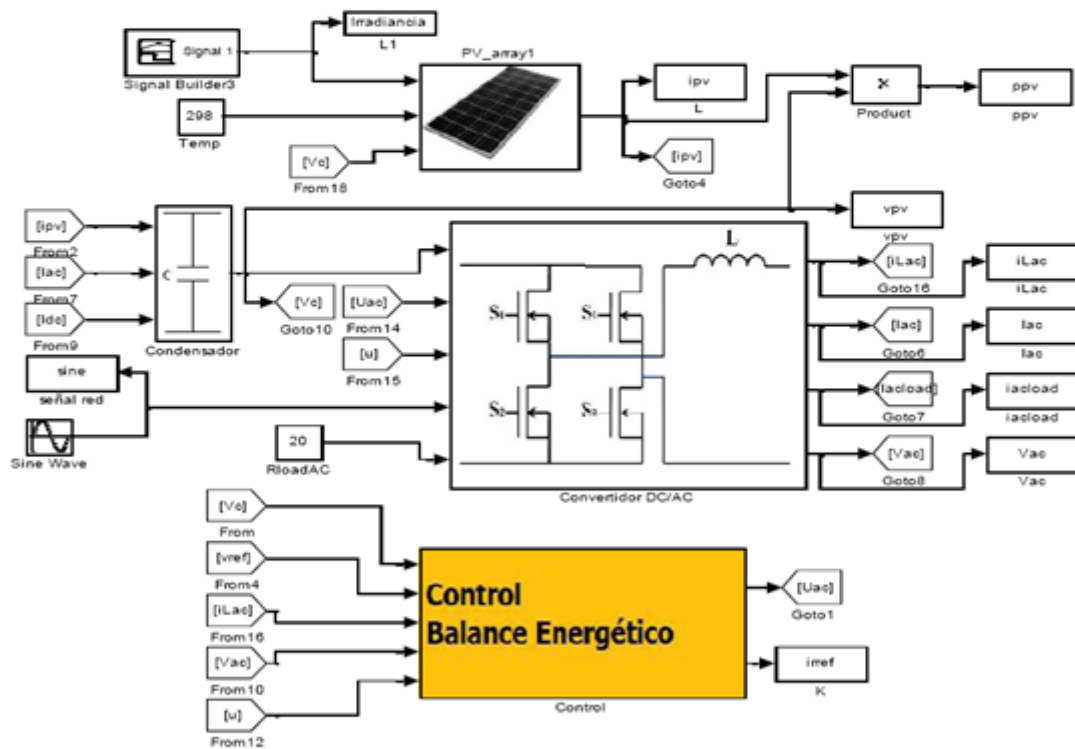


Departamento de Ingeniería Electrónica

CELULAS SOLARES Y SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

MANUAL DEL PRACTICAS



Rafael Ramos Lara
 Domingo Biel Sole
 Septiembre 2009

Índice

PRACTICA 1: Introducción al manejo del entorno de simulación Matlab/Simulink.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Construcción del modelo de un panel fotovoltaico.....	2
1.3 Ajuste de parámetros del modelo del panel fotovoltaico.....	9
1.4 Simulación del circuito.....	11
1.5 Visualización de los resultados.....	12
1.6 Trabajo de simulación.....	13
PRACTICA 2: Control de sistemas de potencia fotovoltaico autónomos.....	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Estructura de un sistema fotovoltaico.....	18
2.3 Operación en lazo abierto.....	18
2.4 Algoritmos MPPT.....	23
2.5 Implementación de algoritmos MPPT con Simulink.....	26
2.6 Operación en lazo cerrado.....	28
PRACTICA 3: Control de sistemas fotovoltaicos conectados a red.....	33
3.1 Introducción.....	33
3.2 Estructura del sistema de procesamiento de potencia.....	34
3.3 Esquema del control del sistema fotovoltaico.....	35
3.4 Lazo interno de corriente.....	36
3.5 Lazo externo de tensión.....	36
3.6 Diseño del control y ajuste de parámetros.....	38
3.7 Simulación del sistema fotovoltaico con conexión a red.....	40
3.8 Control del sistema fotovoltaico con algoritmo de seguimiento de MPP.....	43
PRACTICA 4: Aplicación de sistemas fotovoltaicos conectados a red.....	47
4.1 Introducción.....	47
4.2 Modelo Simulink del condensador de entrada.....	48
4.3 Modelo del inversor DC-AC con carga alterna.....	49
4.4 Modelo del convertidor Buck DC-DC con carga DC.....	50
4.5 Desconexión de la red eléctrica.....	53

PRACTICA 1: Introducción al manejo del entorno de simulación Matlab/Simulink

Objetivos de la práctica

- Introducción al funcionamiento del entorno de simulación Matlab/Simulink.
- Creación de un modelo Simulink de un panel fotovoltaico
- Determinación de los parámetros de una célula y un panel solar

Informe

- El informe de la práctica deberá incluir las respuestas a las peticiones que se formulan en el apartado 1.6.
- En la corrección del informe se prestará especial atención a los siguientes aspectos:
 - Descripción del circuito simulado y de los elementos que se han utilizado para crear el circuito.
 - La justificación detallada del valor de la elección de parámetros en los componentes utilizados.
 - Resultados numéricos solicitados en el enunciado y gráficos de la señales mas representativas de las simulaciones efectuadas

1.1 Introducción

Matlab[®] es un lenguaje de alto nivel y entorno interactivo que permite realizar tareas computacionalmente intensivas de forma más rápida que utilizando lenguajes de programación como C, C++ y Fortran. Matlab se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo procesamiento de señales e imágenes, comunicaciones, diseño de controles, diseño de sistemas de test y medidas, modelado y análisis financiero y biología computacional. Matlab también dispone de herramientas (toolboxes) que amplían el entorno Matlab y permiten resolver problemas en áreas específicas.

Simulink[®] es un entorno de simulación y diseño basado en modelos dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y personalizable además de un conjunto de librerías de componentes que permiten diseñar, simular, implementar y probar una gran variedad de sistemas, incluidos sistemas de comunicaciones, control, procesamiento de señales, procesamiento de vídeo, procesamiento de imágenes y sistemas de potencia.

Estas características hacen de Matlab/Simulink una herramienta adecuada para evaluar prototipos de sistemas de potencia de gran escala como paso previo a su implementación práctica.

El software Matlab está formado por los siguientes componentes básicos:

- *Entorno de desarrollo:* Esta aplicación es el interface con el usuario e incluye herramientas como la ventana de comandos, el editor y depurador, un analizador de código y un navegador para gestionar los archivos de trabajo.
- *Librería de funciones matemáticas:* La librería de Matlab contiene una gran colección de algoritmos que van desde funciones elementales, como suma, seno, coseno, y aritmética compleja, a funciones más sofisticadas como la matriz inversa, matriz de valores propios, funciones de Bessel y la transformada rápida de Fourier.
- *El lenguaje de programación Matlab:* Matlab es un lenguaje de programación de alto nivel orientado al procesado de matrices con funciones de flujo de datos, comandos de entrada/salida, programación orientada a objetos, etc. Permite programar aplicaciones de pequeña y gran envergadura.
- *Gráficos:* Matlab tiene funciones para la visualización gráfica de vectores y matrices. Incluye funciones que permiten visualizar gráficos de datos de dos y tres dimensiones con la posibilidad de personalizar la apariencia de los gráficos, dotarlos de animación e incluso construir interfaces gráficas de usuario.
- *Interfaces externas:* La biblioteca de interfaces externas de Matlab permite escribir programas en lenguaje C y Fortran que interactúan con Matlab. Incluye los comandos para llamar a rutinas de Matlab (enlace dinámico), para ejecutar Matlab como motor de cálculo, y para leer y escribir archivos de código Matlab (*.MAT).

En los siguientes apartados de esta práctica se explicaran los pasos que hay que efectuar para crear, ejecutar y simular un sistema con el software Matlab/Simulink. El sistema a probar está constituido por una agrupación fotovoltaica de la cuál se pretende extraer sus características estáticas para unas condiciones concretas de funcionamiento.

1.2 Construcción del modelo de un panel fotovoltaico

A continuación se comenta paso a paso la creación del circuito a simular con el programa Matlab/Simulink.

Paso 1: En primer lugar se entra en el programa Matlab/Simulink haciendo doble clic en su icono (figura 1.1). Para realizar las prácticas se utilizará la versión de Matlab 7.5 (R2007b) que incluye la versión de Simulink 7.0.



MATLAB R2007b.lnk

Figura 1.1. Icono del programa Matlab 7.5 R2007b

Una vez abierta la aplicación nos encontremos ante el entorno de trabajo de Matlab (ver figura 1.2) que incorpora tres ventanas:

- *Ventana de comandos*: este área sirve para introducir variables o escribir los comandos Matlab que se desea ejecutar
- *Current Directory*: en esta ventana se visualiza el contenido de directorio de trabajo y permite gestionar su contenido. Para cambiar de directorio de trabajo simplemente se debe seleccionar un nuevo directorio en la ventana “*Current Directory*” (ver figura 1.3).
- *Workspace*: esta ventana contiene la información acerca de las variables que se generan durante la sesión de trabajo.
- *Histórico de comandos*: las declaraciones que se introducen en la ventana de comandos se registran en la ventana “*Command History*”, de forma que se pueden buscar, visualizar y ejecutar comandos previamente ejecutados. También se puede seleccionar grupos de comandos e incluirlos en un fichero Matlab (M-file).

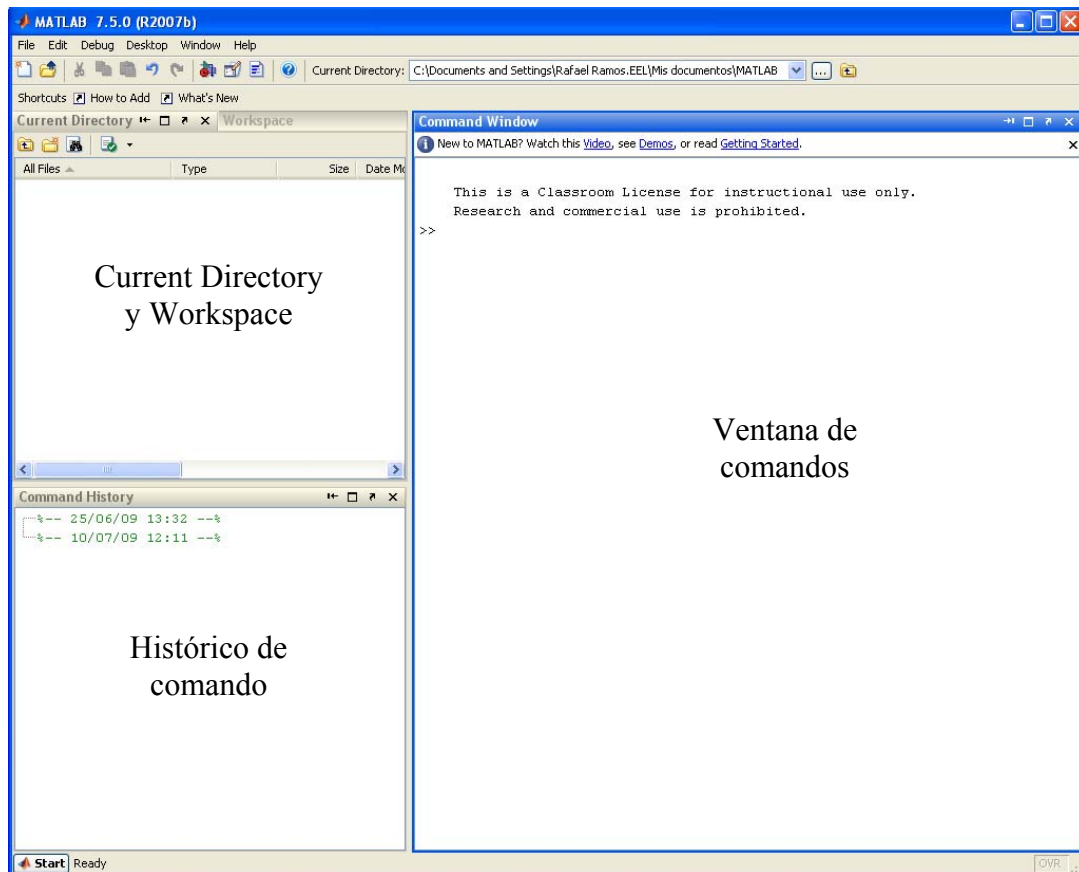


Figura 1.2. Entorno de trabajo de Matlab

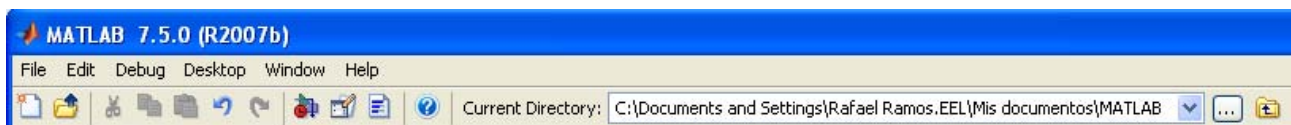


Figura 1.3. Barra de herramientas

Paso 2: A continuación se ejecuta Simulink que es la plataforma de trabajo que nos permite crear el modelo del panel fotovoltaico. Para ello se debe hacer clic en el icono de Simulink que está

ubicado en la barra de herramientas (ver figura 1.4). Aparece a continuación la ventana principal de Simulink (ver figura 1.5).

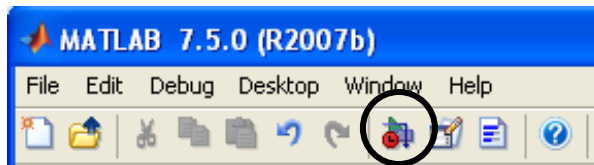


Figura 1.4. Icono de entrada a Simulink

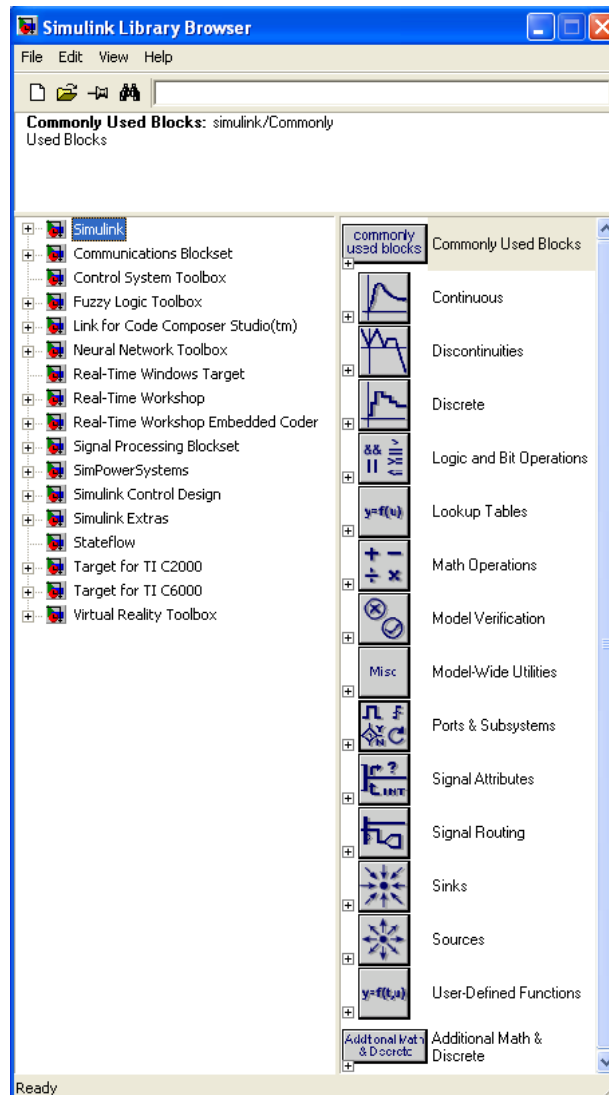


Figura 1.5. Ventana principal Simulink

Paso 3: Seleccionar del menú “File” la opción “New” -> “Model”, automáticamente aparece una ventana que nos permite crear el modelo del componente que se desea simular.

Paso 4: El siguiente paso consiste en seleccionar los componentes que intervienen en la construcción del modelo y que podemos encontrar en la librería de Simulink (ver figura 1.6).

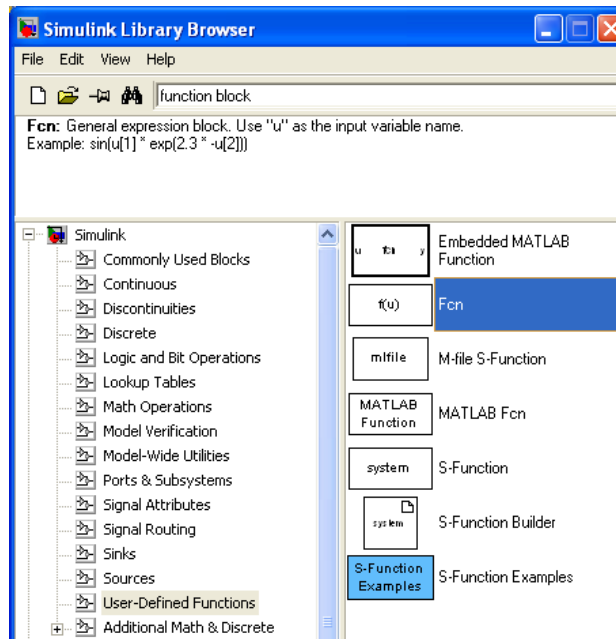


Figura 1.6. Ventana Simulink y carpeta Simulink con la librería de componentes

Los componentes que se utilizan en el modelo del panel fotovoltaico son los siguientes:

- *Fcn*: este bloque permite definir funciones de usuario y se utiliza para introducir las ecuaciones que modelan el funcionamiento de un panel fotovoltaico. Este bloque está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “User-Defined Functions” (ver figura 1.6).
- *Unit Delay*: este bloque muestrea y mantiene (*Sample and Hold*) la señal de entrada introduciendo además un retardo en la señal equivalente al periodo de muestreo especificado en el parámetro “*Sample Period*”. Este componente está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “Discrete”.
- *Mux*: este bloque tiene como función la de combinar sus entradas en un único vector de salida. Todas las entradas deben ser del mismo tipo de datos. Este bloque se utiliza para unificar en un solo vector todas las entradas de la función definida con el bloque “*Fcn*”. En total hay cuatro variables de entrada: irradiancia, temperatura, tensión de salida del panel solar (vpv) y corriente de salida del panel solar (ipv). Este componente está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “Commonly Used Blocks”.
- *Inport block*: este bloque funciona como un puerto de entrada permitiendo introducir señales externas dentro del sistema. Con tres bloques como este se introducen en el modelo las tres variables externas necesarias para que funcione correctamente: irradiancia, temperatura y tensión de salida del panel solar (vpv). Este componente está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “Sources” y tiene nombre “*In1*”.
- *Outport block*: este bloque actúa como puerto de salida de un subsistema o modelo permitiendo extraer fuera del modelo variables internas generadas por el propio modelo. Con este bloque se proporciona como salida del modelo la variable: corriente de salida del panel solar (ipv). Este componente está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “Sinks” y tiene nombre “*Out1*”.

En la figura 1.7 se puede observar como quedan colocados los componentes dentro de la plantilla de dibujo. Obsérvese como el bloque “Unit Delay” está orientado de derecha a izquierda. El cambio de orientación se consigue mediante una rotación del componente con “*Cntrl – R*”.

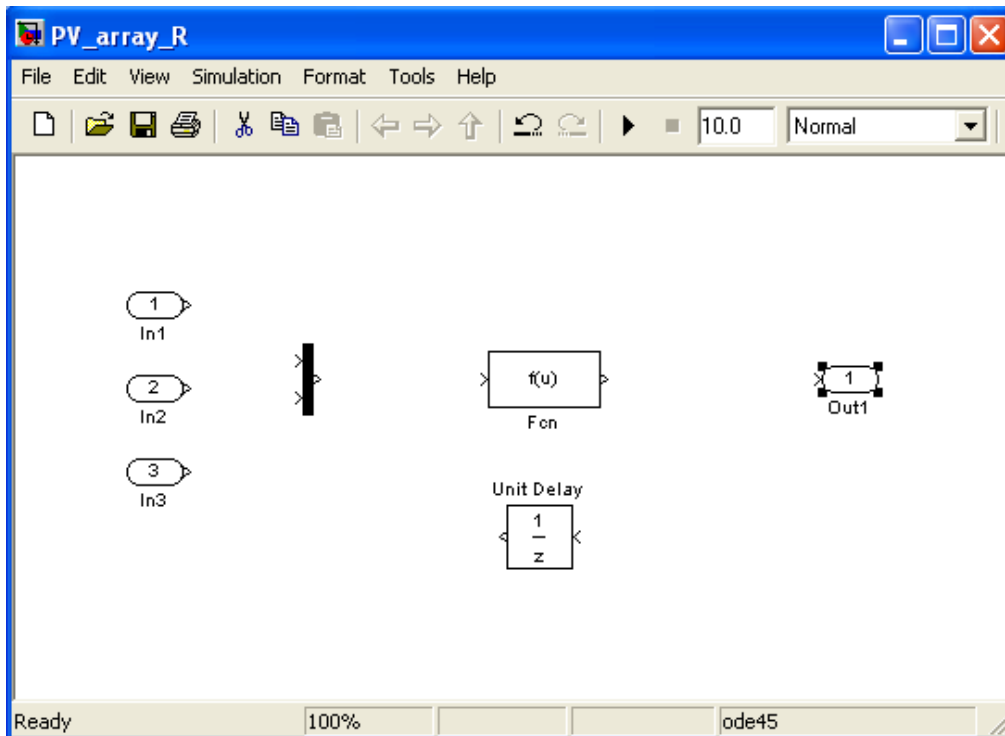


Figura 1.7. Colocación de componentes en la plantilla de dibujo

Paso 5: el siguiente paso es configurar los parámetros de los diferentes bloques que intervienen en el modelo.

Bloque “Fcn”: Empezaremos con el bloque “Fcn”. Haciendo doble clic en este bloque se accede a una ventana de diálogo en la que escribiremos la siguiente expresión, que define el comportamiento del modelo, en el apartado “Expression”:

$$N_p * (\alpha * u[1] + (ISCT2 - ISCT1) / (T2 - T1) * (u[2] - T1) - (ISCT1 / (\exp(q * VOCT1 / (n * K * T1)) - 1) * (u[2] / T1)^{(3/n)} * \exp(-q * V_g / (n * K) * (1/u[2] - 1/T1))) * (\exp(q * (u[3] / N_s + u[4] * R_s / N_p) / (n * K * u[2])) - 1)) - (u[3] / N_s + u[4] * R_s / N_p) / R_p)$$

(1.1)

donde $u[1]$, $u[2]$, $u[3]$ y $u[4]$ son las variables externas, en concreto:

- $u[1]$: irradiancia
- $u[2]$: temperatura
- $u[3]$: tensión de salida del panel solar (vpv)
- $u[4]$: corriente de salida del panel solar (ipv)

el resto identificadores se corresponden con parámetros propios del panel solar cuyo valor podemos fijar:

- N_p : número de células solares conectadas en paralelo.

- α : factor de irradiancia.
- ISCT2: corriente de cortocircuito a temperatura T2.
- ISTC1: corriente de cortocircuito a temperatura T1.
- T2: temperatura nominal T2.
- T1: temperatura nominal T1.
- q: carga del electrón.
- VOCT1: tensión de circuito abierto a temperatura T1.
- n: factor de idealidad (ideality factor).
- K: constante de Boltzman.
- V_g : umbral de tensión.
- Ns: número de células solares conectadas en serie.
- R_s : resistencia serie.
- R_p : Resistencia paralelo.
- VOCT2: tensión de circuito abierto a temperatura T2.

En el apartado “*Simple time*” se coloca el valor por defecto -1.

Bloque “Unit Delay”: haciendo doble clic en este bloque se abre una ventana de diálogo donde aparece dos campos a rellenar:

- “*Initial conditions*”: valor inicial de la salida de este bloque para tiempo $t = 0$. Se fija a cero por defecto.
- “*Simple time*”: tiempo de muestreo, se pone a -1.

Bloque “Mux”: haciendo doble clic en este bloque se abre una ventana de diálogo con un campo en donde se debe indicar el número de entradas del multiplexor. Para este modelo el número de entradas es 4. A estas entradas se conectan las variables externas del modelo. El orden de conexión es importante y se debe corresponder con la definición efectuado en el bloque “*Fcn*”, o sea, en la primera entrada del multiplexor se debe conectar la variable $u[1]$ (irradiancia), en la segunda entrada se conecta la variable $u[2]$ (temperatura), en la tercera $u[3]$ (tensión de salida del panel solar) y en la cuarta entrada $u[4]$ (corriente de salida del panel solar).

Bloques “Inport” y “Outport”: se cambia el nombre de los puertos de entrada y salida para que se correspondan con las variables que se conectan a ellos (ver figura 1.8).

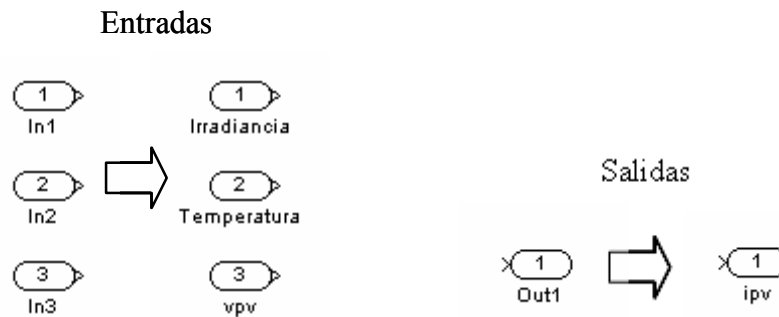


Figura 1.8. Cambio de nombre en los puertos de entrada/salida

Paso 6: El último paso en la construcción del modelo es la interconexión de los distintos bloques que lo componen. El aspecto final una vez realizada esta operación se puede ver en la figura 1.9.

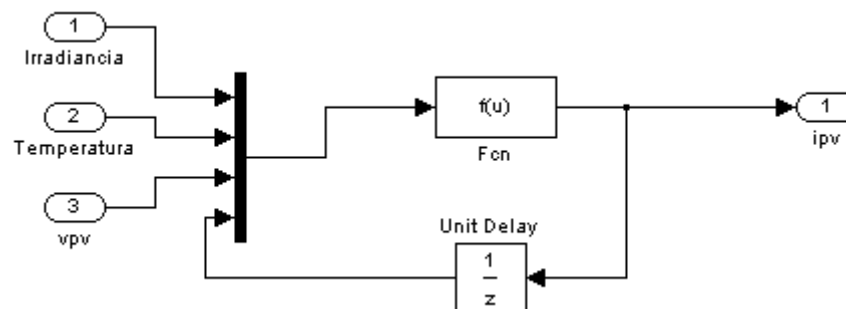


Figura 1.9. Modelo Simulink del panel fotovoltaico

Finalmente, se puede encapsular todos los componentes del modelo en un solo bloque. Para ello se seleccionan todos los componentes, se hace clic en el botón derecho del ratón y se elige la opción “Create Subsystem”. En la figura 1.10 se puede ver el resultado de esta operación.

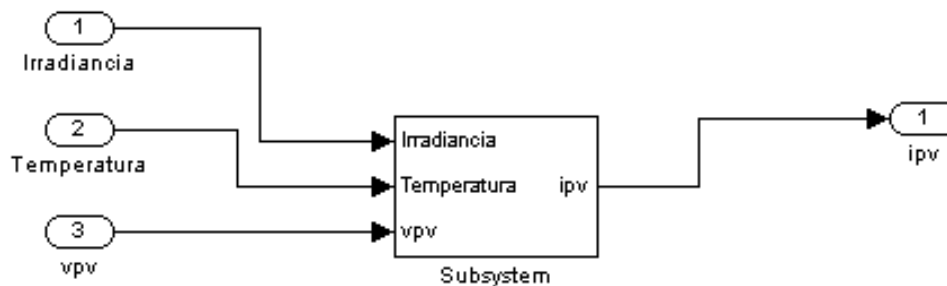


Figura 1.10. Modelo del panel fotovoltaico como subsistema

El circuito diseñado permitirá medir las características estáticas de la célula solar a temperatura constante, como es la tensión a circuito abierto V_{oc} , la corriente de cortocircuito I_{sc} , y el punto de máxima potencia para las condiciones de irradiancia fijadas.

1.3 Ajuste de parámetros del modelo del panel fotovoltaico

El siguiente paso previo a la simulación es ajustar los parámetros de la expresión (1.1) que modela el funcionamiento del panel fotovoltaico. Como paso previo al ajuste de los parámetros del subsistema en primer lugar se define la lista de parámetros que son susceptibles de ser modificados externamente sin tener que entrar en el subsistema. Para ello se selecciona el subsistema y se hace clic en el botón derecho seleccionando la opción “*Edit Mask*”. De la ventana de diálogo que aparece a continuación se selecciona la pestaña “*Parameters*”. Con el botón “*Add*” se añaden los parámetros del subsistema. Para cada parámetro hay que indicar el nombre del parámetro y el de la variable que lo representa. En la figura 1.11 se muestra el resultado una vez introducido todos los parámetros del subsistema.

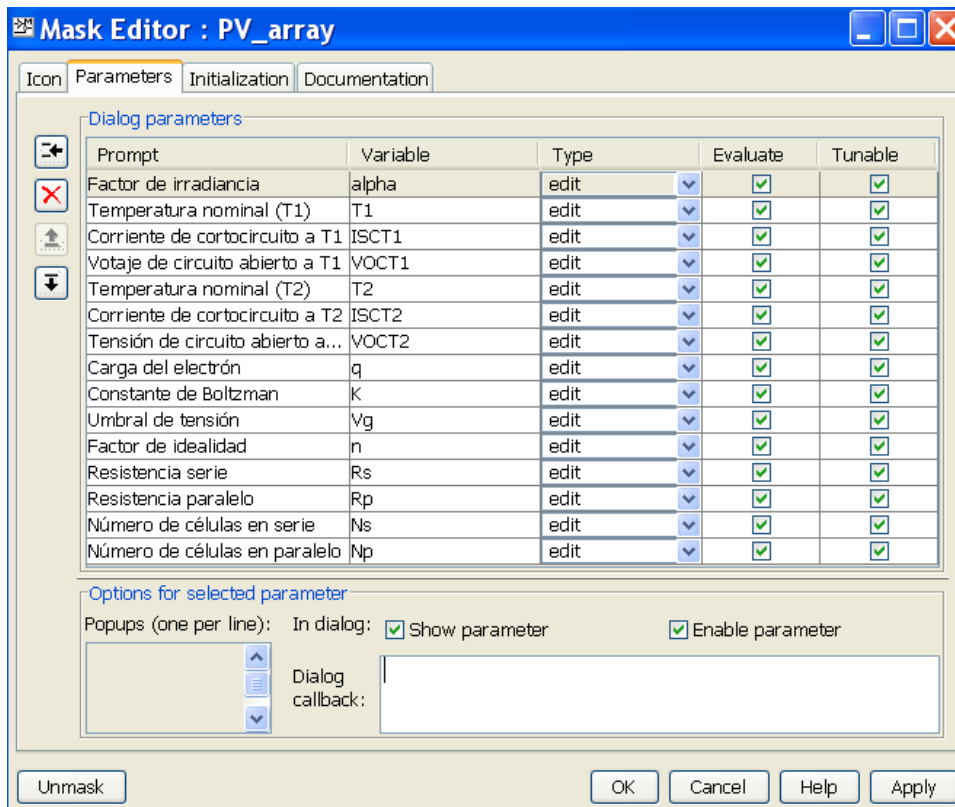


Figura 1.11. Lista de parámetros del subsistema panel fotovoltaico

Una vez editada la lista de parámetros se valida haciendo clic en “OK” y se pasa a seleccionar los valores de los diferentes parámetros, para ello se hace doble clic en el subsistema para que aparezca la ventana de diálogo que permite entrar el valor de los parámetros. En la figura 1.12 se muestra en el contenido de esta ventana una vez fijado el valor de los parámetros de trabajo.

Function Block Parameters: PV_array

Subsystem (mask)

Parameters

Factor de irradiancia
0.0038

Temperatura nominal (T1)
298

Corriente de cortocircuito a T1
3

Votaje de circuito abierto a T1
25.08/36

Temperatura nominal (T2)
348

Corriente de cortocircuito a T2
3

Tensión de circuito abierto a T2
29.3/36

Carga del electrón
1.6e-19

Constante de Boltzman
1.38e-23

Umbral de tensión
1.12

Factor de idealidad
1.2

Resistencia serie
0.0001

Resistencia paralelo
10000

Número de células en serie
1

Número de células en paralelo
1

OK Cancel Help Apply

Figura 1.12. Inicialización de los parámetros de panel fotovoltaico

Una vez construido el modelo y ajustado los parámetros se sustituyen dos entradas, irradiancia y temperatura, por bloques constantes (ubicados en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Commonly Used Blocks*” y con nombre “*Constant*”). La salida de corriente, “*ipv*”, del panel se realimenta hacia la entrada a través de un elemento integrador (ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Continuous*” y con nombre “*Integrator*”) que hace la función del condensador que se conecta a la salida del panel solar. Este condensador facilita la medida de las características estáticas de la célula

solar como la tensión a circuito abierto, V_{oc} , la corriente de cortocircuito, I_{sc} , y el punto de máxima potencia para las condiciones de irradiancia fijadas. En efecto, inicialmente el condensador de carga de la célula solar está descargado por lo que equivale a un cortocircuito. En estas condiciones, la corriente que circula en $t = 0$ es la corriente de cortocircuito de la célula. A medida que transcurre el tiempo el condensador se va cargando con lo que la tensión aumenta y la corriente disminuye. El proceso de carga finaliza cuando el condensador adquiere la tensión de circuito abierto de la célula.

Para visualizar gráficamente las variables más representativas del funcionamiento del panel fotovoltaico (corriente de salida, tensión de salida y potencia de salida) se utilizan los bloques “*To Workspace*” que están ubicados en la carpeta “*Simulink*”, en el apartado “*Sinks*”.

Para obtener la potencia de salida suministrada por el panel solar simplemente se debe multiplicar la corriente y tensión de salida con el bloque “*Product*” ubicado en la carpeta “*Simulink*”, en el apartado “*Commonly Used Blocks*”.

En la figura 1.13 se muestra como queda el modelo del panel fotovoltaico una vez introducidos los nuevos bloques. Para identificar mejor las variables resultantes de la simulación se ha cambiado el nombre por defecto de los bloques “*To Workspace*” sustituyéndolos por los nombres “*ipv*”, “*vpv*” y “*ppv*”. También es necesario cambiar el formato en que se salvan los datos en el “*Workspace*”, para ello se hace doble clic en el bloque “*To Workspace*” y de la ventana de dialogo que sale a continuación se selecciona la opción “*Array*” dentro del apartado “*Save format*”.

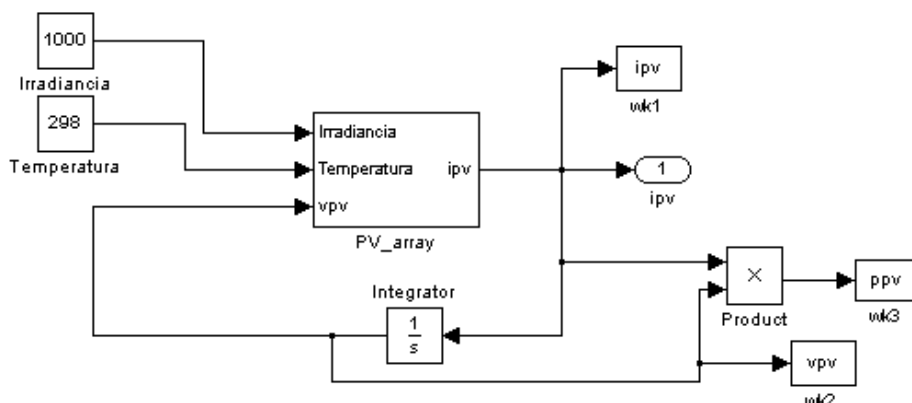


Figura 1.13. Modelo definitivo panel fotovoltaico

1.4 Simulación del circuito

El siguiente paso, después de ajustar los parámetros de los componentes que intervienen en el circuito, es realizar la simulación. En primer lugar se simula el comportamiento de una sola célula fotovoltaica, para ello se ajustan los parámetros “Número de células en paralelo” y “Número de células en serie” a 1 (ver figura 1.14).

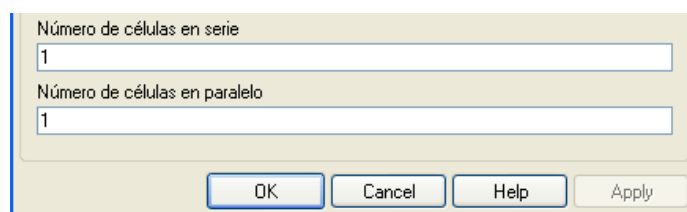


Figura 1.14. Ajuste del número de célula en serie y en paralelo

Se ajusta la irradiancia a 1000W/m^2 y la temperatura a 298K (25°C). El siguiente paso es ajustar los parámetros de simulación, para ello se selecciona la opción “*Configuration parameters*” del menú “*Simulation*”. En la figura 1.15 se muestra el ajuste de los principales parámetros de simulación:

- **Start time:** 0.0 (tiempo inicial de simulación)
- **Stop time:** este parámetro fija el tiempo total de simulación, que en este caso se va a ajustar a 40 segundos.
- **Fixed-step size:** en esta opción se define el paso de simulación que se fija en $1\text{e-}3$ segundos.

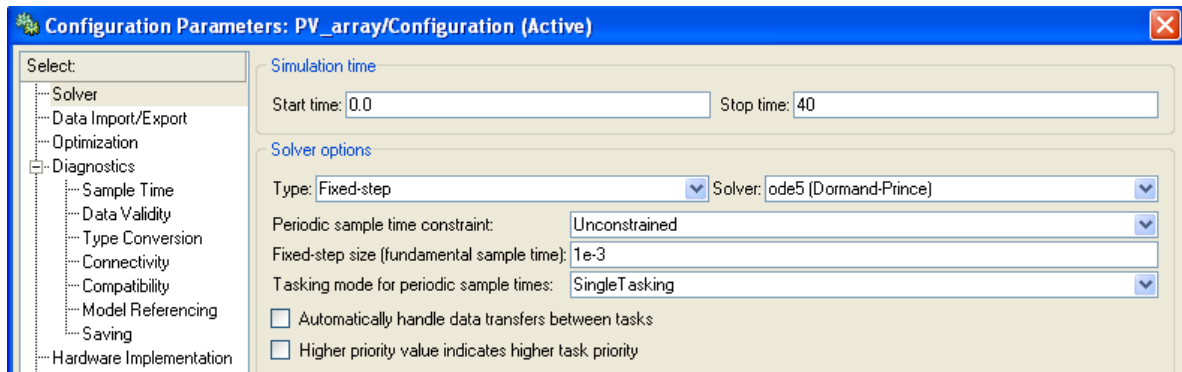


Figura 1.15. Configuración de los parámetros de simulación

Una vez ajustados los parámetros de simulación se hace clic sobre la opción “*Start*” del menú “*Simulation*”.

1.5 Visualización de los resultados

Se pueden visualizar los resultados ejecutando el comando plot(“variable a visualizar”) en la ventana principal de “Matlab”. En principio se visualizan las gráficas más representativas de un panel fotovoltaico que son la curva característica I-V (corriente de salida - tensión de salida) y la curva característica P-V (potencia de salida – tensión de salida). Los comandos que se deben ejecutar, por tanto, en este caso son: plot(vpv,ipv) para la característica I-V y plot(vpv,ppv) para la característica P-V. En la figura 1.16 se puede observar el resultado obtenido en este caso.

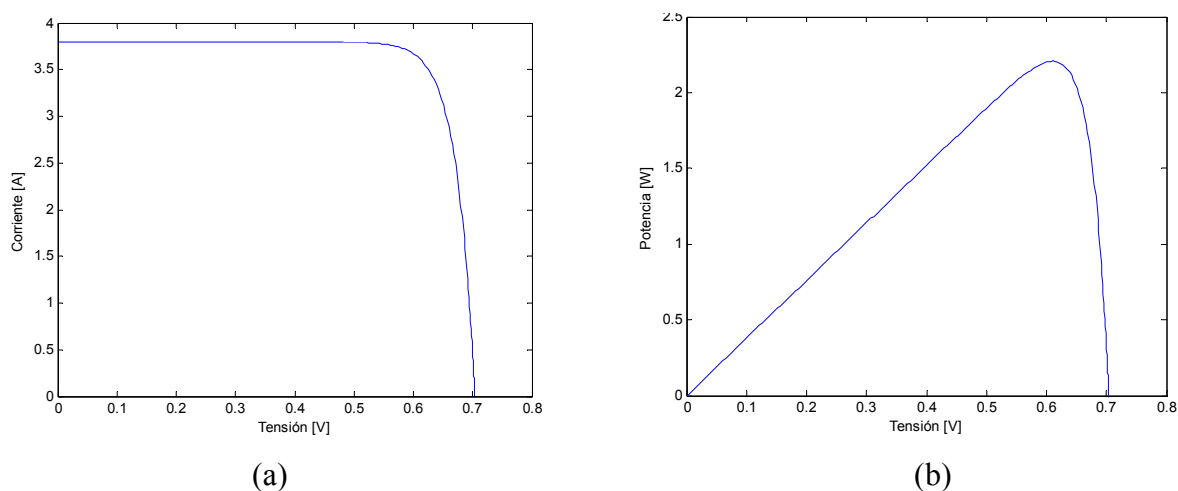


Figura 1.16. Características del panel fotovoltaico: (a) I-V, (b) P-V

Además de visualizar el resultado de la simulación, también se pueden obtener los parámetros mas representativos del panel fotovoltaico como son: corriente de cortocircuito (I_{SC}), tensión a circuito abierto (V_{OC}), punto de máxima potencia (MPP), corriente en el punto de máxima potencia ($I_{m\acute{a}x}$) y tensión en el punto de máxima potencia ($V_{m\acute{a}x}$).

El valor de I_{SC} se corresponde con el valor de la corriente “ipv” para $t = 0$ y se puede obtener fácilmente del resultado de la simulación. Para ello se ejecuta el comando “ipv(1)” que permite obtener el valor del primer punto del array “ipv”.

El valor de V_{OC} se corresponde con el valor de la tensión “vpv” para $t = 40s$ y se puede obtener fácilmente del resultado de la simulación. Para ello se ejecuta el comando “vpv(40001)” que se corresponde con el valor del último punto del array donde se guarda el resultado de la simulación de la tensión de salida del panel fotovoltaico.

Los resultados que se obtiene en esta simulación son:

$$V_{OC} = 0.7040 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 3.8 \text{ A}$$

Para obtener el punto de máxima potencia (MPP) así como el valor de tensión y corriente en ese punto se ejecuta el siguiente comando:

$$[Y,I]=\max(\text{ppv})$$

El resultado conseguido con este comando es: $Y = 2.2078 \text{ W}$, que se corresponde al punto MPP e $I = 162$, que se corresponde a la posición que ocupa este valor dentro del array “ppv”.

Sabiendo la posición del punto MPP dentro del array “ppv” se puede determinar fácilmente los valores $V_{m\acute{a}x}$ y $I_{m\acute{a}x}$, que se corresponde con el valor que ocupa la posición 162 de los array “vpv” y “ipv”. Para obtener estos valores se ejecutan los comandos $\text{ipv}(162)$ y $\text{vpv}(162)$ obteniéndose los siguientes resultados:

$$V_{m\acute{a}x} = 0.6103 \text{ V}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 3.6177 \text{ A}$$

Finalmente se puede calcular el Factor de Forma (FF) que se define como: $FF = \text{MPP}/(I_{SC} \cdot V_{OC})$.

Lógicamente, el valor máximo que puede tomar este parámetro es 1. Para este simulación el valor del Factor de Forma es de $FF = 0.825$.

1.6 Trabajo de simulación

1.6.1 Características estáticas de una célula solar

a) Variaciones de irradiancia

En la simulación efectuada en los anteriores apartados el valor de la irradiancia que incide en el panel solar es de 1000 W/m^2 . La irradiancia máxima posible es la que se obtiene en el vacío y se corresponde con AM0 (Air Mass 0) = 1353 W/m^2 . En general, el nivel de irradiancia en el panel solar dependerá de la orientación de éste con respecto al sol, de la posición del sol en el cielo y de las condiciones atmosféricas. La posición del sol en el cielo depende de la localización del sitio

donde se determine esa posición, del día del año y de la hora del día. Conociendo estos datos es posible calcular el ángulo de altitud de sol “a” y el AM correspondiente a este ángulo, que viene dado por:

$$AM = \frac{1.0}{\sin(a)} \quad (1.2)$$

Conociendo este factor se puede determinar la irradiancia máxima en el panel solar, para condiciones atmosféricas estándar según la siguiente expresión:

$$P(m) = 1353.0 \cdot 0.687^{m^{0.678}} \quad (1.3)$$

Obtener las características estáticas del panel solar Voc, Isc, MPP y FF para valores de irradiancia de 1000, 800, 600, 400, y 200 W/m². En el informe de la práctica se debe incluir una tabla con los valores de Voc, Isc, MPP y FF para cada valor de irradiancia así como la representación gráfica de las características I-V y P-V para cada valor de irradiancia. Para poder comparar mejor las características del panel solar para distintos valores de irradiancia es aconsejable representar las diferentes curvas utilizando dos figuras (una para todas las características I-V y otra para P-V). El comando “hold on” permite representar en una misma figura diferentes características.

¿Cuál es el efecto de la variación de irradiancia sobre los parámetros característicos?

b) Variaciones de temperatura

En este caso se desea evaluar el efecto que tiene la temperatura sobre los parámetros característicos de la célula solar. Obtener dichos parámetros para los siguientes valores de temperatura: 288, 298, 310 y 320 Kelvin.

Para realizar las pruebas se debe ajustar el nivel de irradiancia a 1000 W/m².

En el informe de la práctica se debe incluir una tabla con los valores de Voc, Isc, MPP y FF para cada valor de temperatura así como la representación gráfica de las características I-V y P-V para cada valor de temperatura.

¿Cuál es el efecto de la variación de la temperatura sobre los parámetros característicos?

c) Variaciones con la resistencia serie y paralelo

Se debe evaluar el efecto sobre la célula solar que tiene las pérdidas que se producen en las resistencias serie y paralelo. Con una temperatura e irradiancia constante e igual a 298 Kelvin y 1000 W/m² se debe determinar los valores de los parámetros Voc, Isc, MPP y FF para los siguientes valores de la resistencia serie: 0mΩ, 5mΩ y 8mΩ.

En el informe de la práctica se debe incluir también la representación gráfica de las características I-V y P-V para cada valor de resistencia serie.

A continuación, con una temperatura e irradiancia constante e igual a 298 Kelvin y 1000 W/m² se debe determinar los valores de los parámetros Voc, Isc, MPP y FF para los siguientes valores de la resistencia paralelo: 10kΩ, 5Ω, 1Ω y 0.5Ω.

En el informe de la práctica se debe incluir también la representación gráfica de las características I-V y P-V para cada valor de resistencia serie y paralelo.

¿Cuál es el efecto de la variación de la resistencia serie y paralelo sobre los parámetros característicos?

1.6.2 Características estáticas de un panel solar

Un panel solar o fotovoltaico está formado por una agrupación de células fotovoltaicas conectadas en serie y/o paralelo. En este apartado se trata de determinar las características estáticas V_{oc} , I_{sc} y MPP de un panel fotovoltaico para diferentes valores de células en serie. En concreto se deben probar tres configuraciones de paneles fotovoltaicos: 36 células en serie y 1 en paralelo, 18 células en serie y 2 en paralelo y 12 células en serie y 3 en paralelo en condiciones de irradiancia de 1000W/m^2 y 298 Kelvin de temperatura.

En el informe de la práctica se debe incluir una tabla con los valores de V_{oc} , I_{sc} , MPP y FF para cada configuración de panel fotovoltaico así como la representación gráfica de las características I-V y P-V en cada caso.

¿Cuál es el efecto de la agrupación de células sobre los parámetros característicos?

1.6.3 Agrupaciones de paneles fotovoltaicos

a) Agrupaciones paralelo

Fácilmente se puede realizar un modelo de una agrupación de paneles fotovoltaicos en paralelo aprovechando el diseño del PV_array. En la figura 1.17 se muestra la agrupación de tres paneles conectados en paralelo. Se ha incorporado un sumador que suma las corrientes de salida de los tres paneles fotovoltaicos. El sumador se encuentra en la carpeta “Simulink” en el apartado “Mat Operations”. Se han añadido tres bloques “To Workspace”, que están ubicados en la carpeta “Simulink”, en el apartado “Sinks”, para obtener las corrientes individuales que proporciona cada uno de los paneles solares que intervienen en la agrupación.

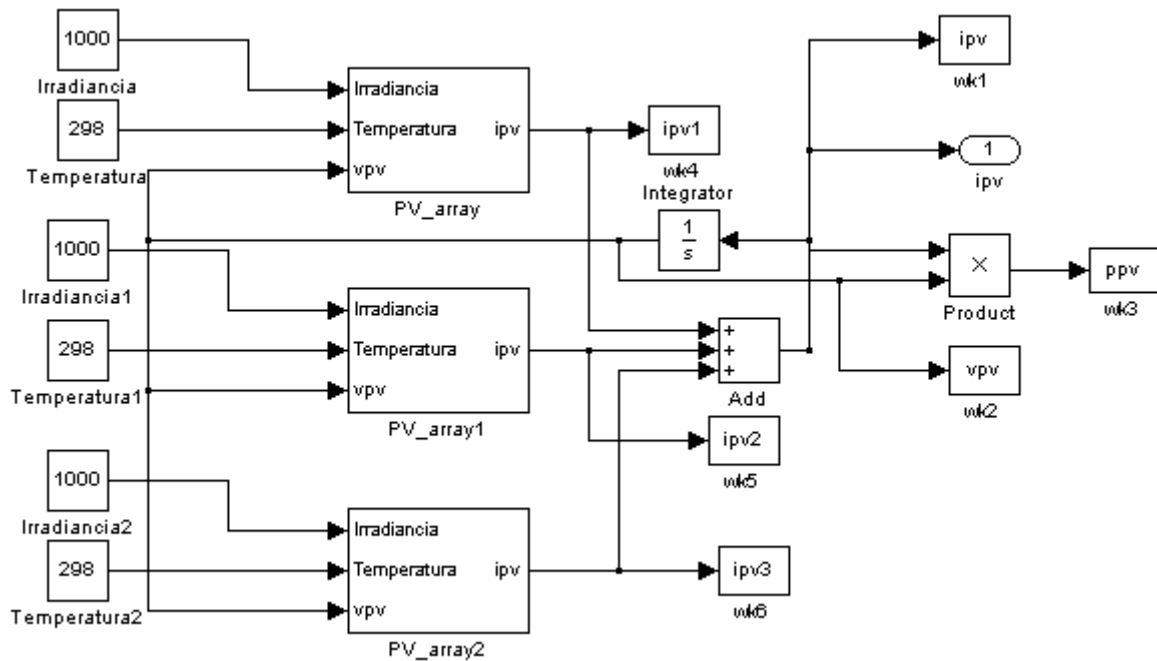


Figura 1.17. Agrupación de paneles en paralelo

Se debe simular el funcionamiento de tres paneles solares idénticos conectados en paralelo formados por 36 células en serie y 2 en paralelo que se encuentran a distintas irradiancias para emular un efecto de sombreado (1353, 1200 y 1100 W/m²), y a una misma temperatura de 298 Kelvin. Evaluar cuál es la máxima potencia que cada uno de los paneles puede aportar de forma individual y obtener la curva tensión-corriente y la curva de tensión-potencia de la agrupación paralelo.

Para obtener las curvas de potencia que suministra cada uno de los paneles de forma individual se puede multiplicar la corriente de un panel por la tensión de salida (común a los tres paneles). Por ejemplo, los datos de potencia del panel 2 se obtienen con el siguiente comando: `pot2 = ipv2.*vpv`.

PRACTICA 2: Control de sistemas de potencia fotovoltaico autónomos

Objetivos de la práctica

- Estudio del punto de trabajo de un panel solar
- Conocer los elementos de un sistema fotovoltaico y su comportamiento en lazo abierto
- Conocer y probar dos algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT): Perturbación y Observación, y Conductancia Incremental.

Informe

- El informe de la práctica deberá incluir las respuestas a las peticiones que se formulan en los puntos indicados como: **P2.x** con $x = 1, \dots, 10$
- En la corrección del informe se prestará especial atención a los siguientes aspectos:
 - Comentario y conclusiones sobre los resultados obtenidos en las simulaciones.
 - Resultados numéricos solicitados en el enunciado y gráficos de las señales más representativas de las simulaciones efectuadas

2.1 Introducción

En esta práctica se diseña y simula el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, para cargas DC. En concreto se trabajará un sistema que permite obtener potencia de salida DC, convenientemente regulada para realizar la carga de una batería y/o alimentar una carga DC, y extraer al mismo tiempo la máxima potencia disponible en cualquier condición de temperatura y carga. En primer lugar se simulará el sistema fotovoltaico en lazo abierto, que no optimiza la potencia entregada a la carga, y a continuación se probarán dos algoritmos de control que permiten extraer la máxima potencia del generador fotovoltaico.

2.2 Estructura de un sistema fotovoltaico

En la figura 2.1 se presenta el esquema eléctrico de un sistema de potencia fotovoltaico autónomo (*Stand-Alone*) para ser usado en áreas remotas donde no se tiene acceso al suministro general proporcionado por la red de distribución de energía eléctrica. Este sistema está compuesto por un generador fotovoltaico constituido por un panel o array de paneles solares, un convertidor de potencia Buck DC-DC cargado con una batería y una carga. El generador fotovoltaico realiza la conversión de la luz solar en electricidad. El convertidor Buck, interpuesto entre el panel y la carga, permite, mediante el algoritmo de control adecuado, extraer la máxima potencia que puede suministrar el generador fotovoltaico. La utilización de este tipo de convertidores es recomendable cuando la tensión que proporciona el generador fotoeléctrico es mayor que la tensión de la batería de carga. La transferencia de potencia a través del convertidor Buck se controla mediante el ajuste del ciclo de trabajo D , del convertidor definido como el cociente t_{on}/T , donde T es el periodo de conmutación y t_{on} es el tiempo que el interruptor Q del convertidor permanece cerrado durante el periodo T . El valor del ciclo de trabajo también relaciona el valor medio de la tensión de salida con la tensión de entrada:

$$D = \frac{V_b}{V_{sa}} \quad (2.1)$$

donde V_b es la tensión de la batería y V_{sa} es la tensión del array Solar.

La batería es un sistema de almacenamiento de energía cuya función es la de suministrar energía a la carga cuando el generador fotovoltaico no pueda hacerlo en los periodos de baja irradiancia o durante la noche.

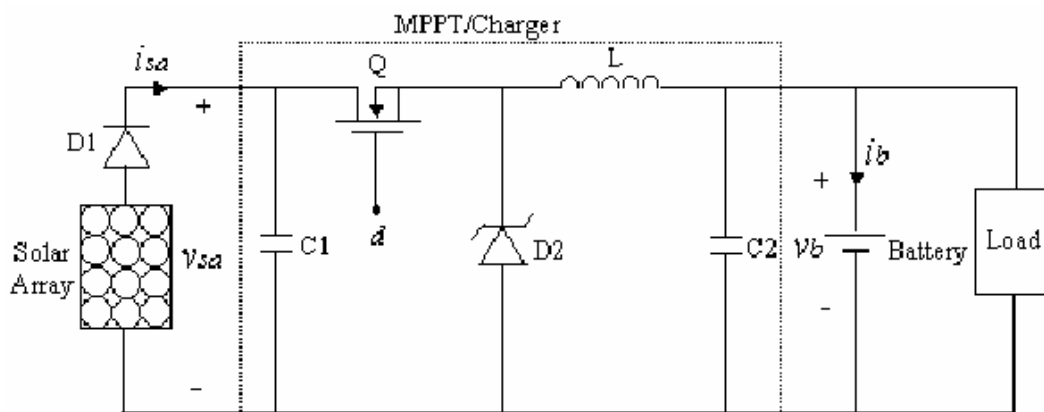


Figura 2.1. Esquema de un sistema de potencia fotovoltaico aislado

2.3. Operación en lazo abierto

En primer lugar se va a estudiar el comportamiento del sistema fotovoltaico cuando el convertidor Buck opera en lazo abierto, o sea, con un ciclo de trabajo constante.

Para ello se debe montar el sistema de potencia fotovoltaico que se muestra en la figura 2.2, utilizando el modelo de panel fotovoltaico diseñado en la práctica 1 y un modelo Simulink del convertidor Buck que se muestra en la figura 2.3 y que ha sido diseñado a partir de las ecuaciones que definen el modelo promediado del convertidor Buck:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_C \cdot d - V_{bat}}{L}$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{I - i_L \cdot d}{C}$$
(2.2)

donde V_{bat} es la tensión de batería colocada al salida del convertidor, L es el valor de inductancia de la bobina, C es el valor de capacidad del condensador conectado a la salida del panel fotovoltaico, v_C es la tensión de dicho condensador, i_L es la corriente del inductor y $d \in [0,1]$ indica el ciclo de trabajo y puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1.

Los componentes principales utilizados para realizar en modelo del convertidor Buck son:

- *Add*: este bloque puede sumar/restar dos o mas señales y está ubicado en la carpeta “Simulink” en el apartado “Math Operations”. Para que el bloque realice la resta de dos señales se hace doble clic en el símbolo del sumador y se configura la opción “List of signs” con los signos “+,-”. Esto indica que el bloque suma la primera entrada y resta la segunda.
- *Gain*: Este bloque multiplica la entrada por una constante que se indica en el parámetro “Gain” de la ventana de diálogo que se abre haciendo doble clic en el símbolo.
- *Integrator*: este bloque realiza la integral de la señal que se aplica a su entrada. En el limitador se debe activar la opción “Limit output” configurando el valor “Lower saturation limit” a cero.

A continuación se indican el ajuste de parámetros para esta simulación:

- *Irradiancia*: 1000 W/m²
- *Temperatura*: 298 Kelvin.
- *Panel fotovoltaico*: 8 células en serie y 8 células en paralelo.
- *Inductor*: 100 μH.
- *Capacidad*: 100 μF
- V_{bat} : 2.5V DC.
- *D*: este componente permite fijar el ciclo de trabajo del convertidor Buck y se debe ajustar a un valor entre 0 y 1 dependiendo de la prueba que se realice.

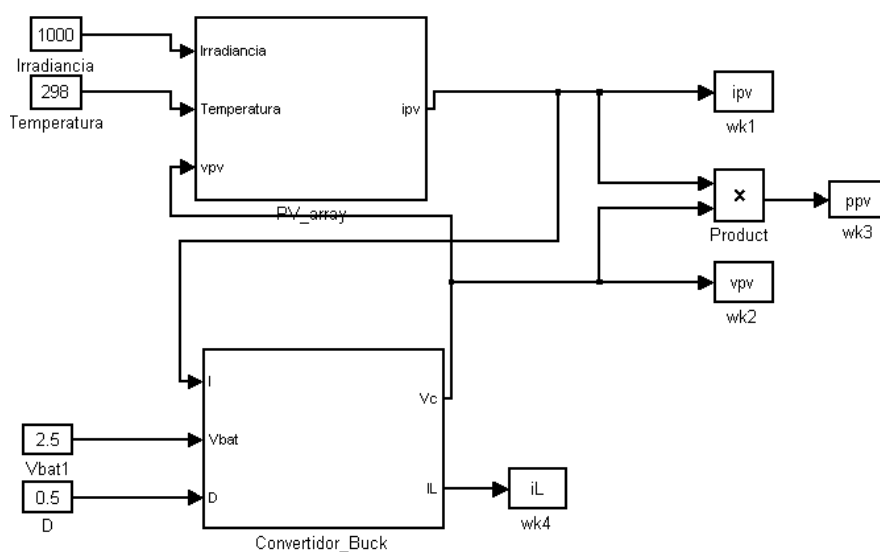


Figura 2.2. Modelo Simulink del sistema fotovoltaico

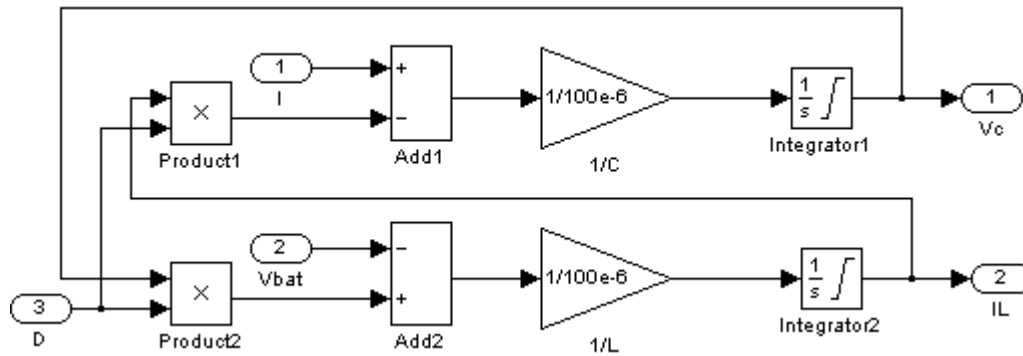


Figura 2.3. Modelo Simulink del convertidor Buck

P2.1 En primer lugar se debe determinar las características estáticas del generador fotovoltaico: V_{oc} , I_{sc} y MPP, utilizando el procedimiento visto en la práctica 1. Para esta prueba el convertidor no debe estar conectado al panel fotovoltaico (tal y como se muestra en la figura 2.4) para evitar que su funcionamiento interfiera en el valor de los parámetros. Indicar también cuál es el valor de tensión de salida $V_{máx}$, y corriente de salida $I_{máx}$, del generador fotovoltaico correspondiente al punto MPP. Se utilizarán los siguientes parámetros de configuración de la simulación: $step\ size = 1e-3$, $Stop\ time = 40s$.

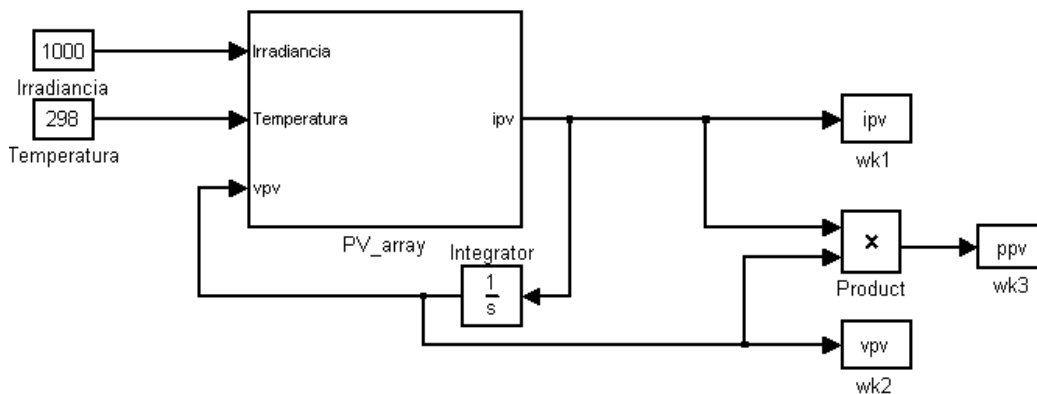


Figura 2.4. Modelo Simulink del panel fotovoltaico para extracción de parámetros

2.3.1 Funcionamiento del sistema fotovoltaico en lazo abierto con $D=0.75$

En esta prueba se va a simular el sistema fotovoltaico en lazo abierto ajustando el ciclo de trabajo del convertidor Buck a $D=0.75$. Con $D=0.75$ y teniendo en cuenta la expresión (2.1) se cumple que $V_b = V_{sa} * 0.75$.

En esta situación la tensión de salida del panel solar, en régimen estacionario, la fija la batería y será igual a 2.5V. Ajustar el tiempo de simulación a 0.1 segundos, tiempo más que suficiente para que el sistema alcance el régimen estacionario, y el paso de simulación a $1e-7$.

P2.2 Indicar el valor de la corriente y tensión de salida de panel en régimen estacionario (para $t \geq 0.1s$). Calcular la potencia en régimen estacionario ($t \geq 0.1s$) que suministra el generador fotovoltaico. Calcular la eficiencia η_p , del generador fotovoltaico definida de la siguiente manera:

$$\eta_p = \frac{P}{P_{max}} \quad (2.3)$$

donde P es la potencia suministrada por el array fotovoltaico y $P_{máx}$ es la máxima potencia que puede suministrar y se corresponde con el parámetro MPP.

Visualizar la curva de tensión-potencia del array solar e identificar sobre la misma el punto de trabajo en régimen permanente.

Como se puede comprobar en la curva tensión-potencia, el generador fotovoltaico suministra una potencia muy por debajo de la potencia máxima posible.

2.3.2 Ajuste del ciclo de trabajo en lazo abierto para MPP

Para aumentar la potencia suministrada por el panel, y con ello la eficiencia del sistema del sistema fotovoltaico, se puede ajustar el ciclo de trabajo del convertidor Buck a un valor que permita obtener una mayor eficiencia.

P2.3 Fijar el ciclo de trabajo a $D = 0.55$. Indicar en este caso el valor de la corriente y de la tensión de salida del panel y calcular la potencia en régimen estacionario. Calcular la eficiencia η_p del generador fotovoltaico. ¿Qué conclusiones se extrae?

Visualizar la curva de tensión-potencia del array solar e identificar sobre la misma el punto de trabajo en régimen permanente.

Aunque con el ciclo de trabajo $D = 0.55$ se mejora significativamente la eficiencia del sistema fotovoltaico, el array solar no trabaja en el punto de máxima potencia.

Se puede determinar fácilmente el valor de ciclo de trabajo óptimo que permite obtener la máxima eficiencia utilizando la expresión (2.1) donde V_b es la tensión de la batería y V_{sa} es la tensión del panel cuando está suministrando la máxima potencia: $V_{m\acute{a}x}$.

P2.4 Calcular el valor del ciclo de trabajo necesario para que el array solar opere en el punto de máxima potencia. Simular el funcionamiento del sistema fotovoltaico ajustando el ciclo de trabajo al valor calculado. Indicar en este caso el valor de la corriente y de la tensión de salida del panel y calcular la potencia en régimen estacionario. Calcular la eficiencia η_p del generador fotovoltaico. ¿Qué conclusiones se extrae?

P2.5 Manteniendo el ciclo de trabajo al valor calculado en **P2.4**, simular el sistema para distintos valores de irradiancia: 800, 600, 400 y 200 W/m^2 . Obtener para cada valor de irradiancia el valor de MPP. Representar en una misma gráfica las cuatro curvas P-V y calcular la eficiencia η_p para cada valor de irradiancia. ¿Se alcanza el MPP del sistema? ¿Qué conclusiones se extrae en relación a la variación de la eficiencia con la irradiancia?

2.3.3 Modelo real de convertidor Buck

En simulaciones anteriores se ha utilizado en el modelo de convertidor Buck un valor de ciclo de trabajo constante. Este modelo no tiene en cuenta el efecto de la conmutación del transistor sobre el generador fotovoltaico. La conmutación del transistor hace que la corriente de entrada del convertidor sea pulsante, lo que provoca que el punto de trabajo del array esté oscilando, con una frecuencia igual a la de conmutación.

Se puede simular fácilmente la acción de conmutación real de un transistor añadiendo un circuito PWM al modelo de la figura 2.2. El resultado se muestra en la figura 2.5. El diseño del PWM se ha llevado a cabo utilizando un restador y dos nuevos bloques que se describen a continuación:

- *Repeating sequence*: este bloque permite generar secuencias periódicas con la forma de onda arbitraria diseñada por el usuario y se encuentra ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Sources*”. Este bloque se encarga de generar el diente de sierra asociado a los moduladores de anchura de pulso. Para fijar el periodo y amplitud del diente de sierra generado se hace doble clic en el componente y se introducen los parámetros que se muestran en la figura 2.6. El diente de sierra generado en estas condiciones tiene una amplitud de 1 y una frecuencia de 100kHz.
- *Relay*: este componente genera la señal que emula la conmutación del transistor de paso (1 ó 0). Los parámetros que se deben ajustar en este bloque son: “*Output when on*” = 1 y “*Output when off*” = 0.

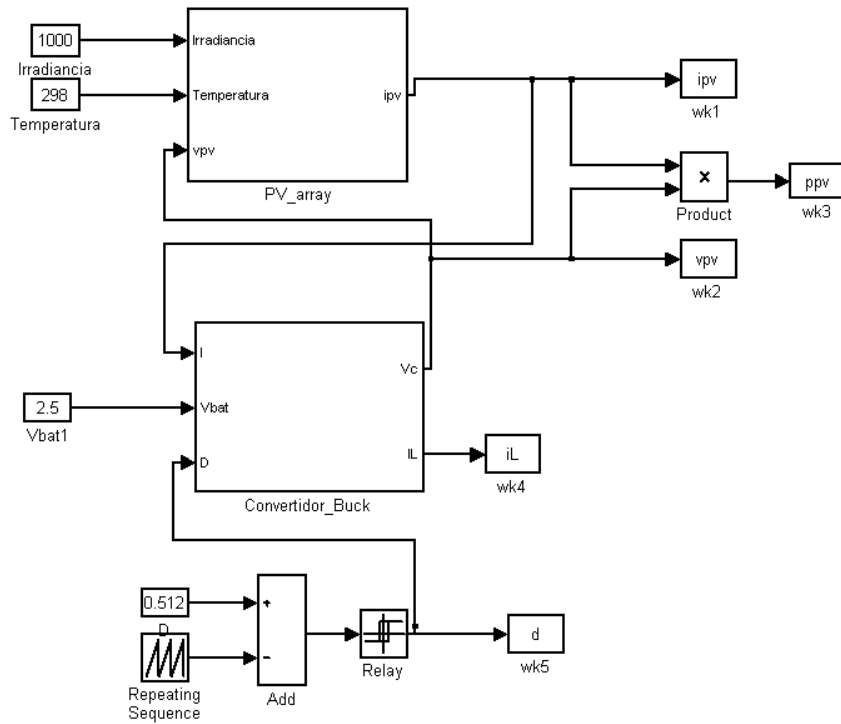


Figura 2.5. Sistema fotovoltaico con el modelo real del convertidor Buck

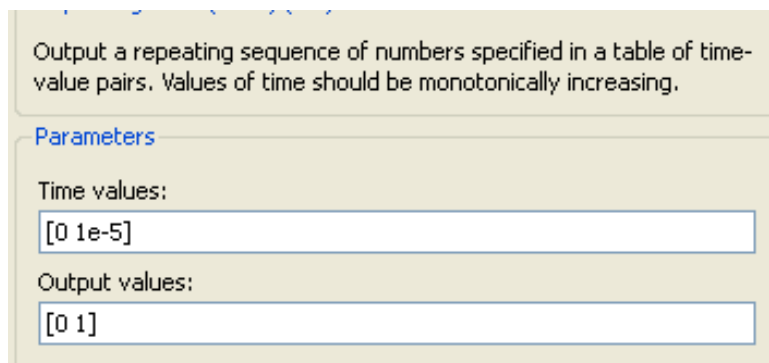


Figura 2.6. Ajuste de parámetros para generar el diente de sierra

P2.6 Simular el funcionamiento del circuito de la figura 2.5 con $D = 0.5$ y $C = 10\text{mF}$. Representar en una misma gráfica la corriente y tensión a la salida del panel fotovoltaico y comprobar el efecto de la conmutación sobre esas variables. Representar gráficamente la eficiencia η_p del panel fotovoltaico. ¿Cuál es el efecto de la conmutación sobre la corriente, tensión y eficiencia del panel fotovoltaico?

2.4 Algoritmos MPPT

La potencia suministrada por el generador fotovoltaico varía dependiendo de las condiciones de entorno como puede ser la temperatura, la irradiancia y también debido a las variaciones de la carga conectada al sistema. Por tanto, es conveniente establecer algoritmos de control del ciclo de trabajo que permitan extraer la máxima potencia posible del generador fotovoltaico en cualquier condición de temperatura, irradiancia y carga. Estos algoritmos se denominan MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) y su objetivo es ajustar el punto de trabajo de operación del generador fotovoltaico para que éste se corresponda con el MPP.

En esta práctica se van a considerar y probar dos algoritmos MPPT denominados:

- Perturbación y observación (P&O)
- Conductancia incremental

2.4.1 Algoritmo MPPT de Perturbación y Observación

Este algoritmo de seguimiento de potencia varía el voltaje del array y monitoriza la potencia resultante. Si la potencia medida es mayor que la medida en la muestra anterior se continúa realizando la misma variación en el voltaje (aumento o disminución), si la potencia es menor que la obtenida en la muestra anterior, se realiza la variación de voltaje opuesta (disminución o aumento) a la que se estaba haciendo en el ciclo anterior. Las muestras del voltaje del array solar permiten ubicar el punto de operación. Una vez alcanzado el punto de máxima potencia el algoritmo P&O hará que el punto de operación del panel oscile en torno a él. En la figura 2.7 se muestra gráficamente los cuatro casos posibles en los que se puede encontrar el sistema fotovoltaico y la correspondiente acción de control a ejercer sobre el ciclo de trabajo para alcanzar el MPP. Estos casos son:

a) $\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0$ y $\Delta V = V(k) - V(k-1) > 0$: En este caso el incremento de potencia ΔP , definido como la potencia actual menos la potencia en la muestra anterior, es positivo. Igualmente el incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico también es positivo. La acción de control a realizar en este caso es disminuir el ciclo de trabajo de forma que siga aumentando la tensión de salida del panel solar hasta que alcancemos el punto MPP:

$$d(k) = d(k-1) - \Delta d \quad (2.4)$$

b) $\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0$ y $\Delta V = V(k) - V(k-1) < 0$: En este caso el incremento de potencia ΔP , es positivo mientras que el incremento de tensión de salida es negativo. La acción de control a realizar en esta situación es aumentar el ciclo de trabajo de forma que siga disminuyendo la tensión de salida del panel solar hasta que alcancemos el punto MPP:

$$d(k) = d(k-1) + \Delta d \quad (2.5)$$

c) $\Delta P = P(k) - P(k-1) < 0$ y $\Delta V = V(k) - V(k-1) < 0$: el incremento de potencia ΔP y de tensión de salida es negativo. La acción de control a realizar en este caso es, como en el caso a), disminuir el ciclo de trabajo de forma que aumente la tensión de salida del panel solar hasta que alcancemos el punto MPP:

$$d(k) = d(k-1) - \Delta d \tag{2.6}$$

d) $\Delta P = P(k) - P(k-1) < 0$ y $\Delta V = V(k) - V(k-1) > 0$: el incremento de potencia ΔP , es negativa mientras que el incremento de tensión de salida es positivo. La acción de control a realizar en esta situación es aumentar el ciclo de trabajo de forma que siga disminuyendo la tensión de salida del panel solar hasta que alcancemos el punto MPP:

$$d(k) = d(k-1) + \Delta d \tag{2.7}$$

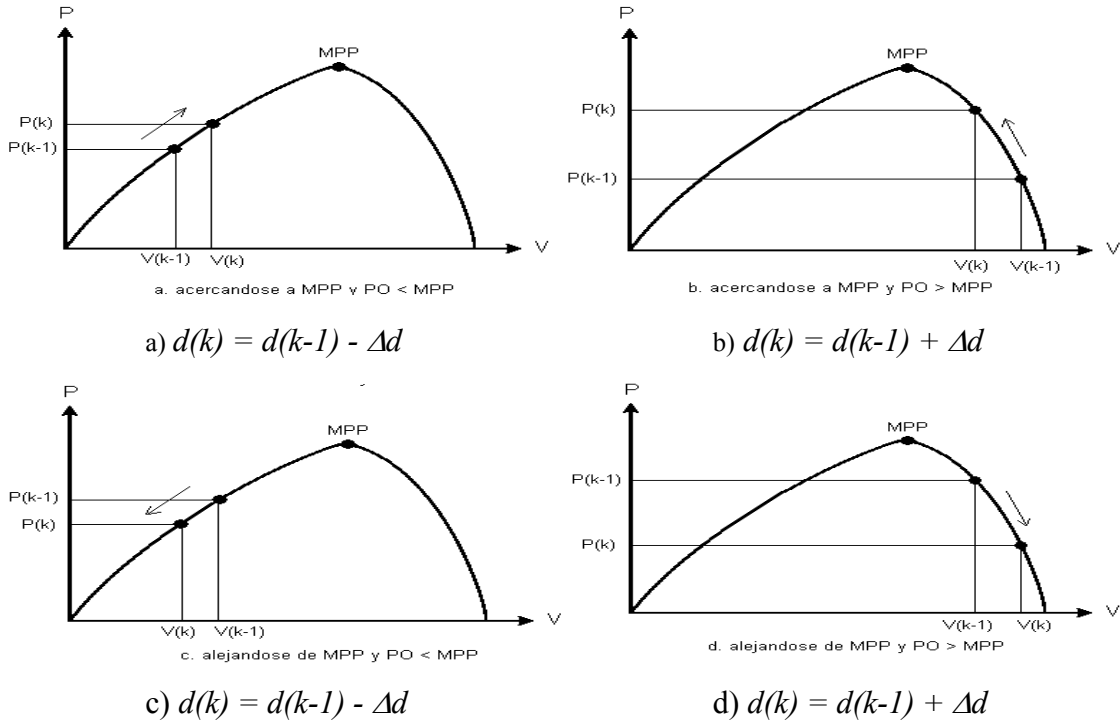


Figura 2.7. Casos posibles del algoritmo P&O

En la figura 2.8 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de P&O.

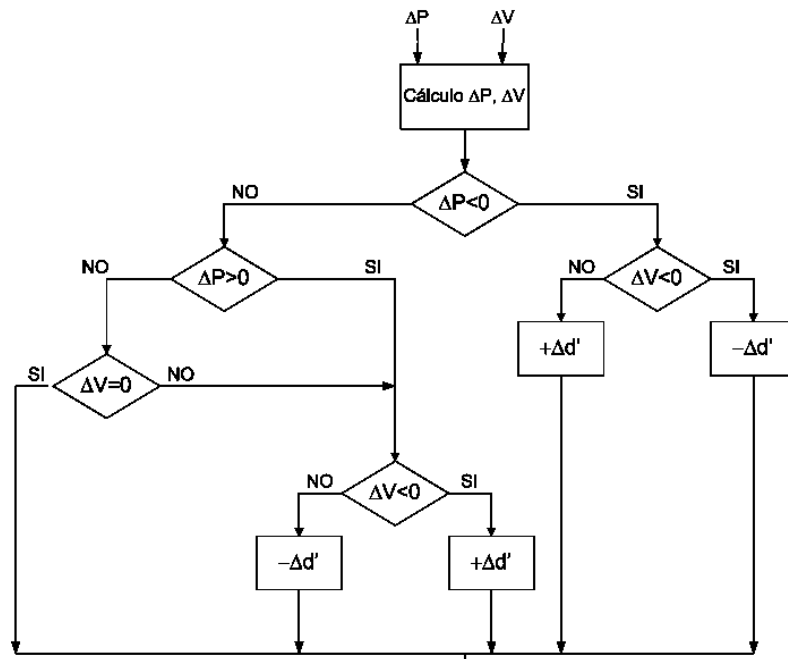


Figura 2.8. Diagrama de flujo del algoritmo de Observación y Perturbación (P&O)

2.4.2 Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental

Las acciones de control del algoritmo de seguimiento de conductancia incremental se derivan del valor de la razón de cambio entre la potencia y el voltaje/corriente del módulo fotovoltaico. Por ejemplo, si se toma la razón de cambio entre la potencia y el voltaje del panel $\left(\frac{\Delta P}{\Delta V}\right)$, el MPPT alcanzará el punto de máxima potencia cuando $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$. Cuando esta razón sea positiva se estará al lado derecho del punto de máxima potencia e inversamente, se estará al lado izquierdo cuando $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$ (ver figura 2.9).

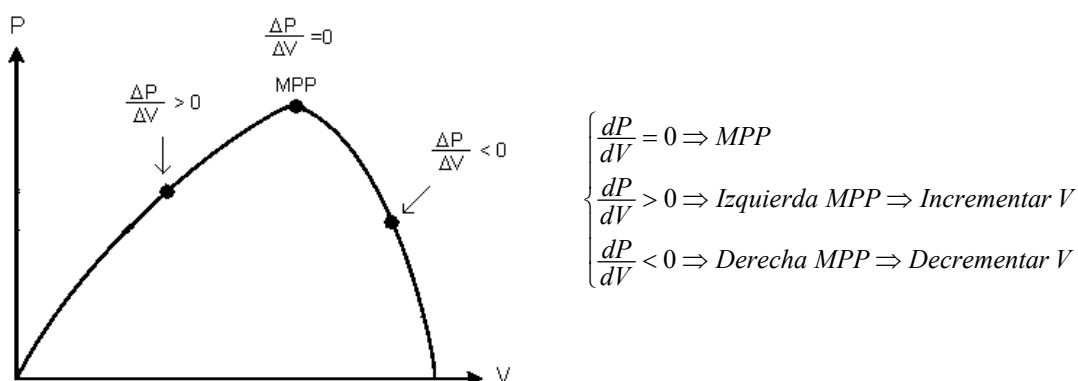


Figura 2.9. Ubicación del punto de operación

El diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento de potencia por conductancia incremental se muestra en la figura 2.10. Para comprenderlo, obsérvese que $\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV}$. El sistema necesita medir la corriente entregada por el panel (I) y la tensión en bornes (V) y calcula $\Delta I = I(k) -$

$$I(k-1) \text{ y } \Delta V = V(k) - V(k-1) \text{ y se aplica: } \begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \end{cases}$$

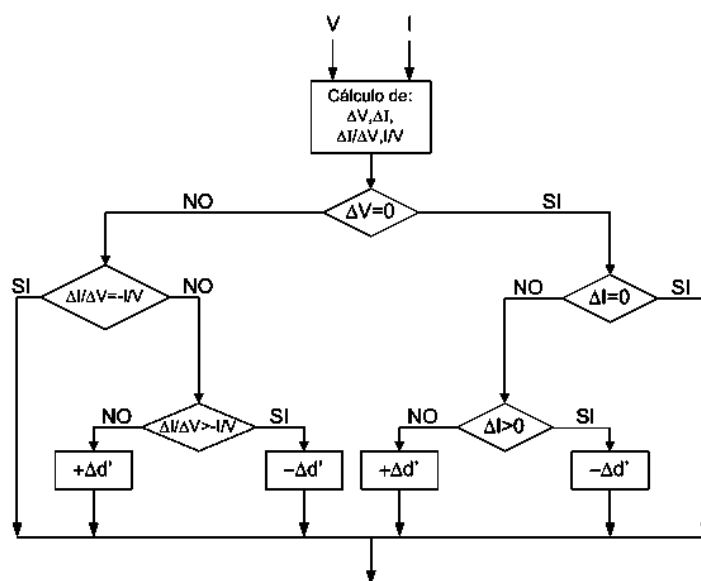


Figura 2.10. Diagrama de flujo del algoritmo de Conductancia Incremental

2.5 Implementación de algoritmos MPPT con Simulink

El primer paso para simular el comportamiento del sistema fotovoltaico controlado por el algoritmo MPPT es implementar dicho algoritmo. En este apartado se indicarán los pasos para implementar el algoritmo de Perturbación y Observación (*P&O*).

Para ello abrimos un esquemático nuevo con la opción “*New*” del menú “*File*” escogiéndose la opción “*Model*” y se incorporan en la plantilla de dibujo los componentes necesarios para llevar a cabo el diseño del algoritmo *P&O*:

- *ZOH (Zero Order Hold)*: este componente está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Discrete*” y es un mantenedor de orden cero cuya función es tomar muestras de los valores de las variables que intervienen en el algoritmo. En este caso se debe tomar muestras de la tensión de salida del panel fotovoltaico $V(k)$, y de la corriente de salida $I(k)$, del generador fotovoltaico, por tanto se deben incluir en el diseño dos *ZOH*. En este componente se ajustará el parámetro “*Sampling Period*” = 0.0001s, para fijar una frecuencia de muestreo de 10kHz.
- *Product*: este componente es un multiplicador, está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Math Operations*”, y se utiliza para calcular la potencia de salida del array solar como el producto de la muestra de tensión por la muestra de corriente.
- *Unit Delay*: este componente es una línea de retardo, está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Discrete*”, y se utiliza para obtener la muestra anterior, tanto de la tensión $V(k-1)$, como de la potencia $P(k-1)$. Se incluirán dos componentes “*Unit Delay*” ajustando el parámetro “*Sampling time*” = 0.0001s, para fijar la misma frecuencia de muestreo que el *ZOH*.
- *Relational operator*: este componente se utiliza para que realice la función de comparador, está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Commonly Used Blocks*”, y permitirá evaluar si el incremento de potencia ΔP , o de tensión ΔV , es mayor o menor que cero. En efecto, se aplica la muestra actual de tensión $V(k)$, o de potencia $P(k)$, a la entrada superior comparador, mientras que a la entrada inferior se aplica la muestra anterior de tensión $V(k-1)$, o de potencia $P(k-1)$. La salida de este operador es de tipo booleano: 1 cuando se cumple la relación y 0 cuando no se cumple.
- *Relay*: este componente se utiliza para adaptar los niveles del operador de relación a los valores 1 y -1. Su entrada se conecta a la salida de los operadores de relación y sus parámetros se ajustan de forma que para la entrada 1, la salida vale 1 y para una entrada igual a cero la salida es -1. En definitiva, este elemento proporcionará a la salida el signo del incremento de la tensión o de la potencia. Para que la salida proporcionada por este componente sea del tipo flotante (en lugar de booleana como la entrada) se debe modificar el campo “*Output data type*” en la carpeta “*Signal attributes*” seleccionando el tipo “*single*”.
- *Fcn*: este bloque está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*User-Defined Functions*” y permite definir fácilmente funciones de usuario. Se utilizará en este caso para modelar el algoritmo de incremento del ciclo de trabajo. En concreto la función a implementar con este componente es el valor actual del ciclo de trabajo $D(k)$ que viene dado por:

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D \quad (2.8)$$

donde ΔD es el incremento del ciclo de trabajo que puede ser positivo o negativo, dependiendo del signo de ΔP y de ΔV . Según lo expuesto en el apartado 2.4.1, ΔD viene dado por:

$$\Delta D = -\text{sign}(\Delta P) * \text{sign}(\Delta V) * |\Delta D| \quad (2.9)$$

La función $\text{sign}(x)$ proporciona el valor del signo de “x”, o sea, $\text{sign}(x)=1$ para $x \geq 0$ y $\text{sign}(x)=-1$ para $x < 0$.

Para definir la función asociada a este componente basta hacer doble clic sobre el componente e introducir la expresión 2.8-2.9 en el campo “*Expression*”:

$$-u(1)*u(2)*0.003+u(3) \quad (2.10)$$

La variable $u(1)$ se identifica con la entrada del signo de ΔP , $u(2)$ es la entrada de signo de ΔV y finalmente $u(3)$ es la entrada correspondiente al valor anterior del ciclo de trabajo $D(k-1)$. La salida se corresponde al valor actual del ciclo de trabajo $D(k)$. Finalmente, el valor 0.003 se corresponde con el valor escogido para el incremento del ciclo de trabajo, $|\Delta D|$.

- *Mux*: este bloque se utiliza para unificar en un solo vector todas las entradas de la función definida con el bloque “*Fcn*”. Este componente está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Commonly Used Blocks*”. Para este componente se debe ajustar el parámetro “*Number of inputs*” con el valor de 3.
- *Saturation*: este componente está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Discontinuities*” y su función es limitar el valor de la señal de entrada, de forma que la salida del bloque nunca supera los límites superior e inferior establecidos como parámetros del componente. En este caso se utilizará este componente para limitar el valor del ciclo de trabajo calculado con el bloque “*Fcn*”. En efecto, teóricamente el ciclo de trabajo adquiere valores comprendidos entre $0 \leq D \leq 1$. Para asegurar que esto sea así, se coloca a la salida de dicho bloque el componente “*Saturation*” donde se han ajustado los límites inferior y superior para que se correspondan con los del ciclo de trabajo: “*Upper Limit*” = 1, “*Lower Limit*” = 0. De esta forma, aunque el valor del ciclo de trabajo, calculado mediante la expresión (2.10), supere el margen $[0, 1]$, a la salida del componente “*Saturation*” siempre tendremos un valor correcto de ciclo de trabajo.
- *Unit Delay*: para obtener el valor anterior del ciclo de trabajo $D(k-1)$, se utiliza otro componente “*Delay*” conectado a la salida del componente “*Saturation*”. El tiempo de muestreo se ajusta a 0.0001s que equivale a una frecuencia de muestreo de 10kHz.
- *Inport block*: este bloque funciona como un puerto de entrada permitiendo introducir señales externas dentro del sistema. Con dos bloques como este se introducen en el modelo las dos variables externas necesarias para que funcione correctamente: tensión y corriente de salida del panel fotovoltaico. Este componente está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Sources*” y tiene nombre “*In1*”.
- *Outport block*: este bloque actúa como puerto de salida de un subsistema o modelo permitiendo extraer fuera del modelo variables internas generadas por el propio modelo. Con este bloque se proporciona como salida del modelo la variable $D(k)$ (valor actual de ciclo de trabajo). Este componente está ubicado en la carpeta “*Simulink*” en el apartado “*Sinks*” y tiene nombre “*Out1*”.

En la figura 2.11 está representado el modelo resultante, después de ubicar e interconectar convenientemente todos los componentes.

Para evitar que el algoritmo se quede en el punto de trabajo $D=0$ ($V_o=V_{oc}$ y $I_o=0$) el operador relacional que procesa la evolución de la tensión de salida del panel evalúa la función $V(k)-V(k-1) > 0$, mientras que el otro operador evalúa la función $P(k)-P(k-1) \geq 0$.

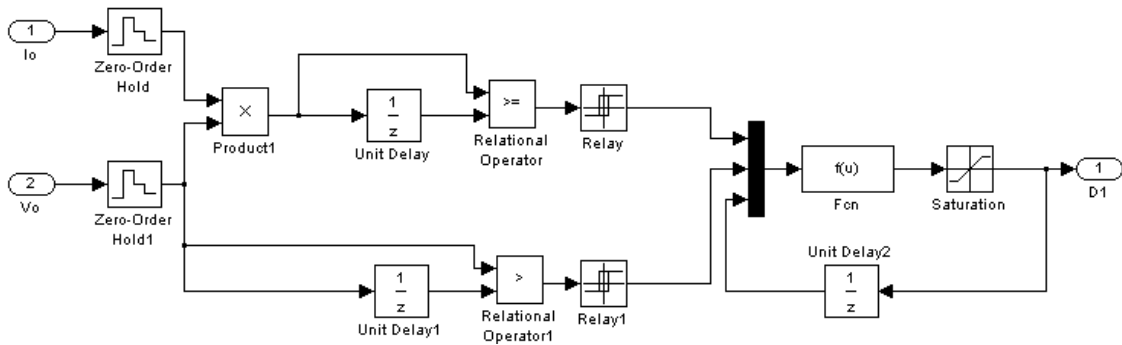


Figura 2.11. Modelo del algoritmo P&O

2.6 Operación en lazo cerrado

2.6.1 Algoritmo MPPT de Perturbación y Observación

En primer lugar se simulará el funcionamiento del sistema fotovoltaico con el algoritmo de Perturbación y Observación (P&O). Para ello, se montará el sistema de la figura 2.12, que consiste básicamente en el circuito del figura 2.2 donde se ha sustituido el componente “Constant”, que proporciona el valor del ciclo de trabajo, por el bloque que implementa el algoritmo MPPT generado en el apartado 2.5.

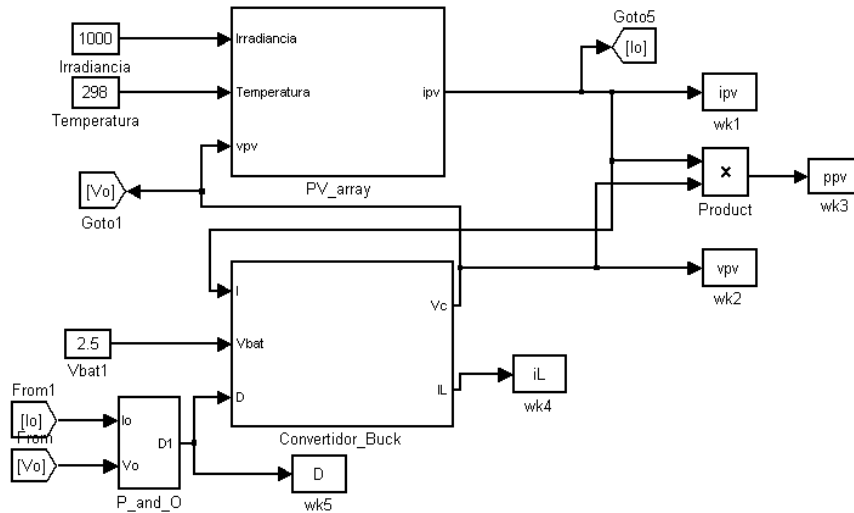


Figura 2.12. Sistema fotovoltaico en lazo cerrado con algoritmo P&O

P2.7 Simular el funcionamiento del circuito de la figura 2.12, utilizando un valor de “Simulation Stop Time” = 0.1s y un paso de simulación de 1e-6s. En la ventana de “Configuration Parameters” del menú “Simulation” se debe seleccionar en la ventana “Solver” el algoritmo de simulación “ode5 (Dormand-Prince)” y en la ventana “Tasking mode for periodic sample times” se debe seleccionar la opción “SingleTasking”. Representar en una misma gráfica la corriente y la tensión de salida del array solar. Representar el valor del ciclo de trabajo y representar también gráficamente el valor de la eficiencia del generador fotovoltaico durante toda la simulación.

P2.8 Representar en una misma figura dos curvas P-V del panel fotovoltaico para valores de irradiancia constantes de 500 y 1000W/m² siguiendo el procedimiento seguido en la práctica 1 y utilizando un paso de simulación de 1e-6s y tiempo de simulación de 0.1s.

A continuación se va a simular el comportamiento del sistema fotovoltaico en condiciones de irradiancia variables. Para simular una variación de la irradiancia se utiliza el bloque “*Signal Builder*” que se puede encontrar en la carpeta “*Sources*” de la librería de Simulink. Con este bloque se puede definir una forma de onda que representará una evolución temporal de irradiancia. Haciendo doble clic sobre el icono de este componente se abre una ventana que muestra por defecto una señal pulsante con una duración de diez segundos (ver figura 2.13).

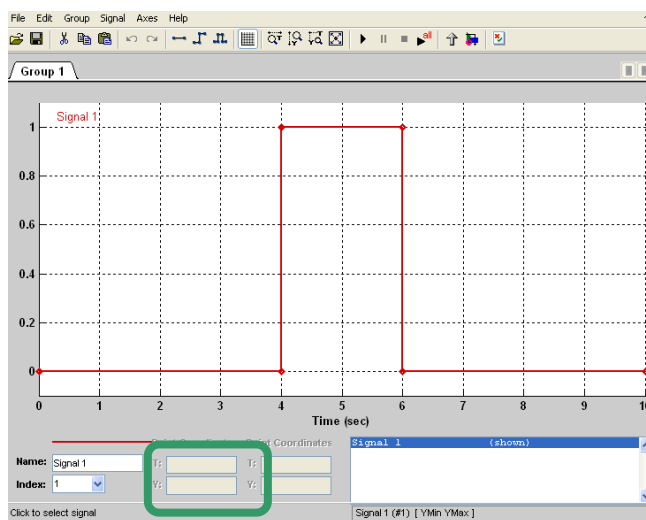


Figura 2.13. Ventana principal del componente “*Signal Builder*”

Se pretende sintetizar una señal pulsante pero de 0.1s de duración. Para ello lo primero que se puede hacer es ir seleccionar la opción “*Change Time Range*” del menú “*Axes*”. En la ventana de diálogo que aparece se ajusta a 0.1s el parámetro “*Max time:*” = 0.1s. A continuación de la opción “*Signal*” del menú superior se selecciona el comando “*Replace whit*” y se elige la señal “*Pulse*”. Después de realizar estas operaciones tenemos en la ventana de trabajo del “*Signal Builder*” una señal tipo pulso de 0.1s de duración (ver figura 2.14).

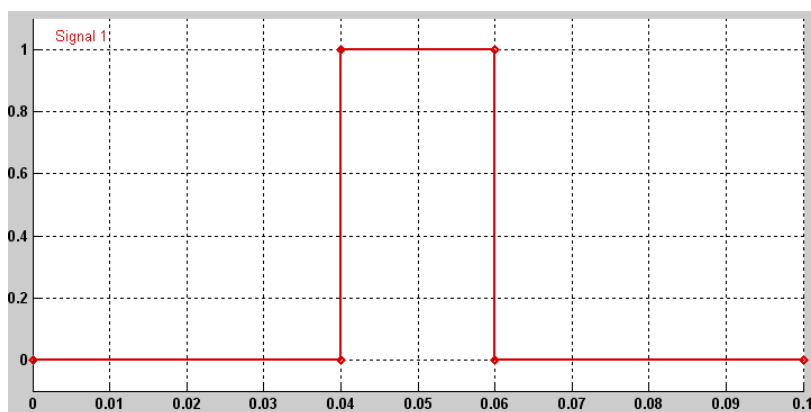


Figura 2.14. Pulso de 0.1s

Se puede modificar la forma de onda simplemente seleccionando cada uno de los puntos que trazan la figura y se modificando sus coordenadas en las ventanas “*T*” e “*Y*” de “*Point Coordinates*”.

El primer punto que posee inicialmente las coordenadas $T = 0$ e $Y = 0$, le adjudicamos las coordenadas $T = 0$ y $Y = 500$. El segundo punto que tiene las coordenadas $T = 0.04$ e $Y = 0$, le adjudicamos las coordenadas $T = 0.04$ y $Y = 500$. Al tercer punto ($T = 0.04$, $Y = 1$) le damos las coordenadas $T = 0.045$ y $Y = 1000$. Al cuarto punto ($T = 0.06$, $Y = 1$) le damos las coordenadas $T = 0.08$ y $Y = 1000$. Al quinto punto ($T = 0.06$, $Y = 0$) le damos las coordenadas $T = 0.08$ y $Y = 1000$. Al sexto punto ($T = 0.1$, $Y = 0$) le damos las coordenadas $T = 0.1$ y $Y = 500$. En la figura 2.15 se puede ver la forma de onda resultante. Esta forma de onda simula una irradiancia constante de 500W/m^2 durante 0.04 segundos para aumentar a continuación hasta 1000W/m^2 de forma gradual en un tiempo de 0.005s. El valor de 1000W/m^2 se mantiene durante 0.035s para caer abruptamente hasta 500W/m^2 , valor al que se mantiene finalmente durante 0.02 segundos.

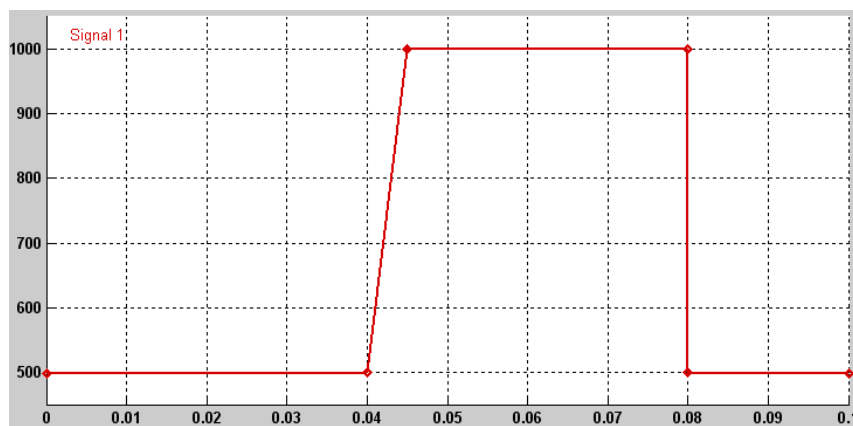


Figura 2.15. Forma de onda de la irradiancia utilizada en la simulación

En la figura 2.16 se muestra la conexión del bloque “Signal Builder” a la entrada de irradiancia del modelo del panel fotovoltaico.

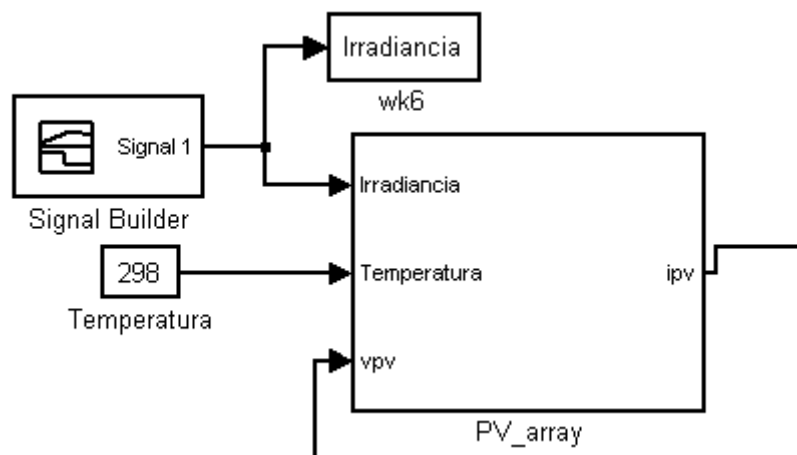


Figura 2.16. Conexión del bloque “Signal Builder” a la entrada del panel fotovoltaico

A continuación se debe simular el comportamiento del sistema fotovoltaico con el mismo paso de y tiempo de simulación para una irradiancia variable. Representar en una misma figura la gráfica P-V obtenida en esta simulación junto a las gráficas P-V obtenidas para una irradiancia constante de 500W/m^2 y 1000W/m^2 .

Representar la variación del ciclo de trabajo para esta última simulación.

2.6.2 Algoritmo MPPT de Conductancia Incremental

P2.9 Montar el bloque que implemente el algoritmo de conductancia incremental y simular su funcionamiento. Repetir la prueba realizada en el punto P2.7 pero utilizando en este caso el algoritmo de conductancia incremental. Representar en una misma gráfica la corriente y la tensión de salida del array solar. Representar el valor del ciclo de trabajo y representar también gráficamente el valor de la eficiencia del generador fotovoltaico durante toda la simulación. Comparar los resultados con los obtenidos con el algoritmo de Perturbación y Observación. Indicar qué diferencias y semejanzas existe entre ambos resultados.

P2.10 Repetir las pruebas realizada en el punto P2.8 pero utilizando en este caso el algoritmo de conductancia incremental. Comparar los resultados con los obtenidos con el algoritmo de Perturbación y Observación. Indicar qué diferencias y semejanzas existe entre ambos resultados.

PRACTICA 3: Control de sistemas fotovoltaicos conectados a red

Objetivos de la práctica

- Conocer los elementos de un sistema fotovoltaico para conexión a red
- Conocer y probar una estrategia de control para la transferencia eficiente de energía a la red eléctrica.

Informe

- El informe de la práctica deberá incluir el resultado del trabajo de simulación pedido en los apartados 3.7 y 3.8.
- En la corrección del informe se prestará especial atención a los siguientes aspectos:
 - Comentario y conclusiones sobre los resultados obtenidos en las simulaciones.
 - Resultados numéricos solicitados en el enunciado y gráficos de la señales mas representativas de las simulaciones efectuadas

3.1 Introducción

Los sistemas fotovoltaicos que entregan energía directamente a la red despiertan un especial interés debido a la reducción de costos que se obtiene de la supresión del subsistema de almacenamiento de energía propia de sistemas autónomos como el estudiado en la práctica 2.

En este tipo de sistemas es importante el correcto dimensionado de la agrupación de los paneles solares para su conexión a la red eléctrica, así como el diseño e implementación de la etapa de control, para obtener el mejor rendimiento posible del sistema fotovoltaico de potencia.

Para poder realizar una transmisión eficiente de energía a la red eléctrica se necesita un sistema de procesado de potencia que enlace la matriz fotovoltaica con la red. Las características que debe reunir este sistema de potencia son:

- Debe ser capaz de seguir el punto de máxima potencia de la agrupación fotovoltaica.
- Debe ser capaz de inyectar a la red una corriente de salida en fase con la tensión de red, o sea, con un factor de potencia igual a la unidad.

3.2 Estructura del sistema de procesamiento de potencia

El sistema de procesamiento de potencia que conecta el array fotovoltaico con la red eléctrica está compuesto por convertidor Full-Bridge (ver figura 3.1) que actúa como inversor proporcionando a la salida una potencia AC a partir de la potencia DC de entrada.

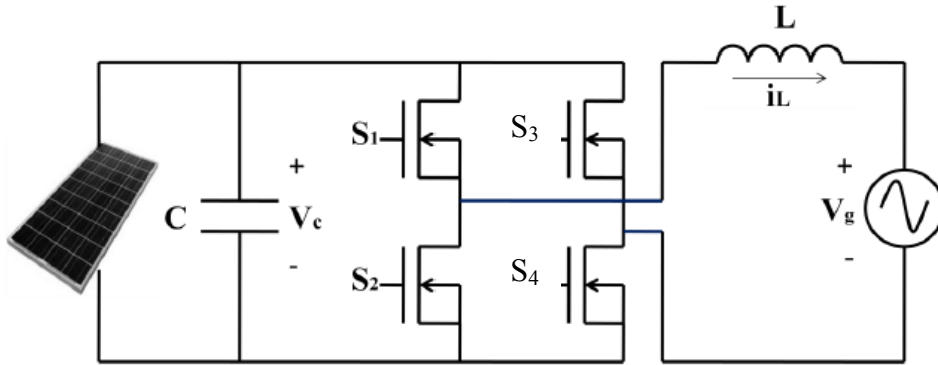


Figura 3.1. Esquema eléctrico del sistema de procesamiento de potencia

El convertidor Full-Bridge DC/AC se encarga de inyectar corriente en la red eléctrica en fase con la tensión de red. La amplitud de la corriente inyectada dependerá de la potencia que se extrae del panel. En la figura 3.2 se muestra un diagrama más adecuado para el análisis del sistema de procesamiento de potencia, en donde el interruptor S_1 se corresponde a un interruptor de puente completo. El interruptor S_4 de la figura 3.1 tiene en todo momento el mismo estado que S_1 , mientras que S_2 y S_3 tienen el estado contrario.

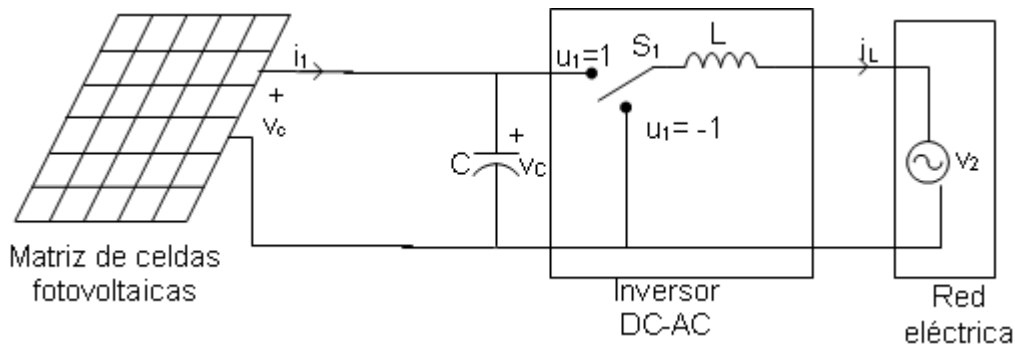


Figura 3.2. Esquema simplificado del circuito de procesamiento de potencia

Teniendo en cuenta que u_1 representa la señal de control del interruptor S_1 , el sistema se puede describir por medio de las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{v_C \cdot u - V_2}{L} \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{i_1 - i_L \cdot u}{C} \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde $u_1 \in [-1, 1]$.

En la figura 3.3 se muestra el diseño Simulink del convertidor Full-Bridge que el mismo que en el caso del convertidor Buck. La única diferencia reside en que el convertidor Full-Bridge la señal de control toma valores $[-1, 1]$. Asimismo se debe desactivar el limitador de salida en el integrador que

modela el comportamiento del inductor ya que en este caso la corriente de inductor debe tomar valores positivos y negativos. Para esta práctica los valores de C y L que se deben tomar son: $L=1\text{mH}$ y $C=20\text{mF}$.

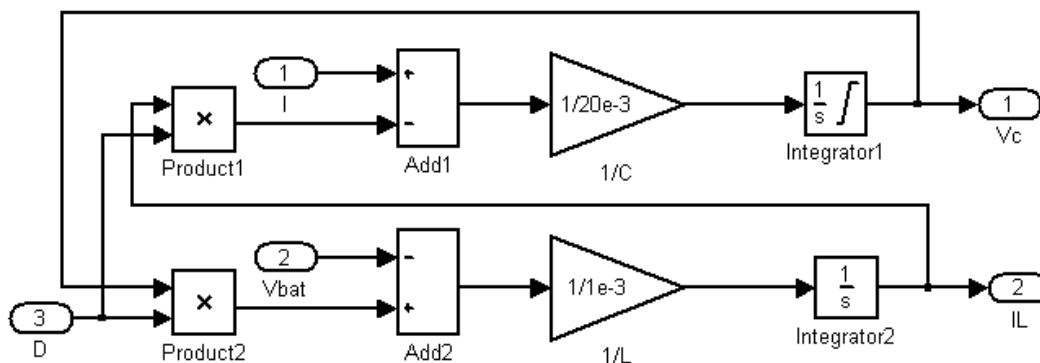


Figura 3.3. Modelo Simulink del convertidor Full-Bridge

3.3 Esquema del control del sistema fotovoltaico

Los objetivos básicos del control del sistema fotovoltaico son:

1. Seguir el punto de máxima potencia del array fotovoltaico.
2. Obtener un factor de potencia cercano a la unidad y una baja distorsión armónica en la corriente entregada a la red.

La figura 3.4 muestra el esquema del control utilizado para alcanzar los objetivos mencionados.

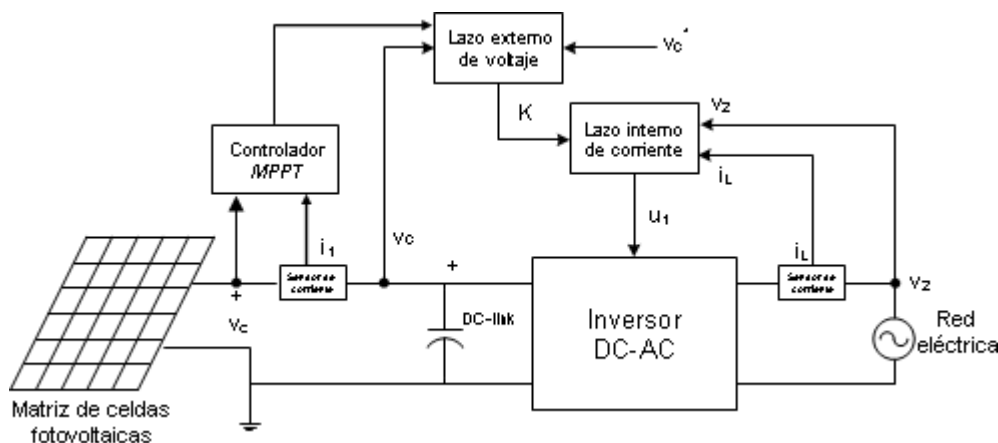


Figura 3.4. Esquema de control del sistema fotovoltaico de potencia

El controlador que gobierna el interruptor S_i del convertidor Full-Bridge se encarga de obtener un factor de potencia unitario a la salida y una mínima distorsión armónica. Para ello, un lazo interno de corriente hace que la corriente de salida presente una forma senoidal y en fase con el voltaje de red eléctrica.

La amplitud de la corriente es determinada por un lazo externo de voltaje que mantiene un balance energético en el sistema. Estos lazos son explicados en las secciones 3.4 y 3.5.

3.4 Lazo interno de corriente

Como se ha mencionado anteriormente el objetivo del lazo interno de corriente consiste en obtener una corriente de salida, i_L , con forma senoidal y en fase con el voltaje de red. Esto se puede conseguir si se establece como referencia la siguiente corriente:

$$i_L = K \cdot v_2 = K \cdot A \cdot \text{sen}(wt) \quad (3.2)$$

donde A es la amplitud del voltaje de la red eléctrica y K representa el factor de escalado de la amplitud de la corriente entregada con respecto al voltaje de red. Dicho factor debe tener un valor que asegure una transferencia máxima de energía entre el array fotovoltaico y la red eléctrica, esto es:

$$P_{out-RMS} = 0.5KA^2 \quad (3.3)$$

Para reducir la distorsión armónica total de salida y mantener un factor de potencia unitario, la amplitud de la corriente de referencia KA tan sólo se actualiza en los múltiplos de ciclo de red. Dado que las variables que modifican la potencia de entrada del generador fotovoltaico (la irradiancia y la temperatura) son de variación lenta, la baja frecuencia de actualización del valor de K no perjudica el rendimiento del sistema de potencia.

Para conseguir el seguimiento de la corriente de referencia de la expresión (3.2) se utiliza el siguiente controlador proporcional integral resonante:

$$G_I = \frac{k \cdot s^2 + k \cdot zc \cdot s}{s^2 + (2 \cdot \pi \cdot 50)^2} \quad (3.4)$$

3.5 Lazo externo de tensión

El lazo externo de voltaje se encarga de generar el factor de escalado K de la corriente entregada a la red. Nótese que el factor K es proporcional a la potencia entregada a la red ($P_{out(RMS)} = 0.5 \cdot KA^2$) y, por tanto, deberá variar conforme lo hace la energía producida por el array fotovoltaico para mantener una máxima transferencia energética de entrada/salida.

El sistema descrito por (3.1), (3.2) y (3.3) se puede describir de forma en que se obtenga la siguiente ecuación de balance energético:

$$\frac{1}{2} C \frac{dv_c^2}{dt} = P_{PV} - \frac{1}{2} L \frac{di_L^2}{dt} - P_{out} \quad (3.5)$$

Asumiendo que el lazo interno de control de corriente mantiene la forma senoidal de la corriente i_L y que la potencia generada por el panel varía muy despacio con respecto al período del voltaje de red (T), se consigue el siguiente modelo muestreado en T del sistema:

$$E_C(nT) - E_C((n-1)T) = E_{pv} - \frac{1}{2} K((n-1)T) A^2 T \quad (3.6)$$

En donde $E_C(nT) = 0.5Cv_c^2$ y E_{pv} representa la energía generada por la matriz fotovoltaica en un período T.

Aplicando transformada Z al modelo (3.6) se obtiene:

$$E_C(z)(1 - z^{-1}) = E_{pv}(z) - \frac{1}{2}K(z)(z^{-1})A^2T \tag{3.7}$$

Reordenando la expresión (3.7) queda finalmente:

$$E_C(z) = E_{pv}(z) \frac{z}{z-1} - \frac{1}{2(z-1)}K(z)A^2T \tag{3.8}$$

De la expresión (3.8) se puede extraer el valor de K a partir de la potencia que genera el array fotovoltaico y de la tensión en el condensador. El valor ideal, v_c^* , de la tensión en el condensador (o de salida del panel fotovoltaico) se debe corresponder al punto MPP. El algoritmo de seguimiento del MPP se encarga de obtener el valor de v_c^* . Para regular v_c al valor deseado se añade en el lazo externo de voltaje un controlador lineal, $G_c(z)$, cuya función es la de calcular el valor concreto de K que haga cero el error o diferencia entre el valor de referencia $E_C^* = 0.5C(v_c^*)^2$ y el valor real $E_C = 0.5C(v_c)^2$. De esta forma se puede expresar $K(z)$ en función de E_C^* y E_C como:

$$K(z) = G_C(z)(E_C^*(z) - E_C(z)) \tag{3.9}$$

Si se denomina “ m ” a la relación entre la energía del condensador y la energía entregada por el panel solar cuando está trabajando en el punto MPP: $E_{pv}^* = m \cdot E_C^*$, se puede expresar E_{pv} en términos de E_{pv}^* , E_C^* y “ m ” mediante la siguiente aproximación solo válida en el entorno del punto MPP:

$$E_{pv} \approx E_{pv}^* + m(E_C - E_C^*) \tag{3.10}$$

Por otra parte, la energía entregada por el panel fotovoltaico se puede expresar en términos de E_{pv}^* ,

En la figura 3.5, se muestra la representación gráfica de la expresión (3.8) junto con el controlador lineal $G_c(z)$, donde se ha tenido en cuenta además la expresión (3.10).

La acción del control $G_c(z)$ regula v_c a un valor de referencia, lo que permite que se mantenga la condición para el adecuado funcionamiento del convertidor inversor, es decir, que $v_c > A$.

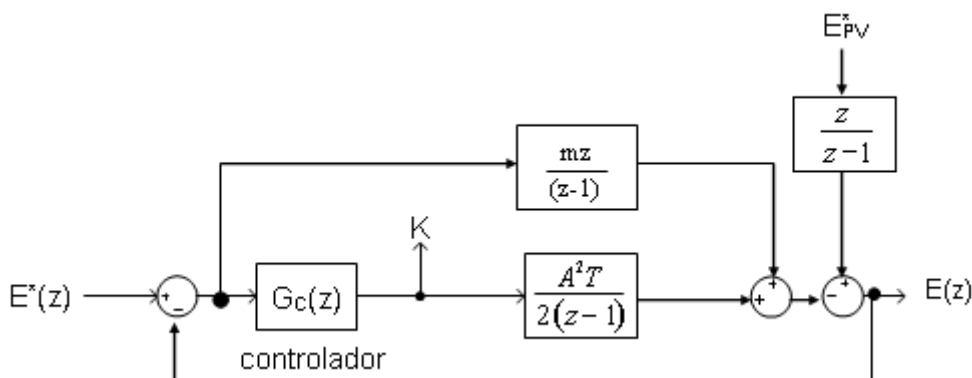


Figura 3.5 Modelo muestreado en T del sistema fotovoltaico

La ecuación (3.11) describe el sistema en lazo cerrado de la figura 3.5.

$$E_c(z) = \frac{zE_{pv}^*(z) - E_c^*(0.5A^2TzG_C(z) + zm)}{z - 1 - (0.5A^2TzG_C(z) + zm)} \quad (3.11)$$

El controlador G_C es diseñado mediante la técnica de ubicación de polos. En este caso se considera el siguiente controlador lineal discreto que presenta un error nulo en estado estacionario:

$$G_C = \gamma \frac{z - \alpha}{z - 1} \quad (3.12)$$

3.6 Diseño del control y ajuste de parámetros

Para realizar el diseño del lazo externo de tensión y el lazo interno de corriente se abre un nuevo fichero Simulink. En primer lugar se procede al diseño del lazo externo de tensión que reproduce la expresión 3.9 junto con la 3.12. En la figura 3.6 se muestra el modelo del lazo de tensión. Las entradas de este modelo son: la tensión en el condensador, v_c , que coincide con la tensión de salida del panel fotovoltaico, v_{pv} , y la tensión de referencia que se desea alcanzar a la salida del panel, V_{ref} . Estas dos entradas se muestrean y mantienen con el componente “Zero-Order Hold” con un periodo de muestreo igual al periodo de la tensión de red (20ms). A continuación se elevan al cuadrado y se restan. El resultado se multiplica por $0.5 \cdot C$, donde $C=20\text{mF}$ es el valor de la capacidad del condensador. Finalmente el resultado se multiplica por la función de transferencia (3.14), implementada mediante un bloque “Discrete Zero-Pole” donde el zero está ubicado en $z=0.875$ y la ganancia es de 0.5. La salida del bloque es el parámetro K de la expresión (3.2).

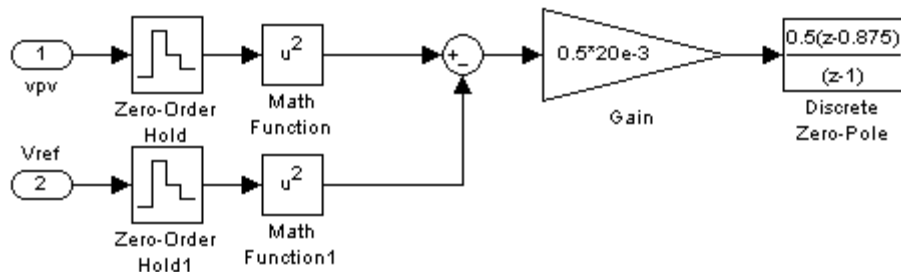


Figura 3.6. Modelo Simulink del lazo de control de tensión.

A continuación se realiza el modelo del lazo interno de corriente definido mediante la expresión (3.4). Básicamente consiste en multiplicar el factor K obtenido con el modelo de la figura 3.6 por una señal senoidal de amplitud 1 y frecuencia 50Hz para obtener la corriente de referencia. El resultado se resta a corriente del inductor i_L y se multiplica por la función de transferencia (3.4), implementada mediante un bloque “Transfer Fcn” con los siguientes valores de parámetros: $k=0.1$ y $zc=5000$.

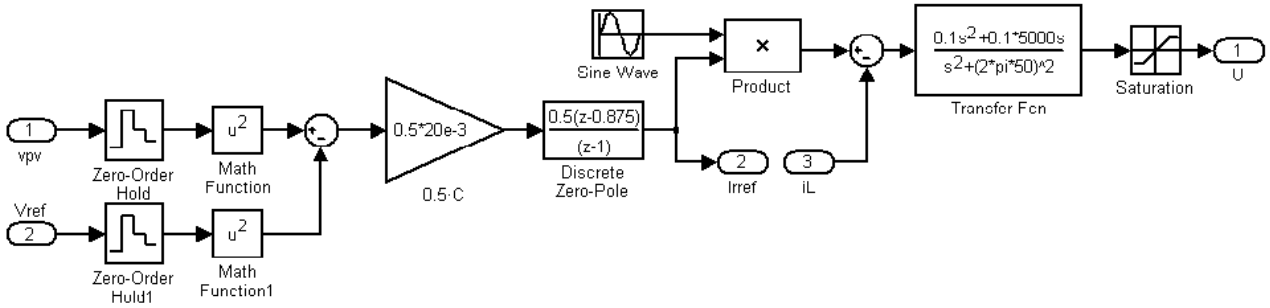


Figura 3.7. Modelo Simulink del lazo de control de tensión y el de corriente

El bloque final “Saturation” limita la salida a los valores -1 y 1, por tanto se debe ajustar los parámetros de este bloque con los siguientes valores: “Upper limit”=1 y “Lower limit”=-1.

En la figura 3.8 se muestra el modelo completo del sistema fotovoltaico junto con el control de tensión y corriente. En la entrada V_{bat} del convertidor Buck se conecta un generador senoidal (bloque “Sine Wave”) que simula la tensión de red. Los parámetros del bloque “Sine Wave” se ajustan como sigue: Amplitude = 312 y Frequency (rad/sec) = $2 \cdot \pi \cdot 50$.

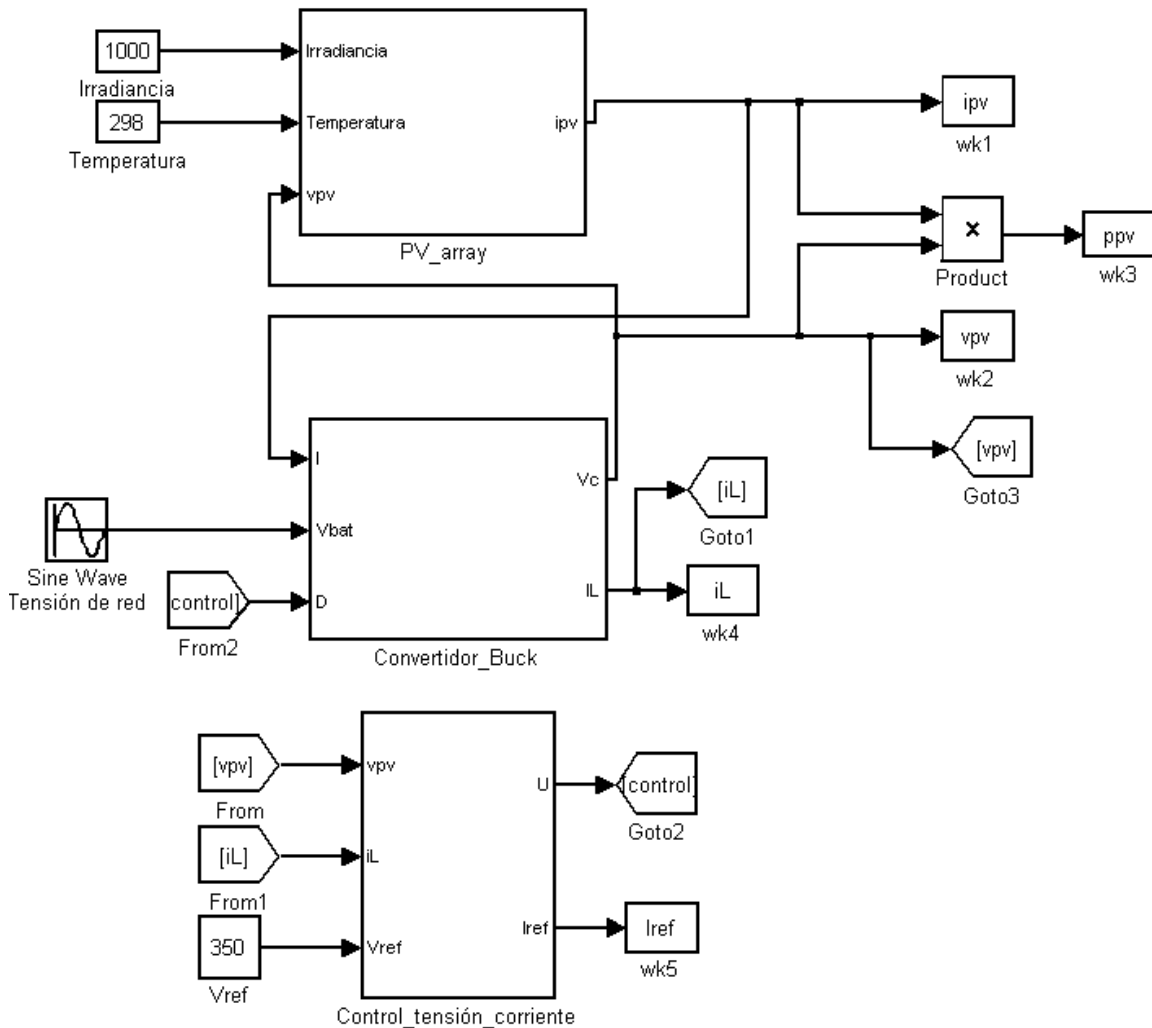


Figura 3.8. Sistema fotovoltaico con conexión a red

Para realizar las simulaciones de este apartado se deben modificar el valor de los siguientes parámetros del panel solar:

Tensión de circuito abierto en T1: 446.1/640V

Tensión de circuito abierto en T2: 520.8/640V

Número de células en serie: 640

Número de células en paralelo: 8

El elevado número de células en serie es necesario para poder obtener una tensión suficientemente alta de forma que se cumpla $v_{pv} > A$, donde A es la amplitud de la tensión de red.

Para esta práctica se debe utilizar los siguientes valores de componentes en el inversor DC-AC: $C = 20\text{mF}$ y $L = 1\text{mH}$. Se debe ajustar la tensión inicial del condensador del inversor DA-AC a 400V. Para ello se ajusta el parámetro “*Initial condition*” del bloque “Integrator1” con el valor 400.

3.7 Simulación del sistema fotovoltaico con conexión a red

P3.1: Aplicar como tensión de referencia en el bloque de control un valor de 350 voltios, tal y como se observa en la figura 3.8. Simular el circuito de la figura 3.8 con un paso de simulación de $1\text{e-}4\text{s}$ y tiempo de simulación de 6s. Representar gráficamente la tensión de la red eléctrica y la corriente inyectada en la red. Uno de los objetivos del control es inyectar corriente eléctrica a la red en fase con la tensión de red. ¿Se alcanza este objetivo de control?

Representar gráficamente la tensión de salida del panel fotovoltaico. Otro de los objetivos del control es mantener la tensión de salida del panel al valor de la tensión de referencia (350V en este caso). ¿Se consigue este objetivo de control? Comentar la respuesta.

P3.2: En este punto se va a simular una variación de la irradiancia, para ello se utiliza el bloque “*Signal Builder*” que se puede encontrar en la carpeta “*Sources*” de la librería de Simulink. Con este bloque se define una forma de onda pulsante como la mostrada en la figura 3.9, para ello se sigue el mismo procedimiento que se indica en el apartado 2.6 de la práctica 2.

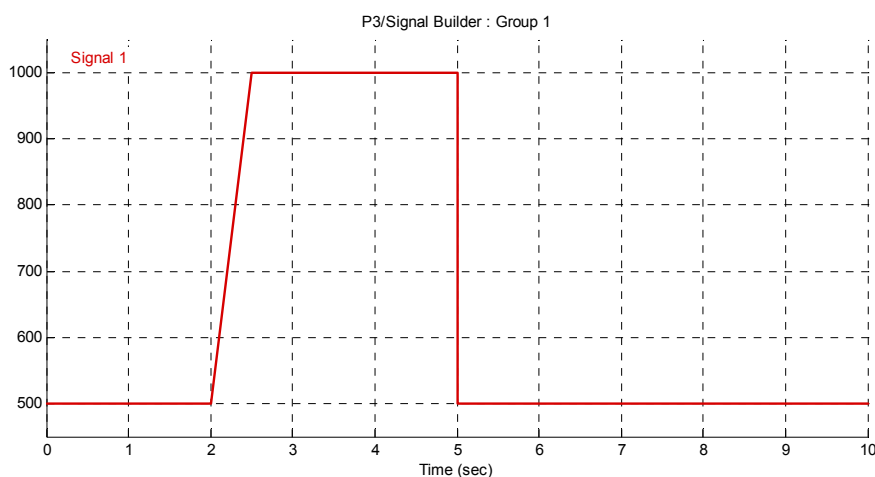


Figura 3.9. Forma de onda de la irradiancia utilizada en la simulación

En la figura 3.10 se muestra la conexión del bloque “*Signal Builder*” a la entrada de irradiancia del modelo del panel fotovoltaico.

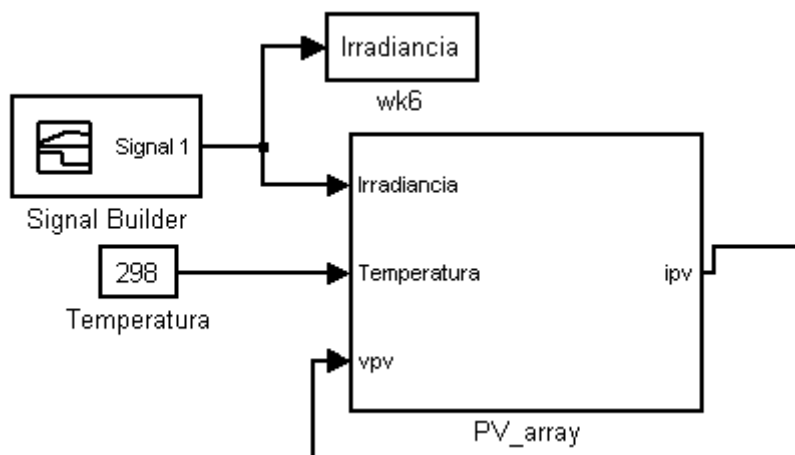


Figura 3.10. Conexión del bloque “Signal Builder” a la entrada del panel fotovoltaico

Simular el circuito con un paso de simulación de $1e-4s$ y tiempo de simulación de 6s. Representar en una gráfica la tensión de red y la corriente inyectada a red por el sistema fotovoltaico.

Determinar, mediante las correspondientes representaciones gráficas, si en los intervalos temporales donde se produce variación de irradiancia se sigue cumpliendo el objetivo de control referente a inyectar corriente en fase con la red eléctrica.

Representar gráficamente el factor K (I_{ref} de la figura 3.8).

P3.3: Representar gráficamente las curvas P-V y I-V del panel fotovoltaico para irradiancia de 500 y $1000W/m^2$ siguiendo el procedimiento indicado en la práctica 1 y utilizando un tiempo de simulación de 60s.

Es posible guardar en un fichero los resultados de las simulaciones para poder recuperarlos en otro momento sin tener que realizar de nuevo la simulación. Por ejemplo, después de realizar la simulación de funcionamiento del panel fotovoltaico con una irradiancia de $500W/m^2$ se puede guardar en un fichero el resultado de las variables “vpv” y “ppv” que nos permitirán posteriormente trazar la característica P-V para este valor de irradiancia. El comando que permite guardar estas variables es: “*save pot500 vpv ppt*”, donde “*pot500*” es el nombre del fichero donde se guardan las variables resultantes de la simulación y “vpv”, “ppv” las variables a guardar.

Después de simular el funcionamiento del panel con una irradiancia de $1000W/m^2$ se puede repetir la misma operación ejecutando el comando: “*save pot1000 vpv ppt*”.

Con el comando “**load**” se puede recuperar el archivo que contiene las variables guardadas.

Repetir la simulación con el bloque de irradiancia variable (figura 3.10) pero esta vez utilizando un tiempo de simulación de 60s y salvar los resultados con el comando “*save potvar vpv ppt*”. Obtener a continuación la gráfica P-V correspondiente (ver figura 3.11). Se puede observar como la potencia suministrada por el panel solar varía siguiendo las variaciones de irradiancia, pero manteniendo una tensión de salida del panel fotovoltaico en torno a 350V gracias a la acción del lazo de control externo de tensión.

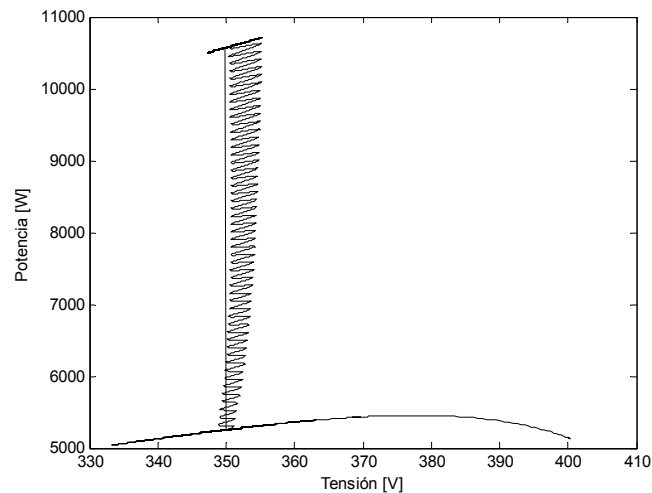


Figura 3.11 Característica P-V para condiciones de irradiancia variable

La representación gráfica de la figura 3.11 se puede mejorar si incluimos las características P-V del panel fotovoltaico obtenidas para una irradiancia de 500 y 1000W/m². Para ello se debe recuperar las variables de esas simulaciones, que están disponibles en los ficheros pot500.at y pot1000.mat, y añadirlas en la figura. A continuación se indica el conjunto de comandos MatLab que permiten realizar la representación gráfica combinada sobre la figura 3.11:

```
>> load pot1000
>> hold on
>> plot(vpv,ppv)
>> load pot500
>> plot(vpv,ppv)
```

El resultado se puede ver en la figura 3.13.

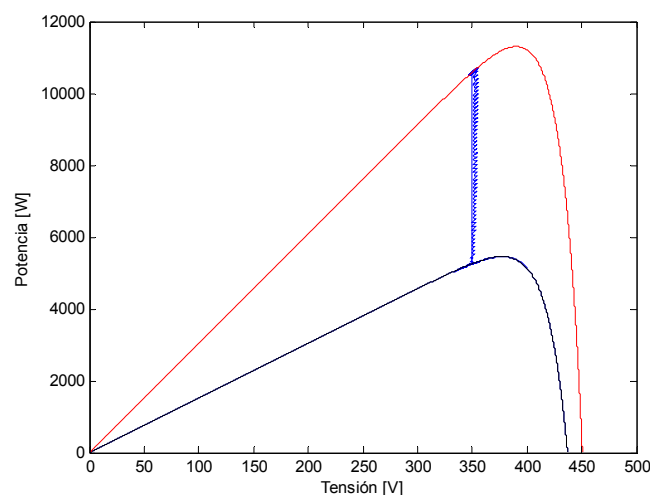


Figura 3.12. Gráficas P-V para irradiancia de 1000W/m² (rojo), 500W/m² (negro), y irradiancia variable (azul).

3.8 Control del sistema fotovoltaico con algoritmo de seguimiento de MPP

En el apartado anterior se simuló el funcionamiento del sistema fotovoltaico utilizando una tensión de referencia constante de 350V. En realidad el punto de máxima potencia depende del valor concreto de la irradiancia y de la temperatura, por ejemplo con una irradiancia de 1000W/m^2 se encuentra para una tensión de salida del panel solar de 390.6V. Para poder obtener el máximo rendimiento del sistema fotovoltaico es conveniente que el panel solar trabaje en el punto MPP para cualquier condición de irradiancia y temperatura. Esto se consigue utilizando los algoritmos de seguimiento del punto MPP que se han implementado en la práctica 2.

En primer lugar se utilizará en algoritmo de control de Perturbación y Observación implementado en el apartado 2.5. Para ello se añade el Subsistema P_and_O (ver figura 2.11) al modelo de la figura 3.8.

Las prestaciones del algoritmo de Perturbación y Observación varían en función de la frecuencia de muestreo de las variables de entrada, del incremento de la variable de salida $|\Delta D|$ (expresión 2.9), así como del valor inicial de las variables de entrada.

Para poder modificar con facilidad el valor de estos parámetros se van a definir en una ventana de diálogo siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó en el apartado 1.3 para definir la lista de parámetros del subsistema panel fotovoltaico: se selecciona el subsistema y se hace clic en el botón derecho seleccionando la opción “Mask Subsystem” para crear un lista de parámetros o “Edit Mask” para modificar una lista ya existente. De la ventana de diálogo que aparece a continuación se selecciona la pestaña “Parameters”. Con el botón “Add” se añaden los parámetros del subsistema. Para cada parámetro hay que indicar el nombre del parámetro y el de la variable que lo representa. En la figura 3.13 se muestra la ventana donde se define la lista de parámetros.

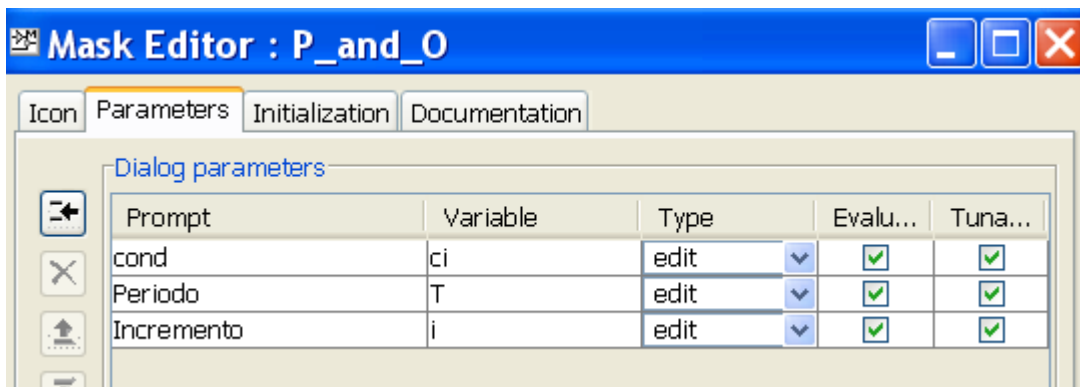


Figura 3.13 Lista de parámetros del algoritmo de perturbación y observación

El siguiente paso es introducir las variables definidas dentro de los componentes del subsistema donde tenemos definido el algoritmo de perturbación y observación. La variable “T” se debe asociar al parámetro “Sample time” de los bloques “Zero-Order Hold”, “Unit Delay” y “Fcn” (ver figura 3.14).

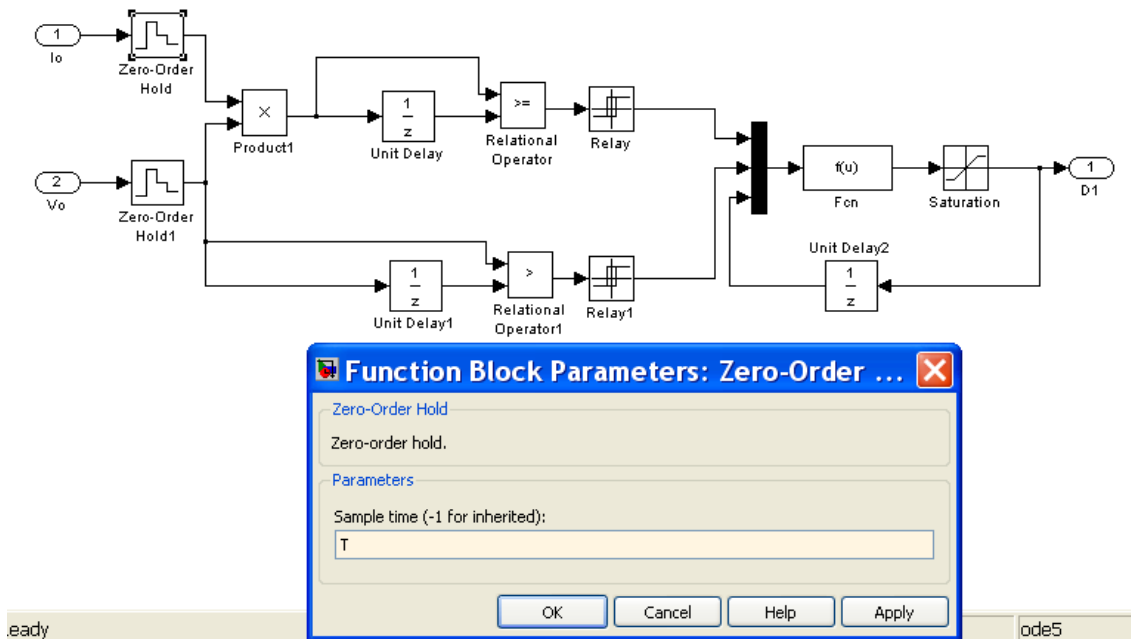


Figura 3.14. Modelo del algoritmo de perturbación y observación.

La variable “*ci*” se asocia al parámetro “*Initial conditions*” del bloque “*Unit Delay*”. La variable “*i*” se incluye en el campo “*Expression*” del bloque “*Fcn*” (ver figura 3.15). También será necesario modificar la expresión que se calcula en el bloque “*Fcn*”. En efecto, en la práctica 2 este bloque ajusta el ciclo de trabajo que se corresponde con la tensión del punto MPP, pero en este caso se ajusta directamente la tensión del punto MPP, por tanto, la expresión a implementar es:

$$V_{REF}^+ = V_{REF}^- + \Delta V_{REF} \quad \text{con} \quad \Delta V_{REF} = \text{sign}(\Delta P) * \text{sign}(\Delta V) * |\Delta V_{REF}| \quad (3.13)$$

Para definir la función asociada a este componente basta hacer doble clic sobre el componente e introducir la expresión 2.8-2.9 en el campo “*Expression*”:

$$u(1)*u(2)*i+u(3) \quad (3.14)$$

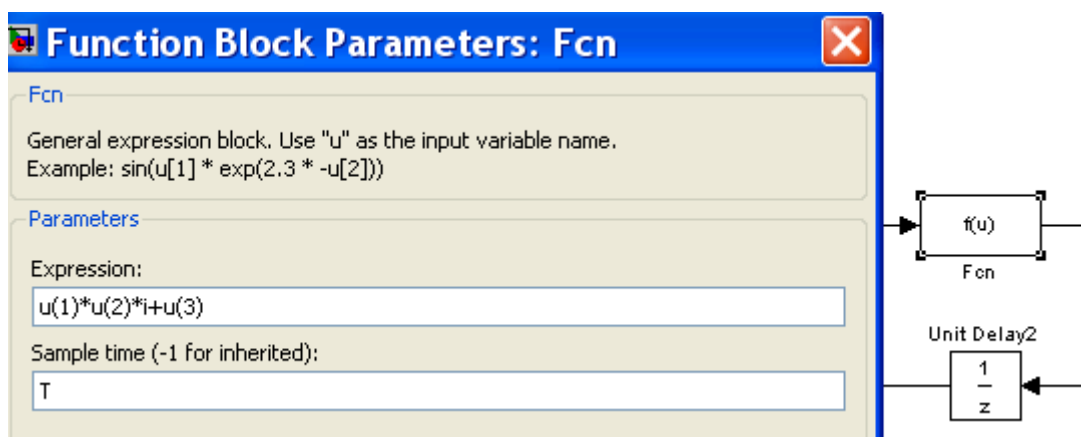


Figura 3.15. Modificación del campo “*Expression*” del bloque “*Fcn*”.

La última operación a efectuar para el buen funcionamiento del algoritmo MPPT es eliminar el bloque de saturación, ya que en este caso la salida no está limitada a los valores del ciclo de trabajo (0,1).

En la figura 3.16 se muestra un detalle de la conexión del bloque que implementa el algoritmo de Perturbación y Observación a la entrada de referencia del bloque de control.

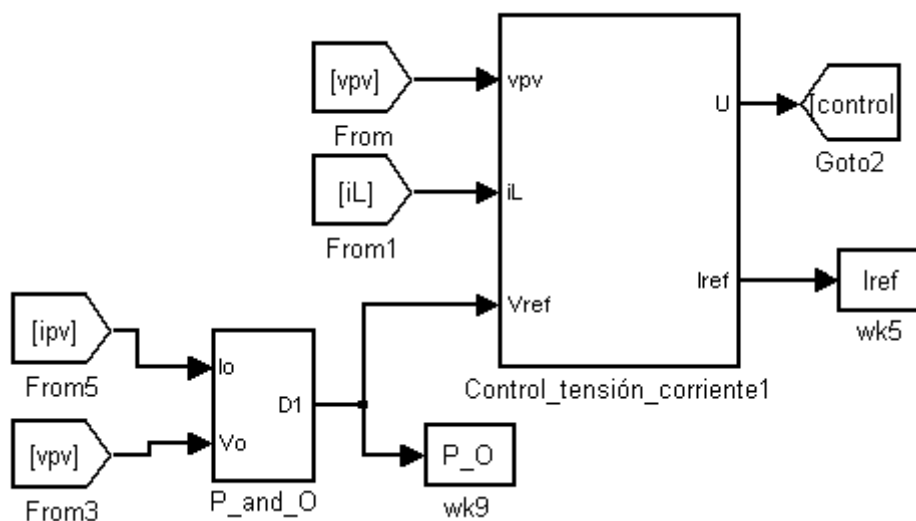


Figura 3.16 Conexión del subsistema P_and_O a la entrada de referencia del bloque de control

P3.4: Justificar la expresión (3.13)-(3.14).

P3.5: Simular el funcionamiento del sistema fotovoltaico con el algoritmo de Perturbación y Observación con los siguientes valores de parámetros: condiciones iniciales: $cond=400$, incremento $i=1$ y a periodo de muestreo $T=0.2$. Ajustar el tiempo de simulación a 20s y el paso de simulación: 0.1ms.

En la figura 3.17 se muestra la gráfica de la irradiancia variable que se utiliza para simular el funcionamiento del sistema fotovoltaico.

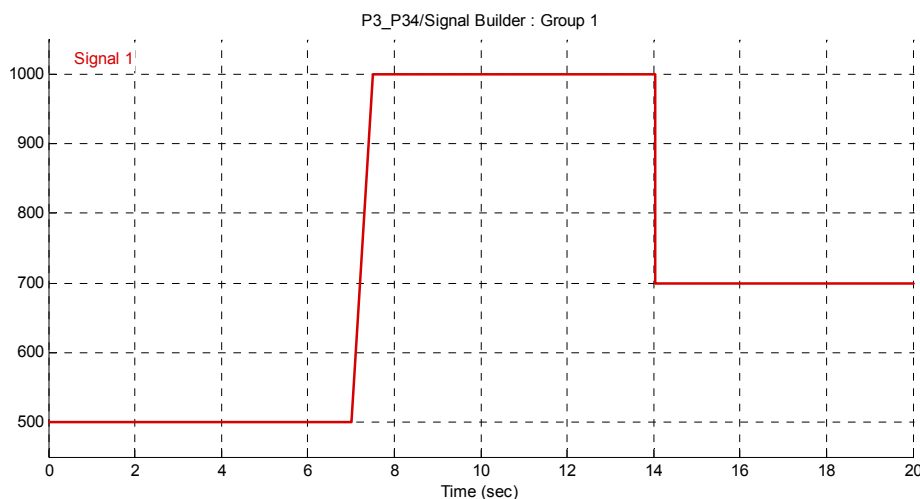


Figura 3.17 Forma de onda de la irradiancia utilizada en la simulación

Representar gráficamente la tensión de salida del panel solar, la tensión de referencia y la potencia de salida del panel solar.

Representar en una misma figura las tres curvas P-V del panel fotovoltaico para valores de irradiancia constantes de 500, 700 y 1000W/m² siguiendo el procedimiento seguido en la práctica 1 y utilizando un paso de simulación de 1e-4s y tiempo de simulación de 60s. Añadir a esta figura la curva P-V obtenida en esta simulación.

P3.6: Repetir el apartado P3.5 utilizando en este caso el algoritmo de conductancia incremental.

P3.7: Realizar simulaciones del sistema fotovoltaico utilizando el algoritmo de Perturbación y Observación y variando el valor del parámetro “Periodo”. Utilizar como en los casos anteriores un tiempo de simulación de 20s, un paso de simulación de 0.1ms y la irradiancia de la figura 3.17. Representar en una misma figura la potencia de salida del panel fotovoltaico para diferentes valores del parámetro “periodo”: 1.5, 0.7, 0.2, 0.02. Representar, igualmente en una misma figura, la tensión de salida del panel solar para las cuatro simulaciones realizadas.

Comentar los resultados obtenidos explicando como influye la variación de este parámetro en la potencia y tensión de salida del panel para los distintos valores de irradiancia.

P3.8: Realizar simulaciones del sistema fotovoltaico utilizando el algoritmo de Perturbación y Observación y variando el valor del parámetro “incremento”, manteniendo el valor del parámetro “Periodo” =0.2. Utilizar como en los casos anteriores un tiempo de simulación de 20s, un paso de simulación de 0.1ms y la irradiancia de la figura 3.17. Representar en una misma figura la potencia de salida del panel fotovoltaico para diferentes valores del parámetro “Incremento”: 2, 1 y 0.5. Representar, igualmente en una misma figura, la tensión de salida del panel solar para las tres simulaciones realizadas.

Comentar los resultados obtenidos explicando como influye la variación de este parámetro en la potencia y tensión de salida del panel para los distintos valores de irradiancia.

PRACTICA 4: Aplicación de sistemas fotovoltaicos conectados a red

Objetivos de la práctica

- Conocer aplicaciones prácticas de los sistemas fotovoltaicos de potencia.

Informe

- El informe de la práctica deberá incluir el resultado del trabajo de simulación pedido en los puntos P4.x con $x = 1, 2, 3, 4$ y 5 .
- En la corrección del informe se prestará especial atención a los siguientes aspectos:
 - Comentario y conclusiones sobre los resultados obtenidos en las simulaciones.
 - Resultados numéricos solicitados en el enunciado y gráficos de la señales mas representativas de las simulaciones efectuadas

4.1 Introducción

En esta práctica se añadirá un sistema de alimentación de cargas DC al sistema fotovoltaico estudiado en la práctica 3. El sistema de alimentación de cargas DC está compuesto por un convertidor Buck DC/DC cuya entrada se conecta a la salida del panel fotovoltaico y a cuya salida se ha conectado una carga DC resistiva.

En la figura 4.1 se muestra el esquema completo que incorpora, junto al Inversor DC-AC, el convertidor Buck DC-DC.

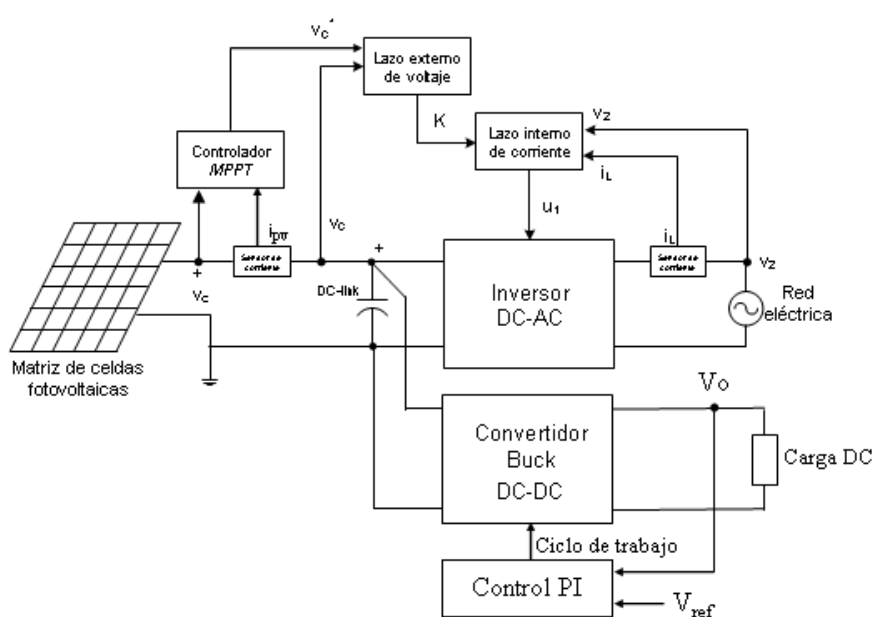


Figura 4.1 Sistema fotovoltaico con conexión a red eléctrica y carga DC

En el apartado 4.2 se diseña y simula el sistema de carga de batería que incorpora un convertidor Buck cuya función es la carga de la batería a tensión constante o corriente constante. En el apartado 4.4 se conectan ambas cargas al sistema fotovoltaico de potencia simulado en la práctica 3 y se comprueba su funcionamiento por simulación.

4.2 Modelo Simulink del condensador de entrada

Antes de introducir el conversor Buck DC-DC se debe modificar el modelo del condensador colocado a la salida del panel fotovoltaico (ver figura 4.1). Inicialmente el condensador estaba incluido dentro del modelo Simulink del convertidor Full-Bridge (ver figura 3.3), siendo la corriente que circula por él:

$$I_C = i_{pv} - i_{AC} \tag{4.1}$$

donde i_{pv} es la corriente de salida del panel fotovoltaico e i_{AC} es la corriente de entrada del inversor DC-AC.

Al conectar la entrada del convertidor Buck DC-DC al condensador (ver figura 4.1) se modifica la ecuación de corriente (4.1), de forma que ahora la corriente que circula por el condensador será la diferencia entre la corriente de salida del panel fotovoltaico y la suma de la corriente que se deriva al inversor DC-AC más la corriente que se deriva al convertidor Buck DC-DC:

$$I_C = i_{pv} - i_{AC} - i_{DC} \tag{4.2}$$

donde i_{DC} es la corriente de entrada del convertidor Buck DC-DC. Por otra, la tensión en el condensador viene dada por:

$$V_C = \frac{1}{C} \int (i_{pv} - i_{AC} - i_{DC}) dt \tag{4.3}$$

Para incluir esta modificación en el modelo Simulink del sistema fotovoltaico se ha extraído el condensador del modelo del inversor DC-AC. Este modelo incluye una nueva salida “ i_{AC} ” que se corresponde con la corriente de entrada del inversor DC-AC. El resultado se muestra en la figura 4.2.

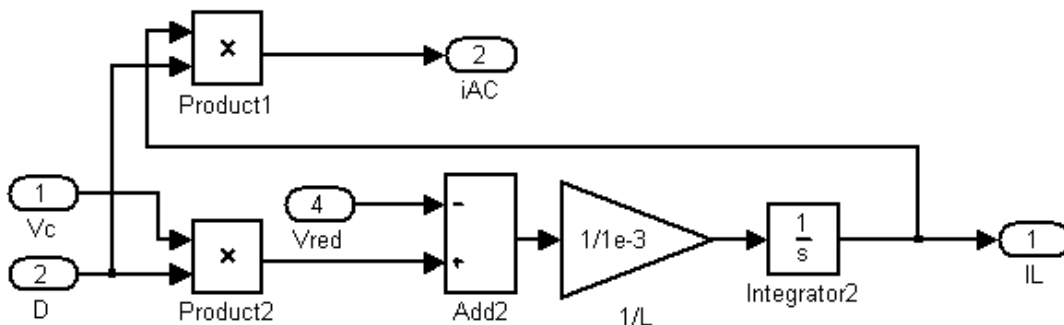


Figura 4.2 Modelo Simulink del inversor DC-AC sin el condensador de entrada

Por otra parte, se ha creado un modelo del condensador basado en la expresión (4.3) que tiene como entradas la corriente de salida del panel fotovoltaico, la corriente de entrada del inversor DC-AC y la corriente de entrada del convertidor DC-DC, siendo la salida la tensión en el condensador.

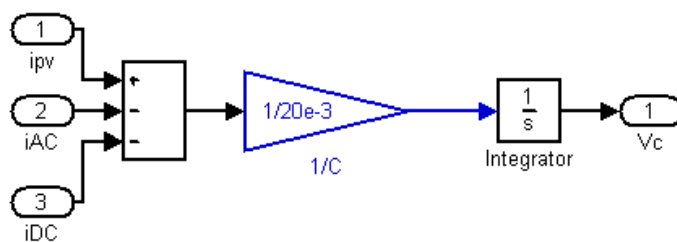


Figura 4.3 Modelo Simulink del condensador

4.3 Modelo del inversor DC-AC con carga alterna

Al inversor DC-AC mostrado en la figura 3.1 se le añade una carga alterna a la salida, de forma que no solo va a inyectar corriente a la red eléctrica sino que va a suministrar corriente a la carga alterna conectada a su salida. En la figura 4.4 se muestra el esquema eléctrico del inversor DC-AC con la carga alterna a la salida.

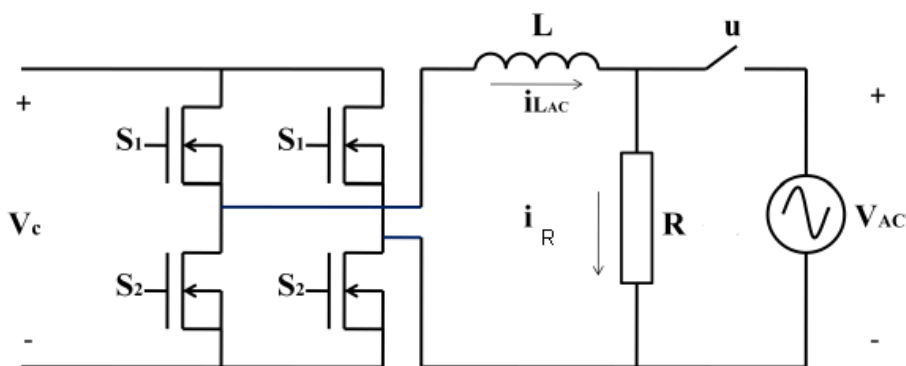


Figura 4.4. Inversor DC-AC con carga alterna a la salida

Para incluir la carga alterna en el modelo Simulink de la figura 4.2 bastará con añadir un bloque que simule el consumo de corriente i_R de la carga alterna (ver figura 4.5).

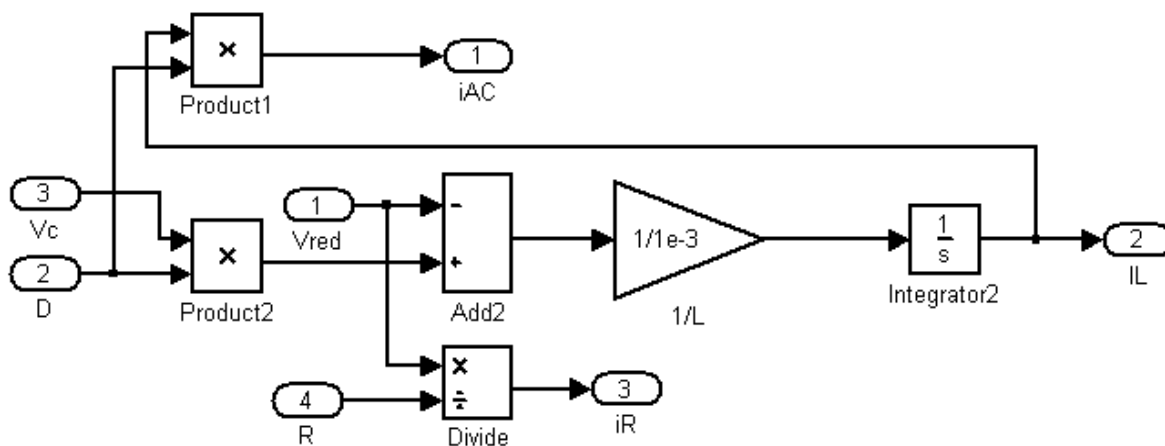


Figura 4.5 Modelo Simulink del inversor DC-AC con carga alterna a la salida

4.4 Modelo del convertidor Buck DC-DC con carga DC

En la figura 4.6 se muestra el esquema eléctrico del convertidor Buck DC-DC.

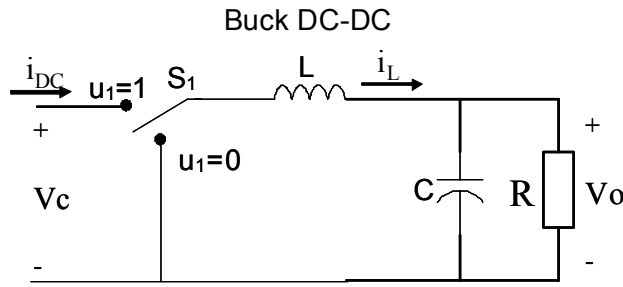


Figura 4.6 Esquema eléctrico del convertidor Buck con carga resistiva a la salida

Teniendo en cuenta que u_1 representa la señal de control del interruptor S_1 , el sistema de la figura 4.6 se puede describir por medio de las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_C \cdot u_1 - V_o}{L} \\ \frac{dV_o}{dt} &= \frac{i_L - \left(\frac{V_o}{R}\right) \cdot u_1}{C} \end{aligned} \tag{4.4}$$

donde $u_1 \in [0, 1]$.

En la figura 4.7 se muestra el modelo Simulink obtenido a partir de la expresión (4.4).

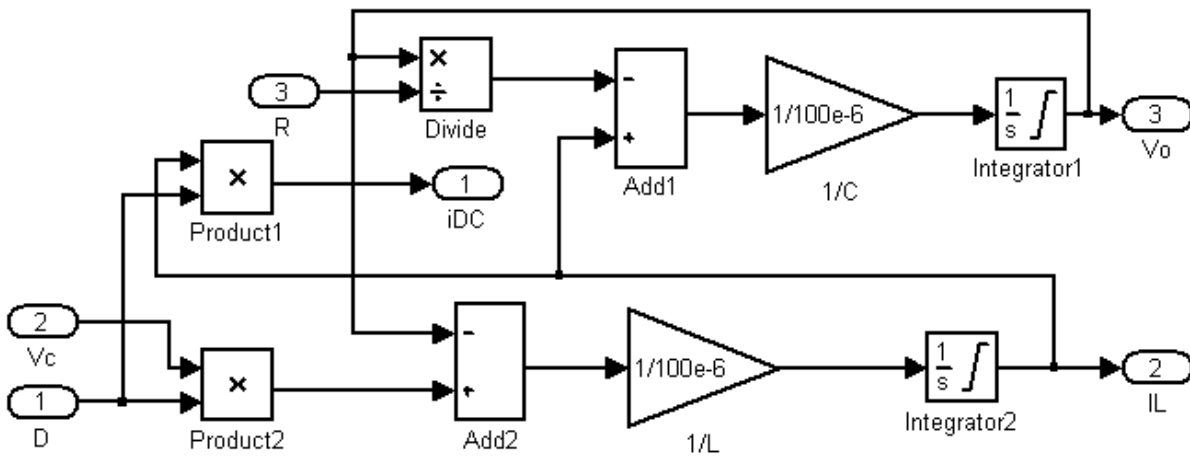


Figura 4.7 Modelo Simulink del convertidor Buck DC-DC.

El valor de los parámetros del convertidor Buck son: $C=100\mu\text{F}$, $L=100\mu\text{H}$. La tensión inicial en el condensador se debe fijar a 200V, para ello se abre la ventana de diálogo del bloque integrador y se ajusta el campo “Initial condition” con el valor 200.

Para conseguir la regulación de la tensión de salida del convertidor Buck se utiliza un control proporcional integral (PI):

$$d = k_p (V_{ref} - V_o) + k_i \int (V_{ref} - V_o) \tag{4.5}$$

donde “ d ” es el ciclo de trabajo que se aplica al convertidor Buck, V_{ref} es la tensión de referencia y V_o es la tensión de salida. Los valores de las constantes proporcional e integral son: $k_p=0.001$, $k_i=0.1$. En la figura 4.8 se muestra el modelo Simulink del control PI. En el bloque integrador del control PI se debe activar la opción “Limit output”, ajustando el parámetro “Upper saturation limit” =1. En el bloque “Saturation” se debe ajustar los parámetros “Upper limit”=1 y “Lower limit”=0.

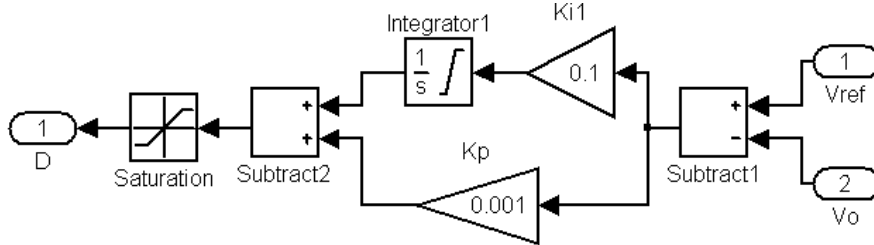


Figura 4.8 Modelo Simulink del control PI.

En la figura 4.9 se muestra el modelo completo del sistema fotovoltaico que incorpora el panel fotovoltaico, el condensador el inversor DC-AC junto con el algoritmo MPPT de Perturbación y Observación y el convertidor DC-DC junto con el control PI.

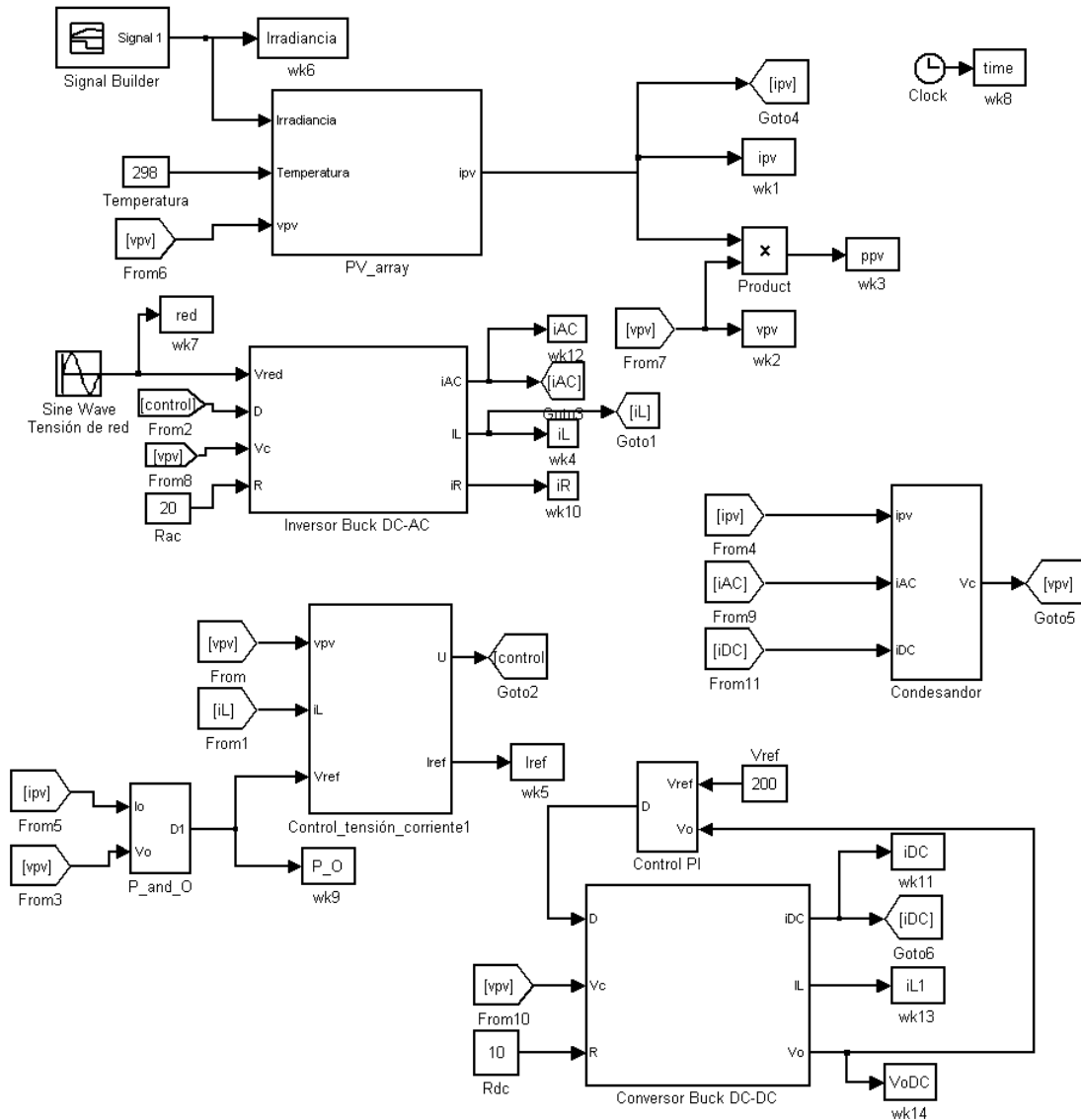


Figura 4.9. Modelo Simulink del sistema fotovoltaico con conexión a red, seguimiento de MPP y carga DC

P4.1: Simular el funcionamiento del circuito de la figura 4.9 con un paso de simulación de $1e-4s$ y tiempo de simulación de 20s, con los mismos parámetros de panel fotovoltaico que los utilizados en la práctica 3, con la irradiancia variable de la figura 3.17 y los siguientes parámetros del algoritmo de Perturbación y Observación: condición inicial=400, incremento=1 y periodo=0.2. Ajustar los siguientes valores de las resistencias de carga: $R_{AC}=20\Omega$ y $R_{DC}=10\Omega$.

Calcular la potencia consumida por la carga DC (P_{DC}) y la potencia consumida por la carga alterna (P_{AC}), así como la potencia total consumida por ambas cargas $P_T = P_{DC} + P_{AC}$.

Representar la potencia suministrada por el panel fotovoltaico en función del tiempo y comentar detalladamente si el panel fotovoltaico es capaz de suministrar en todo momento la potencia suficiente para hacer frente a las demandas de la carga. Determinar el intervalo o intervalos temporales en los que las cargas disipan más potencia que la suministrada por el panel fotovoltaico.

Representar en una misma figura la corriente consumida por la carga alterna y la corriente entregada o recibida por la red eléctrica. Comprobar como en los intervalos temporales en que las cargas disipan más potencia que la suministrada por el panel fotovoltaico, la red eléctrica suministra la corriente suplementaria necesaria para satisfacer las demandas energéticas de la carga alterna.

P4.2: En este apartado se va a simular el comportamiento del sistema fotovoltaico para variaciones de la carga DC y la carga AC siendo el nivel de irradiancia constante e igual a $1000W/m^2$ y la temperatura de 298 Kelvins.

Para simular las resistencias variables se utiliza el bloque “*Signal Builder*”. En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran la evolución de la carga DC y AC respectivamente que se deben utilizar en la simulación.

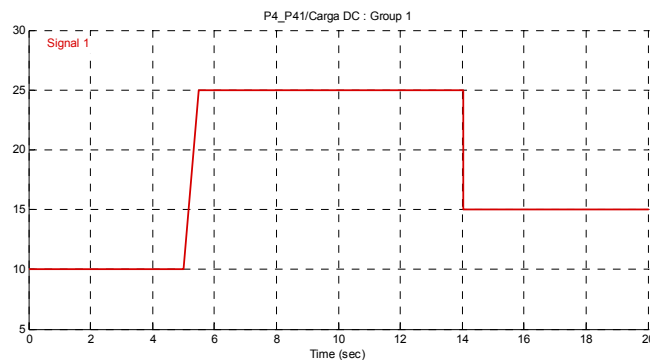


Figura 4.10 Evolución de la carga DC.

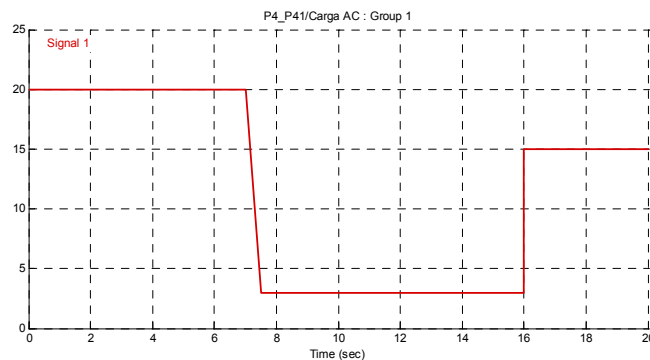


Figura 4.11 Evolución de la carga AC..

Determinar la potencia máxima que se extrae del panel fotovoltaico para estas condiciones de irradiancia y temperatura.

Calcular la potencia consumida por la carga DC y la carga AC para los intervalos temporales en los que se produce algún cambio en las cargas: $0 \leq t \leq 5s$, $5.5 \leq t \leq 7s$, $7.5 \leq t \leq 14s$, $14 \leq t \leq 16s$, $16 \leq t \leq 20s$,

Incluir en el informe una tabla con los valores calculados de P_{DC} y P_{AC} junto con la potencia total $P_T = P_{DC} + P_{AC}$ y comparar dichos valores con la potencia generada por el panel fotovoltaico.

Representar gráficamente la corriente suministrada por el panel fotovoltaico, la corriente consumida por la carga DC y la corriente consumida por la carga AC.

Representar en una misma figura la corriente de la carga AC y la corriente que se deriva o extrae de la red eléctrica. Comprobar (realizando “zoom” si es necesario) como la corriente inyectada en red es positiva cuando se cumple $P_{pv} > P_T$ y que es negativa cuando $P_{pv} < P_T$.

4.5 Desconexión de la red eléctrica

Para aumentar las prestaciones de la instalación fotovoltaica se va a incorporar un sistema que permite la desconexión voluntaria del inversor DC-AC de la red eléctrica.

Para que ello se debe modificar y ampliar convenientemente el bloque que controla el funcionamiento del Inversor DC-AC. Eso es debido a que cuando el sistema esta desconectado de la red cambian los objetivos que debe cumplir el control. En efecto, cuando el sistema fotovoltaico está conectado a la red los objetivos de control son: extraer la máxima potencia del panel fotovoltaico e inyectar la energía sobrante en la red eléctrica en forma de corriente en fase con la tensión de red. El algoritmo de seguimiento de MPP junto con los lazos de tensión y corriente se encargan de cumplir estos objetivos. En cambio, cuando el sistema fotovoltaico no está conectado a la red eléctrica los objetivos del control cambian: se debe generar una tensión alterna de salida de 50Hz de frecuencia y 320V de amplitud que alimente convenientemente la carga AC y no es posible que el panel trabaje en el punto MPP; simplemente debe trabajar en un punto de potencia igual al consumo total de las cargas DC y AC, por lo que se debe deshabilitar el algoritmo de MPPT.

Para conseguir cumplir estos nuevos objetivos de control se debe modificar el sistema de control de la figura 3.7 incorporando un control PI que realiza el seguimiento de una tensión AC de parámetros similares a los de la red eléctrica y que funciona en caso de que desconectemos la salida del inversor de la red eléctrica. En el bloque integrador del control PI se debe activar la opción “*Limit output*”, ajustando el parámetro “*Upper saturation limit*” =1. La señal de desconexión se denomina “Desc”. En la figura 4.12 se muestra el sistema de control modificado.

El único componente nuevo que aparece en el modelo es un bloque “*Switch*” que se encuentra en la carpeta “*Commonly Used Blocks*” de *Simulink*. Este componente actúa de conmutador conectando la salida a la entrada 1 o 3 dependiendo de si el valor que se aplica en la entrada 2 es mayor o menor a un valor umbral que se corresponde con el parámetro “*Threshold*”. Para ajustar el valor de este parámetro basta hacer doble clic en el componente “*Switch*” y colocar el valor deseado en la ventana de diálogo que aparece. Para este caso se ajusta el umbral al valor “0”. De esta forma si en

la entrada 1 del “Switch” ponemos, por ejemplo, un 1 seleccionamos la entrada 1 y si ponemos un -1 seleccionamos la entrada 3.

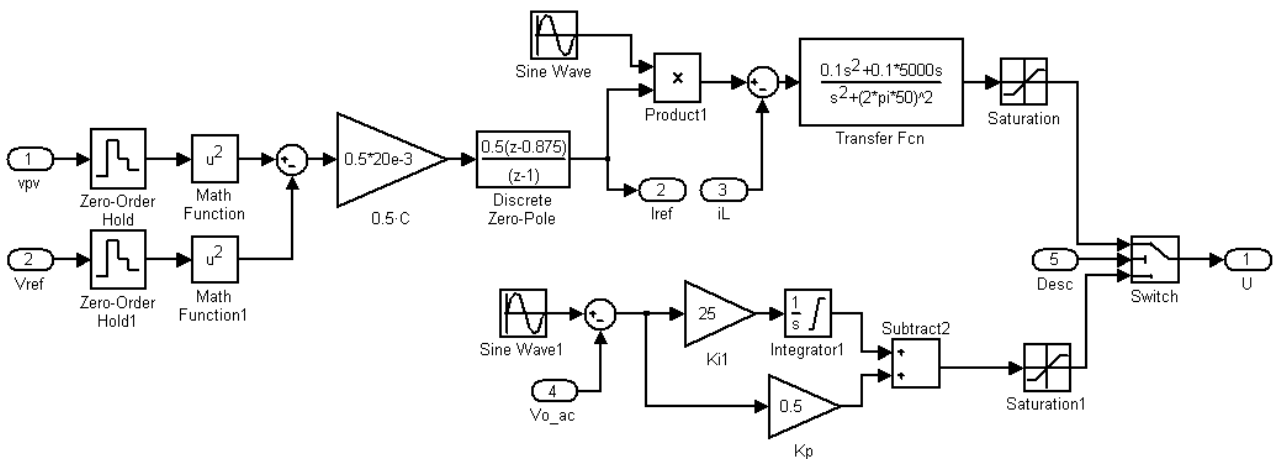


Figura 4.12 Sistema de control del Inversor DC-AC

También será necesario modificar convenientemente el modelo del inversor DC-AC de la figura 4.2 para incorporar el sistema de desconexión-conexión a la red eléctrica. En la figura 4.13 aparece el modelo del inversor a implementar.

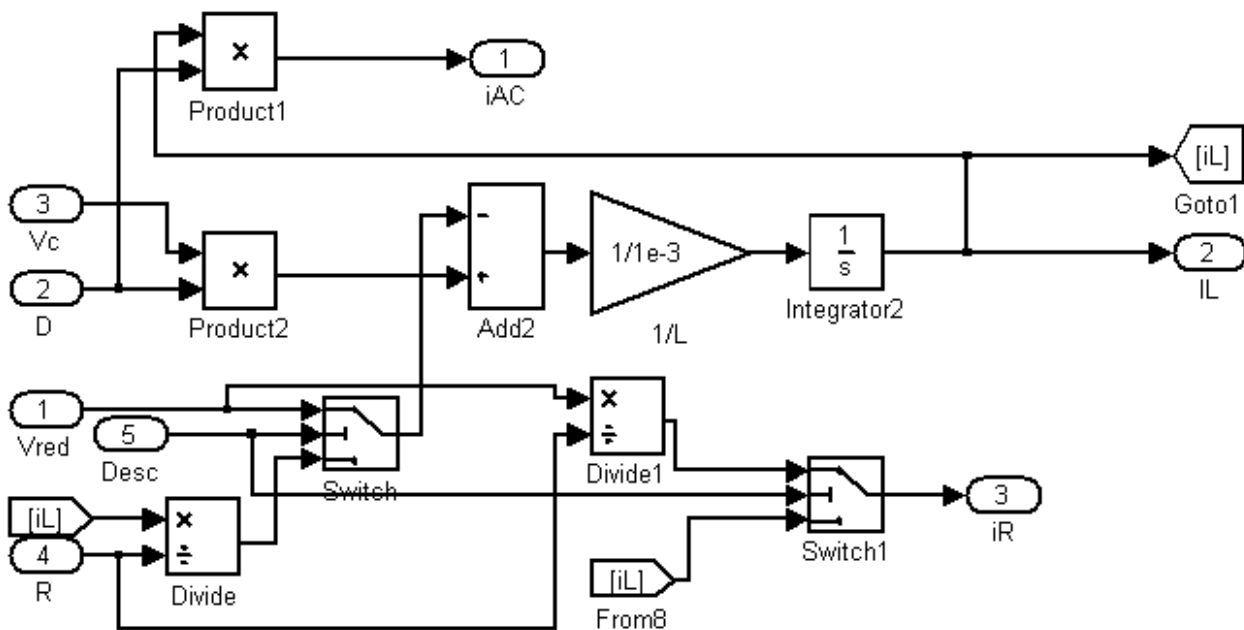


Figura 4.13 Modelo Simulink del inversor DC-AC con carga alterna a la salida y sistema de desconexión de la red eléctrica

En la figura 4.14 se muestra como queda finalmente el modelo del sistema fotovoltaico completo.

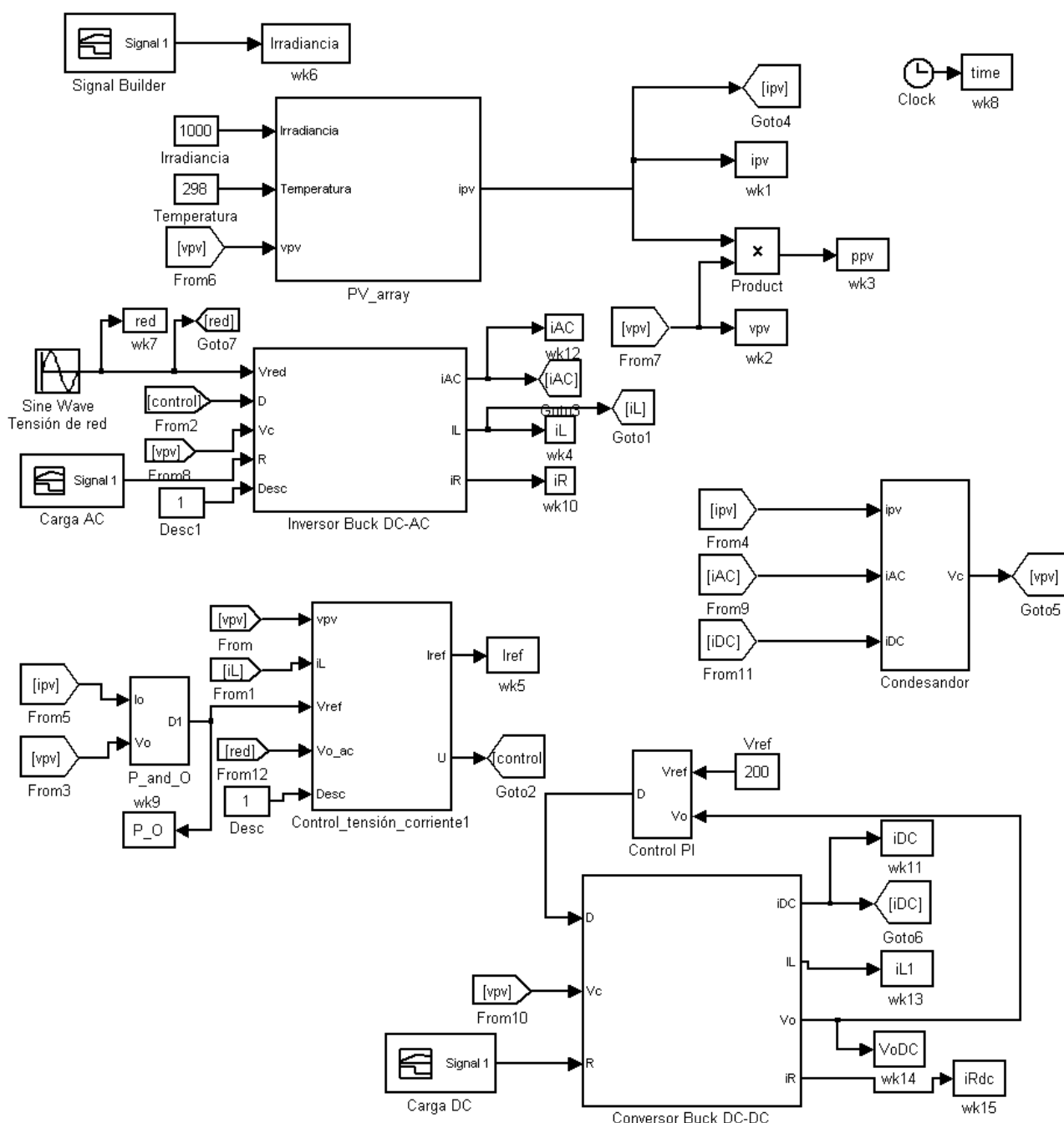


Figura 4.14 Modelo Simulink del sistema fotovoltaico modificado

P4.3: Simular el funcionamiento del modelo de sistema fotovoltaico de la figura 4.14 con un paso de simulación de $1e-6s$ y tiempo de simulación de $1s$, con los mismos parámetros de panel fotovoltaico que los utilizados en la práctica 3 y con la irradiancia fija de $1000W/m^2$. Ajustar a -1 el valor de la señal “Desc” de forma que la salida del inversor DC-AC quede desconectada de la red eléctrica. Seleccionar los siguientes valores de las resistencias de carga: $R_{AC}=20\Omega$ y $R_{DC}=10\Omega$.

Determinar la potencia total consumida por las cargas y compararla con la potencia extraída del panel fotovoltaico. ¿El panel fotovoltaico trabaja en el MPP? Representar la potencia en función del tiempo y en función de la tensión. Comentar ambas figuras.

P4.4: Cambiar la resistencia de carga alterna fija por una variable como se muestra en la figura 4.15. En este caso la carga R_{AC} vale 20Ω entre 0 y 0.5s, vale 3Ω para $0.5 \leq t \leq 1s$ y finalmente vale 20Ω para $1 \leq t \leq 3$. Simular el funcionamiento del sistema fotovoltaico con los mismos ajustes que el punto P4.3 pero con la carga R_{AC} variable.

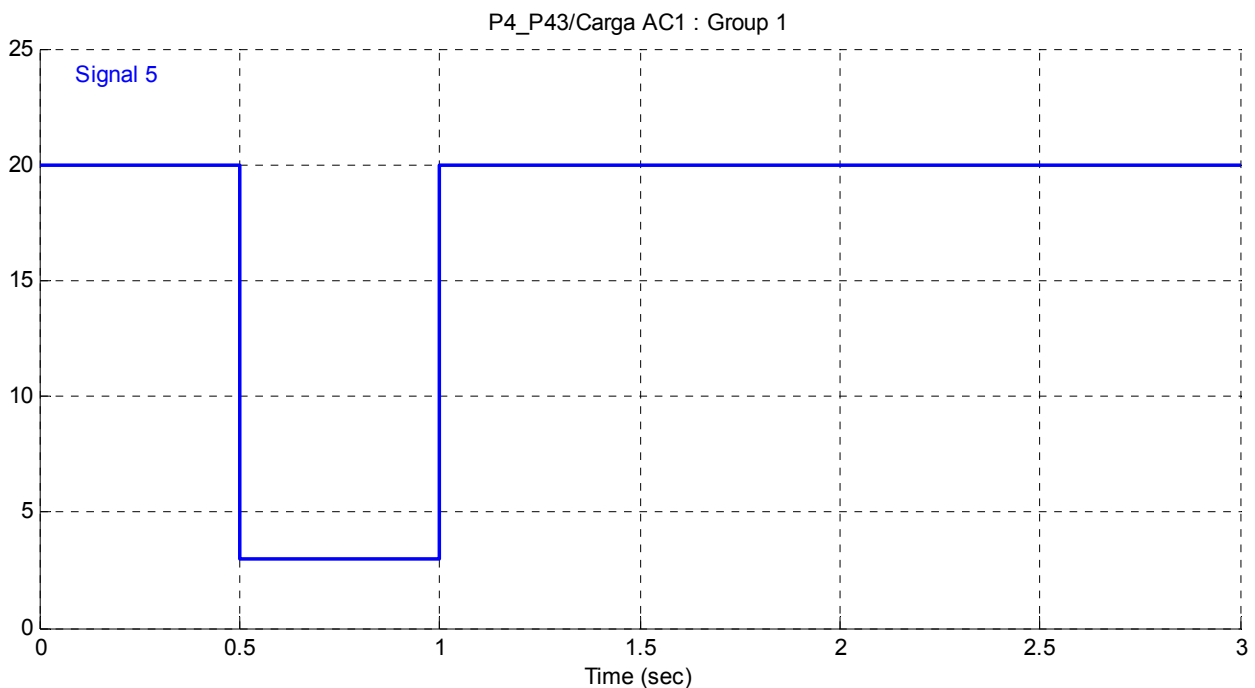


Figura 4.15 Variación de la carga R_{AC}

Calcular la potencia total consumida teóricamente por las cargas en los intervalos $0 \leq t \leq 0.5s$ y $0.5 \leq t \leq 1s$. Determinar si el panel fotovoltaico es capaz de suministrar la potencia que teóricamente consumen las cargas.

Representar la potencia de salida del panel fotovoltaico en función del tiempo. Comentar la figura.

Representar en una misma figura la tensión y corriente de salida del panel fotovoltaico en función del tiempo. Comentar la figura.

Determinar cuál es el punto de trabajo (i_{pv} , v_{pv} y ppv) del panel fotovoltaico para $t=1s$.

Representar gráficamente la tensión de salida del inversor DC-AC junto con la tensión de salida del panel fotovoltaico. Calcular cuál la potencia real que consume la carga R_{AC} . Explicar porque la tensión de salida del inversor DC-AC para $t=1s$ no se corresponde con la señal de red.

Representar gráficamente la tensión de salida del convertor DC-DC junto con la tensión de salida del panel fotovoltaico. Calcular cuál es la potencia real que consume la carga R_{DC} . Explicar porque la tensión de salida del convertor DC-DC para $t=1s$ no se corresponde con la señal de referencia de 200V.

P4.5: En este apartado se va a simular la desconexión del sistema fotovoltaico de la red eléctrica. Para ello se sustituye en el modelo de la figura 4.14 el bloque “constant”, cuyo valor de 1 o -1 controla la conexión o desconexión de la red eléctrica, por el bloque “step” que se encuentra en el apartado “sources” de la librería de Simulink. Se debe ajustar tres parámetros de este bloque: “Initial value” = 1, “Final value” = -1 y “Step time” = 1. De esta forma este bloque genera

inicialmente un valor 1, con lo que el sistema fotovoltaico está conectado a la red eléctrica. A continuación para $t = 1s$, la salida pasa a -1 lo que provoca una desconexión de la red eléctrica. Seleccionar los siguientes valores de las resistencias de carga: $R_{AC}=20\Omega$ y $R_{DC}=10\Omega$. Ajustar el nivel de irradiancia a $1000W/m^2$.

Simular el circuito con los siguientes parámetros de simulación: “*Stop time*” de 2 segundos.

Representar en una misma figura la corriente de salida consumida por la carga continua, la corriente de salida consumida por la carga alterna, la corriente de salida del panel fotovoltaico y la corriente inyectada en la carga. Explicar razonadamente qué ocurre con la corriente de salida del panel fotovoltaico después de la desconexión de la red eléctrica.

Representar la curva característica P-V del panel y la potencia de salida del panel en función del tiempo. Determinar cual es la potencia máxima del panel cuando está conectado a la red eléctrica y cual es la potencia final para $t=2s$ una vez se desconecta de la red eléctrica. ¿A qué es debido esta diferencia de potencia entregada por el panel fotovoltaico?