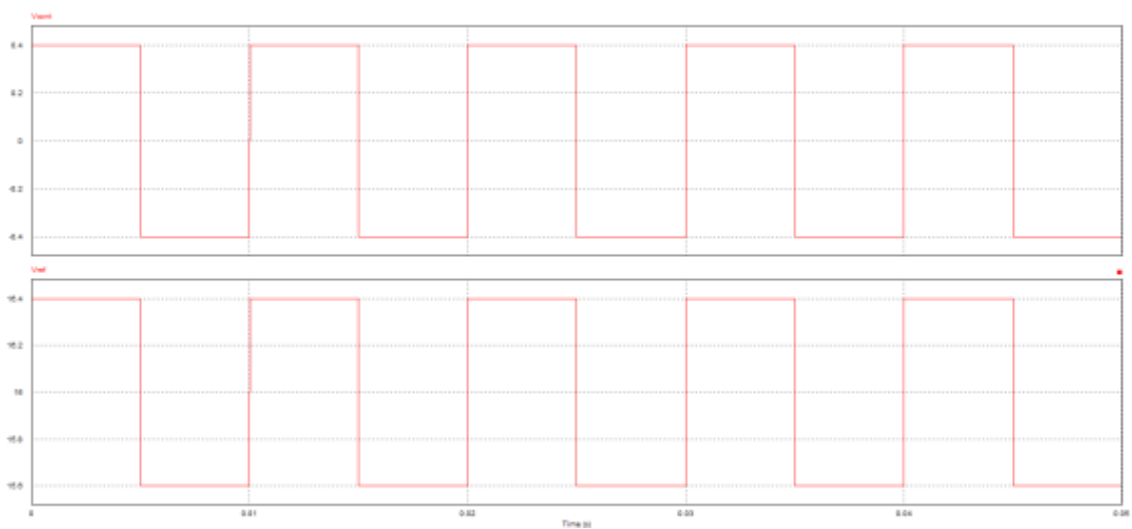


Figura 11

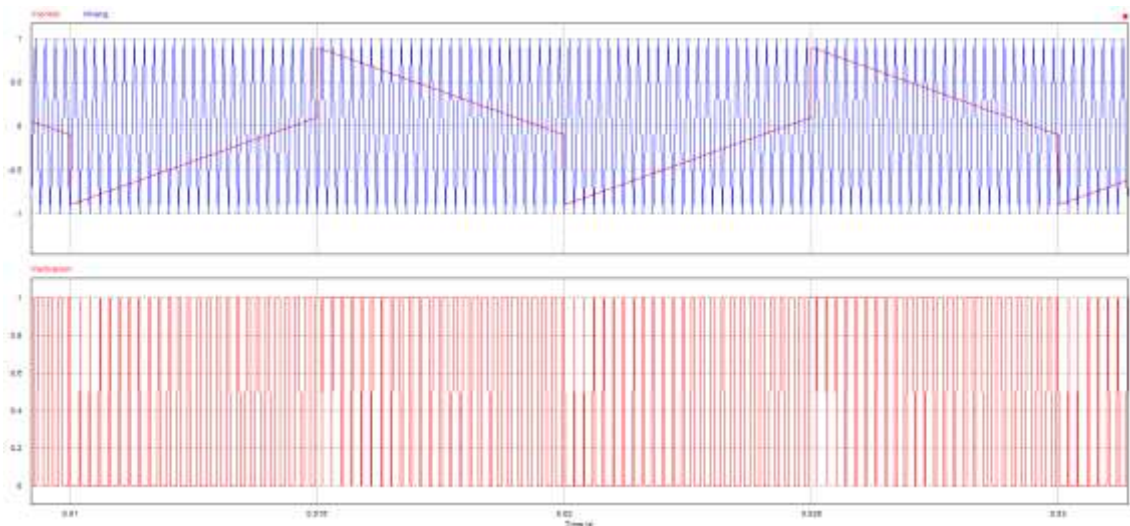


Figura 12

Para apreciar en mayor medida el efecto de la señal de control y la señal triangular realizamos un zoom de la simulación:

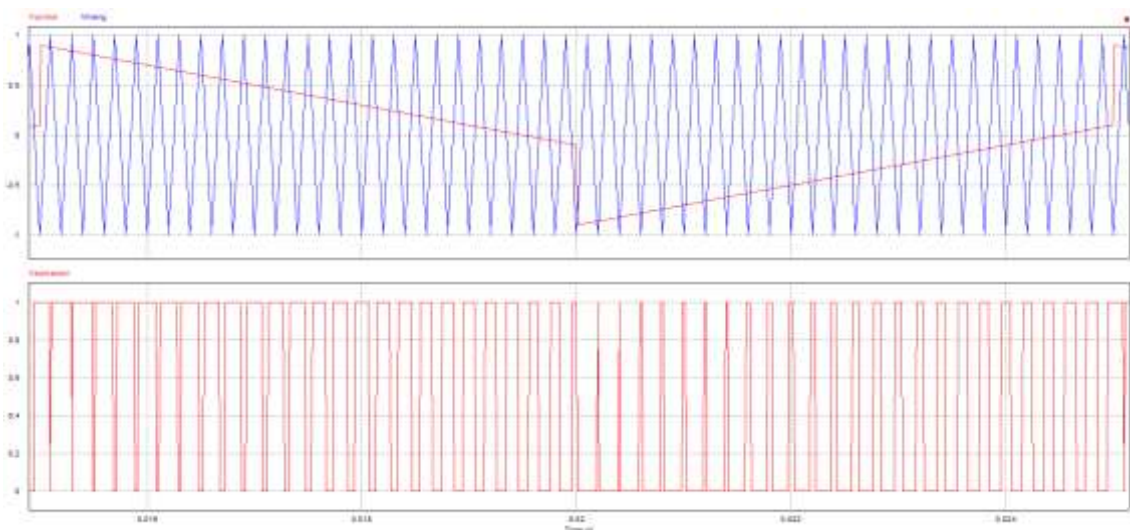


Figura 13

Comentario de resultados:

En este circuito se añade al circuito del algoritmo el comparador que sirve para controlar la tensión, de manera que esta siga a la tensión de referencia V_{ref} . Hay que añadir que al ser el valor de la intensidad igual a 1 A y constante, el valor de la potencia del panel es similar al de la tensión.

La señal de entrada al sistema (tensión) se resta de la señal de referencia (más o menos la variación de esta definida por el algoritmo) para obtener el error que debemos corregir. Esta señal de error pasa a través de un saturador limitado por la amplitud de la señal triangular con la que compararemos posteriormente.

El comparador funciona como un control PWM, en el que cuando la señal $V_{\text{control}} > V_{\text{triangular}}$ en la salida tendremos un 1 y en el caso contrario de que $V_{\text{control}} < V_{\text{triangular}}$ la señal de salida del comparador será 0.

Esta señal de será la que posteriormente se conecta a la base del polo de potencia, y activará o desactivará el paso de corriente, es decir conectará o desconectará el interruptor.

Comparador:

Entradas	Salida	Interruptor
$V_{\text{control}} > V_{\text{triangular}}$	1	Cerrado
$V_{\text{control}} < V_{\text{triangular}}$	0	Abierto

Para observar mejor como se ve afectada la señal Vactivación, hay que representar la señal de tensión y Vref, junto con las anteriores gráficas:

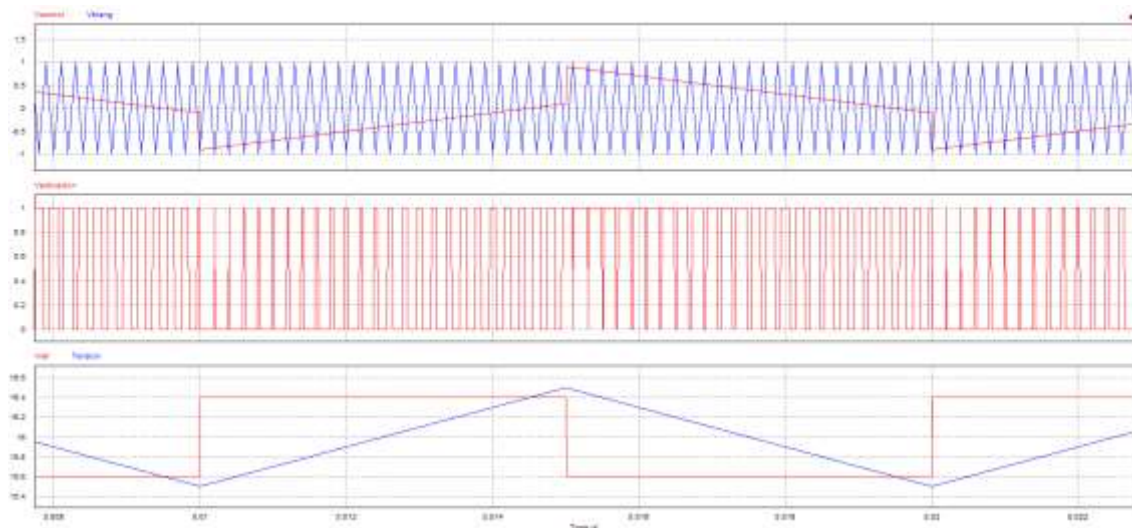


Figura 14.

Circuito 4:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente:

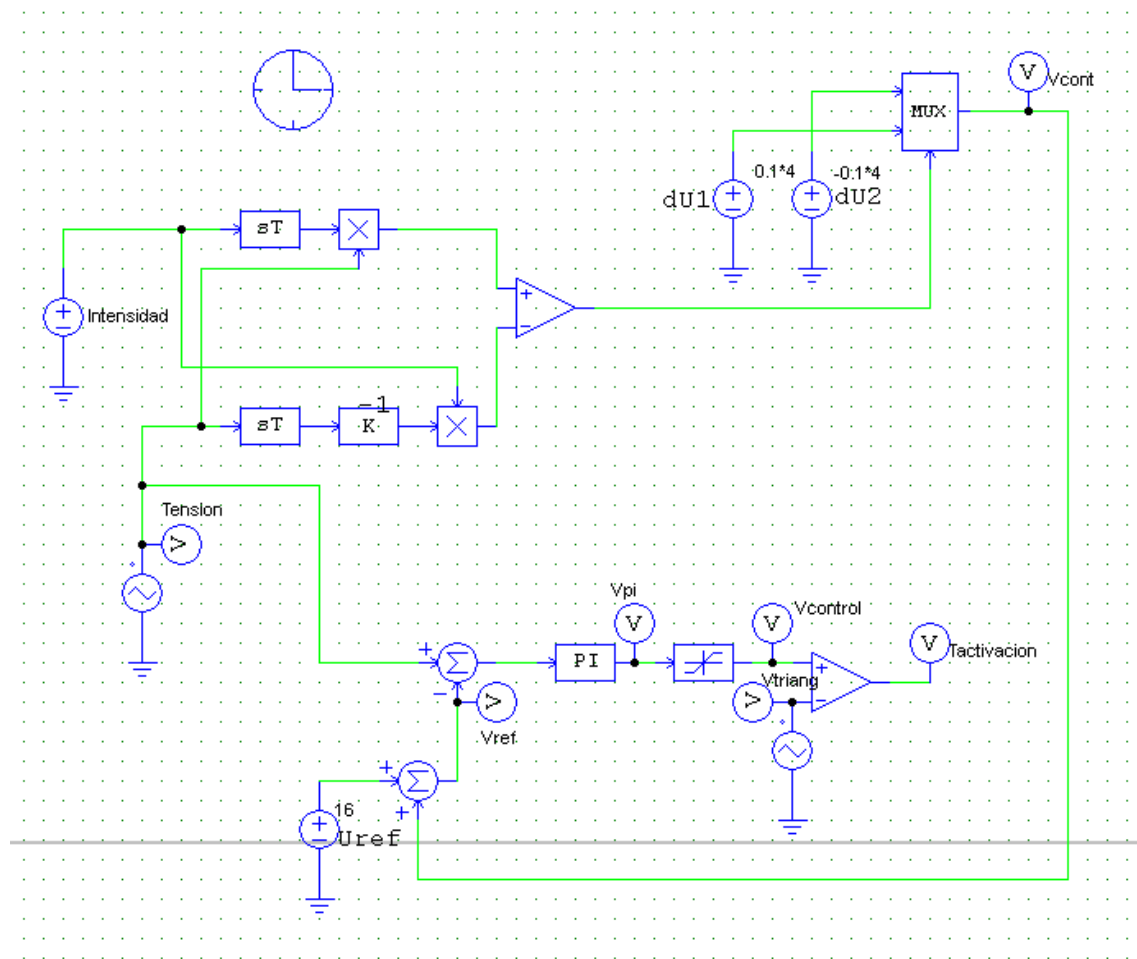


Figura 15.

En este caso tenemos el mismo circuito que el ejercicio anterior solo que este tenemos un controlador con un PI, de manera que aplique una acción correctora que ajuste la señal con una mayor velocidad y estabilidad.

Simulación del circuito:

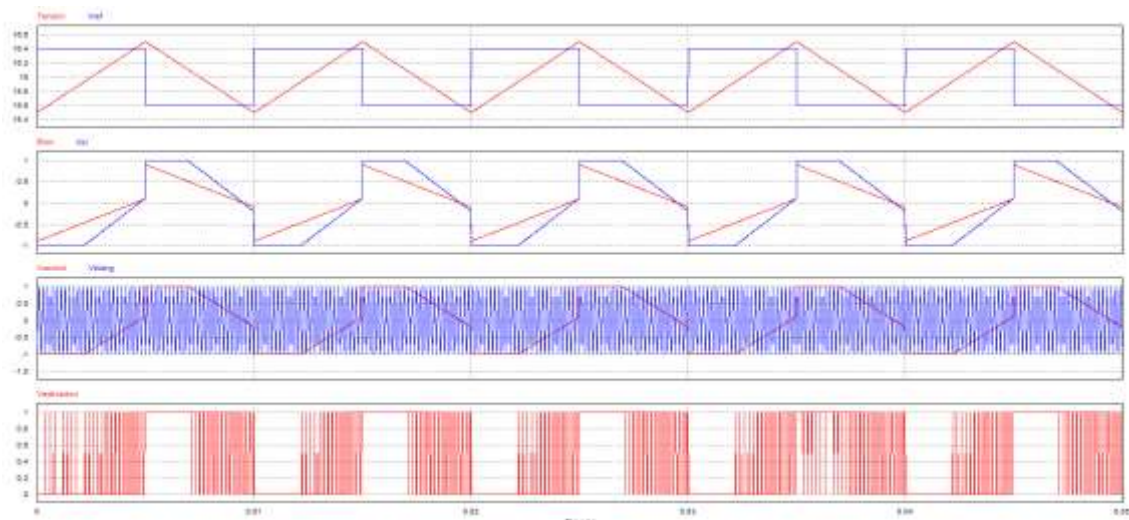


Figura 16

Para ver con más detalle ajustamos el tiempo de simulación:

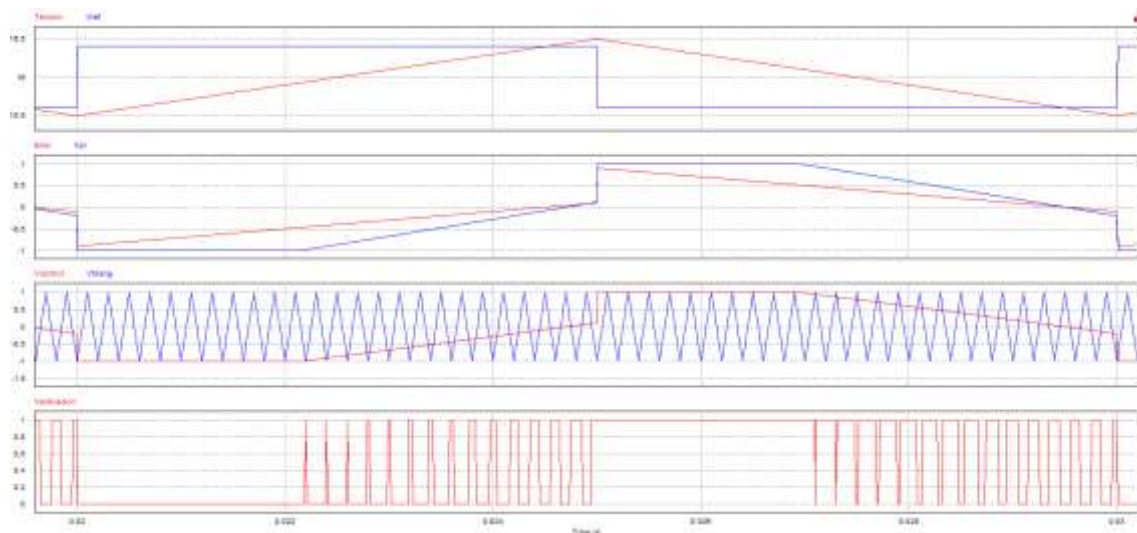


Figura 17.

Comentario de resultados:

Mediante la introducción en el circuito de control de un PI, conseguimos que la señal se adapte de manera más rápida y con una mayor estabilidad a la referencia.

La señal $V_{control}$, la cual comparamos con la señal $V_{triangular}$, es la señal que se modifica al introducir en el controlador un PI, como consecuencia tenemos que la señal de activación que controla el polo de potencia también varía:

Cuando la potencia aumenta y está por debajo de la de referencia tenemos que ir aumentando progresivamente el ciclo de servicio, de manera que trabajemos siempre con la máxima potencia que ofrece.

Circuito 5:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente:

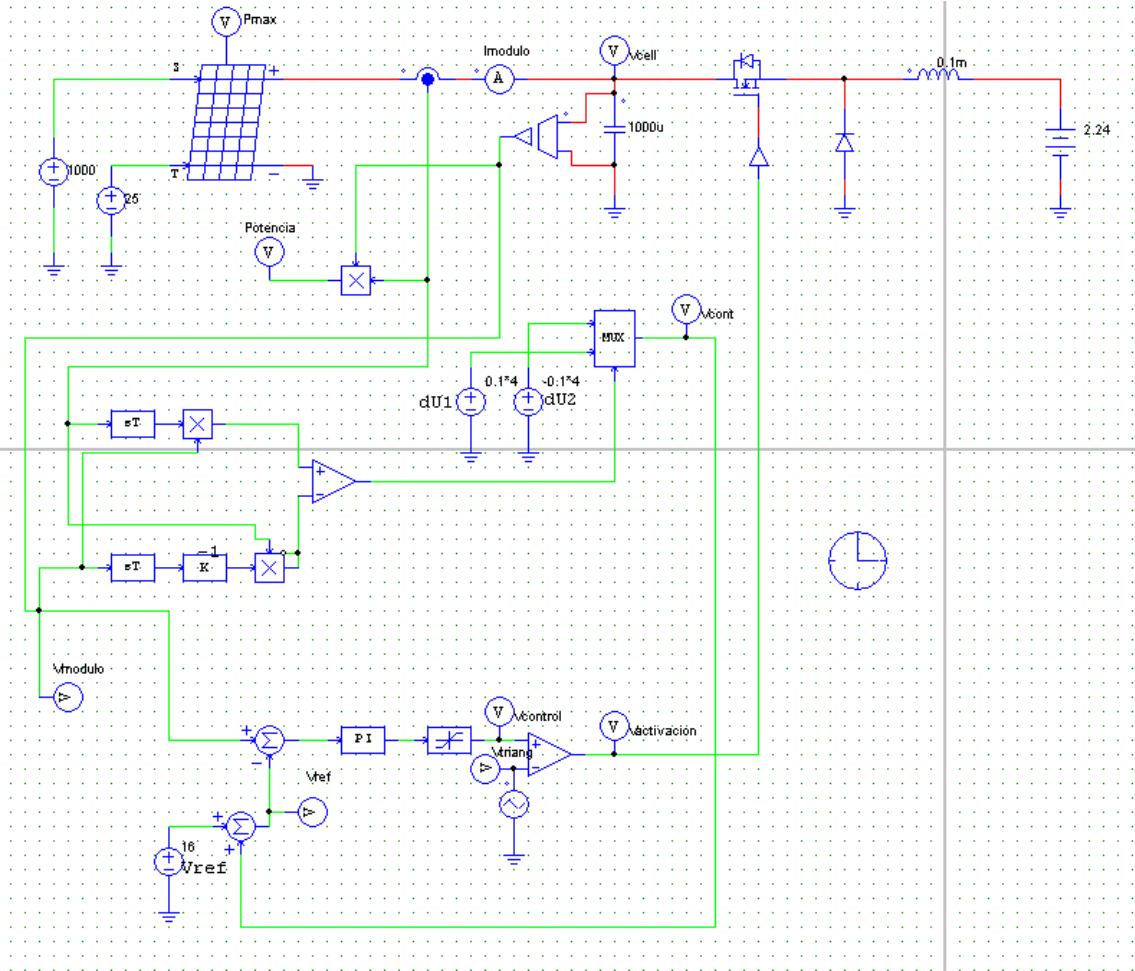


Figura 18.

En este circuito se incluye un panel solar fotovoltaico con 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*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*m)
Ambient Temperature T_a :	25	(oC)

Figura 19.

Las condiciones de operación en las que se simulará el módulo fotovoltaico son las siguientes:

- S (irradiancia) = 1000 W/m^2 .
- T (temperatura) = $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

El panel utilizado tiene las siguientes características, para ello utilizamos el módulo de Psim que nos ofrece las curvas P-V e I-V del panel:

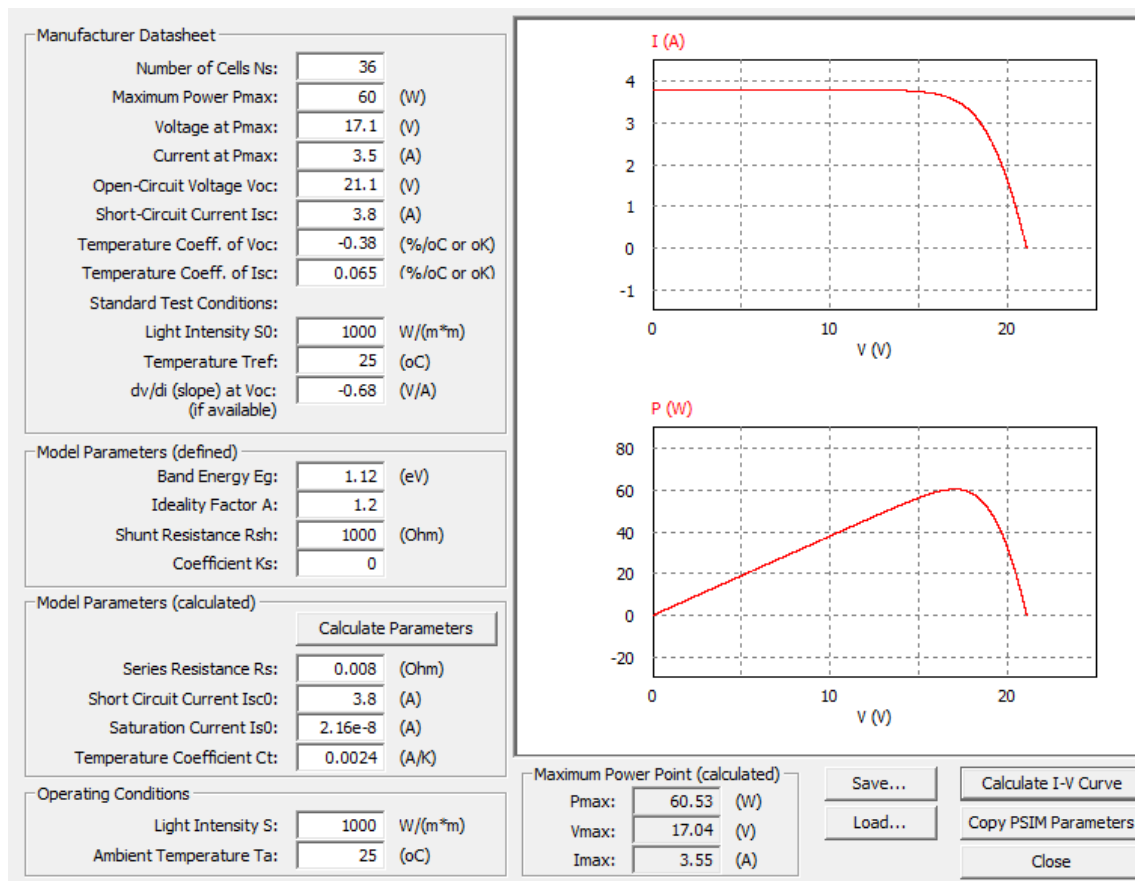
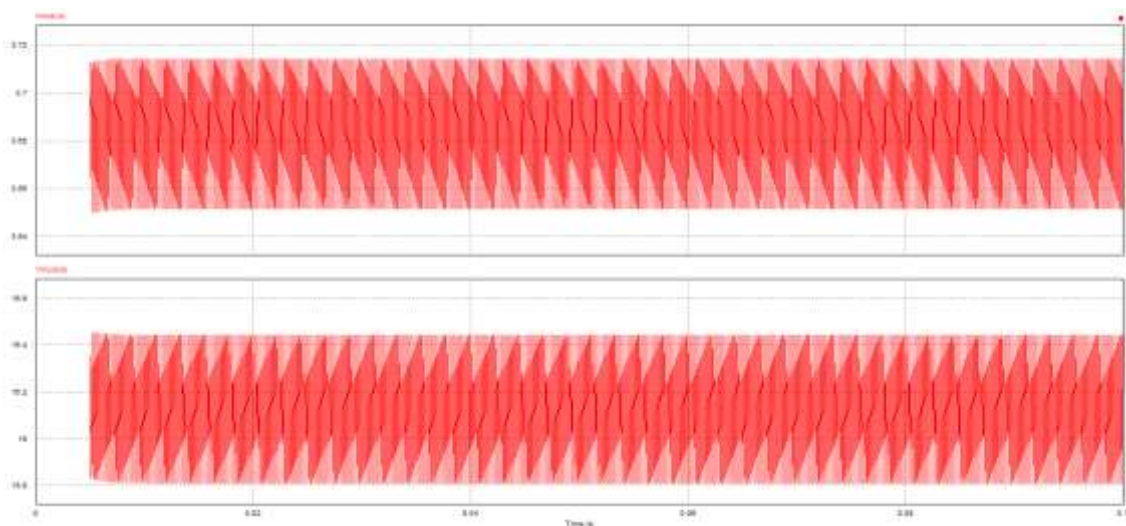


Figura 20.

Las gráficas de las señales del circuito son las siguientes:

Imodulo y Vmodulo:



En el caso de apreciar con más detalle cómo evolucionan la tensión y la intensidad que obtenemos del panel modificamos el tiempo de simulación para ver el estado de las señales en estacionario.

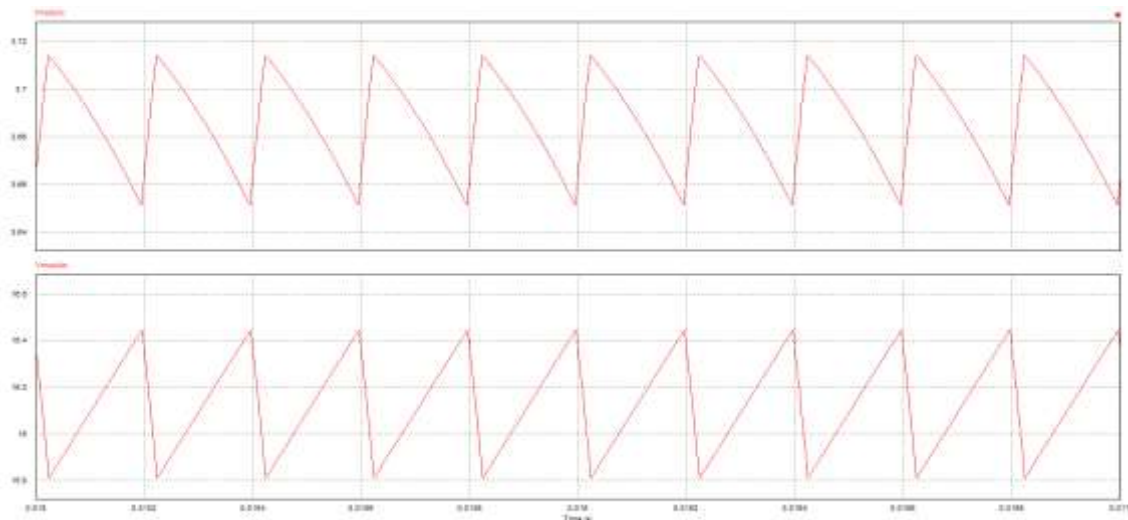


Figura 21.

Si modificamos el tiempo de simulación podemos ver el arranque del panel y su transitorio, hasta que llega a estabilizarse:

I modulo y V modulo:

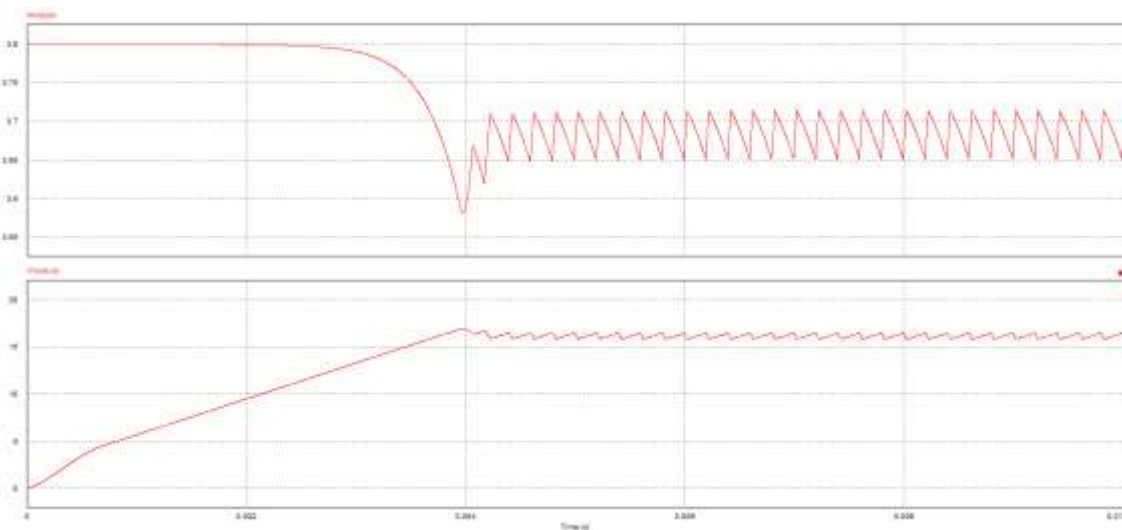


Figura 22.

Como vemos, la intensidad varía tan poco que puede considerarse constante, en cambio la tensión va subiendo poco a poco hasta alcanzar valores más o menos constante, este valor es el de máxima potencia. Una vez que alcanza ese valor fluctuará alrededor del este.

Tenemos que tener en cuenta que ni la irradiancia ni la temperatura del panel varían a lo largo de la simulación.

V_{modulo}, V_{ref} y V_{activación}:

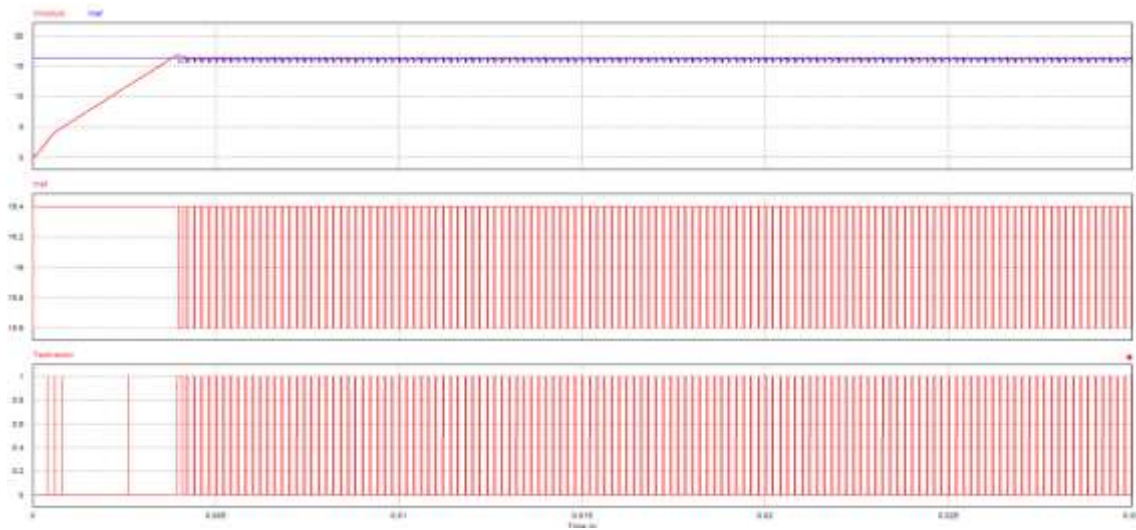


Figura 23.

Modificando el tiempo de simulación, en estado estacionario tendremos:

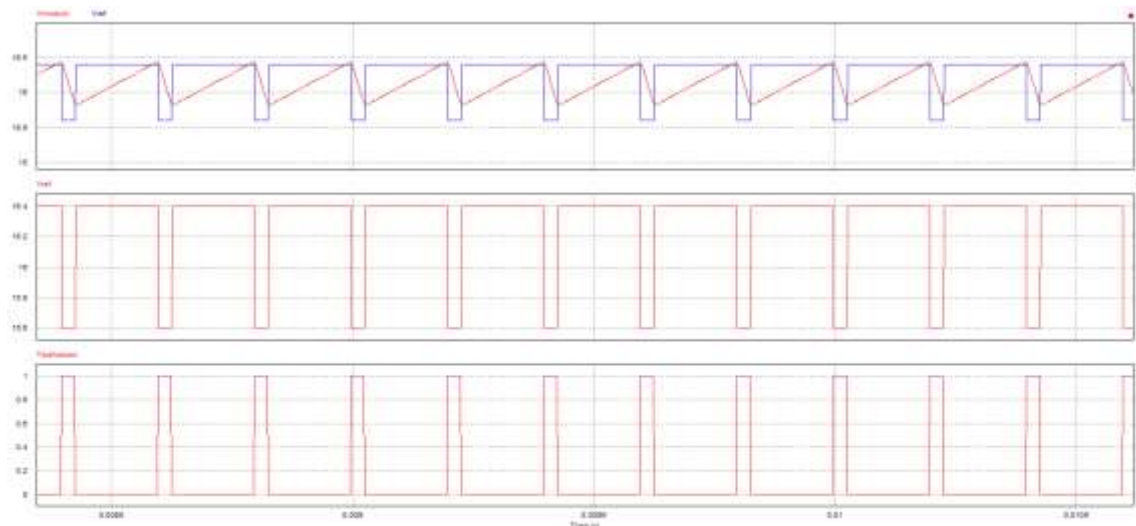


Figura 24.

En estas gráficas se puede observar como interviene el algoritmo y entender completamente como afecta los circuitos de los ejercicios anteriores en el control de la tensión y V_{ref}, en la señal de activación que controla el polo de potencia.

En la simulación del transitorio vemos como el algoritmo no empieza a intervenir hasta que estamos en valores de tensión y potencia cercanos al punto de máxima potencia. El sistema va aumentando la tensión de salida hasta alcanzar el valor estacionario, esto es la consecuencia de que la señal de activación este todo el tiempo a nivel bajo.

Veamos que ocurre con las potencias:

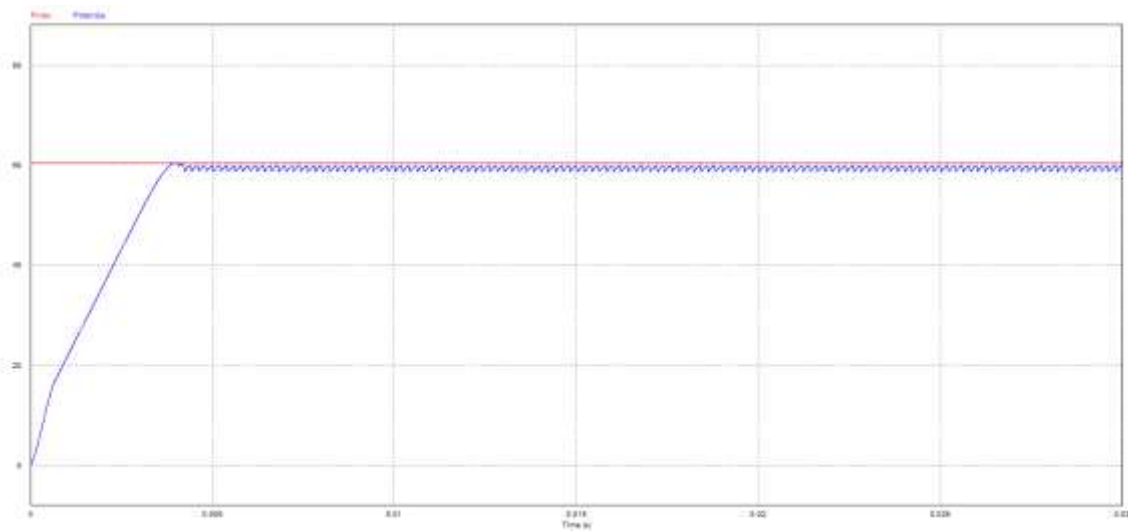


Figura 25.

La potencia de salida que nos ofrece el módulo solar fotovoltaico se encuentra en torno a la potencia máxima que da en las condiciones de simulación.

Vcontrol, Vtriangular y Vactivación:

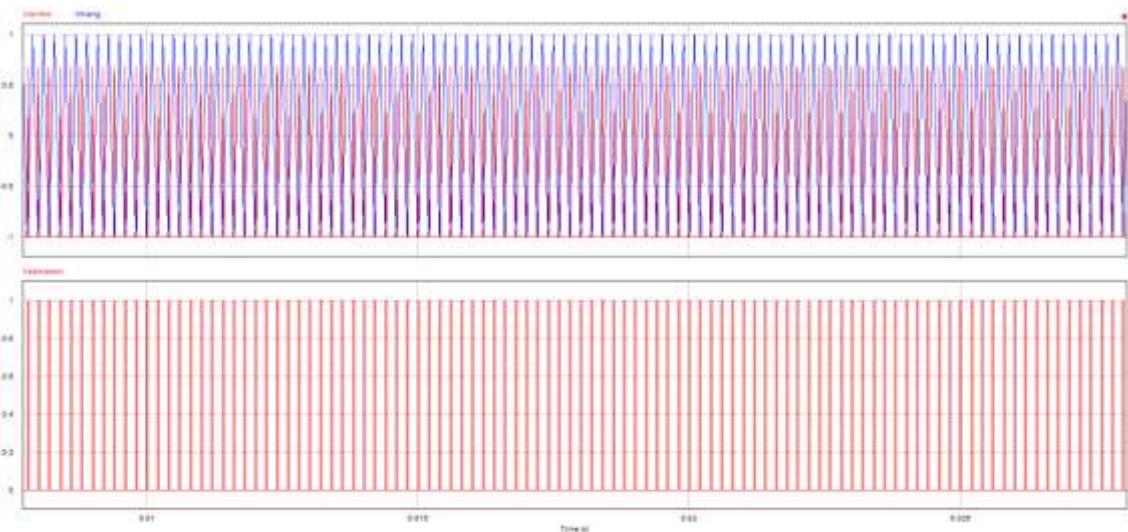


Figura 26.

Si queremos apreciar cómo influye la señal de control, tenemos que modificar el tiempo de simulación:

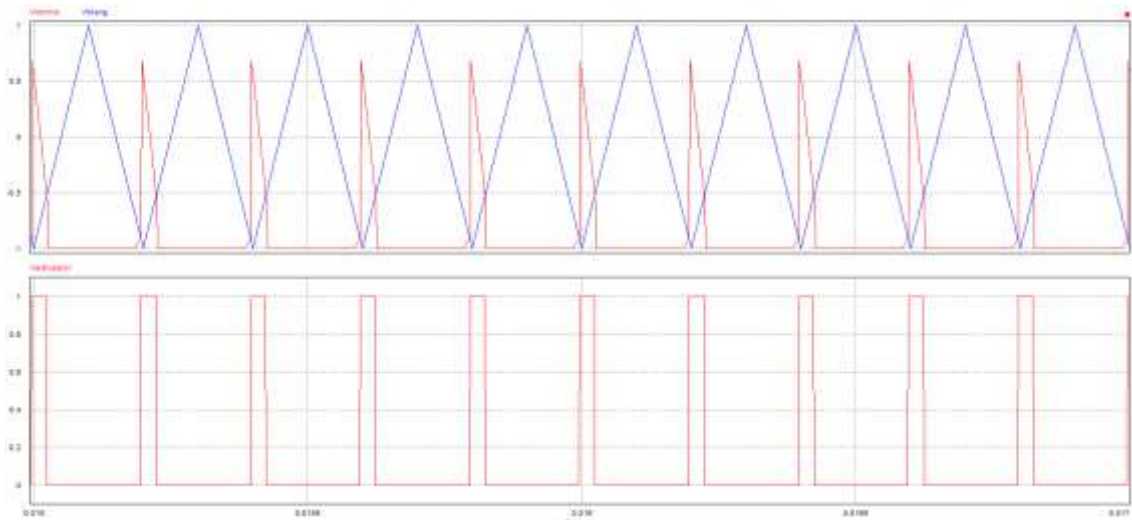


Figura 27.

En este caso la carga es una batería de 2.24V, un uso más común es el de aplicar el panel a cargas de baterías de 12V.

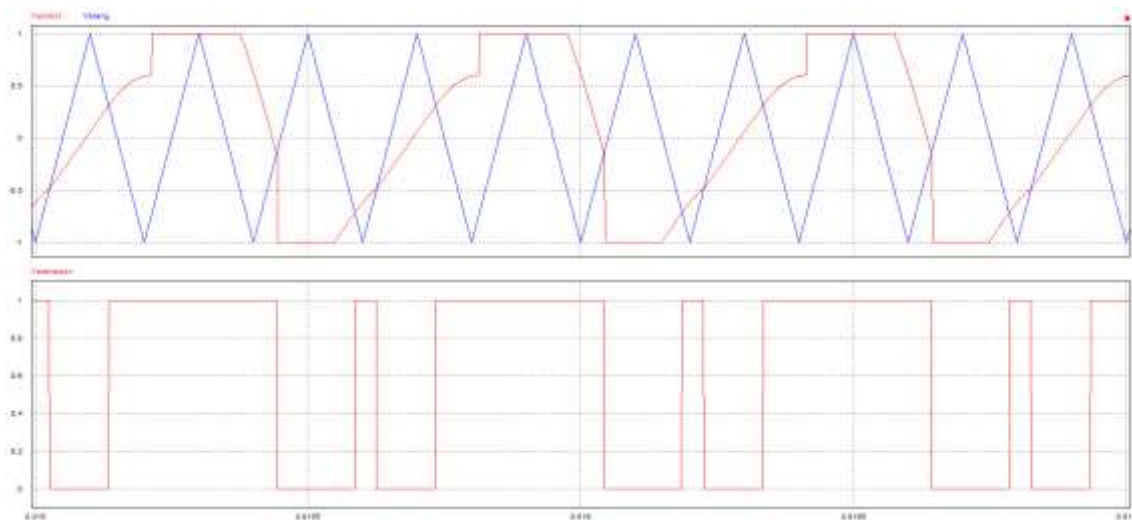


Figura 28.

Como vemos en las figura 27 y 28, la primera con carga de batería de 2.24 V y la segunda con carga de batería de 12V, el ciclo de servicio tiene que ser mayor ya que la tensión de salida también lo es. De esta manera el controlador junto con el convertidor de potencia, en este caso un convertidor reductor, ajusta el ciclo de servicio del controlador, para que independientemente de la tensión que ofrezca el panel siempre trabajemos en el punto de máxima potencia.

En este circuito se muestra el funcionamiento de un controlador PI y su resultado en el circuito. Este controlador se utiliza como regulador para 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.

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, es decir que convertimos una fuente de corriente en una fuente 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 la potencia.

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 6:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente:

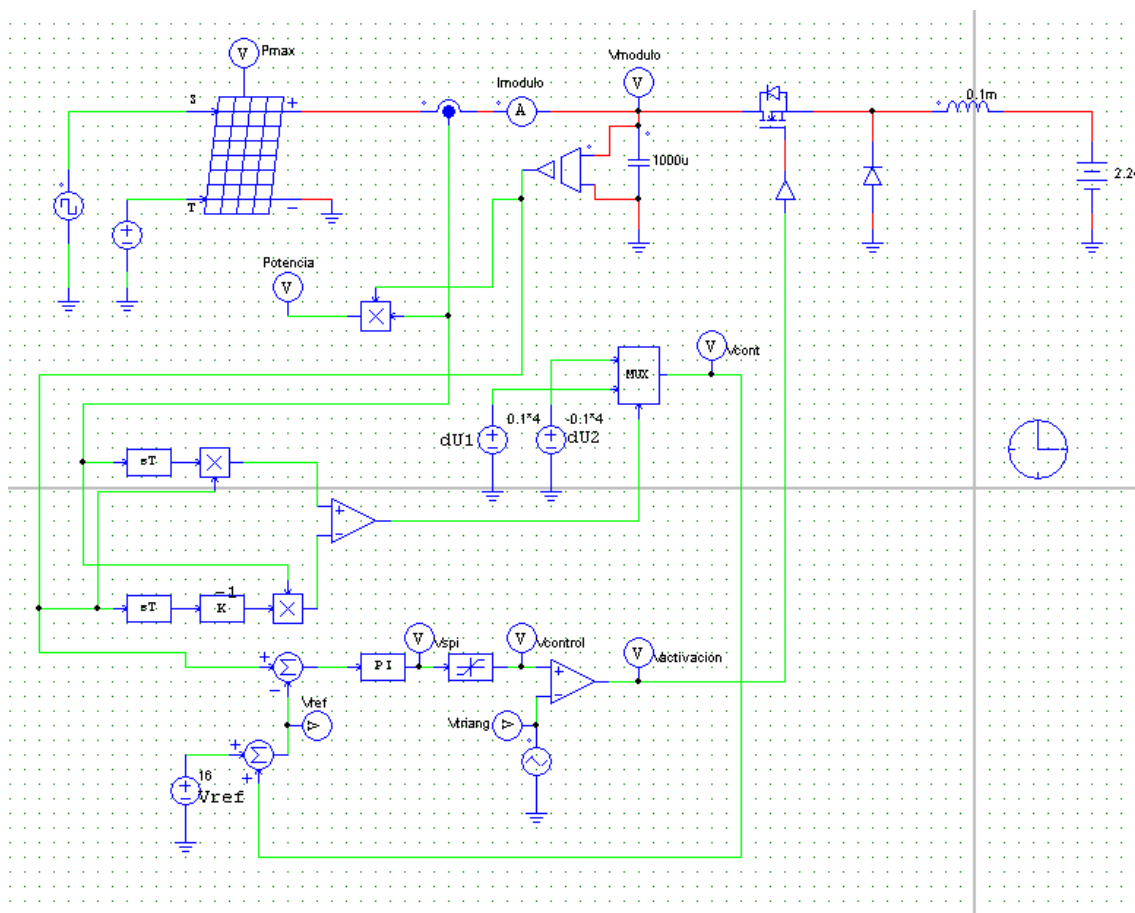


Figura 29.

Este circuito se diferencia del anterior, en que la irradiancia no es constante. Al variar la irradiancia que recibe el panel, la potencia que es capaz de administrar también lo hace, con lo que el controlador tiene que ajustar el ciclo de servicio del convertidor para ajustarse a las necesidades de funcionamiento del panel.

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 la tensión de referencia sigue siendo el mismo.

En la simulación, la variación de la irradiancia lo simulamos mediante un bloque que genera una onda cuadrada que varía entre 800 W/m^2 y 1000 W/m^2 .

I_{modulo} y V_{modulo}, Pot_{max} y Potencia:

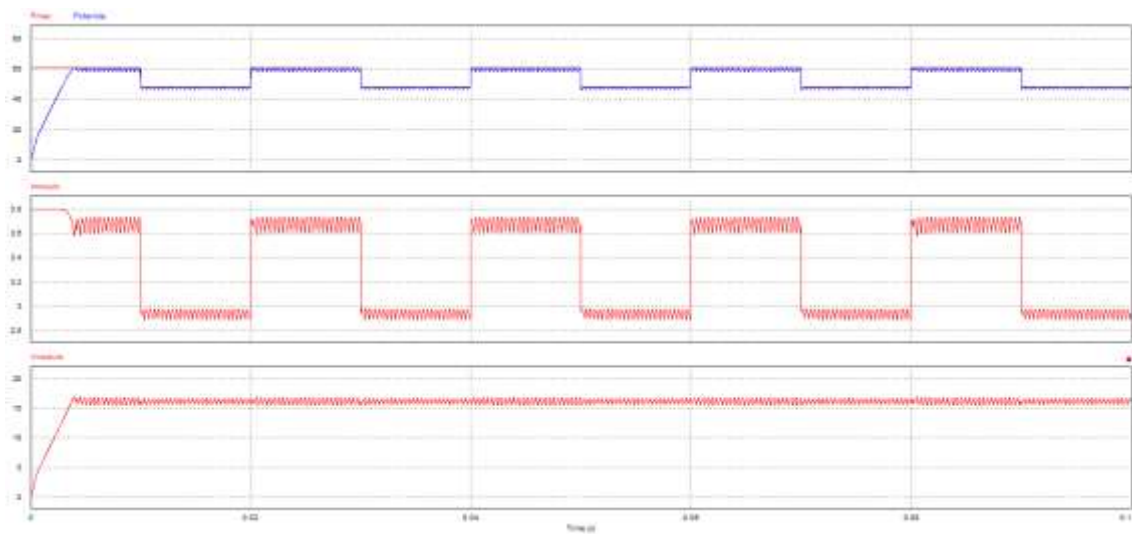


Figura 30.

Como observamos en la figura 30, la variación en la irradiancia afecta a la intensidad, mientras que la tensión se mantiene prácticamente constante.

V_{modulo}, V_{ref} y V_{activación}:

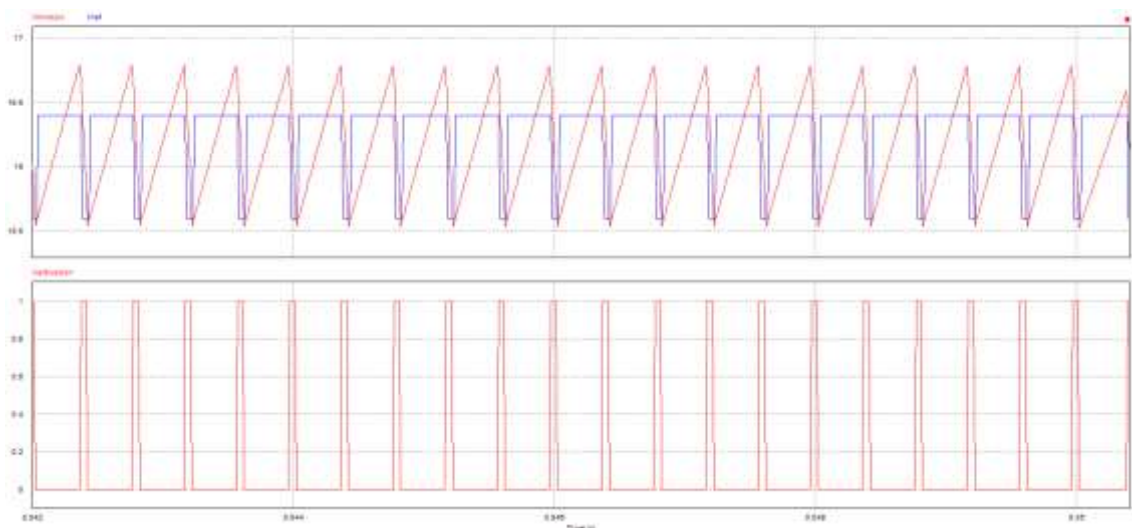


Figura 31.

Vcontrol, Vtriangular y Vactivación:

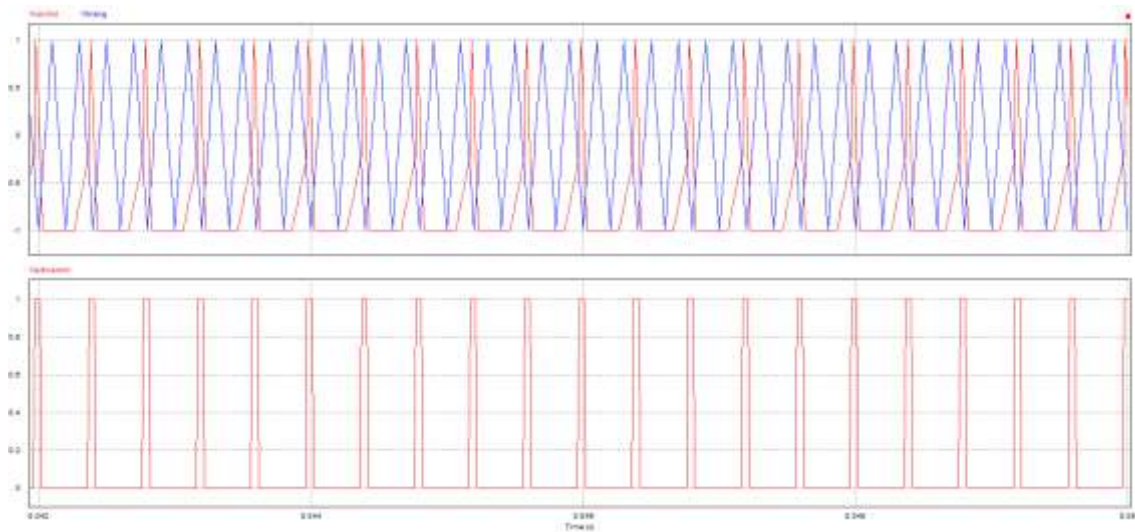


Figura 32.

En estas gráficas podemos apreciar que aunque varíe la irradiancia, la tensión, y en consecuencia el ciclo de servicio, se mantienen prácticamente igual que en el ejercicio anterior cuando la carga es un batería de 2.24V.

En el caso de que la carga sea una batería de 12V, tendremos las siguientes formas de onda:

- Pmax y potencia.
- Vcontrol y Vtriangular.
- Vactivacion.
- Vmodulo y Vref

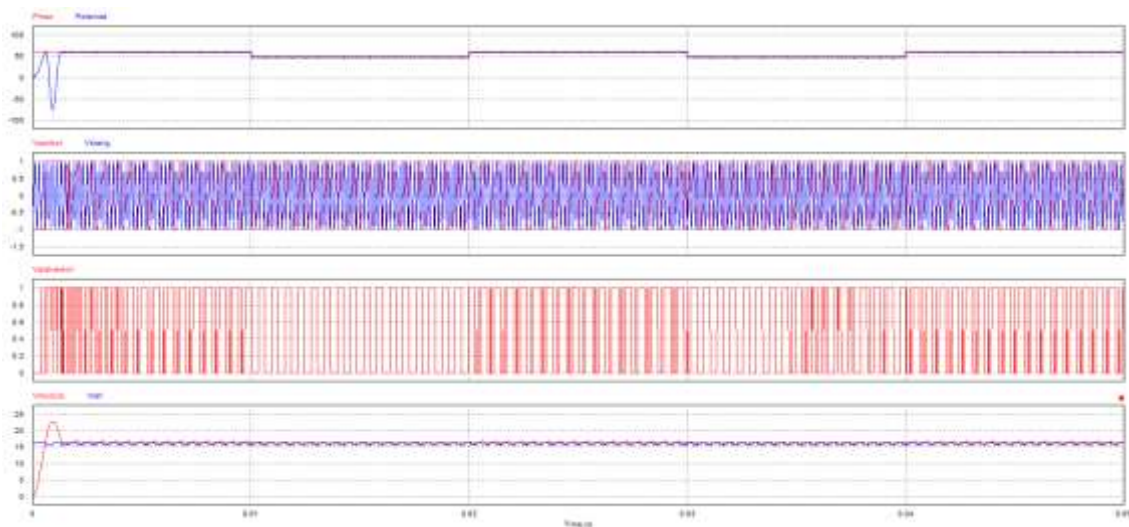


Figura 33.

Si reducimos el tiempo de simulación y vemos con detalle las gráficas vemos que efecto tiene el cambio de irradiancia en el valor de la tensión y el ciclo de servicio de funcionamiento del convertidor.

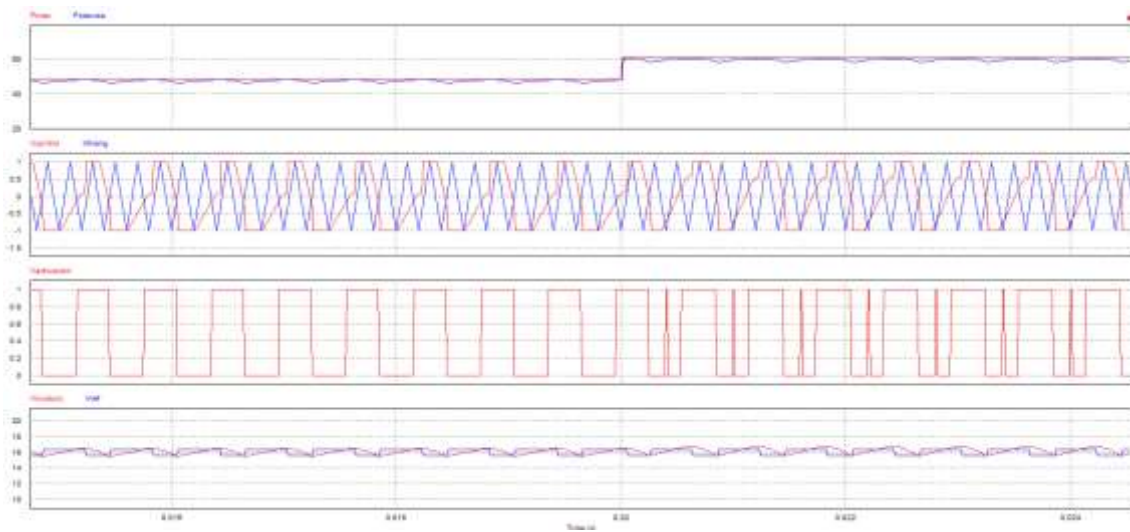


Figura 34.

Con ayuda de estas gráficas vemos las diferencias en el ciclo de servicio del convertidor cuando la carga es una batería de 12V en vez de una de 2.24V. Como cabe esperar el ciclo de servicio es mayor para que la tensión de salida sea la de la batería.

Circuito 7:

El circuito estudiado en este caso es el siguiente:

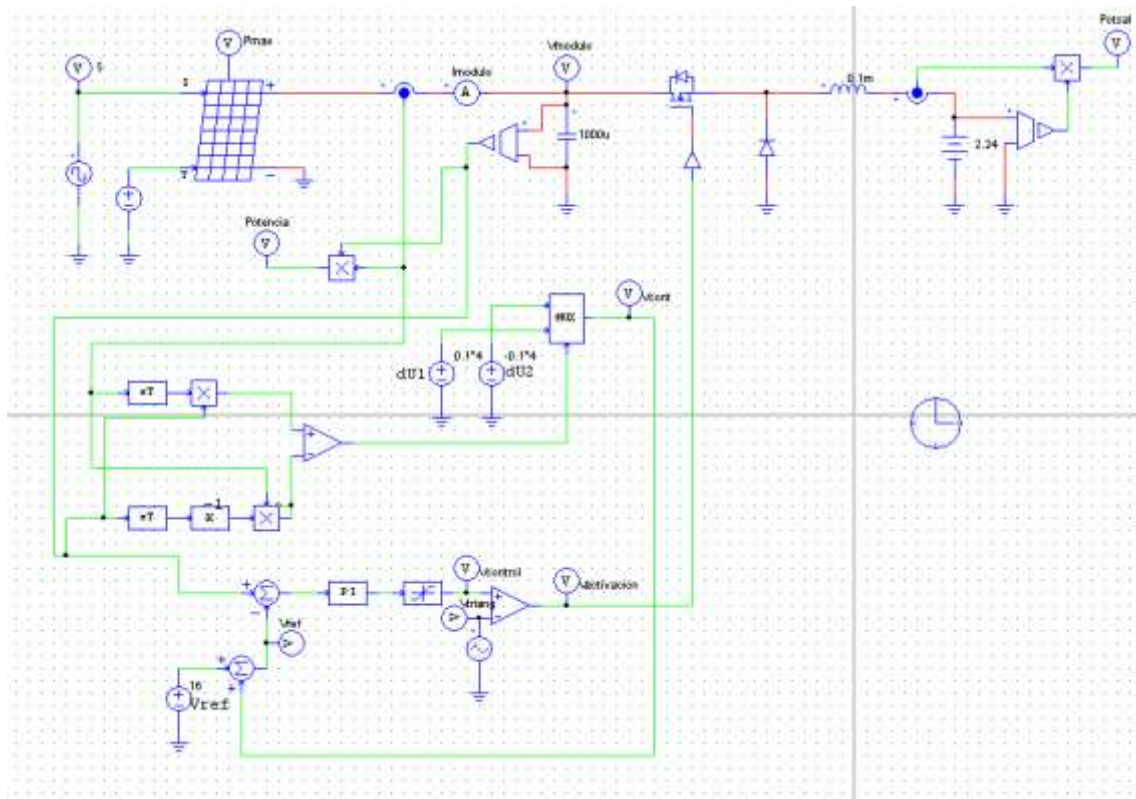


Figura 35.

Este circuito se diferencia del anterior en que también medimos la potencia de salida. Con la simulación del circuito vemos la cantidad de potencia que somos capaces de transmitir a la carga. Podemos simular cómo evoluciona cuando estamos en estado estacionario y también cuando la irradiancia que recibe el panel varía con el tiempo.

- S (Irradiancia)
- $P_{otmodulo}$ y P_{max}
- $P_{otsalida}$ y P_{max}

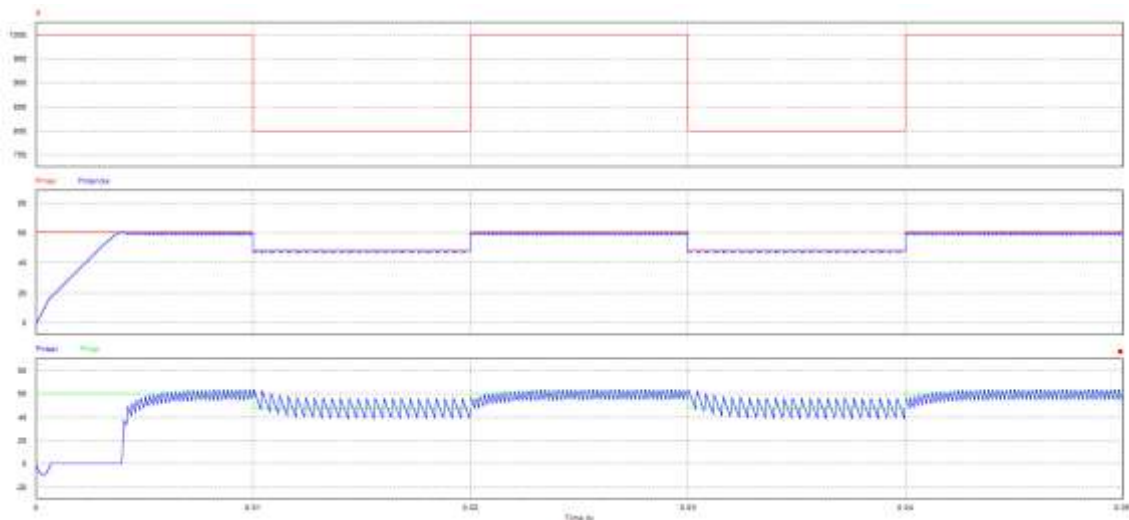


Figura 36.

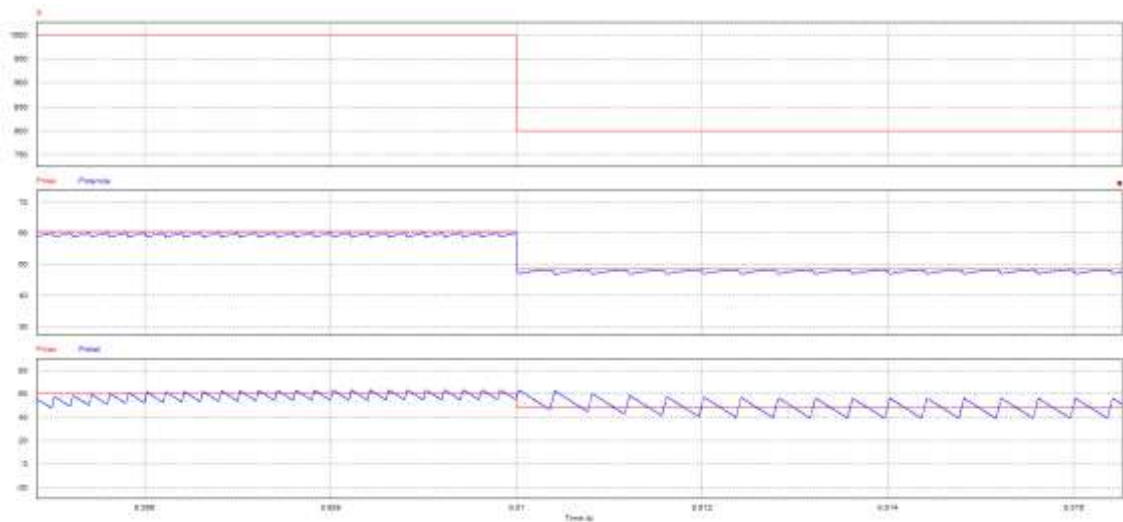


Figura 37.

En la figura 36, se muestra la variación de la irradiancia de forma de escalón, cuando esta disminuye de 1000 W/m^2 a 800 W/m^2 y cómo afecta este hecho a las potencias, tanto de entrada como de salida.

¿Qué ocurre cuando la irradiancia disminuye?

La potencia que nos ofrece el módulo fotovoltaico disminuye. Esto no afecta en gran medida a la tensión que nos aporta el módulo pero sí a 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 37 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.

I modulo y V modulo:

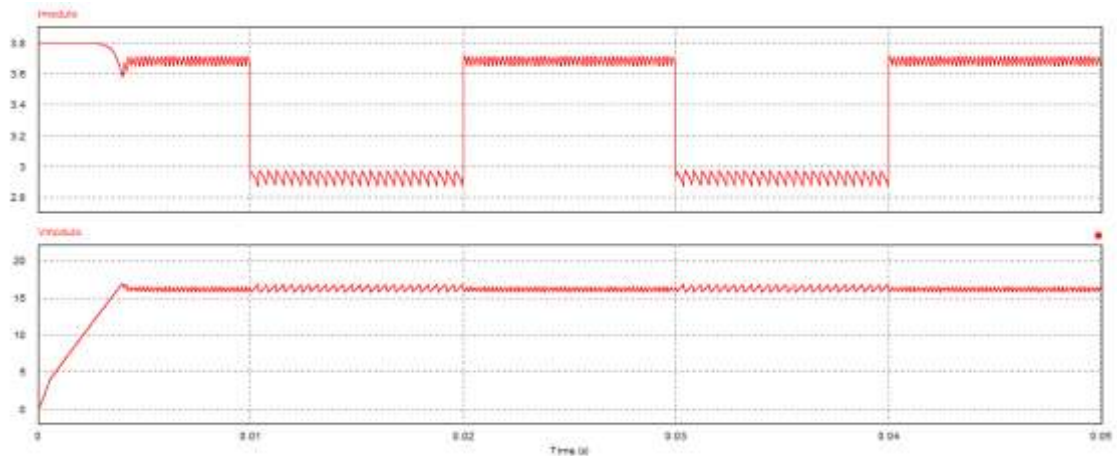


Figura 38.

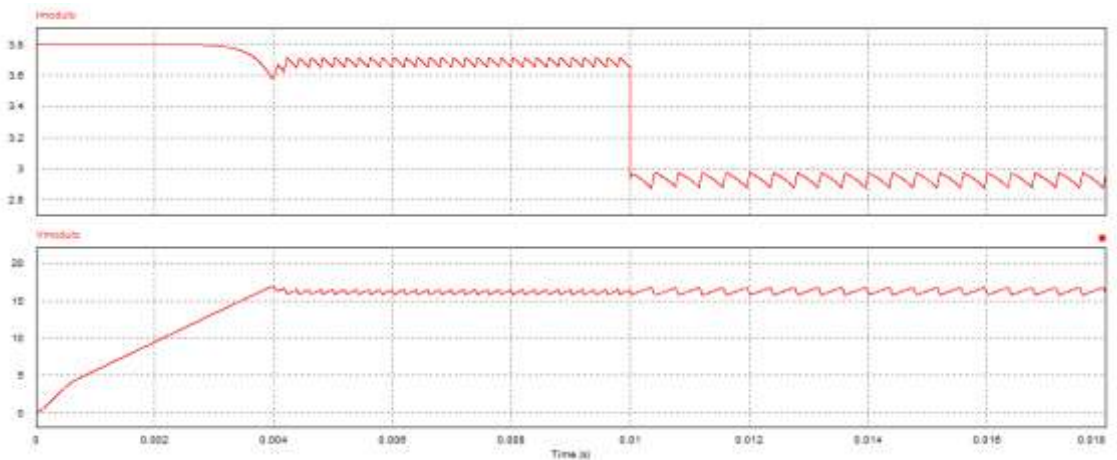


Figura 39.

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

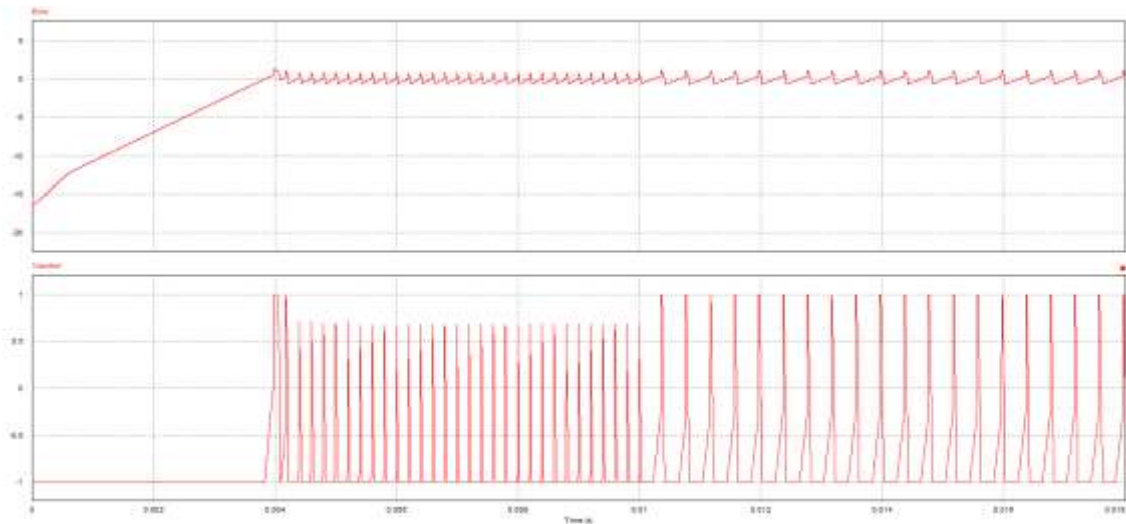


Figura 40.

Lo que vemos en la figura 40, 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.

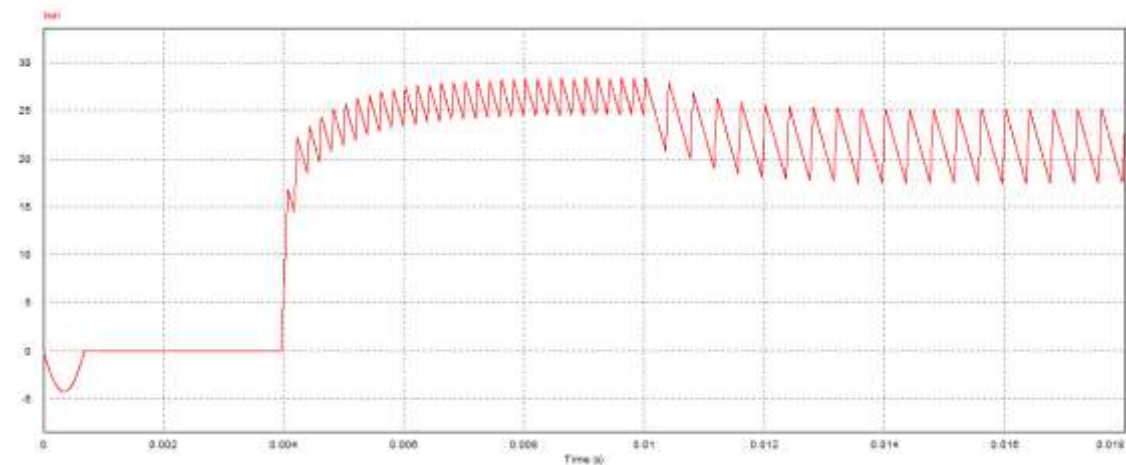


Figura 41.

Lo que vemos en la figura 41 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 7, 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.