



PROYECTO FINAL DE CARRERA

MEMORIA

TITULO: ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE
GENERACIÓN FOTOVOLTAICA UTILIZANDO
MATLAB/SIMULINK

AUTOR: ALVARO CASTAÑO VICENTE-GELLA

DIRECTOR: FERNANDO IBÁÑEZ ESCOBAR

TITULACIÓN: INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO: INGENERÍA ELECTRÓNICA

FECHA Y LUGAR: JUNIO 2010, VALENCIA

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE
MATLAB/SIMULINK

TÍTULO: ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE GENERACIÓN
FOTOVOLTAICA UTILIZANDO MATLAB/SIMULINK

APELLIDOS: CASTAÑO VICENTE-GELLA **NOMBRE:** ALVARO
TITULACIÓN: INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD: ELÉCTRÓNICA INDUSTRIAL **PLAN:** 1998

DIRECTOR: FERNANDO IBÁÑEZ ESCOBAR
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CALIFICACIÓN DEL PFC

Índice general

1. Objeto del proyecto.	6
1.1 Agrupación fotovoltaica.	7
2. Estudio de necesidades, factores a considerar: limitaciones y condicionantes.	11
2.1 Modelado de la célula fotovoltaica.	11
2.2 Circuito real e ideal de una célula solar y curva de MPP.	12
3. Planteamiento de posibles soluciones.	17
4. Justificación de la solución adoptada.	18
5. Descripción detallada de la solución adoptada.	18
5.1. Creación del modelo de la célula solar en Matlab/Simulink.	18
5.2. Simulación del modelo de una célula fotovoltaica.	22
5.3. Módulos fotovoltaicos.	25
5.4. Simulación de un módulo fotovoltaico completo.	26
5.4.1. Comportamiento frente a incrementos en la irradiancia G.	29
5.4.2. Comportamiento frente a descensos en la irradiancia G.	32
5.4.3. Comportamiento frente a aumentos en la temperatura.	33
6. Algoritmo de máxima potencia (MPPT).	36
6.1 Obtención del valor de tensión máxima V_{max} .	37

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE
MATLAB/SIMULINK

6.2 Construcción del modelo en simulink.	38
6.3 Algoritmo MPPT mejorado.	41
7. Construcción de un modelo de inversor monofásico para conexión del sistema a la red eléctrica.	43
7.1. Posibles soluciones para implementar un inversor monofásico.	43
7.2 Justificación de la solución final y descripción detallada de la misma.	44
7.3 Creación del modelo en simulink.	45
8. Características del campo fotovoltaico presente en la upv.	47
9. Ampliación del modelo y formas de onda de potencia inyectada a la red.	48
9.1. Formas de onda de tensión, corriente y potencia a la salida del inversor.	49
9.2. Ampliación del modelo para calcular la potencia media entregada anualmente a la red eléctrica.	51
9.2.1. Creación de una tabla con los valores de G y T.	51
9.2.2. Entrada y salida del bloque diseñado.	52
9.3. Simulación completa de la energía anual obtenida introduciendo los valores de G y T de cada mes del año.	53
9.4. Factores limitantes de la potencia obtenida por el campo fotovoltaico.	58

9.5 Diseño del bloque para calcular limitaciones de potencia del sistema.	60
10. Justificación detallada de los componentes de la solución adoptada.	65
11. Conclusiones.	65
12. Bibliografía.	66

1. Objeto del proyecto.

El presente proyecto final de carrera tiene por objeto la implementación de una simulación de un sistema fotovoltaico real que en nuestro caso será el instalado en la upv o universidad politécnica de Valencia cuyas características se expondrán en apartados posteriores y estudiar las diferentes posibilidades de modelización de los elementos que aparecen en el modelo.

A continuación se expone una pequeña introducción acerca de las células solares existentes en el mercado y cuáles son sus características de funcionamiento.

La energía solar fotovoltaica es una energía limpia y renovable, con una larga vida útil y una alta fiabilidad. A pesar de ello, el aporte energético producido mundialmente está muy por debajo del resto de fuentes de energía. Sin embargo, debido al progreso tecnológico y al compromiso medioambiental de los países desarrollados, se pronostica un rápido y significativo crecimiento de su aportación energética. Los sistemas fotovoltaicos están formados por un conjunto de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos cuya funcionalidad principal es captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica útil. Estos sistemas se pueden dividir en dos categorías: sistemas autónomos o aislados y sistemas conectados a la red eléctrica. A lo largo del proyecto se ha desarrollado el modelado de ambos sistemas, con especial énfasis en los sistemas conectados a red eléctrica. La finalidad del proyecto es permitir el aprendizaje de las características y funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, tanto autónomos como conectados a red eléctrica, mediante programas diseñados en Matlab/Simulink. El desarrollo del proyecto está estructurado en diversos capítulos, dónde se parte de la unidad más pequeña, la célula fotovoltaica, hasta concluir con un sistema completo fotovoltaico.

Este primer capítulo hace referencia a las características de funcionamiento de una célula y un panel fotovoltaico. Se inicia con una descripción de los tipos de celdas existentes en el mercado actual, para posteriormente profundizar en datos técnicos y cálculos que definen el comportamiento de las células fotovoltaicas. La realización de las experiencias permite corroborar el desarrollo teórico.

1.1 Agrupación fotovoltaica.

El primero de los bloques que conforman un sistema fotovoltaico es el panel solar y constituye la principal fuente de energía de una instalación fotovoltaica. Está formado por un conjunto de células solares asociadas entre ellas en serie y paralelo.

Una célula fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz solar en electricidad. La conversión se realiza mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico que consiste en generar una fuerza electromotriz cuando la superficie de la célula es expuesta a la irradiación solar. La tensión generada puede variar entre 0.3V y 0.7V en función de diferentes parámetros como el material utilizado en la fabricación, la temperatura admisible por la celda y el envejecimiento de ésta.

Habitualmente se utilizan células formadas por una unión P-N construidas en base de silicio monocristalino. Una celda fotovoltaica se fabrica con dos capas de silicio, una con dopado P (dopada de boro) y la otra con dopado N (dopada de fósforo), creando así la unión P-N.

Cuando los fotones son absorbidos por el semiconductor, transmiten su contenido energético a los átomos de la unión P-N de tal modo que los electrones de estos átomos se liberan y crean electrones (carga N) y huecos (carga P). Este fenómeno produce una diferencia de potencial entre ambas capas.

Las células fotovoltaicas se clasifican en tres grupos según el tipo de silicio que las componen:

Células de silicio policristalino: son aquellas obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni tampoco un crecimiento controlado en su red cristalina. Se les da el nombre de policristalinas porque en la solidificación no se hace en un solo cristal sino en múltiples.



Figura 1. Panel constituido por células de silicio policristalino

El primer rendimiento obtenido a finales de los 70, se situaba entre el 7% y el 8%; actualmente se ha logrado llevar a valores próximos al 12%, siendo posible en los procesos de fabricación refinados llegar a valores del 14%.

Una gran ventaja en la fabricación de células de silicio policristalino es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, lo que facilita enormemente la fabricación de paneles solares compactos sin posteriores mecanizaciones de célula.

Hay diferentes tipos de silicio policristalino atendiendo al tamaño de los cristales que lo compone, que generalmente en los más modernos es mucho más pequeño que en las células más antiguas, lo que da un aspecto más homogéneo a su superficie.

Células de silicio amorfo: La gran ventaja de la utilización del silicio amorfo para la fabricación de células fotovoltaicas es el espesor del material a utilizar, ya que puede llegar a ser 50 veces más finas que el equivalente fabricado en silicio monocristalino.

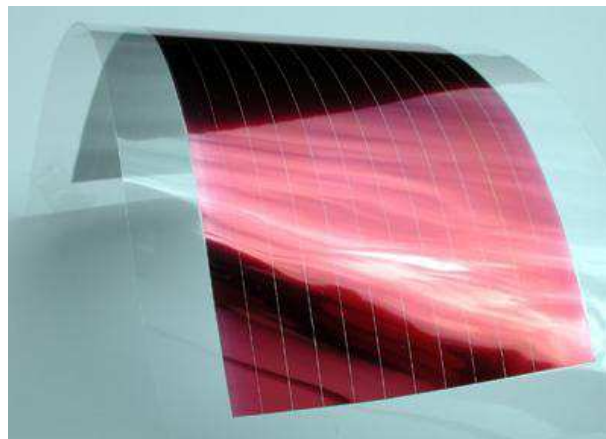


Figura 2. Lámina formada por células de silicio amorfo.

El silicio amorfo tiene unas propiedades totalmente diferentes al silicio cristalino. Por ejemplo, su elevada velocidad de recombinación producida por la gran cantidad de imperfecciones en la red cristalina, que crean núcleos activos para la recombinación. Este efecto se ve compensado en parte por la adición de hidrógeno que hace disminuir la velocidad de recombinación de los portadores. Este tipo de silicio presenta también un alto coeficiente de absorción, lo que permite la utilización de espesores de material activo muy pequeños.

Uno de los inconvenientes de la utilización de este tipo de células es la degradación que sufren al ser expuestas al sol después de un determinado tiempo de trabajo. Además, las células fotovoltaicas fabricadas con silicio amorfo son las de menor rendimiento del mercado, con una eficiencia del 8%.

El coste de fabricación de las células de silicio amorfo es mucho menor que el resto de tecnologías, por el poco material que se emplea y la facilidad de fabricación en masa. Una característica diferenciadora de las otras células solares es que se pueden fabricar de colores o incluso translúcidas, peculiaridades que le dan posibilidades de un uso más amplio.

Células de silicio monocristalino: son las más utilizadas en la actualidad debido a que gran parte de la industria perteneciente al silicio es la base de fabricación de todos los semiconductores (transistores, circuitos integrados y otros componentes activos electrónicos). Por otro lado, el silicio es el segundo material más abundante de la Tierra, después del oxígeno.

Un panel fotovoltaico común de silicio encontrado en la actualidad tiene la apariencia que se muestra a continuación:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK



Figura 3. Panel fotovoltaico formado por células de silicio monocristalino.

El proceso al cual ha de someterse el silicio para reunir las características apropiadas para realizar la conversión fotovoltaica conlleva un aumento del coste final de la célula fotovoltaica. El silicio no se encuentra en estado puro y existen ciertos elementos que son difíciles de eliminar. Además, se ha de fundir y permitir el crecimiento para formar el monocristal, lo cual provoca una inversión de tiempo y energía elevada. Otro aspecto importante es que, por el momento su uso está un poco limitado, no pudiéndose fabricar en grandes cantidades. La eficiencia de éste tipo de células oscila entre el 14% y el 18%, y son las de mayor rendimiento del mercado actual [4]. A lo largo del presente proyecto, se ha trabajado con modelos de células fotovoltaicas basadas en las características de las celdas de silicio monocristalino. En la figura 3 se puede observar la geometría típica de una célula solar sencilla utilizando tecnología basada en el silicio monocristalino.

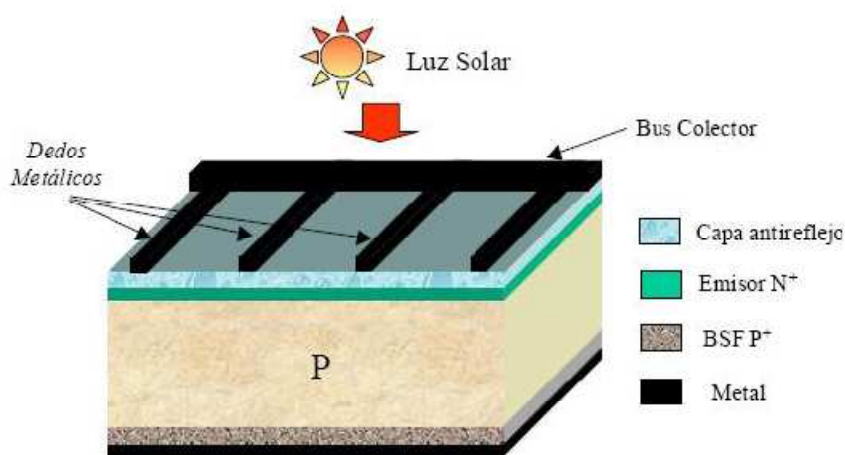


Figura 4. Esquema de una célula fotovoltaica de sodio monocristalino.

2. Estudio de necesidades, factores a considerar: limitaciones y condicionantes.

2.1 Modelado de una célula solar fotovoltaica.

La estructura básica del modelo de una celda o célula solar es semejante a la de un fotodiodo, en general de silicio, diseñada para maximizar la absorción de fotones procedentes de la luz y minimizar la reflexión. Cuando ésta recibe una luz incidente (LUX) se comporta como un generador de corriente inversa cuyo valor aumenta con la cantidad de luz que incide sobre él. Si estudiamos su comportamiento en detalle podemos ver que esta generación de corriente se expresa como la diferencia entre la corriente fotogenerada I_L debida a la generación de portadores en la iluminación incidente y la corriente del diodo I_d correspondiente a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo, entonces expresamos la corriente generada con la siguiente expresión:

$$I = I_L - I_d \quad (1)$$

La ecuación que describe correctamente la característica I-V de la mayoría de las células solares fotovoltaicas es la que sigue:

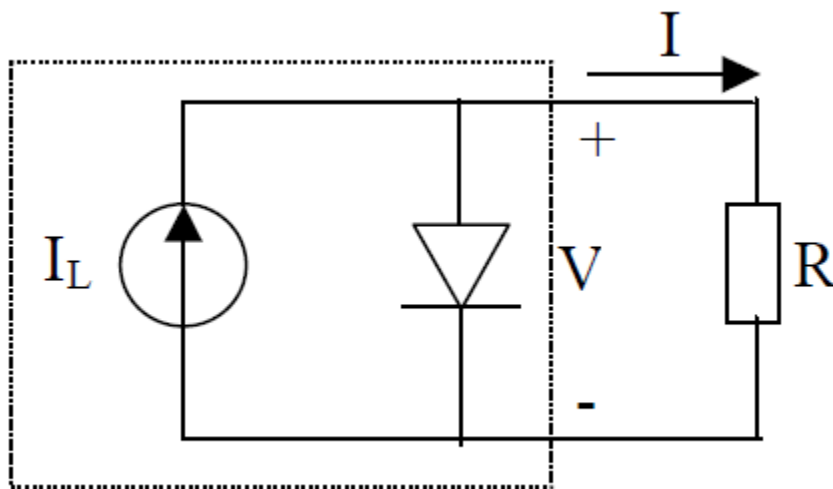
$$I = I_L - I_0 (e^{qV/nkT} - 1) \quad (2)$$

Donde:

- I_L es la corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico).
- I_d es la corriente en oscuridad por recombinación de portadores que produce el voltaje externo.
- q la carga del electrón.
- V la tensión eléctrica en bornes del diodo.
- k la constante de Boltzmann.
- n el factor de idealidad del diodo.
- T la temperatura absoluta en grados kelvin.

2.2 Circuito real e ideal de una célula solar y curva de máxima potencia MPP.

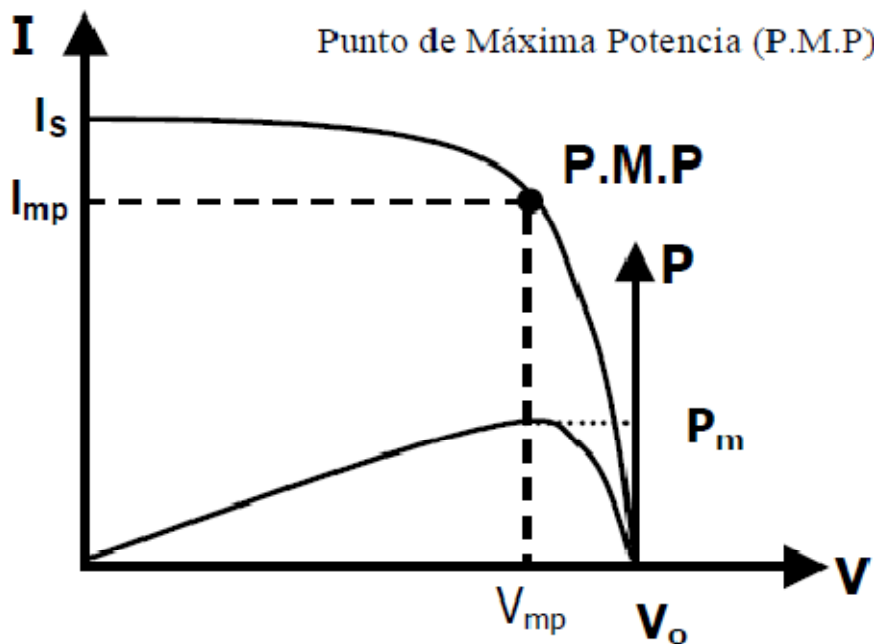
Para ilustrar mejor el comportamiento de la célula en cuanto a corriente y tensión entregadas a una carga utilizamos el circuito siguiente que representa el equivalente ideal de una célula fotovoltaica:



Lo interesante en este circuito equivalente es la entrega de potencia eléctrica a la carga R que tiene por valor:

$$P = V \cdot I = V \cdot I_L - V \cdot I_0 (e^{qV/nkT} - 1) \quad (3)$$

Para un valor determinado de la corriente fotovoltaica o corriente cedida por la célula y de tensión eléctrica V obtenemos el punto en el cual la potencia entregada a la carga será máxima conocido como punto de máxima potencia, el gráfico 2 muestra los datos anteriores representados.



Donde:

- P_m : valor máximo de potencia que puede entregar el dispositivo.
- I_{mp} : corriente a la máxima potencia.
- V_{mp} : tensión a la máxima potencia
- $V_o = V_{oc}$: tensión de cortocircuito.
- $I_s = I_{sc}$: corriente de cortocircuito.

Siempre interesa obtener el mayor rendimiento energético posible por lo que será importante trabajar en este punto siempre que sea posible, y para obtener las coordenadas V-I de dicho punto calcularemos $\frac{dP}{dV} = 0$ que es el procedimiento habitual para calcular máximos y mínimos de funciones, así obtenemos el valor de V_{mp} y sustituyendo este valor en la ecuación I-V obtenemos el correspondiente valor para I_{mp} .

Para describir mejor el punto de máxima potencia se define el factor de relleno o Fill Factor (FF). Este factor se define como el cociente entre la potencia máxima que la célula solar puede dar a la carga y la potencia teórica máxima definida por el punto (V_{oc} , I_{sc}):

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (4)$$

El valor máximo que puede adoptar el FF es 1, cuanto más próximo a 1 sea la característica I-V con iluminación se aproxima más al rectángulo de máxima potencia teórica y la célula es de mayor calidad.

Como en cualquier sistema generador de energía hay que calcular el rendimiento de la célula cuya expresión es la que sigue:

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{PL} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{G \cdot A} \quad (5)$$

Siempre se cumple que $V_{mp} < V_{oc}$ y que $I_{mp} < I_{sc}$.

PL es la potencia luminosa recibida por la célula, el producto GA. Un dato interesante es que un día soleado en el cenit se recibe una potencia luminosa de 1 kW por metro cuadrado aproximadamente. La eficiencia crece linealmente con el nivel de radiación y el tamaño de la celda, sin embargo, decrece linealmente con la temperatura de la célula. También puede expresarse como:

$$\eta = \frac{V_{pv} \cdot I_{pv}}{MPP} = \frac{P_{pv}}{MPP} \quad (6)$$

Donde:

- V_{pv} : Tensión generada por el panel fotovoltaico.
- I_{pv} : Corriente generada por el panel fotovoltaico.
- P_{pv} : Potencia generada por el panel fotovoltaico.
- MPP: Punto de máxima potencia.

El rendimiento de la célula viene limitado por distintos factores intrínsecos y de diseño. Estos son:

• **Energía de los fotones incidentes**: para generar los pares electrón-hueco es necesario que los fotones que llegan a la célula tengan una determinada energía. En la radiación solar, una parte de los fotones

incidentes no tiene esa energía por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde el exceso.

- **Pérdidas por recombinación:** el proceso de recombinación depende de los defectos de la estructura cristalina del semiconductor, cuanto más puro sea (silicio monocristalino), éstas pérdidas serán menores.
- **Resistencia serie:** La resistencia serie es una característica muy importante ya que disminuye el factor de forma y, por lo tanto, la eficiencia de la célula. Esa resistencia se debe a que los electrones generados en el semiconductor que alcanzan la zona “n” superficial, han de correr por la superficie hasta alcanzar una tira metálica de la rejilla. La resistencia serie es menor cuanto más profunda sea la zona “n” y cuanto mayor sea la superficie metálica de la rejilla, pero entonces la superficie del semiconductor sobre la que incide la luz solar es menor (mayor sombra) y el valor de la tensión a circuito abierto es también más pequeño, por lo que hay que buscar un compromiso a la hora del diseño de la célula. Esta resistencia además disipa energía por efecto Joule, al circular la corriente por ella, en forma de calor y que debe disipar la célula.
- **Pérdidas por reflexión parcial:** Parte de la luz que incide sobre la célula es reflejada por la superficie de esta, por lo que se pierde. Para evitar esta pérdida, en la fabricación de las células se emplean capas antirreflectantes y superficies rugosas.

La suma de todas estas pérdidas disminuye el rendimiento de la célula, lo que explica las diferencias que existen entre los rendimientos obtenidos en laboratorio y los de las células comerciales que resultan de los procesos industriales de fabricación.

Circuito equivalente modificado: la característica ideal de la célula solar que se ha descrito se ve alterada por la presencia de dos factores: la resistencia serie y la resistencia paralelo. Estas afectan al factor de forma y por tanto, la eficiencia de la célula.

La resistencia serie R_s es una resistencia interna de la célula y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor. La resistencia paralelo R_p o R_{sh} tiene su origen

en imperfecciones en la unión PN que constituye la célula y es la responsable de permitir la existencia de fugas de corriente. En la celda fotovoltaica ideal se consideraban $R_s=0$ y $R_{sh}=\infty$. Sin embargo, en las células solares de silicio toman los valores $R_s=0.05-0.1\Omega$ y $R_{sh}=200-300\Omega$ ($I_{sh}\approx 0$). Estos dos factores se pueden tener en cuenta en el modelo de la célula solar de forma que su ecuación característica viene ahora determinada por:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

El nuevo modelo circuital de esta ecuación se ha representado en la figura 3.

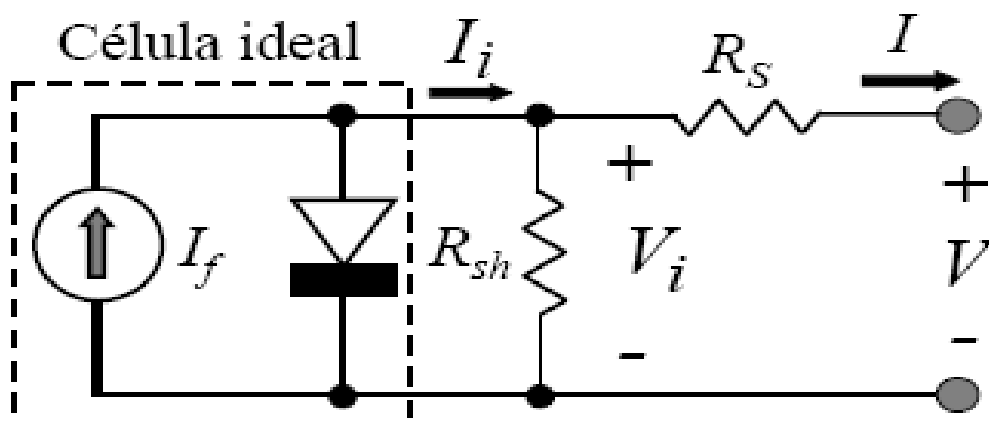


Figura 3. Equivalente circuital modificado.

La ecuación (14) se ha obtenido del análisis directo del circuito de la figura 3, no obstante esta nueva ecuación puede simplificarse haciendo unas aproximaciones que son las siguientes:

$$\begin{aligned} I_L &= I_{sc} \\ e^{(q(V+I \cdot R_s)/NkT)} &\gg 1 \\ V_t &= nkT/q \end{aligned}$$

Obteniéndose finalmente la ecuación simplificada siguiente:

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{V_t}} \right) \quad (8)$$

En esta última ecuación las dos variables que dependen de la temperatura y de la irradiancia son I_{sc} y V_{oc} y lo hacen según las siguientes expresiones:

$$I_{sc} = G * \frac{I_{sc,STC}}{G_{STC}} \quad (9)$$

$$V_{oc} = V_{oc}(T=25^{\circ}\text{C}) - 0.0023 * (T - 25^{\circ}\text{C}) \quad (10)$$

$I_{sc, STC}$ = valor estándar de corriente de cortocircuito proporcionado por el fabricante.

G_{STC} = valor estándar de irradiancia = $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ a 25°C .

$V_{oc}(T=25^{\circ}\text{C})$ = valor de V_{oc} a temperatura ambiente proporcionado por el fabricante.

3. Planteamiento de posibles soluciones.

La implementación de esta simulación con un software de simulación cualquiera como por ejemplo Pspice o Electronics Workbench o Matlab/Simulink es igualmente viable dadas las características de estos programas, sin embargo los dos primeros ofrecen herramientas sobre todo útiles en lo referente a modelos de circuitos eléctricos y estudio de formas de onda, pero son más limitados en cuanto a resolución de ecuaciones que se llevaran a cabo en esta simulación así como en la creación de un panel fotovoltaico completo y a la utilización de algoritmos de máxima potencia MPP.

El tercer programa mencionado ofrece un entorno de trabajo muy útil para el proyecto a realizar debido a la utilización de diagramas de bloques

para estudiar el comportamiento de la célula y a la posibilidad de editar ecuaciones así como a la existencia de librerías predeterminadas sobre conexión a red que servirán para ilustrar el funcionamiento del sistema para entregar energía a la red.

4. Justificación de la solución adoptada.

Finalmente se escogerá la tercera opción comentada para realizar la simulación, o sea Matlab/Simulink como entorno de trabajo. Ésta herramienta de simulación ofrece la posibilidad de crear modelos similares a los existentes en la realidad, por tanto, idóneo para la implementación de este modelo y la ejecución de las pruebas que se llevaran a cabo para estudiar el comportamiento de un sistema fotovoltaico.

5. Descripción detallada de la solución adoptada.

A continuación se detallaran los pasos a realizar para llevar a cabo la simulación desde la creación del modelo de una célula hasta la entrega de la energía hacia la red eléctrica.

5.1 Creación del modelo de una célula en Matlab /Simulink.

Estas últimas ecuaciones serán las que se utilizarán para realizar la simulación en el entorno Matlab/Simulink empleando para ello un procedimiento que se detalla a continuación:

Lo primero es crear un archivo a partir del cual empezaremos a trabajar en simulink para ello haciendo click sobre el dibujo en la parte superior izquierda con forma de folio en blanco se crea un nuevo documento de trabajo.

Hecho esto el documento recibirá el nombre que queremos en este caso lo llamaremos PV y automáticamente matlab lo designara como PV.mdl,

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

este será el documento donde introduciremos los bloques que forman parte de la simulación. Hay varias formas de simular el comportamiento de una célula solar pero utilizando la ecuación (8) es la más sencilla y esquemática, así pues necesitaremos definir la ecuación (8) en simulink y para ello utilizaremos el bloque “Fcn” que hay en la librería llamada “User-defined functions”, e introducimos la ecuación tal y como sigue:

$$G \cdot \alpha \cdot (1 - \exp((u - V_{oc} + 0.0023 \cdot (T - T_{amb}) + G \cdot \alpha \cdot R_s) / V_t)) \quad (11)$$

Donde α es el factor de irradiancia y se corresponde con la expresión:

$$\alpha = I_{STC} / G_{STC} \quad (12)$$

Una vez hecho esto en el bloque Fcn, a su entrada tenemos que introducir las variables o la variable que rige su funcionamiento en este caso la única variable que tomará valores diferentes en cada simulación será la tensión V que tendrá forma de rampa para realizar la simulación y obtener las curvas I-V y P-V. Las otras variables que aparecen en la ecuación (10) toman valores en la máscara del subsistema que contendrá al bloque Fcn y que veremos más adelante.

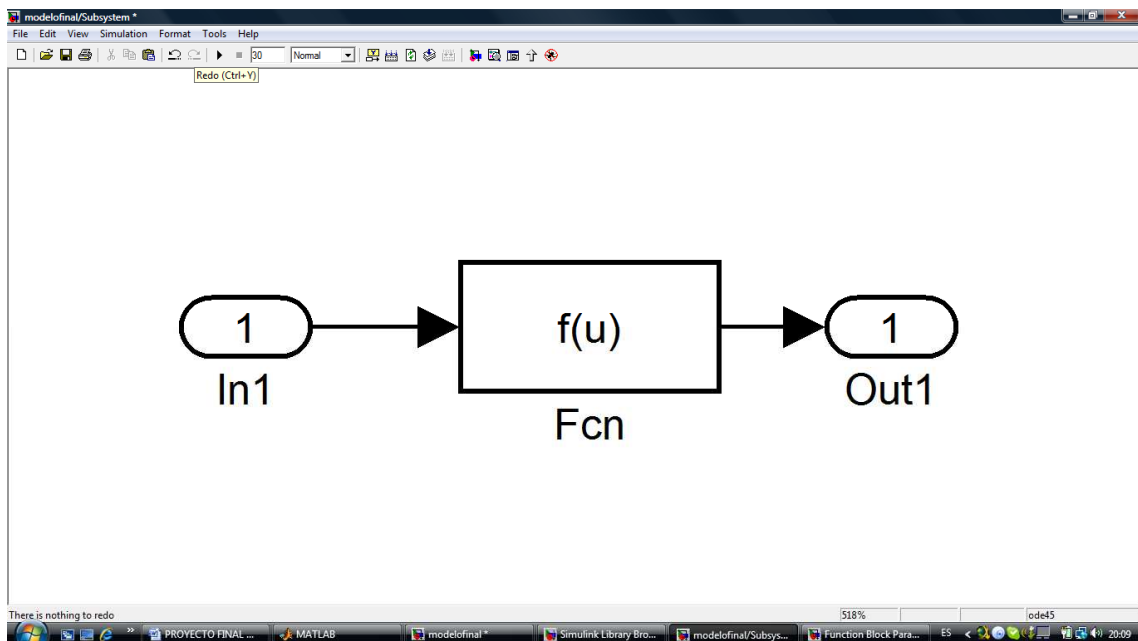


Figura 4. Bloque Fcn con entrada y salida.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

La tensión será la entrada In1 y a la salida Out1 obtendremos la corriente. Una vez introducida la ecuación (10) añadimos los bloques que permitirán obtener la potencia como producto de $V \cdot I$ y las formas de onda con dos Graph XY como muestra la figura 5.

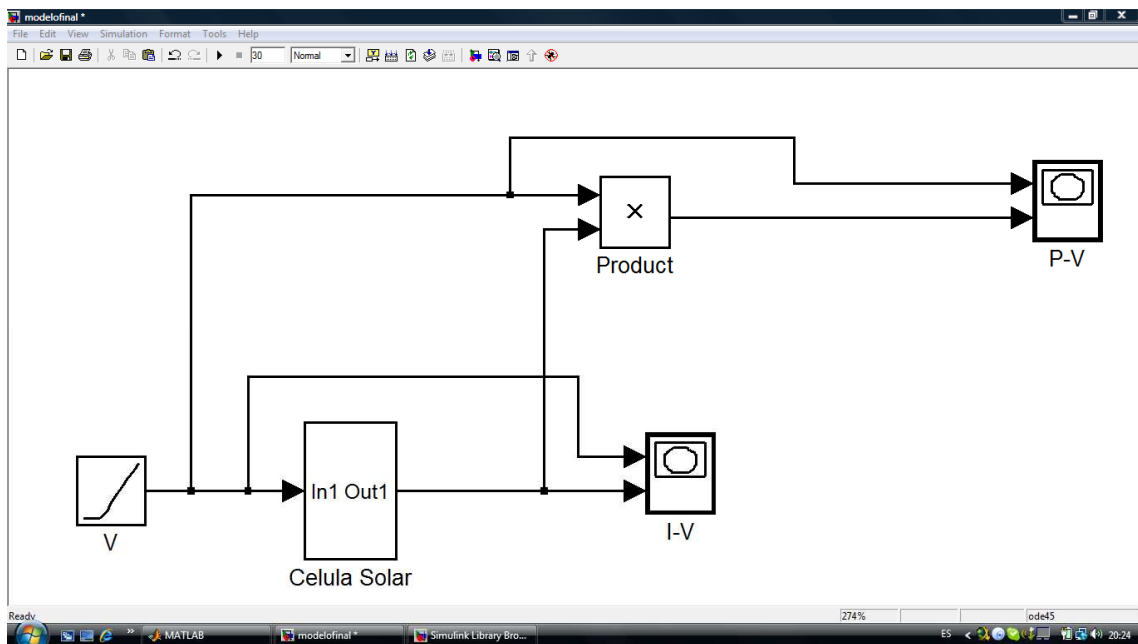


Figura 5. Diagrama de bloques de la simulación.

El bloque llamado “Célula Solar” contiene al bloque Fcn donde hemos introducido la ecuación anteriormente. Pinchando con el botón derecho del mouse sobre el subsistema creado aparecen una serie de opciones una de las cuales es “Edit Mask” donde daremos valores al resto de variables que aparecían en la ecuación (10) como se indica en la figura 6.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

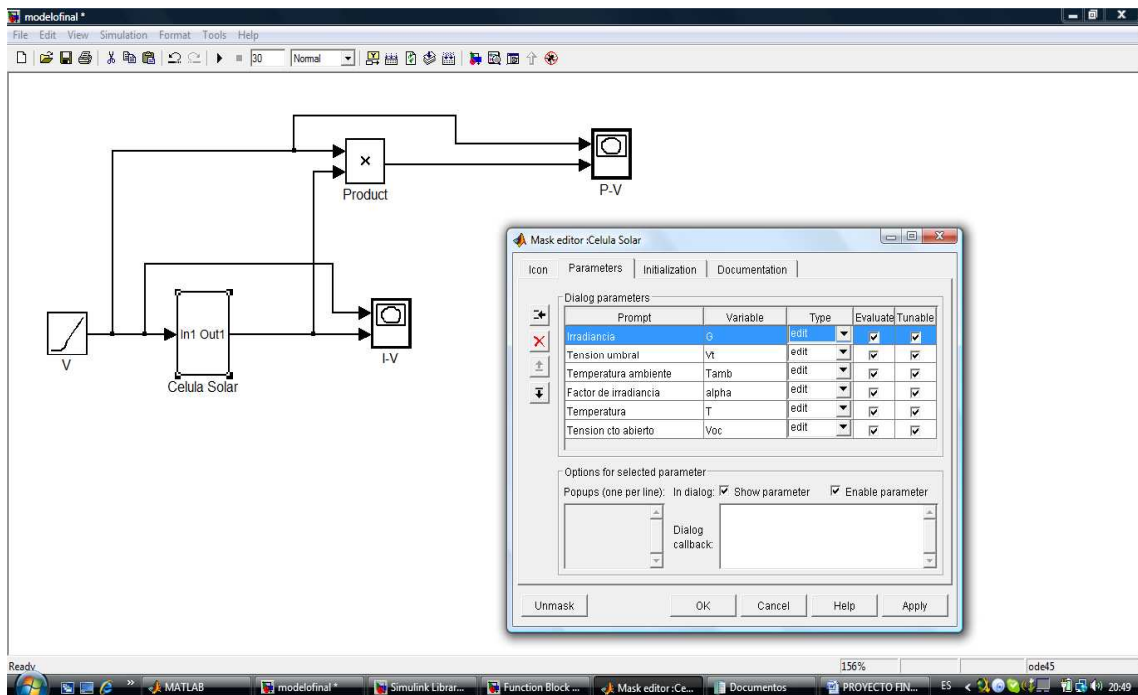


Figura 6. Edición de la máscara del subsistema.

Una vez editadas las variables restantes que aparecen en la ecuación (9) solo queda dar valor a cada una de ellas y realizar la simulación, para una primera simulación daremos los valores que siguen a las variables como se indica en la figura siguiente:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

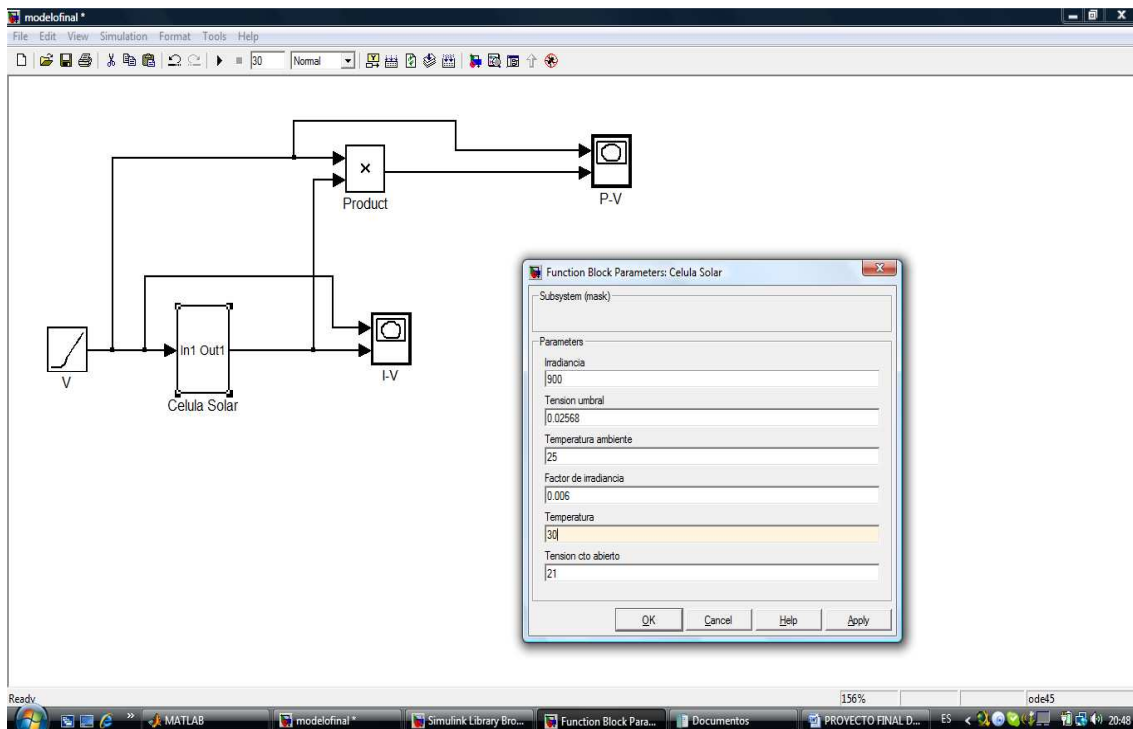


Figura 7. Valores de parámetros de la simulación.

Hecho esto solo queda empezar la simulación y obtener las curvas I-V y P-V.

5.2 Simulación del modelo de una célula fotovoltaica.

Para ilustrar la simulación como ejemplo utilizamos el panel fotovoltaico situado en la universidad politécnica de Valencia (upv) cuyas características proporcionadas por el fabricante son las siguientes:

$$I_{mp} = 4.4 \text{ A} \quad V_{mp} = 17 \text{ V} \quad I_{sc} = 4.8 \text{ A} \quad V_{oc} = 21 \text{ V}$$

Número de células en serie = 36 de 5"

Número de células en paralelo = 1

Medidas realizadas con $T = 25^{\circ}\text{C}$ $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

En esta simulación tenemos en cuenta el comportamiento de una única célula, por tanto en el valor de tensión en lugar de 21 V pondremos la correspondiente a una única célula que es $21\text{V}/36 = 0.5833$ y en las

siguientes ampliaremos el modelo para simular el comportamiento del panel fotovoltaico completo poniendo el valor de 21 V.

Sustituyendo en el modelo los valores indicados se obtienen las curvas I-V:

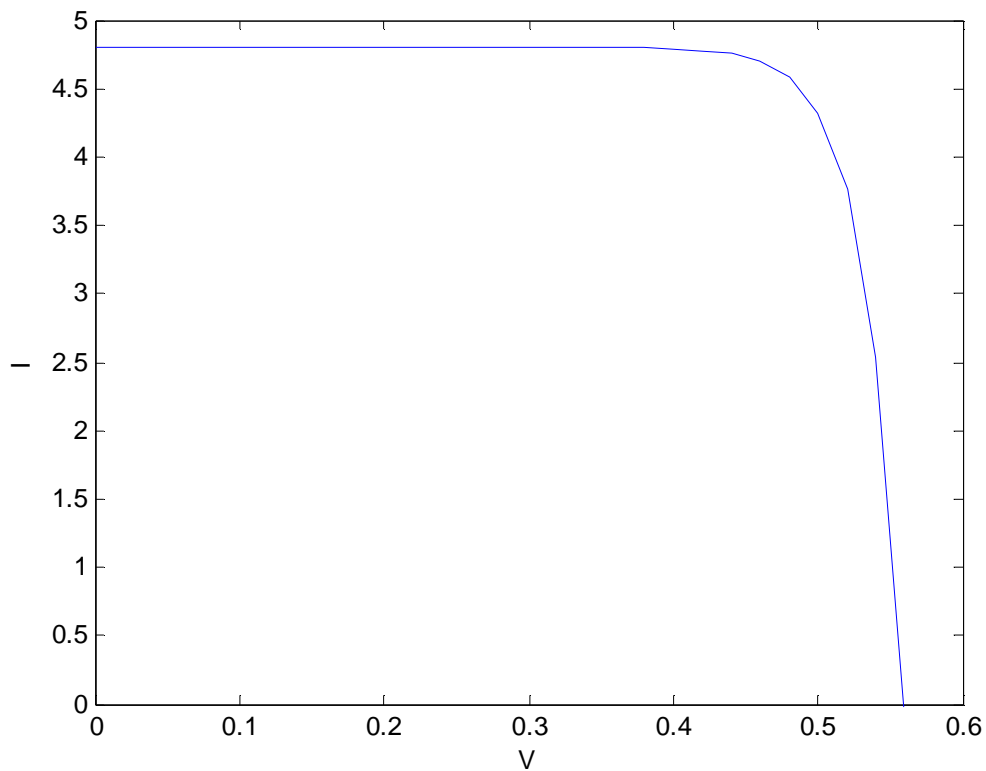


Figura 8. Curva I-V de la célula solar.

De igual manera obtenemos la curva de potencia - tensión P-V:

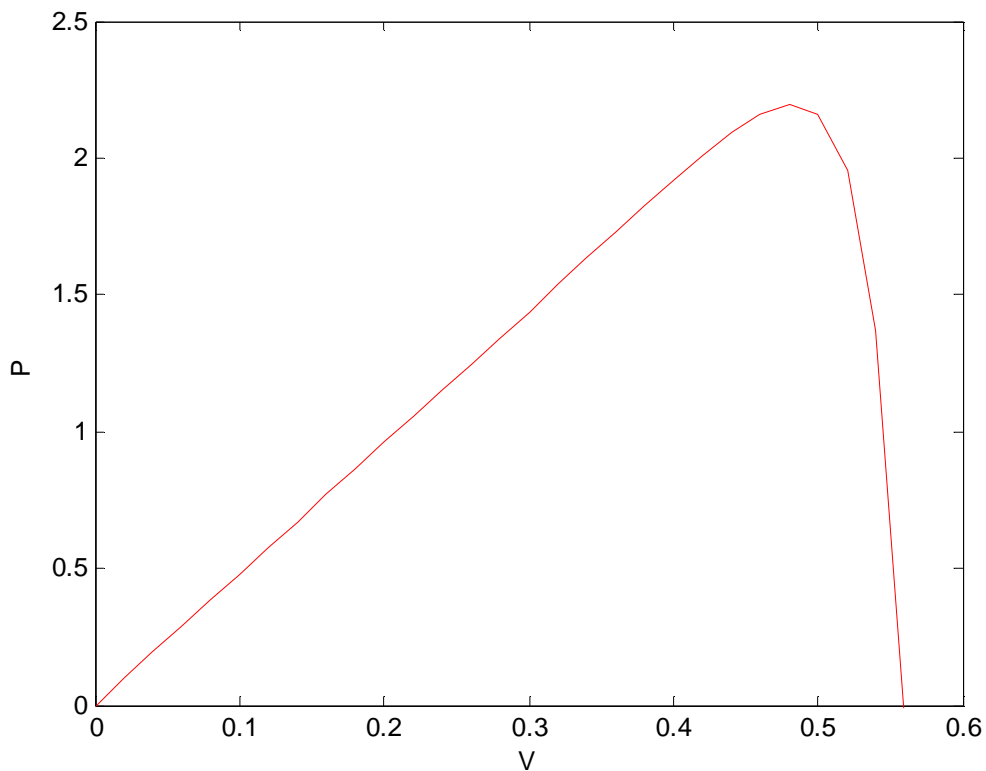


Figura 9. Curva P-V de la célula solar.

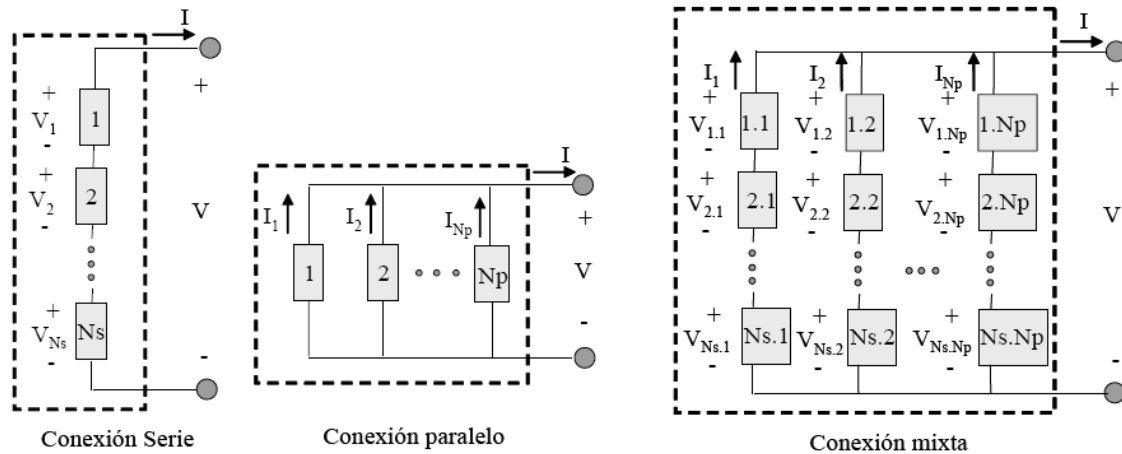
Como se observa en las figuras las curvas corresponden a las estudiadas teóricamente anteriormente obteniéndose los valores de las gráficas siguientes:

Isc	4.8 A
Voc	0.55 V
Imp	4.5 A
Vmp	0.47 V
FF (Fill Factor)	0.757
Pmaxima	2.12 W

Se observa que la tensión Voc aparece ligeramente desplazada debido a la aproximación realizada en la ecuación (8) que simplifica los cálculos a realizar y la simulación.

5.3 Módulos fotovoltaicos.

En la siguiente figura se aprecian los diferentes modos de conexionado de las células para formar paneles solares:



El panel fotovoltaico o concepto PV aparece por la necesidad de adecuar los modelos de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requerimientos del sistema eléctrico al cual alimenta. Por ejemplo, cuando conectamos en serie las células solares aumentamos la tensión que es capaz de suministrar el panel; en cambio, si la conexión se hace en paralelo, se aumenta la corriente. En una conexión mixta se aumenta tanto la tensión como la corriente suministrada.

Las siguientes expresiones reflejan el concepto de PV para las agrupaciones de paneles comentadas. Como se comprobará posteriormente, el concepto de PV que aparece en células solares es igualmente aplicable en paneles fotovoltaicos:

En serie:
$$V_{pT} = \sum_{i=1}^{N_s} V_{pi} \quad (13)$$

$$I_{pT} = I_{pi} \quad (14)$$

En paralelo:
$$I_{pT} = \sum_{i=1}^{N_p} I_{pi} \quad (15)$$

$$V_{pT} = V_{pi} \quad (16)$$

Las agrupaciones de células idénticas se formulan como:

En serie: $V_{pT} = N_s * V_{pi} \quad (17)$

$$I_{pT} = I_{pi} \quad (18)$$

En paralelo: $I_{pT} = N_p * I_{pi} \quad (19)$

$$V_{pT} = N_p * V_{pT} \quad (20)$$

Para extrapolar el comportamiento de la célula al del panel completo solo tenemos que modificar la ecuación presente en el bloque Fcn añadiendo dos parámetros que serán el número de células en serie N_s y en paralelo N_p presentes en el panel de la siguiente forma:

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} * R_s * N_p}{V_t * N_s}} \right)$$

5.4 Simulación de un módulo fotovoltaico completo.

Para simular el comportamiento del modulo modificamos estos parámetros en simulink añadiendo dos variables N_s y N_p en la máscara del subsistema como se ha hecho en la figura 6 y que en nuestro caso tomaran valores $N_s = 36$ y $N_p = 1$ como se indica en la hoja de características del panel de la upv.

Las curvas resultantes del ensayo con los valores anteriores para N_s y N_p son:

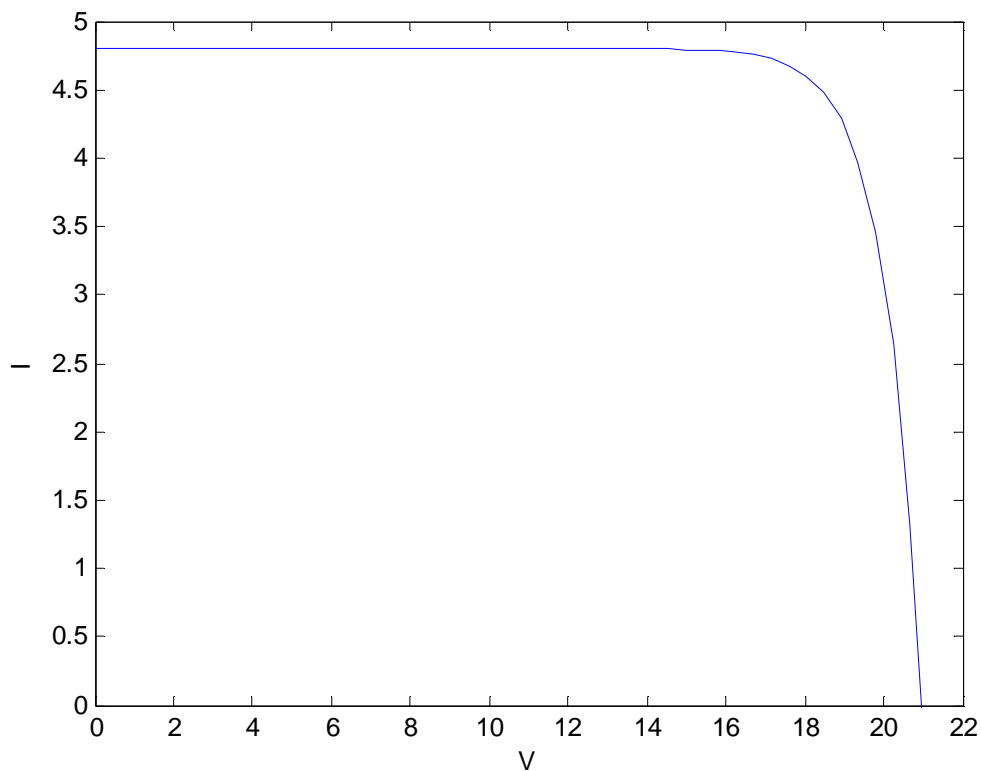


Figura 10. Curva I-V del módulo fotovoltaico completo.

La curva resultante de I-V corresponde al módulo fotovoltaico completo con una Isc de 4.8 A corriente que al estar las 36 células en serie es la misma para todas ellas y una Voc de 21 V resultante de la suma de la Voc de cada célula en serie. Los valores obtenidos en la gráfica concuerdan con los obtenidos en el caso de una única célula.

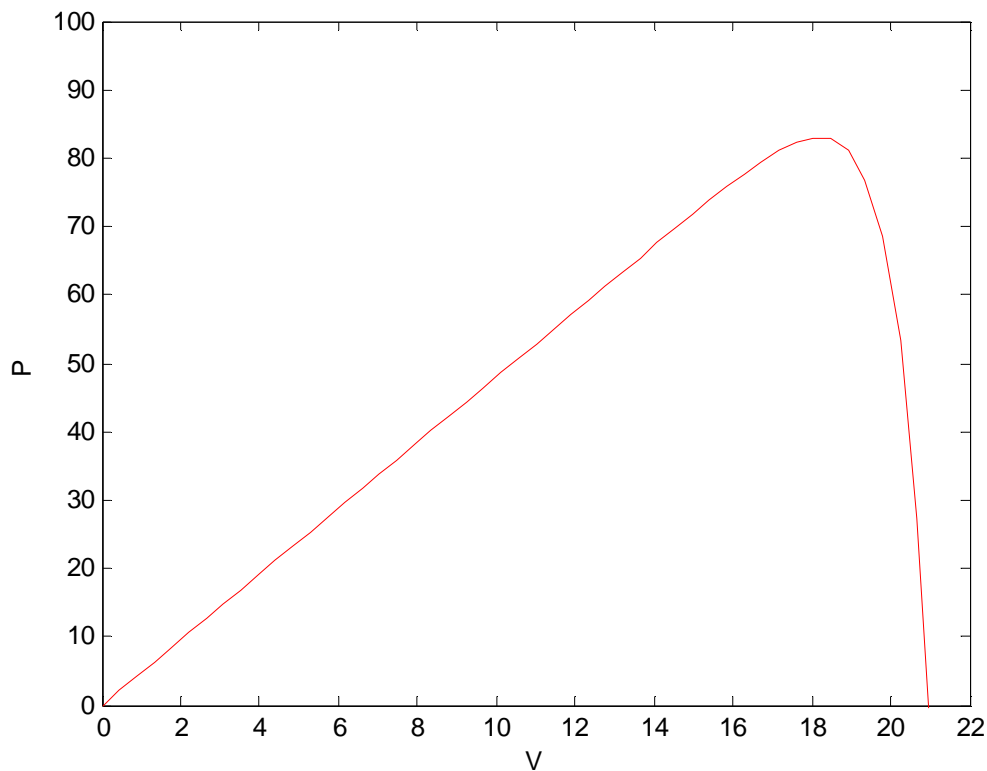


Figura 11. Curva P-V del modulo fotovoltaico completo.

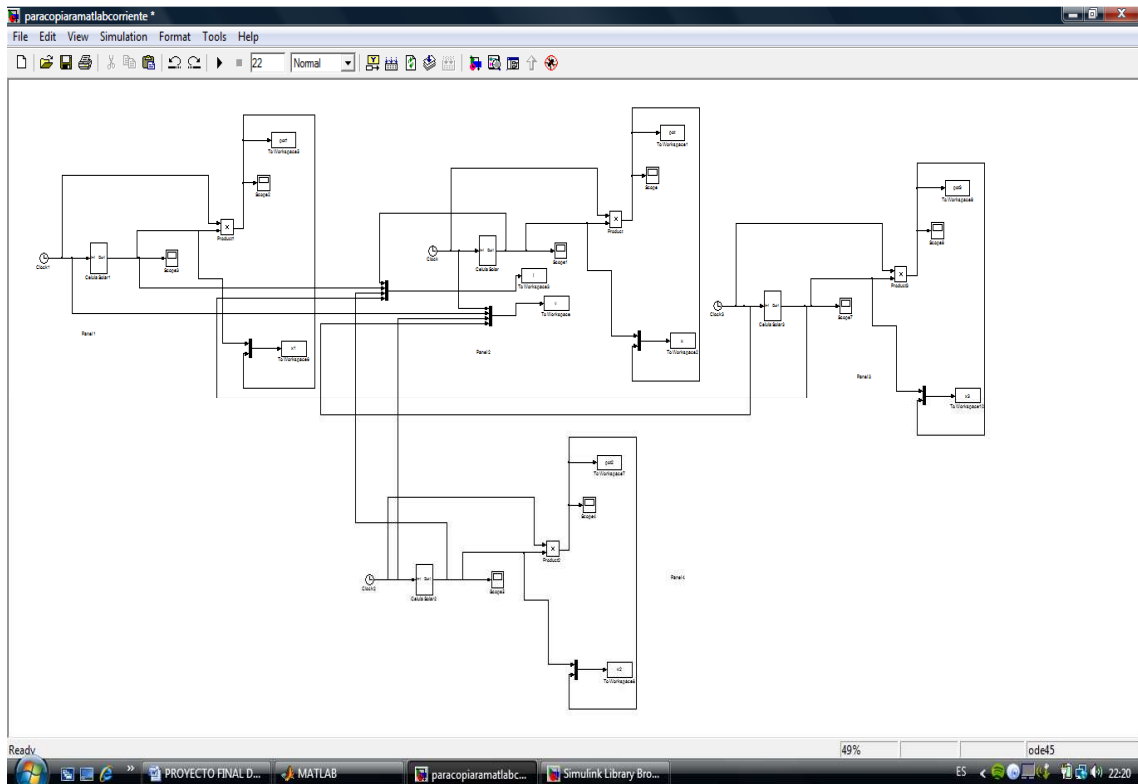
Isc	4.8 A
Voc	21 V
Imp	4.58 A
FF (Fill Factor)	0.8184
Vmp	18 V
Pmáx	82.5 W

El valor de la potencia máxima es de 82.5 W correspondiente al producto de $V_{mp} = 18 \text{ V}$ e $I_{mp} = 4.58 \text{ A}$.

En lo que sigue tendremos en cuenta en todas las simulaciones el modulo fotovoltaico completo con el número de células especificado en este apartado, tanto en serie N_s como en paralelo N_p .

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Para los apartados que siguen será necesario utilizar varios modelos de paneles fotovoltaicos como el creado al principio del proyecto para simular cada uno de ellos como un panel independiente del resto con unas condiciones de G y T que en algunas ocasiones no son iguales para todos aunque si estén situados próximos entre ellos, esto es debido a que la irradiancia por ejemplo no es constante en todos ellos y puede variar en cada uno así como el rendimiento de cada panel fotovoltaico, asimismo este modelo se utilizara para simular las diferentes condiciones de G y T y observar el comportamiento de los paneles o módulos. Para ello copiamos sobre el modelo anterior tres más idénticos que simularemos al mismo tiempo con condiciones diferentes de irradiancia o de temperatura.



5.4.1 Comportamiento del sistema frente a incrementos en la irradiancia G.

La idea de realizar simulaciones del comportamiento de los módulos fotovoltaicos es comprobar la veracidad de los modelos teóricos que

conocemos, por eso vamos a variar los parámetros de la simulación y que afectan a las curvas que son G y T.

Hasta ahora hemos utilizado para los dos ensayos anteriores valores estándar de irradiancia y temperatura que son $T = 25^{\circ}\text{C}$ y $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Pero ahora vamos a alterar estos valores a ver cómo se comporta el modulo completo objeto de nuestro estudio presente en la upv.

Modificamos el valor de irradiancia de 1000 a $1300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, valores más altos presentes en el perihelio (punto más cercano de la órbita de un objeto alrededor del sol) manteniendo la temperatura del módulo constante y de valor $T = 25^{\circ}\text{C}$.

Las curvas obtenidas I-V ahora son:

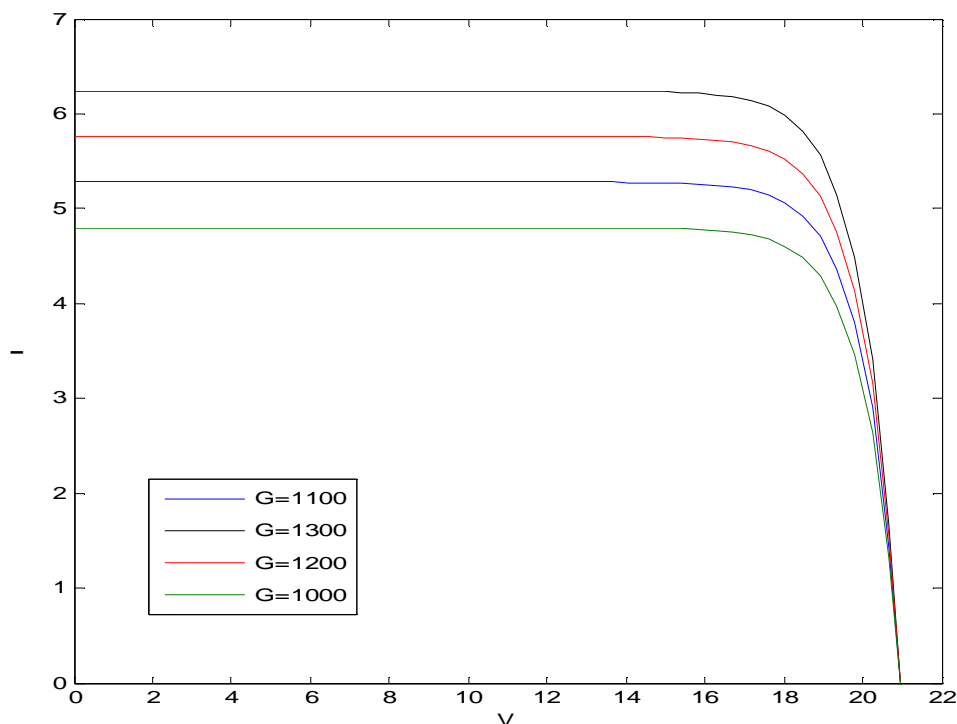


Figura 12. Curva I-V para incrementos en la irradiancia G.

Se puede observar como la irradiancia G influye directamente en la curva desplazándola hacia valores más grandes en corriente y manteniéndola constante en valores de tensión Voc puesto que esta última no varía con la irradiancia sino con la temperatura.

De igual forma obtenemos las curvas P-V para los cambios en la irradiancia detallados:

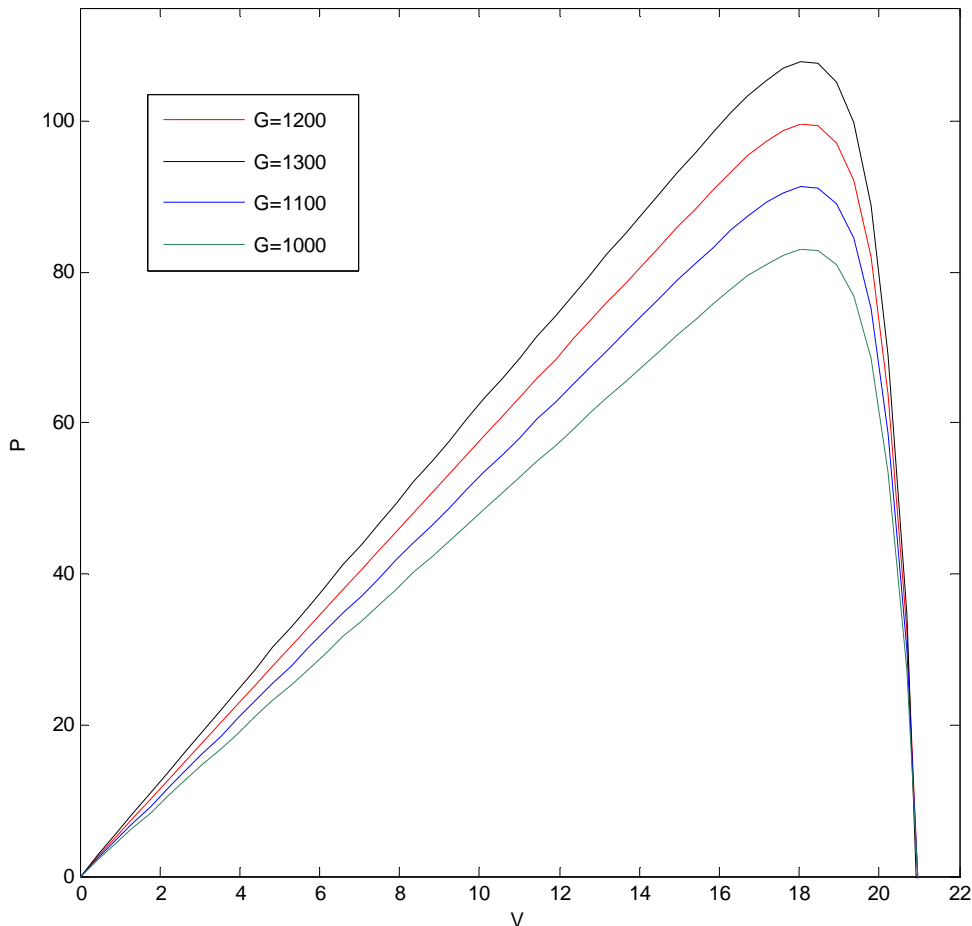


Figura 13. Curva P-V para incrementos en la irradiancia G.

Como se ve en la curva de potencia su valor máximo se ha incrementado notablemente desde los 82.5 W obtenidos hasta 115 W con el incremento de G, así como el valor de I_{sc} que crece proporcionalmente con G, mientras que V_{oc} es un parámetro de la célula que no se ve alterado por la simulación a otro valor de irradiancia y por tanto se mantiene constante a 21 V.

5.4.2 Comportamiento frente a un descenso en los valores de la irradiancia G.

Si desciende el valor de G por ejemplo a valores comprendidos entre $G = 500 \frac{W}{m^2}$ y $800 \frac{W}{m^2}$ manteniendo T constante obtenemos la curva que sigue en la que se aprecia que la potencia máxima desciende notablemente.

Como se ve en la ecuación (10) incrementándose o disminuyendo la irradiancia se obtiene mayor y menor potencia respectivamente.

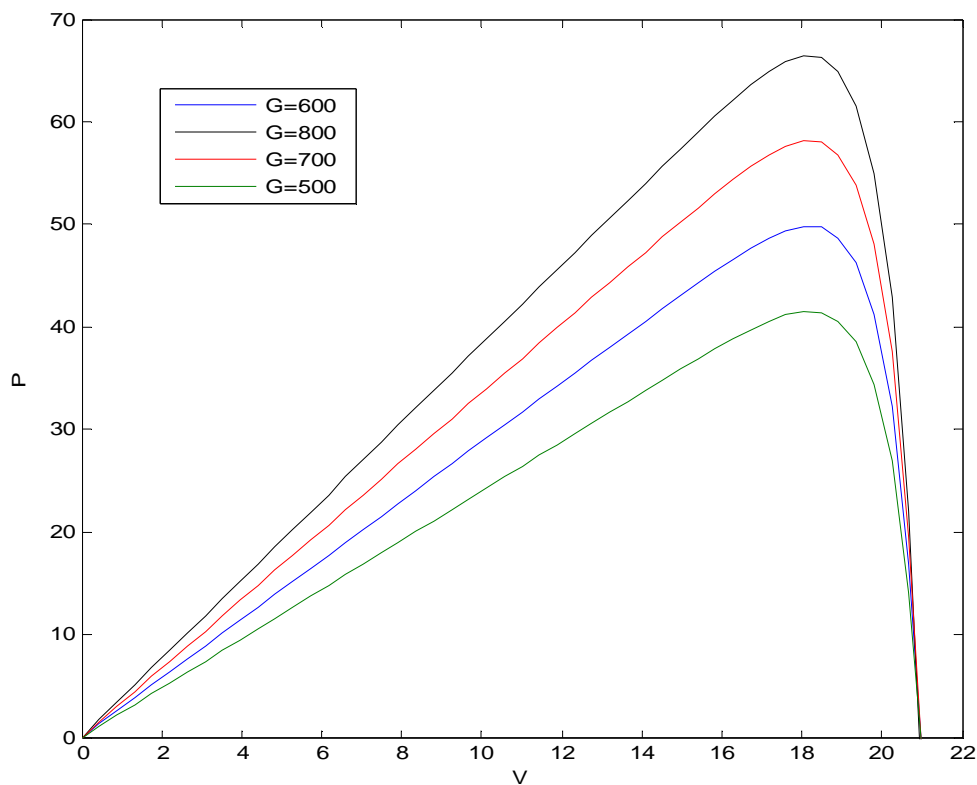


Figura 14. Curva P-V frente a un descenso en el valor de G.

5.4.3 Comportamiento frente a incrementos en la temperatura.

Si cambiamos el valor de T a valores comprendidos entre 25 y 75°C y mantenemos G constante aparecen las curvas que siguen de I-V y P-V.

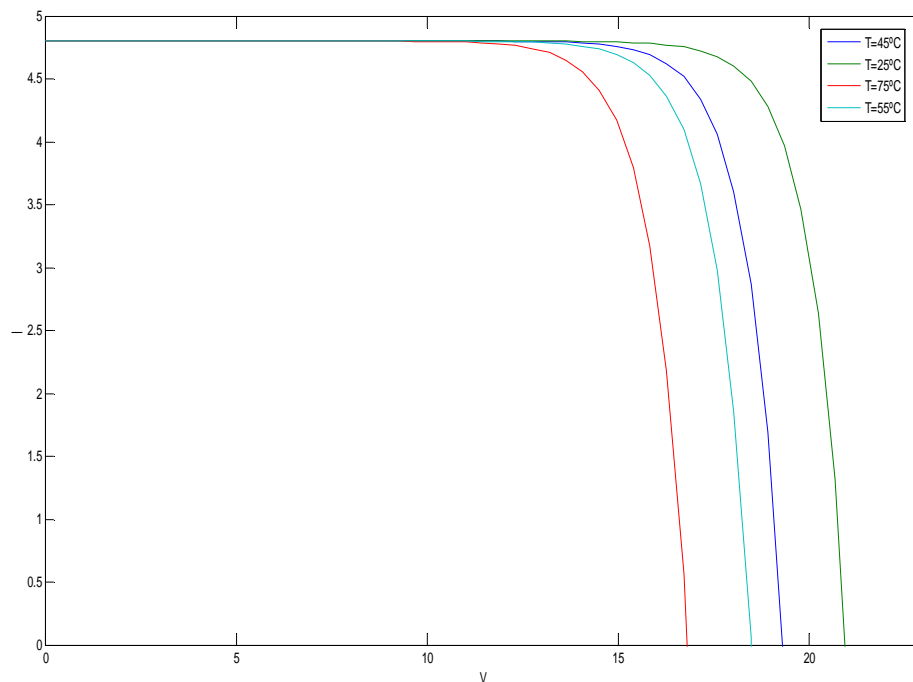


Figura 15. Curva I-V para incrementos en la temperatura.

Para ver mejor las diferencias entre las curvas representadas hacemos un zoom en la zona de corte con el eje V de abscisas y vemos el resultado obtenido.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

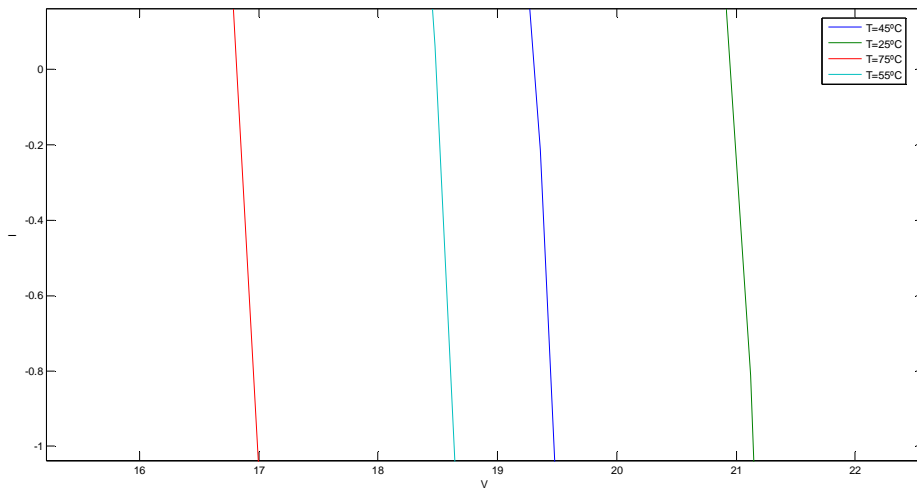


Figura 16. Curva I-V ampliada.

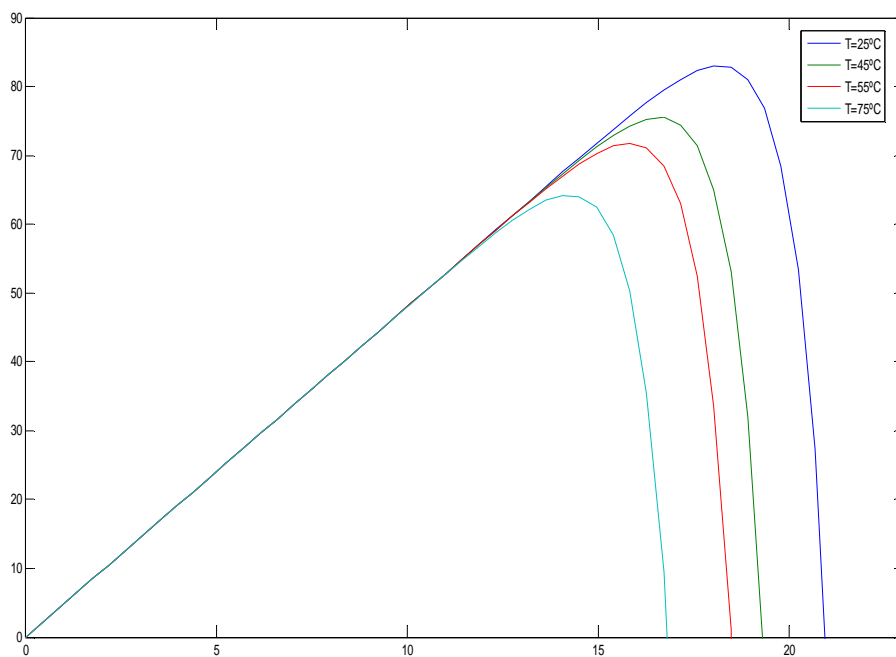
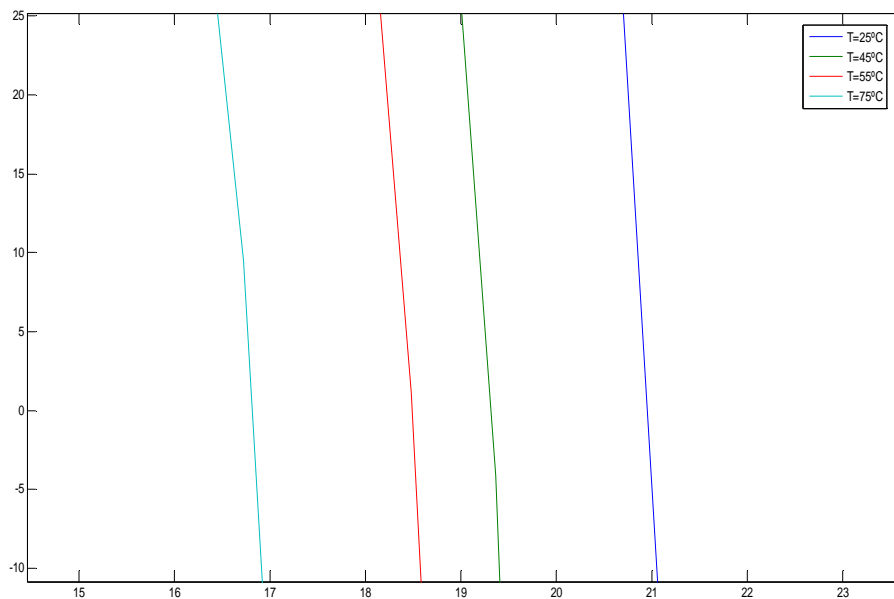


Figura 17. Curva P-V para incrementos en la temperatura.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Los cambios en la temperatura afectan negativamente a la potencia que entrega la célula cuando T aumenta de valor pero deben ser aumentos importantes para producir una pérdida notable de potencia, si hacemos un zoom del punto de corte con el eje de abscisas V vemos lo siguiente:



Como se ve en los cortes con V la tensión a la cual se produce $I=0$ desciende desde 21 V hasta menos de 17 V debido al incremento de temperatura hasta 75°C, todo esto puede comprobarse con la ecuación que modela la célula.

La eficiencia de las células solares disminuye cuando aumenta la temperatura debido, sobre todo, debido a la disminución que sufre la tensión de circuito abierto.

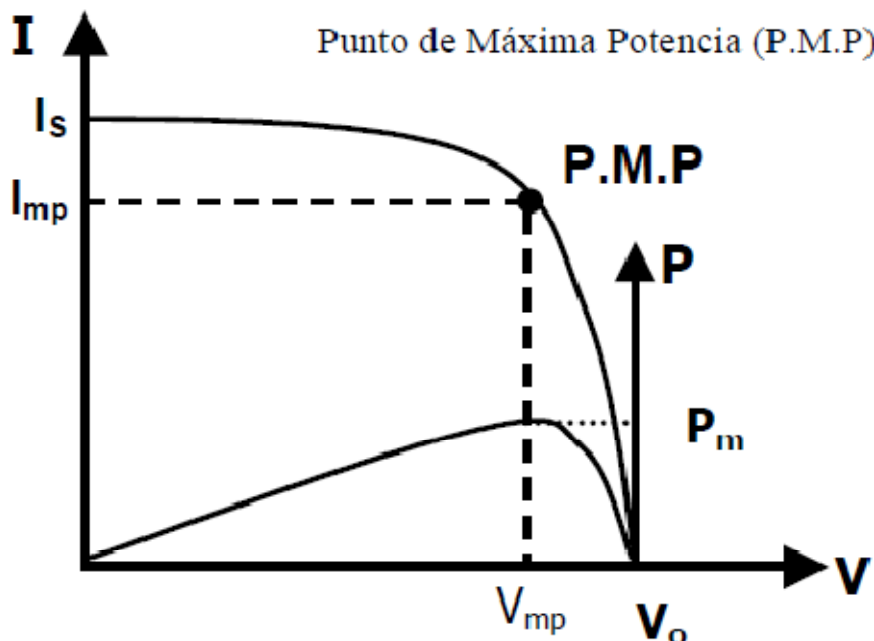
Mientras que la densidad de corriente de cortocircuito es prácticamente insensible a los efectos de la temperatura (aumenta ligeramente), la tensión de circuito abierto disminuye del orden de unos pocos milivoltios por grado de temperatura. Debido a la dependencia del FF con la tensión V_{oc} , éste también disminuye al aumentar la temperatura. Como resultado final, la eficiencia decrece debido al aumento de la temperatura para un módulo fotovoltaico. A diferencia del caso anterior con cambio de irradiancia, la evolución del MPP ante una variación de temperatura es prácticamente lineal. Este efecto se observa habitualmente en las horas

centrales del día, cuando a pesar de estar recibiendo mayor irradiancia, la potencia generada por el panel solar disminuye ligeramente debido al aumento de su temperatura de trabajo.

En esta simulación lo que ocurre es que la curva se desplaza muy ligeramente hacia la derecha cuando disminuye el valor de T por debajo de 0°C y hacia la izquierda cuando T sube por encima de 0°C proporcionalmente con el valor de T pero, para obtener variaciones apreciables en V_{oc} , T debe ser muy grande o muy pequeña de acuerdo con la ecuación (10), en la que se expresa la dependencia de la V_{oc} con la temperatura, sin embargo debido a la aproximación realizada en la ecuación (8) para la realización del modelo en simulink se pierde precisión en la importancia en cambios de temperatura, puesto que si hay variaciones en T la curva en la realidad se desplaza hacia izquierda y derecha a temperaturas como las expuestas en los ejemplos de la simulación sin ser necesario dar valores a T muy excesivos.

6. Algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia y justificación del uso del mismo.

Hechas estas pruebas para ilustrar el comportamiento de la célula solar y de un módulo fotovoltaico completo siendo ampliable a un campo fotovoltaico compuesto por varios paneles o módulos añadiendo en la simulación tantos módulos como se necesiten surge la necesidad de trabajar siempre en el valor de potencia máxima suministrado por cada panel para maximizar la energía entregada por el campo fotovoltaico, esto supone que los valores de tensión y corriente entregados por cada módulo de los que forman el campo fotovoltaico son los máximos de la curva de máxima potencia y por tanto se trabaja en el MPPT o punto de máxima potencia, esto es:



Tenemos que realizar un algoritmo que permita obtener el punto V_{mp} para cualquier valor de irradiancia y temperatura presentes en el entorno, para ello hay varios métodos existentes que ahora comentaremos. Los algoritmos se extienden desde el más sencillo (no por ello menos eficaz) al más complejo y creativo (no necesariamente más eficaz). Tantos métodos se han desarrollado que actualmente resulta difícil determinar cuál de ellos es el más apropiado para un sistema fotovoltaico. Los métodos más utilizados habitualmente son el de perturbación y observación y el de conductancia incremental que consisten en encontrar el punto MPPT buscando la $V_{m\acute{a}x}$ y aumentando el valor de V o disminuyéndolo según sea preciso, para ello en nuestro caso emplearemos otro sistema menos sofisticado pero igualmente válido para las simulaciones que realizamos.

6.1 Obtención del valor de tensión máxima V_{max} .

Lo primero que haremos será observar la ecuación (8) añadiendo en ella los valores de N_s y N_p como se hace más adelante en las simulaciones, en esta ecuación hay una relación entre V e I , para obtener la potencia suministrada por el campo fotovoltaico basta con multiplicar la corriente

suministrada I por la tensión de funcionamiento V y obtenemos así la expresión de la potencia suministrada:

$$P = I_{sc} \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s \cdot N_p}{V_t \cdot N_s}} \right) * V \quad (21)$$

Lo que necesitamos ahora es encontrar el máximo de esta expresión que observando la forma de la curva P-V será un máximo absoluto cuyos valores de tensión y corriente serán respectivamente V_{max} e I_{max} , para ello derivamos la expresión anterior (21) respecto de la tensión V puesto que es función de esta última y obtenemos la expresión que sigue:

$$\frac{dP}{dV} = I_{sc} - I_{sc} * e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s \cdot N_p}{V_t \cdot N_s}} * \left(1 + \frac{V}{N_s \cdot V_t} \right) \quad (22)$$

Para encontrar el máximo de la expresión (21) igualamos la expresión (22) a 0 y el valor resultante de V será V_{max} y sea el que cumpla la ecuación obtenida:

$$V - N_s * V_t * \left(e^{\frac{-V + V_{oc} - 0.0023 * (T - 25) - \alpha * G * R_s * N_p}{N_s * V_t}} \right) = 0 \quad (23)$$

6.2 Construcción del modelo en simulink.

Ahora introduciremos en simulink un nuevo bloque Fcn donde definiremos esa función y a continuación uno del tipo “Algebraic Constraint” que resuelve ecuaciones definidas en su entrada de la forma que sigue:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

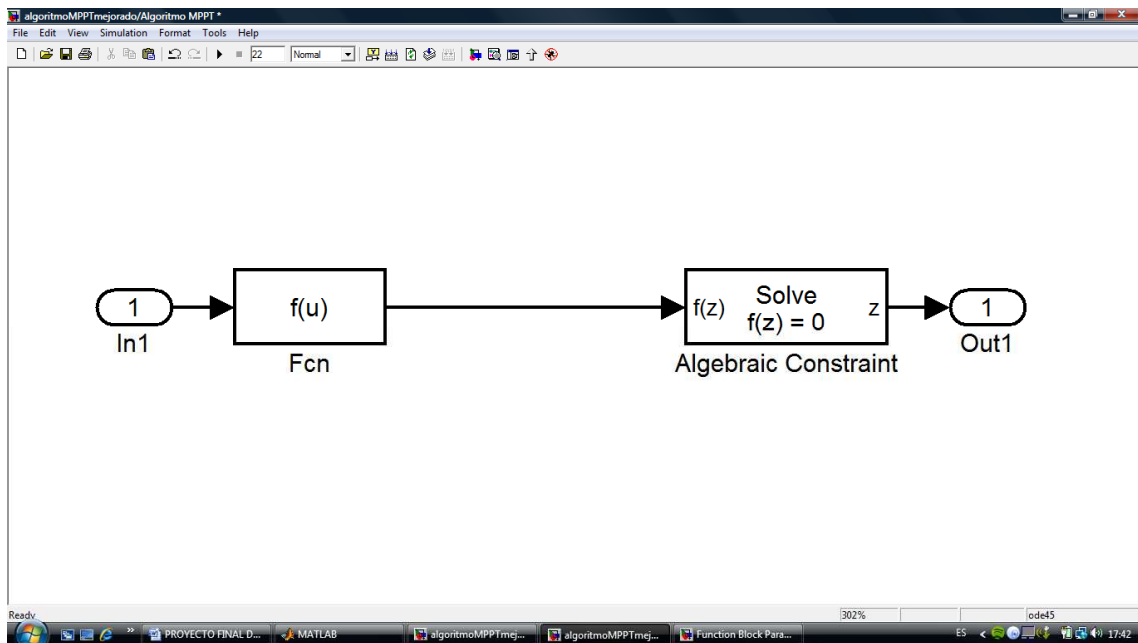


Figura 20. Construcción del bloque en simulink.

Donde el bloque Fcn a la entrada del siguiente contiene la ecuación (22) definida como en la primera simulación de una única célula anteriormente.

Hecho esto creamos un subsistema que contendrá los dos bloques con una entrada y una salida y editamos las constantes que aparecen en la ecuación con el comando Edit Mask pinchando encima del subsistema creado.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

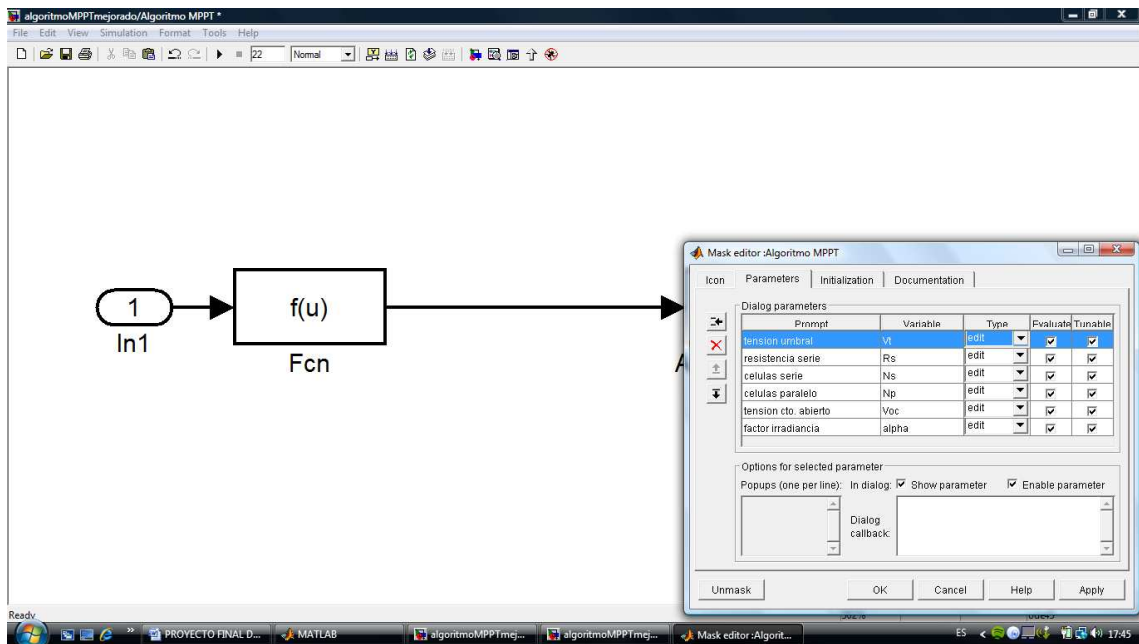
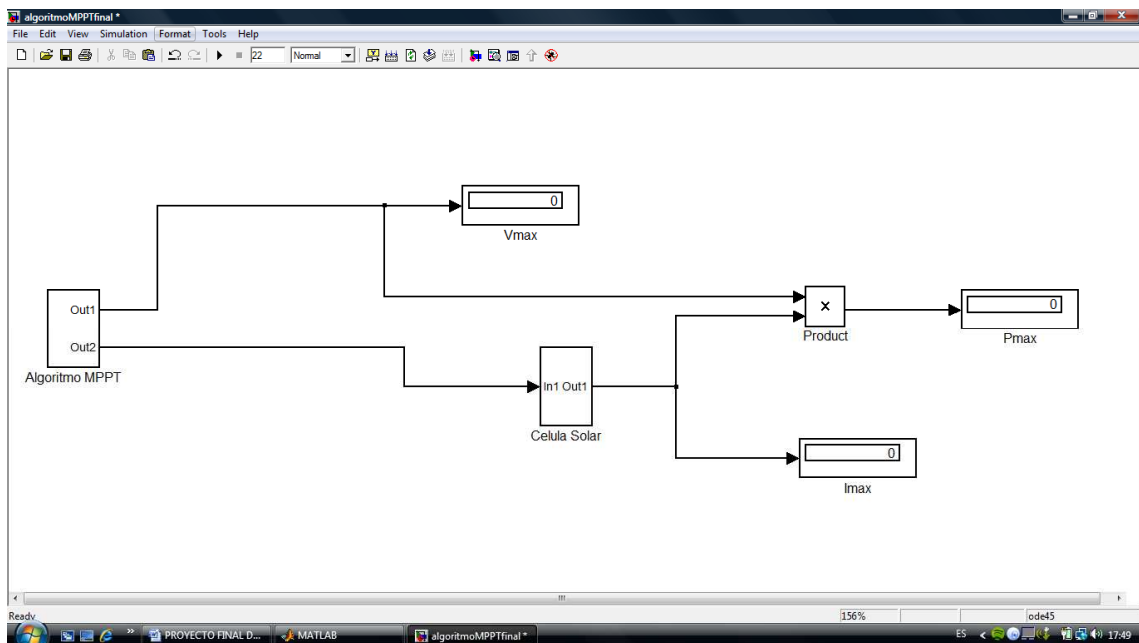


Figura 21. Edición de variables del bloque Algoritmo MPPT.

Hecho esto queda situar un display a la salida del subsistema para ver el valor de tensión máxima obtenido de la manera que sigue:



Así si iniciamos la simulación con valores de $G = 1000 \frac{W}{m^2}$ y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ obtenemos un valor de tensión máxima a la salida del bloque de 18.08 V

que concuerda con los valores obtenidos en curvas anteriores y un valor de potencia máxima de 83.04 W como muestra la figura siguiente:

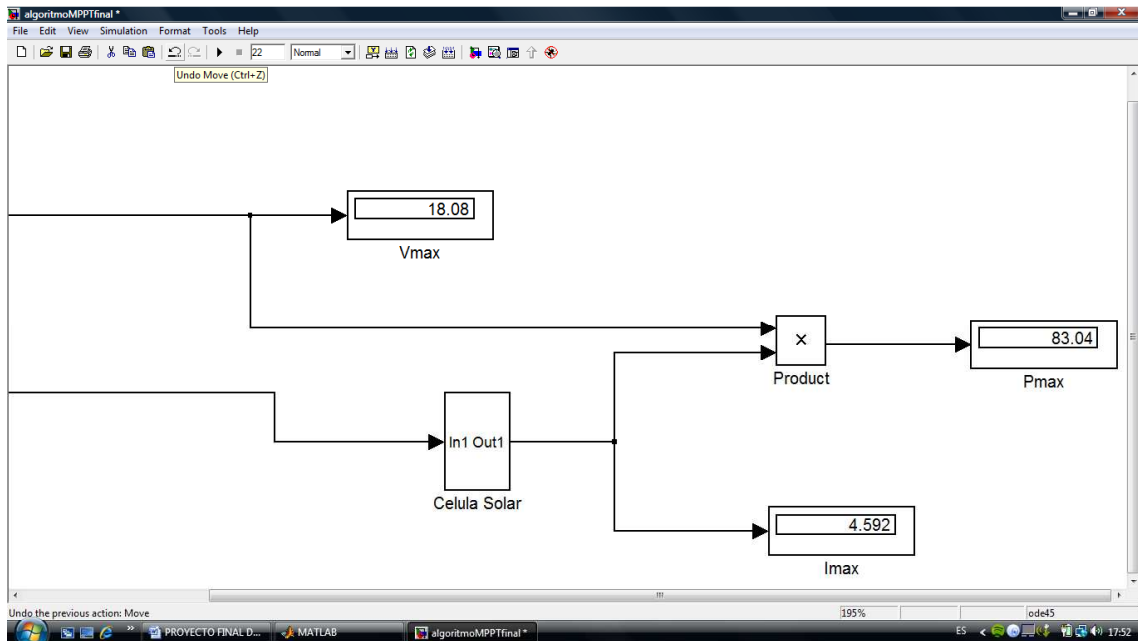


Figura 22. Obtención del valor de potencia máxima proporcionada.

Así hemos implementado un algoritmo más sencillo que los existentes e igualmente válido para nuestro modelo.

Si cambiamos los valores de G o T veremos que solo se producen variaciones en el valor de V_{max} con cambios en el valor de T puesto que la G hace variar el valor de corriente máxima pero no afecta al valor de la tensión máxima salvo casos muy extremos.

6.3 Algoritmo MPPT mejorado.

Podemos mejorar el modelo haciéndolo más sencillo de manejar y completarlo extrayendo los valores de G y T de la máscara e incorporándolos fuera de los subsistemas, para ello solo es necesario multiplexar las entradas de los subsistemas con un multiplexor (MUX), así una de ellas será la irradiancia G , otra la temperatura T y la variable tensión V la última de ellas.

El modelo obtenido ahora será el siguiente:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

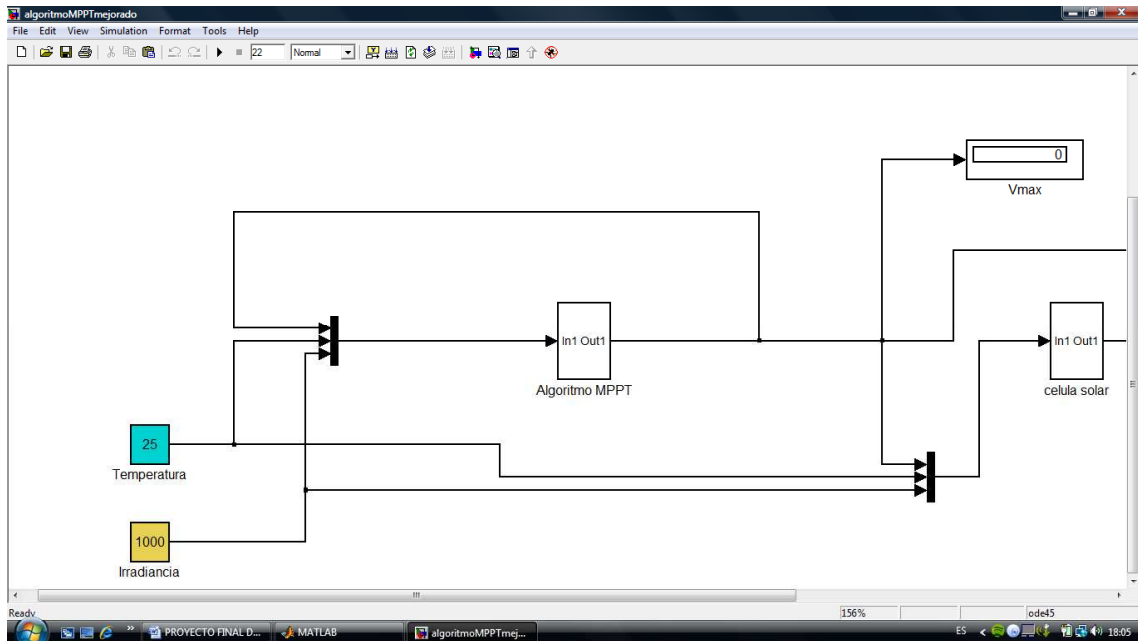


Figura 23. Extracción de variables de funcionamiento del sistema

Solo es necesario cambiar el valor de las constantes G y T de color amarillo y azul respectivamente para establecer los valores adecuados en cada simulación, así se obtienen directamente las tres variables de salida de los bloques que nos interesan V_{max} , I_{max} y P_{max} .

Hay que recalcar que en todas las simulaciones se emplean los valores de tensión de circuito abierto V_{oc} y corriente de cortocircuito I_{sc} del panel presente en la upv que son $V_{oc}=21$ V e $I_{sc}=4.8$ A.

Con este algoritmo realizado solo queda utilizar esta energía producida y medida, trabajando siempre el sistema con la potencia máxima, para el uso y consumo devolviéndola a la red eléctrica necesitándose para ello un inversor eléctrico que es posible modelarlo como una fuente de corriente dependiente del valor de irradiancia y temperatura presentes en el medio lo cual haremos a continuación.

7. Construcción de un modelo de inversor monofásico para conexión del sistema a la red eléctrica.

El objeto de este bloque es realizar un acoplamiento de nuestro sistema fotovoltaico a la red de distribución eléctrica para aprovechar la energía generada. Para ello crearemos un modelo en Simulink del mismo utilizando para ello unos bloques que se detallaran en los apartados siguientes.

7.1 Posibles soluciones para implementar un inversor monofásico.

Lo podemos implementar de varias maneras siendo el resultado obtenido similar sin embargo la complejidad de cada modelo diferente.

-Como una fuente de corriente en fase con la tensión de red AC: de esta forma obtenemos una corriente variable en fase con la tensión de red de forma que la potencia inyectada a la red se obtendrá con un sencillo algoritmo que utilizaremos, este es el método que escogeremos por su sencillez y semejanza a la realidad.

-Como una fuente de tensión con una inductancia en serie L de valor elevado de forma que en régimen estacionario o permanente la corriente a través de ella puede suponerse constante: esta forma es idéntica a la anterior con la salvedad de escoger un valor adecuado de la bobina de filtro L adecuado para la aplicación en cuestión.

- Como una fuente de tensión seguida de un puente con modulación PWM del tipo FULL-BRIDGE o totalmente controlado con cuatro IGBT's: esta última opción es la más sofisticada por la utilización de un modulador de anchura de pulsos o PWM siendo el resultado más preciso pero más complejo debido a la necesidad de elegir datos adecuados para el PWM así como para los diodos volantes e IGBT's que lo componen.

7.2 Justificación de la solución final y descripción detallada de la misma.

Como hemos dicho escogemos la primera de las tres opciones detalladas por varias razones la primera de ellas es que nuestro modelo será para estudiar el comportamiento de paneles solares y en estos lo que interesa es la potencia entregada a la red eléctrica mensual o anual, entonces si utilizamos la tercera opción, al elegir la frecuencia de conmutación de los IGBT's tendremos demasiadas conmutaciones cada mes o cada año lo cual no necesitamos ya que no nos interesa el comportamiento transitorio sino el final y observar las medidas obtenidas. Además claramente esta opción es más sencilla de implementar e igualmente valida en nuestro modelo.

Lo primero que haremos será obtener el valor de la corriente de pico o corriente máxima entregada por nuestro campo fotovoltaico utilizando para ello una relación entre la potencia entregada por el campo y la potencia inyectada a la red, esto es a la entrada y a la salida del inversor.

$$P_{inyectada} = V_{red_{RMS}} * I_{inyectada_{RMS}} \quad (24)$$

$$P_{generada} * \rho = P_{inyectada} \quad (25)$$

Sustituyendo se obtiene:

$$I_{inyectada_{RMS}} = \frac{P_{generada} * \rho}{V_{red_{RMS}}} \quad (26)$$

Y el valor máximo de I se obtendrá multiplicando por $\sqrt{2}$ la corriente anterior con lo que se obtiene:

$$I_{inyectada_{max}} = \sqrt{2} * \frac{P_{generada} * \rho}{V_{red_{RMS}}} \quad (27)$$

Donde ρ es el valor del rendimiento del inversor y RMS el valor eficaz de tensión y corriente en cada caso.

Hecho esto tenemos que introducir una corriente alterna cuyo valor de pico será el indicado en la ecuación (27) y el producto de dicha corriente por el valor de tensión de red nos dará la potencia obtenida en la que para los dos semiciclos de la tensión de red tendrá valores positivos, es decir en todo instante de tiempo t.

7.3 Creación del modelo en simulink.

Lo primero a hacer será unir la potencia generada a un bloque de ganancia del tipo "Gain" cuyo valor será el indicado en la ecuación (27) en el segundo termino de la igualdad y que resulta ser $5.84 * e^{-3}$ a la salida del cual obtenemos el valor de la amplitud de la corriente inyectada al inversor el cual multiplicaremos por un bloque del tipo "Sine wave" para tener una forma alterna de corriente.

A continuación ponemos un bloque de corriente controlada del tipo "Controlled Current" que sirve para introducir la forma de onda de corriente que queramos, hecho esto a la salida de este añadimos un bloque de medida de dicha corriente y la salida de este la conectamos a la fuente de tensión de red cuya amplitud la fijaremos en $230 * \sqrt{2}$ V que da como resultado 325.27 V, es importante fijar la frecuencia de funcionamiento del sistema en 50 Hz que es la que corresponde a la red eléctrica. Después añadimos un bloque de medida de tensiones y a la salida de estos obtenemos la potencia entregada multiplicando los dos, solo queda ver las formas de onda añadiendo un "Scope" que nos permitirá ver las tres simultáneamente.

Hecho todo esto obtenemos algo como lo siguiente:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

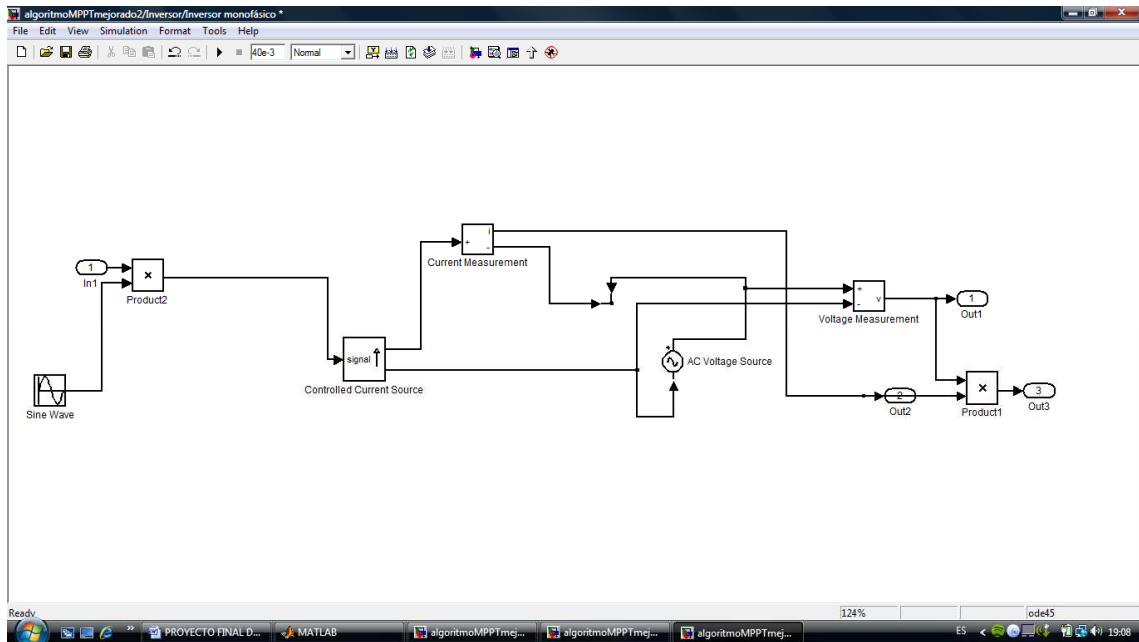
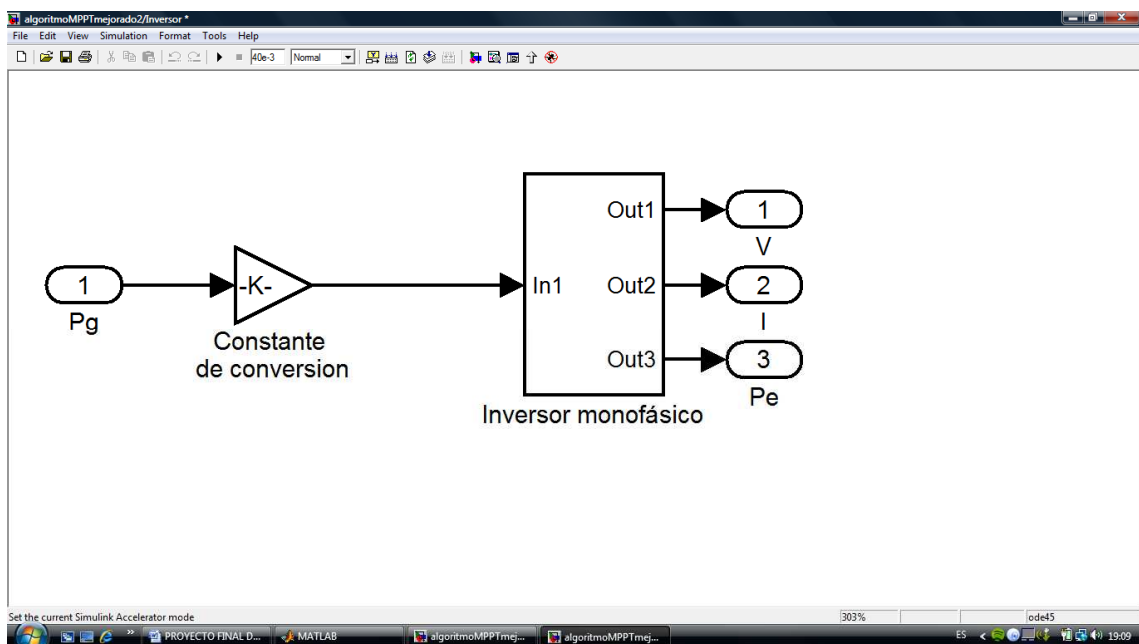


Figura 24. Diseño del inversor monofásico.

Para mejorar la estética del modelo podemos crear un subsistema que contenga todos los bloques antes empleados el cual tendrá una entrada y tres salidas extrayendo el Scope a la salida del mismo podremos ver cada una de ellas.



ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Ahora ya tenemos el modelo completo que quedara de la siguiente forma cambiando de color cada bloque para distinguir la función que realiza dentro del modelo.

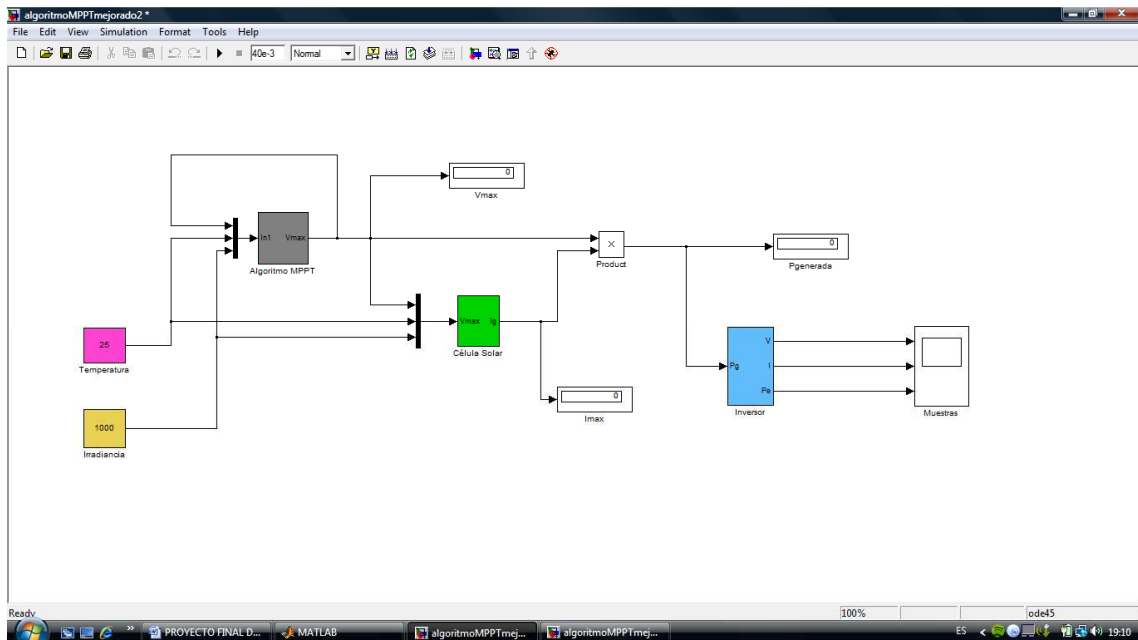


Figura 25. Modelo completo del sistema fotovoltaico.

8. Características del campo fotovoltaico presente en la upv.

Si realizamos ahora una simulación lo mejor será dar valores reales a cada parámetro del modelo, es decir valores comerciales, en nuestro caso daremos los valores del campo fotovoltaico de la upv los cuales se exponen a continuación.

La nomenclatura empleada a continuación es la siguiente:

Panel = Módulo.

Número de células serie por panel: 36 de 5"

Número de células en paralelo por panel: 1

Estructura de células en cada panel: 8 en serie y 4 en paralelo formando cada panel.

Los paneles o módulos se conectan entre sí de forma que podemos considerar que el total de células en serie corresponde a 36 por cada panel multiplicada por el número de paneles en serie 8 y multiplicada por 6 inversores monofásicos a los cuales llegan los paneles conectados, así como 5 grupos conectados en paralelo lo que supondrá:

$$N_s = 8 \cdot 36$$

$$N_p = 4$$

Cada grupo de 32 módulos formado por 8 en serie y 4 en paralelo constituye un campo y va a un inversor trifásico teniendo 6 inversores para cada uno de los 6 campos fotovoltaicos que están conectados a su vez entre sí, así se tendrá una potencia nominal proporcionada por la instalación de: $P_{TOTAL} = 8 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 75 = 18 \text{ KW}$ siendo 75 W la potencia de cada panel empleado.

No obstante a esta potencia total hay que restarle la potencia de un campo situado a la salida de los inversores y cuya potencia a considerar será $P_{RESTADA} = 5 \cdot 6 \cdot 75 \text{ W}$.

Haciendo el producto de la potencia de un módulo =75 W por el número de módulos totales 234 obtenemos la potencia nominal del campo 17.55 KW.

Dicho esto aplicamos estas características a nuestro modelo modificando los parámetros N_s y N_p en la ecuación característica de la célula/módulo.

9. Ampliación del modelo y formas de onda de potencia inyectada a la red.

Lo que nos interesa desde el principio de la elaboración del modelo es la potencia media inyectada a la red en cada periodo de señal de la misma, para conocer este valor solo es necesario añadir a la salida del inversor en la línea de P_e un bloque llamado "Mean Value" situado en la librería "Simpowersystems" a la salida del cual obtenemos directamente el valor

medio de la potencia entregada en cada periodo de la señal de red con tan solo asegurarnos de emplear el tiempo adecuado en cada simulación, es decir que este sea un múltiplo del periodo de la señal de red que es 0.02 segundos o 20 milisegundos.

9.1. Formas de onda de tensión, corriente y potencia a la salida del inversor.

Si realizamos una simulación con unos valores de N_s y N_p de 350 y 1 respectivamente y una V_{oc} de 210 V que corresponde a todo el panel fotovoltaico y condiciones ideales de $G = 1000 \frac{W}{m^2}$ y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ obtenemos unos valores como los que siguen:

Pgenerada por el panel	439 W
Pmedia inyectada a la red	417 W
Valor máximo de Pinyectada	834 W
Fase de la potencia inyectada	0 rad.

Si observamos las formas de onda obtenidas a la salida del inversor monofásico:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

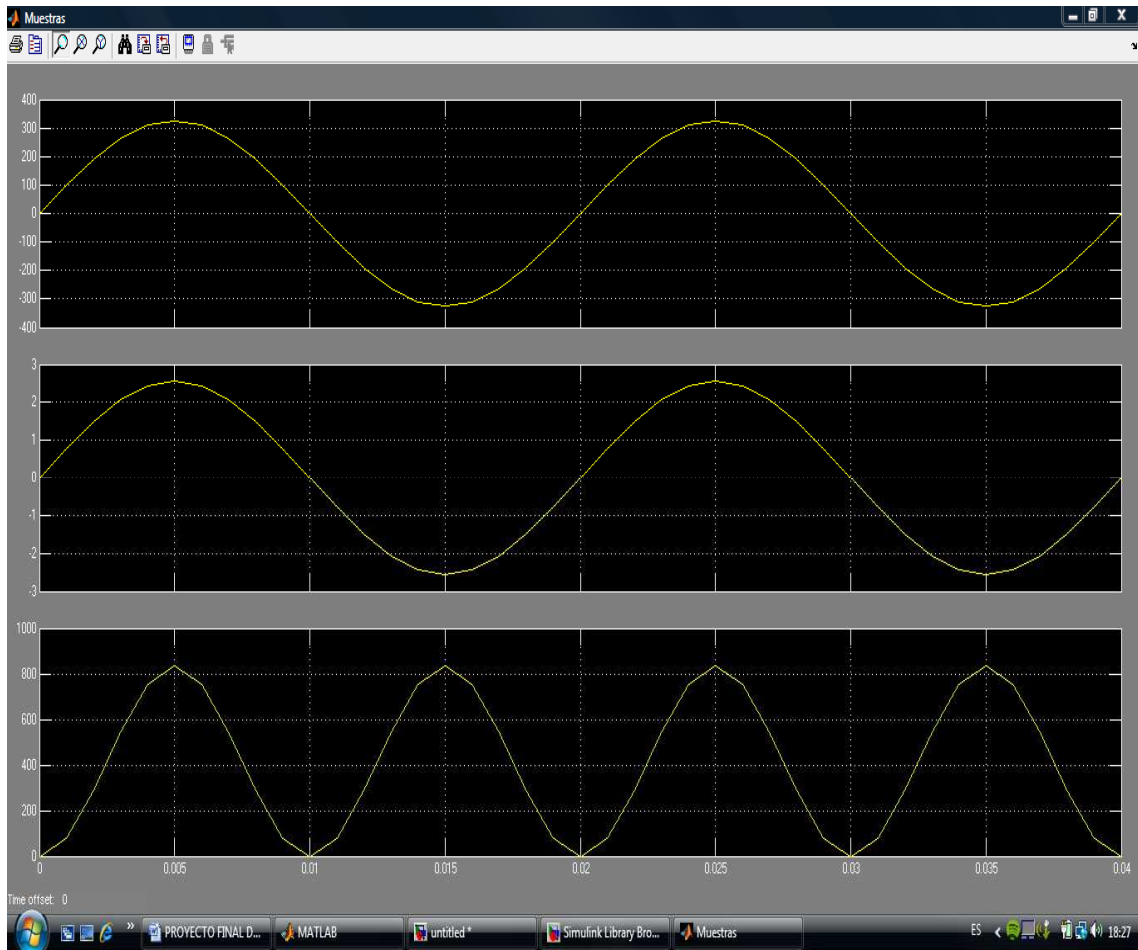


Figura 26. Formas de onda obtenidas.

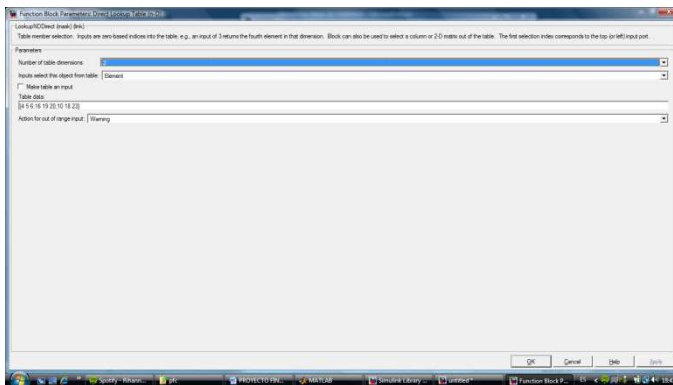
Podemos observar que la primera curva corresponde a la tensión de red, la segunda a la corriente y la tercera a la potencia inyectada por el sistema fotovoltaico en la que, al estar la tensión y corriente en fase obtenemos una potencia con valores únicamente positivos con lo que se maximiza la potencia media entregada a la red eléctrica y la fase como se puede ver en esta forma de onda es e 0 radianes.

Si nos encontramos en un lugar donde habitualmente la irradiancia toma valores más bajos que el utilizado idealmente ($G=1000$) la potencia entregada también será más pequeña pero la fase de la misma y los valores que tome serán siempre positivos.

9.2. Ampliación del modelo para calcular la potencia media entregada anualmente a la red eléctrica.

9.2.1. Creación de una tabla con los valores de G y T.

Para simular el sistema con valores de irradiancia y temperatura de un año completo tenemos que crear una tabla de valores de irradiancia y temperatura la cual constara de dos columnas, una para cada grupo de valores. La manera más directa y sencilla de hacerlo es utilizando un bloque del tipo “Direct Look-up table” del menú Lookup Tables en el que podemos seleccionar el tipo de datos que queremos introducir en la tabla en el menú que se despliega haciendo doble click sobre el bloque:



En nuestro caso seleccionamos 2 dimensiones, tipo de entrada “Element” y añadimos las columnas en la línea de debajo donde introducimos los valores de temperatura e irradiancia correspondientes a cada mes del año por tanto 12 valores diferentes. Para ello ponemos un valor de irradiancia a continuación del anterior seguidos con un espacio de separación entre ellos, a continuación añadimos un punto y coma ; e introducimos los valores de temperatura en el mismo orden de forma que a cada valor de irradiancia le corresponda un valor de temperatura y después otro ; para finalizar. Así ya tenemos nuestra tabla con los valores de G y T que servirán de entradas a los bloques de “AlgoritmoMPPT y Celula Solar” del modelo.

9.2.2. Entrada y salida del bloque diseñado.

Una de las características de este bloque es que a su salida tenemos los valores de G y T simultáneamente seleccionados por los valores de la entrada del bloque en una misma línea, por lo que esta línea la llevamos a un demultiplexor y este a su salida nos da los valores por separado de irradiancia y temperatura correspondientes como muestra la figura:

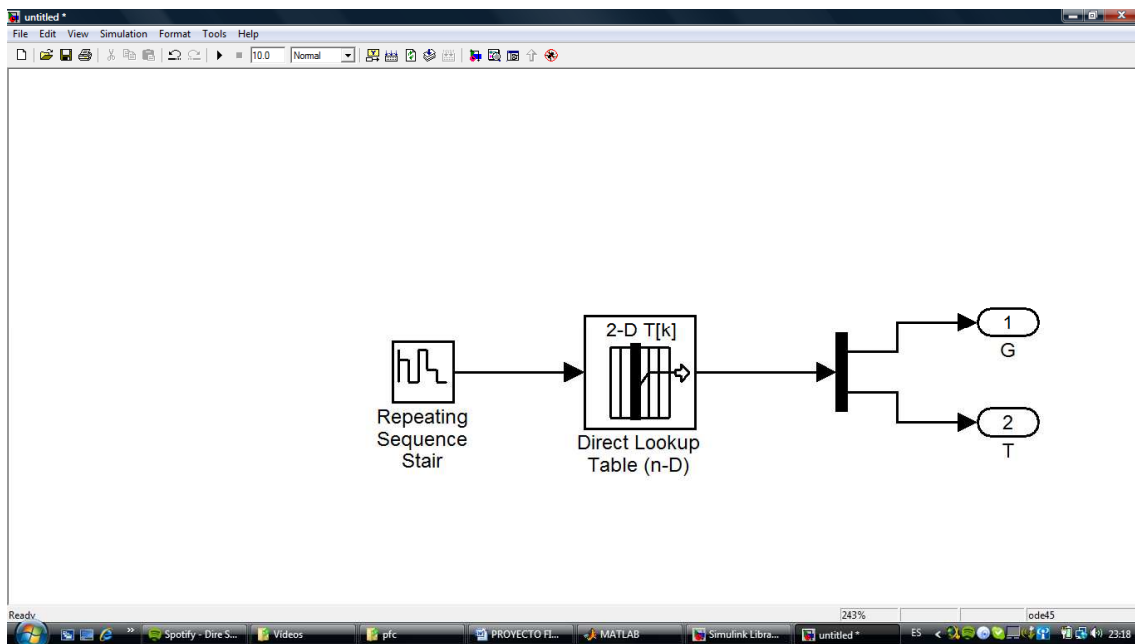


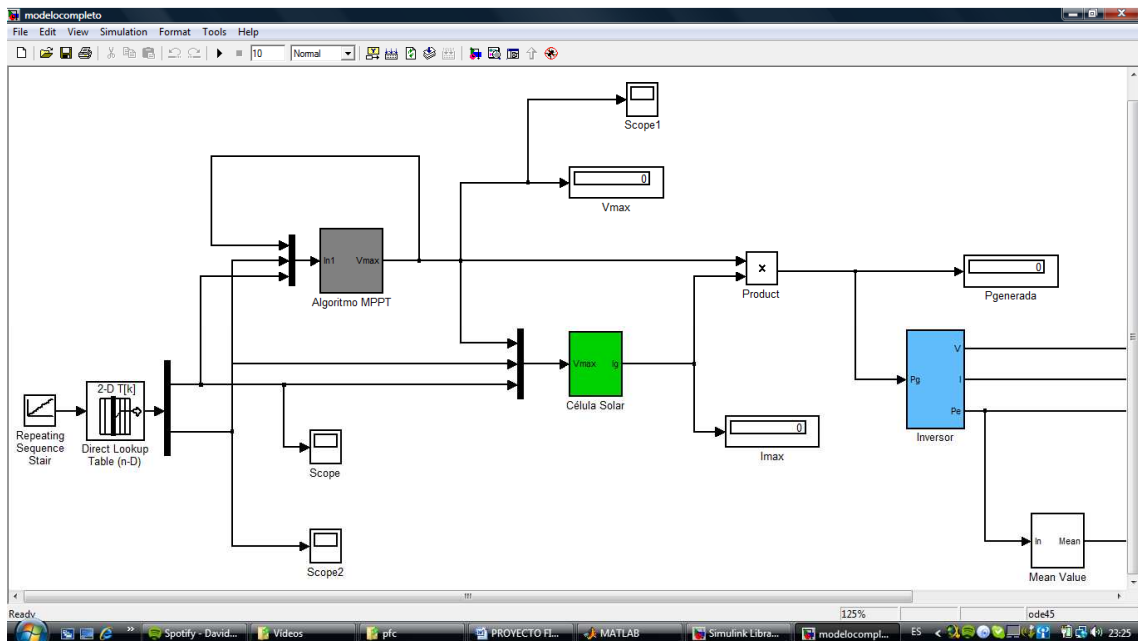
Figura 27. Creación de la tabla que contiene valores de G y T.

Ahora cada una de las dos salidas G y T la llevamos a los bloques “Algoritmo MPPT y Celula Solar” para que calculen los valores correspondientes de V_{max} y I_{max} y así la potencia obtenida en la simulación.

Para seleccionar cada uno de los valores de las dos columnas introducidas necesitaremos conectar a la entrada del bloque una secuencia repetitiva de valores que pondremos desde 0 hasta 11 siendo así 12 el total de valores que corresponden a un mes de un año como se muestra en la figura anterior.

9.3. Simulación completa de la energía anual obtenida introduciendo los valores de G y T de cada mes del año.

Con todo esto hecho el modelo completo que resulta es el siguiente:

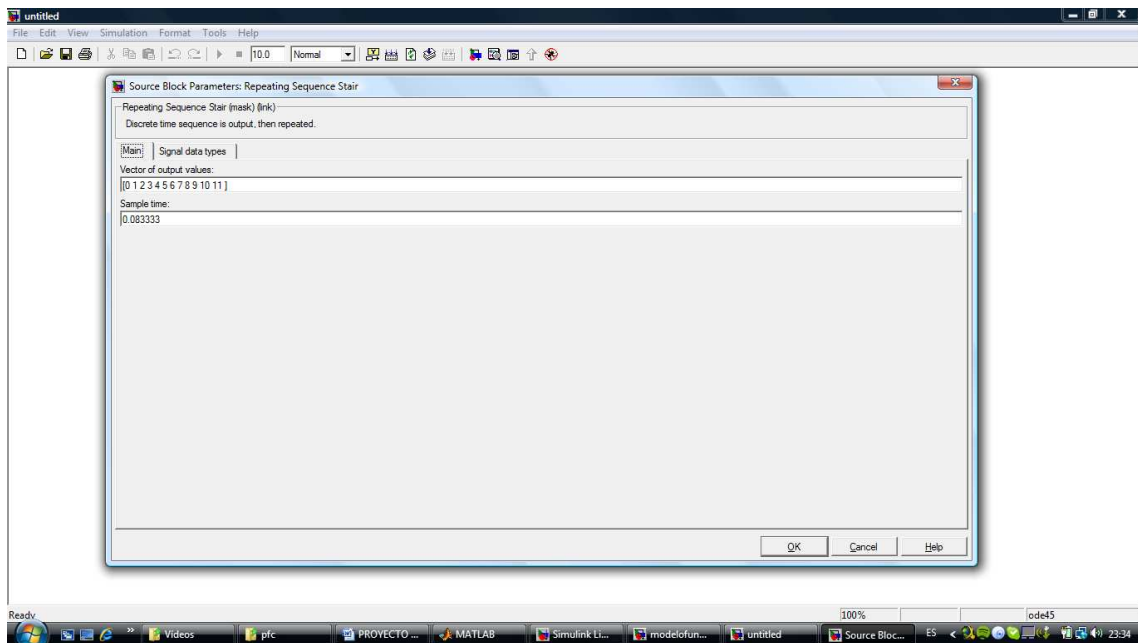


Así queda el modelo completo en el que solo resta seleccionar los valores adecuados de G y T correspondientes a cada mes y llenar la tabla anterior, además habrá que seleccionar tiempos adecuados para cada simulación en lo que respecta a la secuencia de entrada de la tabla y a la simulación en sí.

Para asegurar que el modelo completo pueda ejecutar la simulación completa para cada par de valores de G y T pondremos un tiempo para cada muestra de la secuencia "Repeting Sequence Star" de valor 0.083333 como se muestra en la figura que sigue, en la que se observan también los valores desde 0 hasta 11 para seleccionar todas las filas de la tabla diseñada.

Este tiempo para cada valor de los introducidos es suficiente para realizar todo el proceso hasta obtener las formas de onda de la potencia y la potencia media entregada a la red utilizando un tiempo total para la simulación de 1, de tal forma que tendremos que $0.083333 \cdot 12 = 1$.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

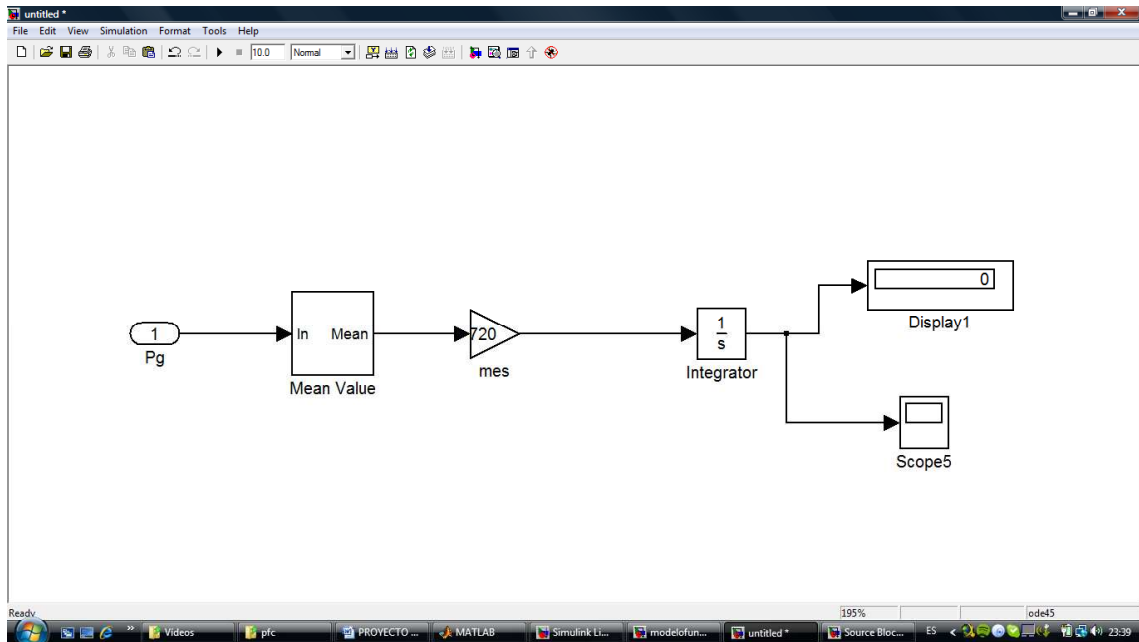


Hecho esto solo queda sumar todas las potencias obtenidas en cada mes utilizando para ello un integrador de la librería “Continuous” integrator y este realizara la integral de los valores a su entrada, así obtendremos a su salida la suma de todos ellos multiplicada por el valor del tiempo que permanece cada muestra en la entrada de la tabla creada ya que este bloque realiza la siguiente operación:

$$y(t) = \int_{t_0}^t x(t) dt + y(t=0) \quad (28)$$

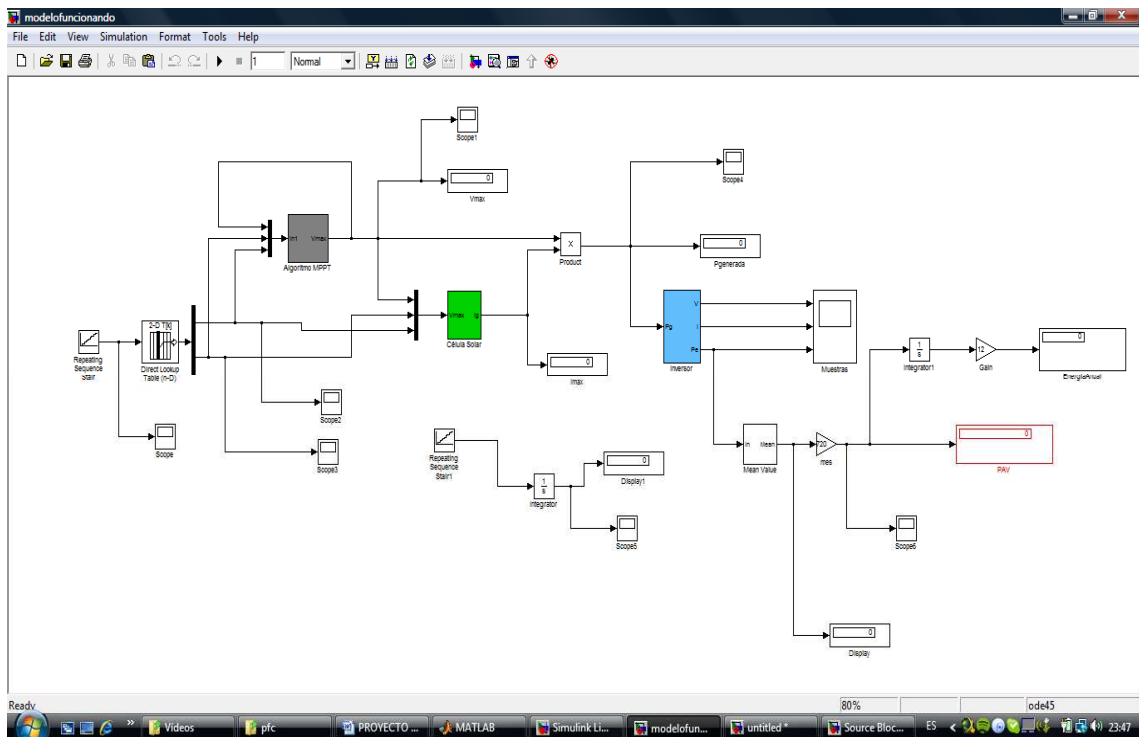
El valor de t por tanto tendrá que estar ajustado a nuestra necesidad que es 0.08333 para que el total de tiempo en la simulación sea 1 como hemos seleccionado anteriormente.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK



El valor del bloque de ganancia situado a continuación del valor medio de la potencia tiene el valor de $24 \cdot 30 = 720$ horas en cada mes, así podemos convertir el valor a la salida de este en energía medida en KWh y a la salida del integrador obtenemos energía total medida al año.

El diagrama de bloques del sistema completo quedara como sigue:



ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Figura 27. Diagrama del sistema ampliado para estimaciones de energía anual producida.

En el display rojo situado en el extremo derecho se indicara la energía medida en KWh cada mes, es decir para cada par de valores de G y T y al realizar la integral de estos y multiplicar el resultado por 12 obtendremos la suma de la energía producida anualmente como se ha descrito previamente.

Hecho todo esto solo queda ya introducir valores de irradiancia y temperaturas medias cada mes en la tabla y obtener a la salida el valor de energía anual obtenido por nuestro campo fotovoltaico, así hemos creado un modelo que sirve tanto para valores aislados como para valores en periodos de tiempo completos.

Para obtener unos valores de irradiancia reales podemos visitar la página web que sigue:

<http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/radday.php?lang=en&map=europe>

En esta página encontramos valores de irradiancia mensual para cualquier mes del año en cualquier región, en nuestro caso buscando Valencia aparecen los siguientes valores de G:

Mes	Irradiancia mensual (W/m^2)
Enero	84.125
Febrero	115.58
Marzo	162.04
Abril	203
Mayo	246.08
Junio	267.6
Julio	266.41
Agosto	237.7
Septiembre	192.83
Octubre	141.67
Noviembre	91.04
Diciembre	72.33

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Para obtener los valores medios de temperatura podemos entrar en páginas con información meteorológica como por ejemplo:

<http://www.agricultura.gva.es/coyuntura/cast/publicaciones/ISAV/ISAV-2006/Quadres/Cuad03-02.pdf>

Con los valores medios de temperatura de Valencia que aparecen en dicha página podemos elaborar otra tabla de valores que introducir en nuestra simulación:

Mes	Temperatura mensual (°C)
Enero	8.4
Febrero	11.5
Marzo	16.5
Abril	17.4
Mayo	20.1
Junio	22.8
Julio	26.9
Agosto	25.5
Septiembre	24
Octubre	21.9
Noviembre	17.3
Diciembre	12.6

Una vez introducidos estos valores en la tabla de la simulación obtenemos una energía anual de 622.03 KWh anualmente inyectada a la red como muestra el display de color negro que aparece en la figura siguiente:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

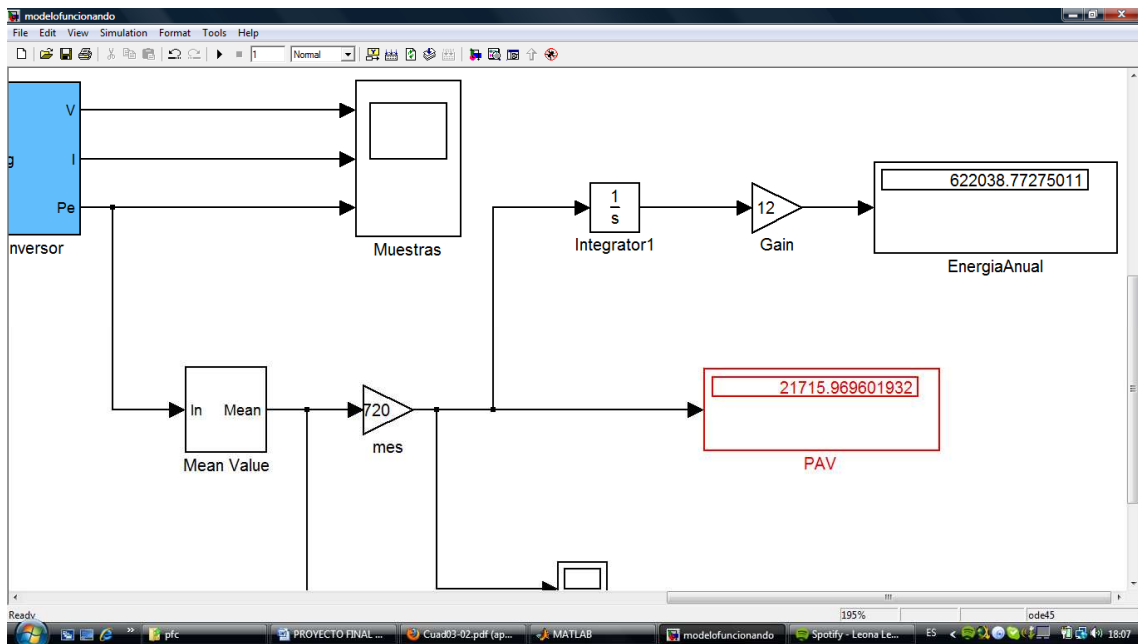


Figura 28. Valor de la energía producida anualmente.

El display rojo situado debajo del anterior muestra el último valor proporcionado por la simulación con los valores de G y T introducidos para el mes de diciembre que se muestran en las tablas de la página anterior.

Así ya podemos obtener valores de energías producidas según la instalación fotovoltaica con que contamos y utilizar dichos valores para conocer la cantidad de energía que podemos vender a las empresas eléctricas o con que contamos para nuestro uso.

9.4 Factores limitantes de la potencia obtenida por el campo fotovoltaico.

Los valores de irradiancia presentados en la tabla de la página anterior no recogen los errores presentes en el entorno real del sistema, es decir asociadas a la irradiancia existen unas pérdidas en el proceso de captación de la misma por parte de nuestro sistema fotovoltaico, además de otras pérdidas presentes en el inversor monofásico y demás elementos que intervienen en la producción de energía. En primer lugar necesitamos

modelar la cantidad de irradiancia recibida por nuestro sistema de la total procedente del sol y para ello necesitamos definir unos conceptos que siguen a continuación:

- P_{nom} : Potencia del generador en condiciones estándar de medida (STC).
- \varnothing : Latitud del lugar ($^{\circ}$).
- α : Ángulo de acimut ($^{\circ}$) u orientación del campo fotovoltaico.
- β : Ángulo de inclinación ($^{\circ}$) del campo fotovoltaico.
- Rendimiento global de la instalación o "Performance Ratio"(PR).
- $G_a(0)$: Irradiancia total presente en el medio.

Para calcular la cantidad de irradiancia que recibe realmente el sistema que llamaremos irradiancia efectiva o G_{ef} tenemos que realizar los siguientes pasos:

1) Radiación anual incidente sobre superficie horizontal, $G_a(0)$ (W /m²), dato procedente de tablas de diferentes organismos.

2) Radiación anual incidente sobre superficie con posición óptima, o $G_a(\beta_{opt})$.

La orientación óptima para el campo es que el sol este situado enfrente del mismo, o sea que $\alpha = 0^{\circ}$.

3) Calcular el valor óptimo del ángulo de inclinación del campo β_{opt} que se obtiene con la siguiente expresión:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69*\varnothing \quad (29)$$

4) Calcular el valor de la irradiancia $G_a(\beta_{opt})$ con la expresión que sigue:

$$G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1-4.46*10^{-4}*\beta_{opt}-1.19*10^{-4}*\beta_{opt}^2} \quad (30)$$

5) Calcular finalmente la irradiancia efectiva en la superficie del campo que como se puede observar es función de la inclinación y de su orientación con respecto al sol con la expresión que sigue:

$$G_{a,ef}(\alpha, \beta) = G_a(\beta_{opt}) * [g_1 * (\beta - \beta_{opt})^2 + g_2 * (\beta - \beta_{opt}) + g_3] \quad (31)$$

Donde los coeficientes g_i se calculan:

$$g_i = g_{i1} * \alpha^2 + g_{i2} * \alpha + g_{i3} \quad (32)$$

Y los valores de g_{ii} para un grado de suciedad medio son:

$T_{sucio}(0) / T_{limpio}(0) = 0,97$			
Coeficientes	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
g_{1i}	8×10^{-9}	$3,8 \times 10^{-7}$	$-1,218 \times 10^{-4}$
g_{2i}	$-4,27 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-6}$	$2,892 \times 10^{-4}$
g_{3i}	$-2,5 \times 10^{-5}$	$-1,034 \times 10^{-4}$	0,9314

Añadiendo este algoritmo a nuestro modelo en simulink podemos obtener la irradiancia efectiva sobre el campo fotovoltaico para cualquier valor de G presente en el medio y este nuevo valor de $G_{efectiva}$ será el que entrara a los bloques “Célula Solar y Algoritmo MPPT”.

9.5 Diseño del bloque para calcular limitaciones de potencia del sistema.

Lo primero a hacer es crear tres funciones con el bloque “Fcn” utilizado anteriormente y cada una de ellas será las expresiones de cálculo de los tres factores g_1 , g_2 , y g_3 que resultan de tres ecuaciones diferentes empleando la expresión (32) al sustituir por i el valor de 1, 2 y 3.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

Hecho esto añadimos el resto de los factores que aparecen en la ecuación (31) introduciendo la expresión (30) en otro bloque “Fcn” y a continuación podemos crear un subsistema que englobe al diagrama de bloques que realiza la función (31) que acabamos de hacer con una única salida Gefectiva y cuyas entradas serán la irradiancia total $G_a(0)$, la latitud del lugar donde realizamos la simulación, ϕ y el valor de la inclinación de nuestro campo, β . Hay que recalcar que la entrada como valor de irradiancia a los bloques “Célula Solar” y “Algoritmo MPPT” será la Gefectiva calculada por el nuevo bloque.

A continuación se muestran el diagrama de bloques creado y el subsistema respectivamente:

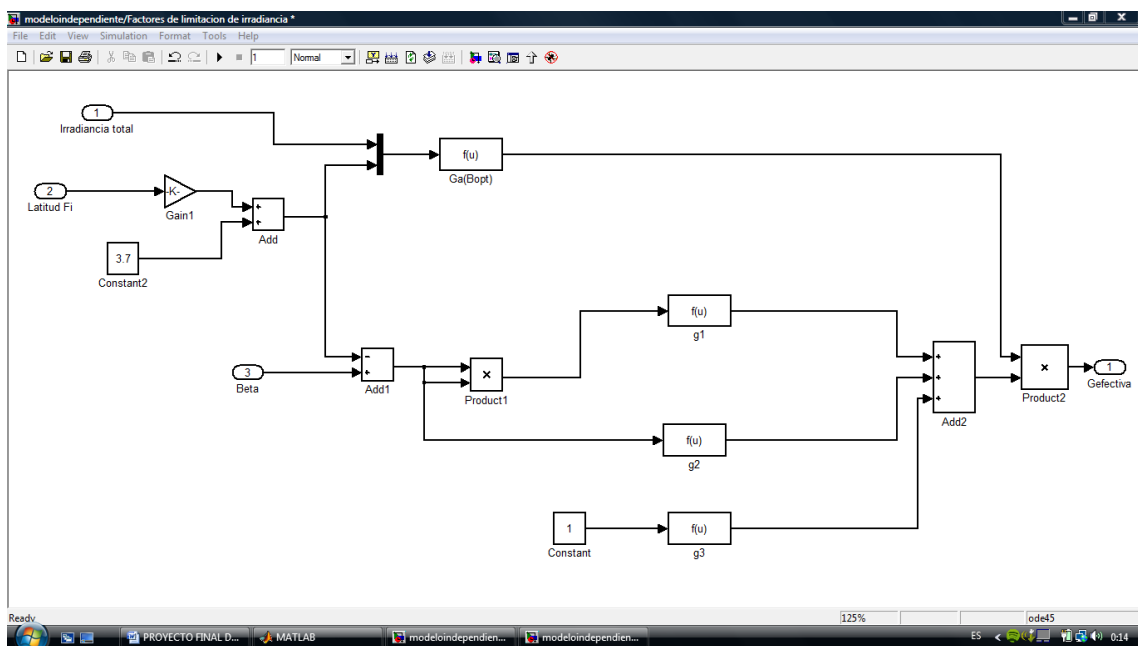


Figura 29. Diagrama de bloques para calcular la irradiancia efectiva.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

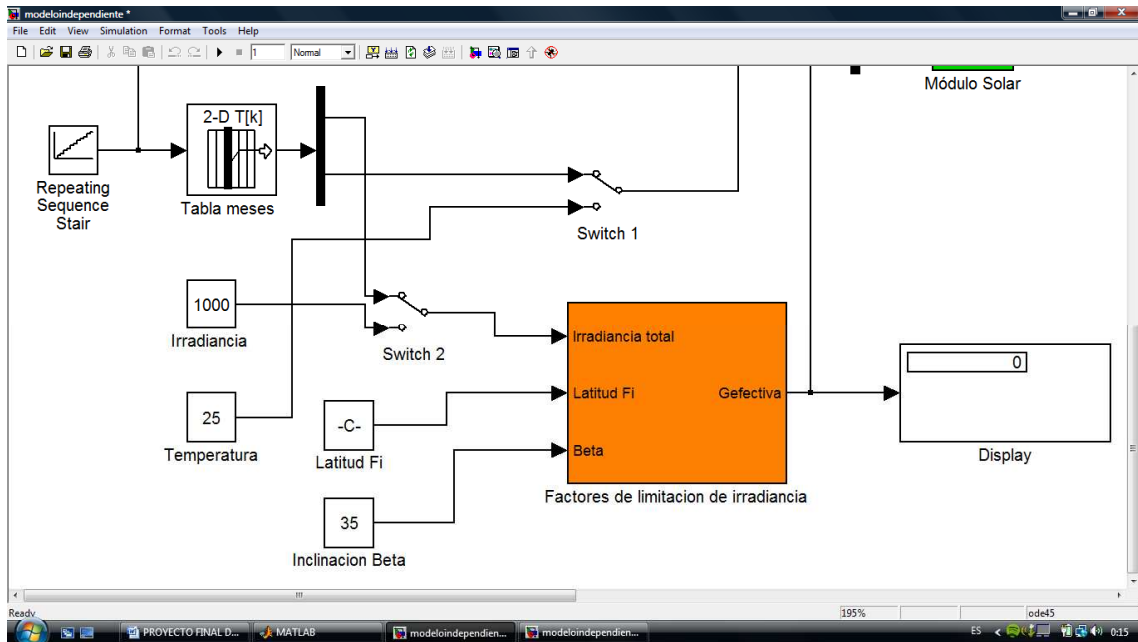


Figura 30. Subsistema asociado al diagrama de bloques anterior.

Los dos interruptores “switch” mostrados en la figura anterior sirven para disponer de un modo de funcionamiento para calcular la energía producida por un único valor de irradiancia mensual y el cálculo de energía producida por un año completo utilizando la tabla diseñada anteriormente. Añadimos también un valor de ganancia de 0.7 a la salida de la energía obtenida para modelar el factor PR anteriormente mencionado que incluye las pérdidas asociadas a todo el sistema fotovoltaico.

Con este nuevo bloque el modelo esta ya completo y tiene la forma que sigue:

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

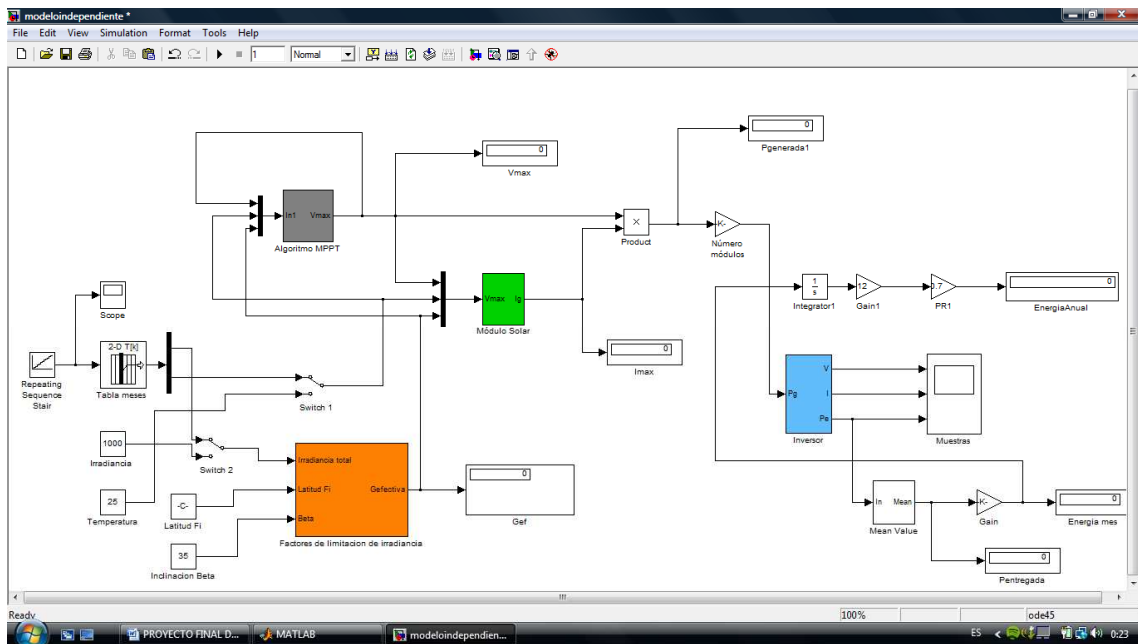


Figura 31. Diagrama de bloques del modelo completo.

Para comprobar que funciona correctamente podemos introducir los datos de irradiancia y temperatura presentes en Valencia medios cada mes de las páginas anteriores y calcular el valor de energía obtenida con este modelo, así como el obtenido en la página donde obtenemos los valores de la irradiancia introduciendo en la misma los valores de P_{nom} , α , β de nuestro campo.

El valor obtenido en la simulación en simulink es el que muestra el display de la figura que corresponde a 20156874 Wh, o sea 20.15MWh anuales.

ESTUDIO Y SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE MATLAB/SIMULINK

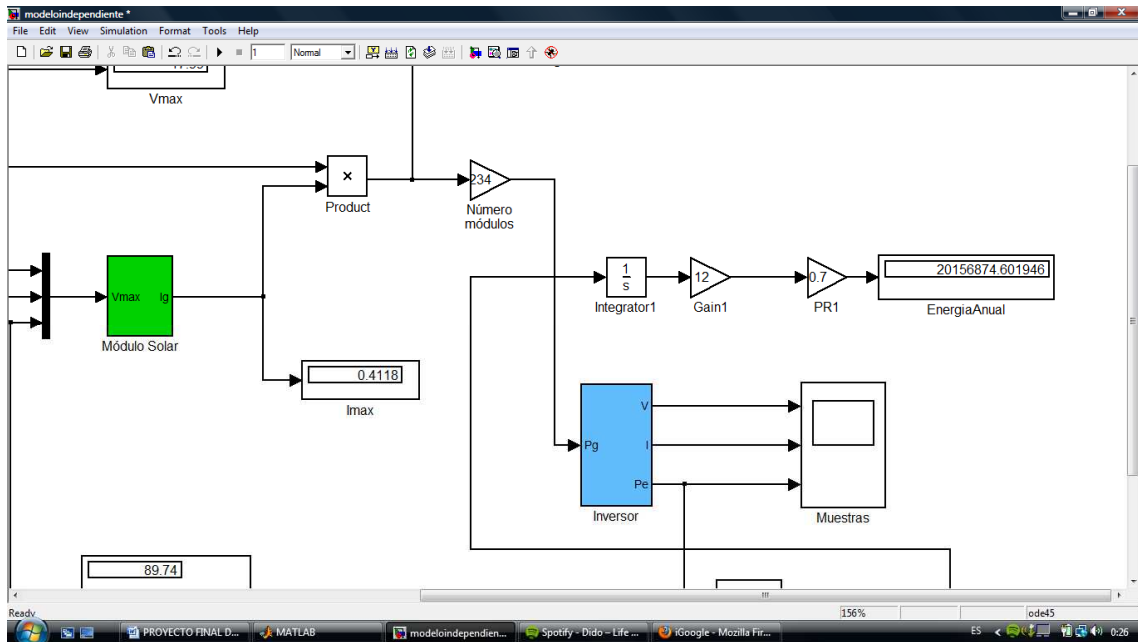


Figura 32. Valor de energía anual producida.

El valor obtenido en la página web que sigue:
<http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/pvest.php?lang=en&map=europe>

Es de 18986 KWh, o sea 18.986MWh introduciendo los datos anteriores que se asemeja bastante al obtenido en nuestra simulación lo que supone un error de un 5% que es aceptable teniendo en cuenta los factores de perdidas considerados en el modelo y las aproximaciones en las ecuaciones utilizadas.

Para calcular las diferencias entre el valor obtenido en simulink y en la página web podemos utilizar la expresión de error relativo que se detalla a continuación:

$$\text{Error} = [\text{Valor (simulink)} - \text{Valor(web)}] / \text{Valor (simulink)}$$

Así podemos estimar la aproximación de nuestra simulación con otras simulaciones.

10. Justificación detallada de los componentes de la solución adoptada.

Se ha escogido el panel fotovoltaico presente en la upv para las simulaciones debido a que sus características constructivas son sencillas de implementar en nuestro modelo en simulink y además tenemos toda la información sobre él, asimismo los inversores que forman parte de la instalación de la upv son modelos del tipo TAURO y se pueden encontrar en catálogos comerciales y en diversas aplicaciones en la industria electrónica por tanto esta instalación es muy útil desde un punto de vista didáctico.

11. Conclusiones.

El desarrollo y estudio realizado durante el presente proyecto ha permitido extraer una serie de conclusiones que a continuación se detallan. En primer lugar, el conjunto de experiencias llevadas a cabo mediante los diferentes bloques diseñados dan la posibilidad de proporcionar un apoyo a la enseñanza en el campo de la energía fotovoltaica. Todo implementado en Matlab/Simulink, que debido a su potencia como herramienta de simulación, proporciona resultados muy próximos a la realidad.

También se ha comprobado en diferentes apartados, la necesidad de disponer de un algoritmo de seguimiento de máxima potencia para extraer el máximo rendimiento de una instalación de estas características.

El modelo creado puede ser útil para estimar la energía que se puede obtener de un modelo real y en cualquier entorno conociendo los valores medios de G y T anuales, mensuales o diarios, además de poder en caso de ser necesario una instalación autónoma de producción de energía para mantener a éste suministrando energía todo el tiempo que sea necesario.

Con el disco que contiene este pfc adjunto los archivos creados en simulink que han permitido obtener todos los resultados detallados en las diferentes partes de esta memoria.

12. Bibliografía.

<http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/pvest.php?lang=en&map=europe>

http://iecon02.us.es/ASIGN/SEFER_2IE/practicas/Practica5.pdf

http://www.solarpedia.es/index.php/C%C3%A9lula_solar

<http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik-e.html>