



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

**SIMULACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON
MATLAB-SIMULINK : SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA.**

Alumno: Gregorio Sánchez Rodríguez

Tutor: D. Juan Domingo Aguilar Peña
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

A. Septiembre, 2018

Índice:

1 .	Introducción.....	4
1.1.	Motivación.....	4
1.2.	Objetivos.....	5
1.3.	Matlab y Simulink	6
1.4.	Simscape.....	7
1.4.1 .	Simscape. Librerías.	8
2 .	La Célula Fotoeléctrica.....	11
2.1.	Propiedades electricas.....	12
2.1.1 .	Circuito eléctrico equivalente.....	17
2.2.	Efectos medioambientales sobre la Célula (Temperatura e Irradiancia)	17
2.3.	Modelado de la Célula Solar en Matlab-Simulink.	21
3 .	Módulo Fotovoltaico : Generadores.	23
3.1.	Asociación de las células. Caso Ideal.	23
3.2.	Asociación de células. Caso real.	26
3.3.	Condiciones estándares de medida.	30
3.4.	Simulink. Módulo fotovoltaico.....	31
4 .	Convertidores DC-DC. Aplicación a los sistemas fotovoltaicos.	39
4.1.	Introducción.....	39
4.2.	Concepto de conmutación. Convertidor DC/DC	40
4.2.1 .	Convertidor reductor (Buck)	41
4.2.2 .	Convertidor elevador o Boost.....	48
4.2.3 .	Convertidor Reductor-Elevador o Buck-Boost	52
4.3.	Comportamiento de los Convertidores DC/DC Acoplados a Módulos Fotovoltaicos.	57
4.3.1 .	Comportamiento de un Convertidor Elevador.....	57
4.3.2 .	Comportamiento de un Convertidor Reductor	60
4.3.3 .	Comportamiento de un Convertidor Reductor-Elevador.....	61
4.4.	Limitaciones de los convertidores DC/DC.....	63
4.5.	Modelado del convertidores. Simulink.....	66
4.5.1 .	Simulink. Convertidor buck	66
4.5.2 .	Simulink. Convertidor Boost.....	71
4.5.3 .	Simulink. Convertidor Buck-Boost.....	75
5 .	Seguidores del punto de máxima potencia (MPPT)	77
5.1.	Introducción.....	77
5.2.	Clasificación de los Métodos de Seguimiento.....	77
5.2.1 .	Métodos indirectos	78
5.2.1.1	Control por tensión de circuito abierto del generador FV.....	79

5.2.1.2	Control por corriente de cortocircuito del generador FV.	80
5.2.2 .	Métodos Directos	82
5.2.2.1	Método de Perturbación y Observación (PyO).....	82
5.2.2.2	Conductancia Incremental.....	85
5.3.	Simulink. Simulación de MPPT	88
5.3.1 .	Simulink. Método Indirecto. Control por tensión de circuito abierto.....	88
5.3.2 .	Simulink. Método Indirecto. Control por corriente de cortocircuito.....	94
5.3.3 .	Simulink. Método Directo. Perturbación y Observación.	99
5.3.4 .	Simulink. Metodo Directo. Conductancia Incremental.	102
6 .	Anexo	107
6.1.	Bloques Simulink	107
6.2.	Bloques Simscape.....	109
6.3.	Circuitos SIMULINK.	111
6.4	Ejercicios Prácticos.....	133
7 .	REFERENCIAS:	144

1 . Introducción

Este trabajo está realizado desde el departamento de ingeniería Electrónica y Automática de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén como trabajo fin de Grado del alumno Gregorio Sánchez Rodríguez, supervisado por el profesor y tutor del mismo, D. Juan Domingo Aguilar Peña.

El trabajo consiste en el estudio y simulación mediante Matlab/Simulink de los elementos necesarios para poner en funcionamiento un módulo o generador fotovoltaico con un seguidor del punto de máxima potencia.

Se ve estructurado, inicialmente, por una introducción al software que se utilizará en este trabajo y que hará posible la simulación. Posteriormente, se estudiarán los elementos que componen cada una de las simulaciones realizadas en este trabajo: Células y módulos fotovoltaicos, convertidores de tensión y seguidores de máxima potencia. Finalmente, se concluirá con un anexo que contiene los circuitos y algoritmos utilizados para cada una de las simulaciones contenidas en la memoria, además de una serie de ejercicios prácticos para que el alumno podrá realizar en el entorno Matlab/Simulink.

1.1. Motivación

Dada la situación actual energética del planeta, cada vez más nos vemos obligados a buscar fuentes limpias e inagotables de energía que puedan cumplir con la demanda del ser humano y ser sostenibles a largo plazo. La energía solar fotovoltaica es una de las alternativas que nos ofrece la naturaleza para conseguir energía limpia y renovable.

El creciente uso de esta fuente de energía, junto con su estrecha relación con la electrónica, la hace cada vez más una alternativa atractiva de estudio por parte de los alumnos de Ingeniería. Por lo tanto, otra de las razones que incitan a la realización de este trabajo es facilitar el entendimiento a los alumnos de los distintos sistemas utilizados para el correcto aprovechamiento de la radiación solar como energía mediante la simulación de los mismos con el software Matlab y Simulink.

Este trabajo tiene como base el proyecto fin de carrera del alumno de la Universidad de Jaén Juan José Marín Mera, que basó su estudio en la simulación de seguidores de máxima potencia con un software

adicional distinto al que se usará en este trabajo : Orcad PSPICE.

A día de hoy es complicado integrar el software de PSPICE con Matlab, ambos software han avanzado lo suficiente como para no necesitar integrarse mutuamente y permiten la simulación de modelos fotovoltaicos con seguidores del punto de máxima potencia de forma individual.

Desde un punto de vista personal, Matlab y Simulink contienen una interfaz con características más adaptadas a la docencia que el propio PSPICE, por lo que se tomó la decisión de utilizar estas herramientas para el estudio y simulación de los circuitos tratados en este trabajo.

1.2. Objetivos

Objetivos generales del trabajo:

- Concienciar de la existencia de una energía limpia y fácil de generar
- Utilización de las nuevas tecnologías en la enseñanza
- Facilitar al alumno en la asimilación de los conocimientos básicos necesarios para el diseño de instalaciones de sistemas fotovoltaicos

Objetivos específicos:

- Analizar la necesidad de hacer trabajar al generador FV en el punto de máxima potencia en distintas aplicaciones
- Estudiar los conceptos sobre seguimiento del punto de máxima potencia en un generador fotovoltaicos
- Modelos de célula, módulo y generador con Matlab-Simulink
- Predecir el comportamiento del sistema a diferentes condiciones de funcionamiento y evaluar teóricamente su funcionamiento con diferentes configuraciones realizando la comparativa correspondiente
- Distintos convertidores electrónicos utilizados
- Modelos para control mppt mediante algoritmos de control con Simulink (Matlab)
- Desarrollar unos ejercicios de simulación que muestren los distintos algoritmos y su aplicación al convertidor de potencia y módulo fotovoltaico.

1.3. Matlab y Simulink

Mathworks MATLAB ([link Web Matlab](#)) (abreviatura de Matrix Laboratory) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Fue creado por el matemático y programador de computadoras Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje.

En 2004, se estimaba que MATLAB era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales.

Las aplicaciones de MATLAB se desarrollan en un lenguaje de programación propio. Este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos *.m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

Mathworks Simulink ([link Web Simulink](#)) es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model").

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Es ampliamente usado en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica.

En este trabajo, se utilizará particularmente un complemento de Simulink llamado Simscape.

1.4. Simscape

Simscape es un conjunto de bibliotecas de bloques para el modelado de sistemas físicos en el entorno de Simulink. Su uso es apropiado para simular sistemas con componentes físicos reales, ya que la disposición de los bloques, reproduce la disposición del sistema físico real. Por esta motivo se diferencia de los bloques estándares de Simulink. Además los bloques de Simscape se pueden integrar y usar con los bloques de Simulink.

Los bloques de Simscape se pueden dividir en dos apartados:

- Elementos Pasivos: Son los elementos que consumen energía y no importa la orientación que tenga el bloque. Algunos de estos bloques son resistencias, amortiguadores, resortes, etc.
- Elementos Activos: Son los elementos que proporcionan energía a la red y es muy importante controlar la orientación del bloque. Algunos de estos bloques son fuentes de voltaje, fuentes de velocidad, etc.

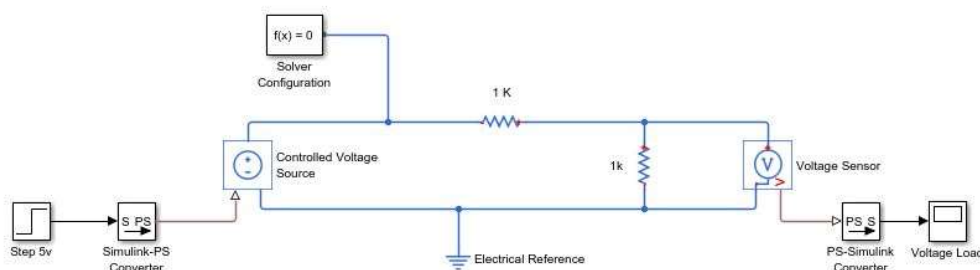


Ilustración 1.1 Circuito básico Simscape. [Captura Simulink]

Como se puede observar en la imagen de arriba, se ha construido un circuito eléctrico muy básico para explicar los bloques necesarios.

- Elementos activos: Se ha usado “Controlled Voltage Source” como una fuente de tensión controlada. Es muy importante la orientación del bloque.
- Elementos pasivos: Se han usado dos resistencias de 1k cada una. En estas no importa la orientación del bloque.
- Sensor: Se ha usado un sensor de voltaje para medir el voltaje en una de las resistencias.
- Convertidores de señal. Se usa “Simulink-PS Converter” y “PS-Simulink Converter” para

convertir las señales de Simscape a Simulink y viceversa. Así es posible usar ambos tipos de bloques en las simulaciones.

- Solver: Es necesario conectar el solver a la red ya que es el encargado de resolver las ecuaciones del sistema.
- Entrada escalon de Simulink: Se ha usado una entrada escalón para simular el encendido de la fuente de voltaje. Esta pasara de 0 a 5 voltios.

1.4.1 . Simscape. Librerías.

Simscape facilita una diversa y completa librería que actúa como complemento perfecto para cualquier circuito de simulink. El acceso a esta librería es bastante simple, como si de cualquier otro complemento de Simulink se tratara, inicialmente hay que acceder a la librería de bloques de simulink (Ilustración 1.1).



Ilustración 1.2. Acceso librería de bloques simulink. [Captura Simulink]

Desde este punto, es posible acceder a las distintas librerías que el usuario tenga instaladas (Ilustración 0.2), en este caso, la librería Simscape :

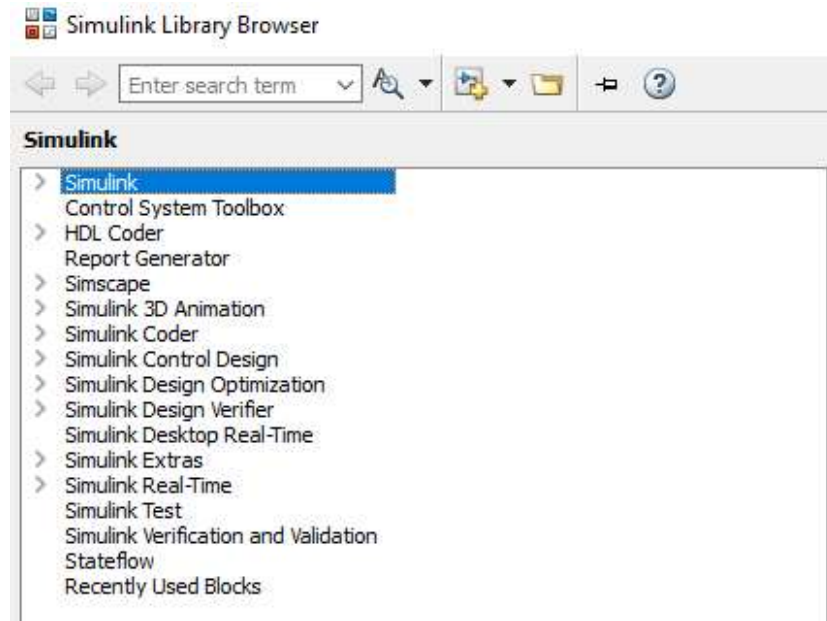


Ilustración 1.3 Acceso a la librería de bloques Simscape. [Captura Simulink]

Una vez seleccionada la librería Simscape, aparecen una serie de apartados en los que se encuentra dividida esta librería (Ilustración 1.4).

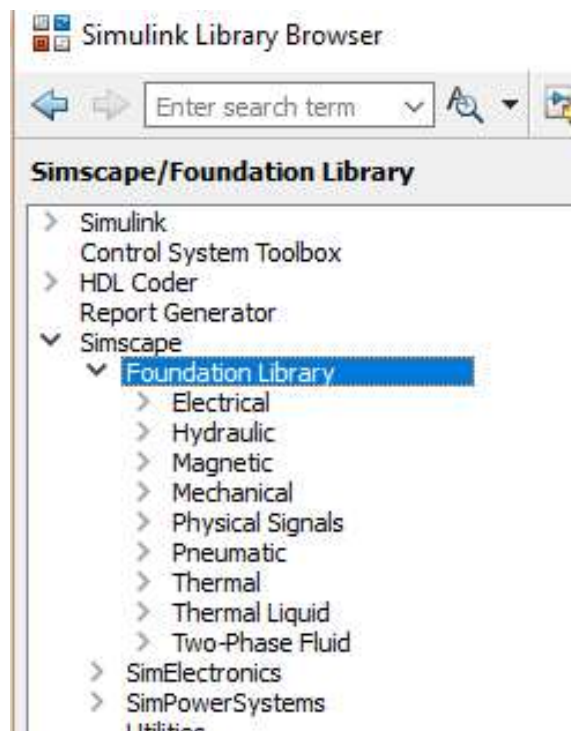


Ilustración 1.4 Apartados de la librería Simscape. [Captura Simulink]

Se observan varios apartados con bloques relacionados con todas las ramas de la ingeniería. En este

caso, se profundizará en la rama Eléctrica, en la que se encuentran los componentes más básicos de un circuito eléctrico (Ilustración 1.5).

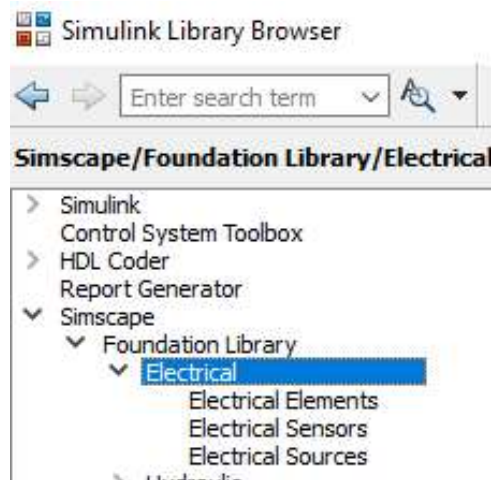


Ilustración 1.5 Subapartados de la rama eléctrica de Simscape. [Captura Simulink]

Bajo esta rama, se encuentran los elementos que se utilizarán para la simulación de los circuitos que aparecerán en los distintos apartados del trabajo. Se divide en :

- Componentes eléctricos : Pasivos y activos
- Sensores : Amperímetro y voltímetro
- Fuentes : De corriente y tensión.

Cabe destacar que, bajo la librería de Simscape, es posible encontrar una librería más avanzada de electrónica llamada SimElectronics (Ilustración 1.6).

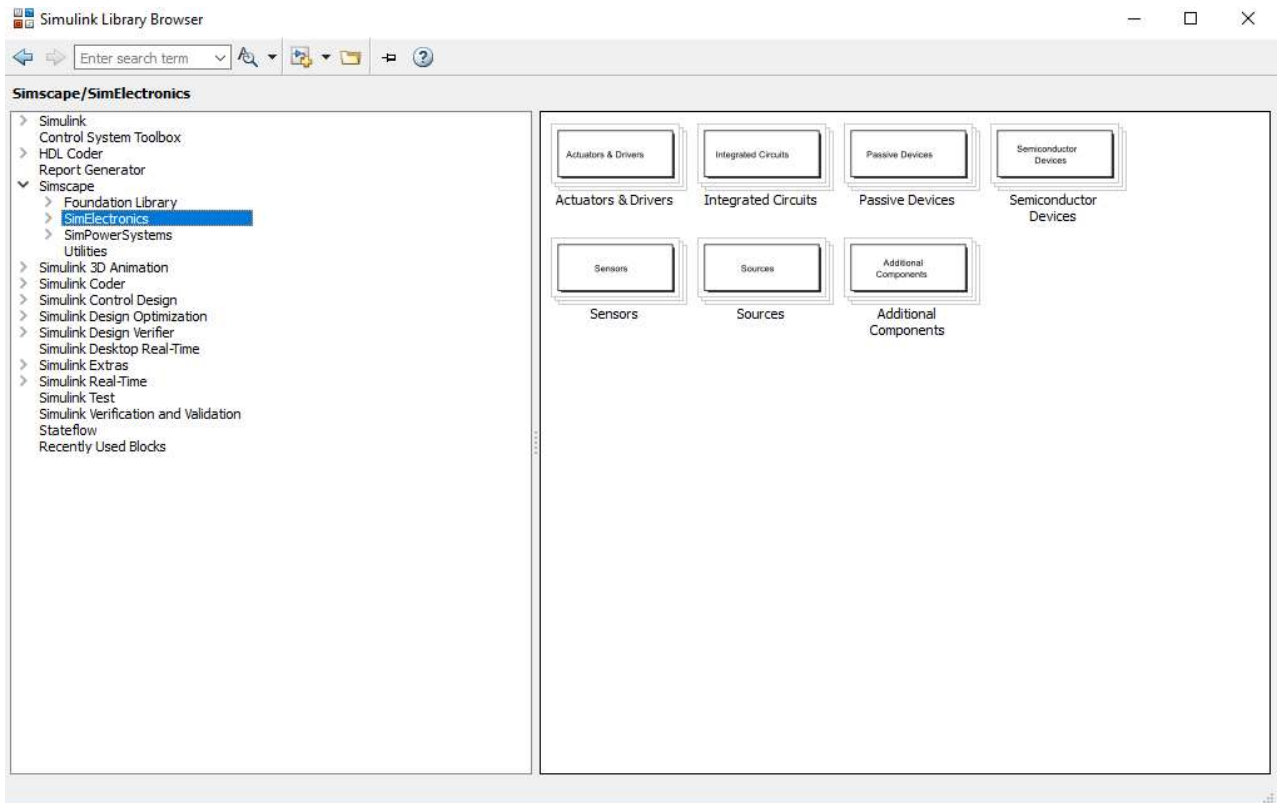


Ilustración 1.6 Vista previa de la librería de bloques SimElectronics. [Captura Simulink]

La librería de SimElectronics se divide en:

- Actuadores y Drivers, en su mayoría, para controlar motores eléctricos o servomotores.
- Circuitos Integrados, como puertas lógicas o amplificadores operacionales.
- Componentes Pasivos. Como circuitos RLC o potenciómetros.
- Componentes Activos. Como diodos o transistores.
- Sensores.
- Fuentes de Alimentación.
- Otros componentes adicionales.

2. La Célula Fotoeléctrica.

Una célula fotoeléctrica, fotocélula o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico.

2.1. Propiedades electricas

El principio de funcionamiento de una célula solar es el siguiente: Cuando conectamos una célula solar a una carga y la célula está iluminada, se produce una diferencia de potencial en extremos de la carga y circula una corriente por ella (efecto fotovoltaico).

- Corriente de iluminación: debida a la generación de portadores que produce la iluminación.

$$I_{pk} = I_L \quad 2.1$$

- Corriente de oscuridad: debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

$$I_D(V) = I_o(e^{\frac{eV}{KI_o}} - 1) \quad 2.2$$

- Curva característica I-V de iluminación real : La curva I-V de una célula fotovoltaica representa pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la célula. La corriente eléctrica producida por una célula solar viene dada por la diferencia entre la corriente de iluminación (I_L), y la corriente de oscuridad (I_D) de la unión PN, tomando como positiva la corriente fotogenerada de la célula tenemos :

$$I = I_L - I_D \quad 2.3$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.2 y 2.1 en la ecuación 2.3, obtenemos la curva V-I característica de la célula solar:

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{e(V+I_L)}{KT_c}} - 1 \right] \quad 2.4$$

e Carga del electrón $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

K Constante de Boltzman ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).

T_c Temperatura de la célula °K.

A continuación, un ejemplo de una curva estándar que represente los distintos valores de V-I para una célula fotovoltaica con los distintos puntos vistos anteriormente :

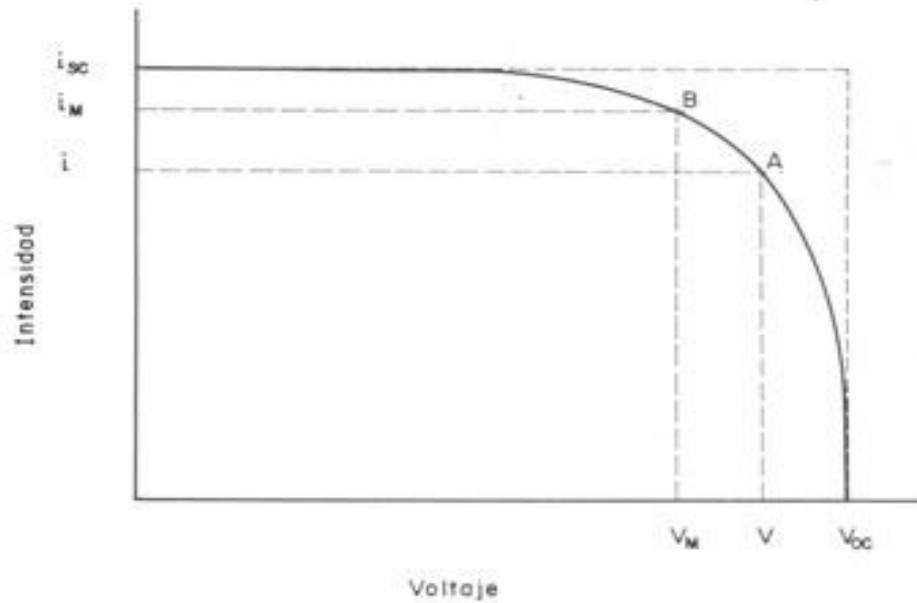


Ilustración 2.1. Cuva V-I Célula fotoeléctrica. [2]

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): definido como el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica y se da cuando la célula está en cortocircuito.

La siguiente ecuación representa todos los pares de valores (I/V) en que puede trabajar una célula fotovoltaica.

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad 2.5$$

- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): que es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga.

$$V_{oc} = m \frac{kT}{e} \cdot \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad 2.6$$

Con la introducción de estos dos nuevos conceptos, la ecuación 2.4 característica de la célula queda de

la siguiente manera :

$$I = I_{SC} \left[1 - e^{\frac{(V - V_{OC} + IR_S)}{V_T}} \right] - \frac{(V + IR_S)}{R_P} \quad 2.7$$

donde:

$$V_T = \frac{mKT}{e} \quad 2.8$$

conocida como tensión térmica que, para valores de $m = 1$ y $T = 300^\circ \text{ K}$ (27° C , temperatura ambiente aproximada) es $V_T = 25\text{mV}$.

Una vez definida la curva V-I, es posible centrar el estudio de la célula en la potencia que genera. La potencia de salida de una célula solar, es el producto de la corriente entregada a la carga y del voltaje de la célula. La potencia entregada por la célula viene dada por la característica V-I

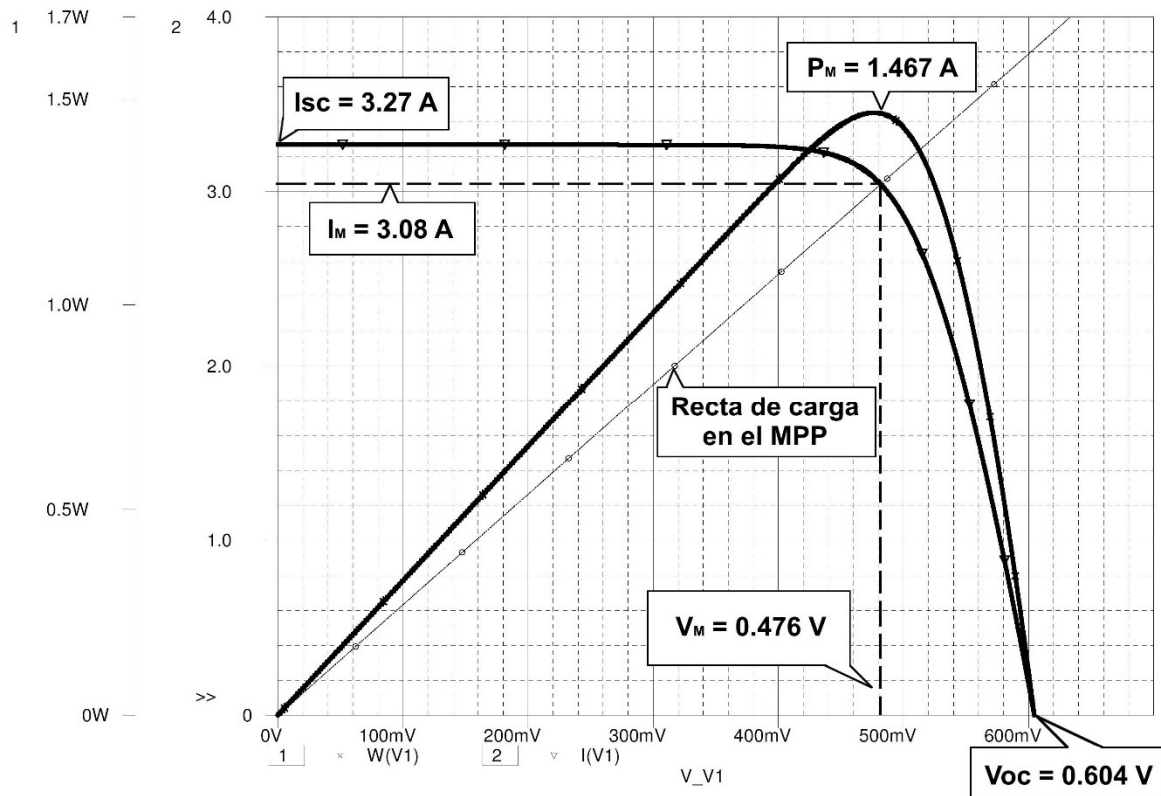


Ilustración 2.2. Curva P-V [2]

Si la potencia de la célula es suministrada a una carga resistiva, la célula se situará en unas condiciones de tensión e intensidad dependiendo del valor de la resistencia *Ilustración 2.2*. Eso nos lleva a decir que existe un punto de funcionamiento (I_M , V_M) para el que la potencia entregada a la carga sea máxima, esto es lo que conocemos como MPP (Punto de Máxima Potencia, del inglés, Maximum Power Point). Este punto podemos hallarlo mediante la condición de máximo de una función aplicado a la ecuación (6):

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad 2.9$$

O:

$$0 = d(I \cdot V)_M = I_M dV + V_M dI = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_M}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_M}{V_T} \cdot I_0 \cdot e^{\frac{V_M}{V_T}} \quad 2.10$$

que también puede escribirse como:

$$\left[\frac{dI}{dV} \right]_M = -\frac{I_M}{V_M} \quad 2.11$$

si lo aplicamos a la célula resulta:

$$I_M = \frac{I_L + I_0}{1 + \frac{V_T}{V_M}} \quad 2.12$$

y debiendo cumplir la ecuación de la célula:

$$I_M = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_M}{V_T}} - 1 \right) \quad 2.13$$

Resolviendo el sistema con las ecuaciones 2.12 y 2.13, obtenemos una solución aproximada para los valores de I_M y V_M :

$$\frac{I_M}{I_L} = 1 - a^{-b} \quad 2.14$$

$$\frac{V_M}{V_{OC}} \approx 1 - \frac{\ln a}{a} \quad 2.15$$

siendo:

$$a = 1 + \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \quad 2.16$$

Y :

$$b = \frac{a}{a + 1} \quad 2.17$$

La relación que existe en las *ecuaciones 2.14 y 2.15* son los factores conocidos como, factor de corriente M_C y factor de voltaje M_V , que para células de silicio son:

$$M_C \approx 0.86 \text{ y } M_V \approx 0.71$$

Mediante esta relación podemos conocer aproximadamente los valores I_M , V_M de la célula en situaciones usuales de irradiancia y temperatura ambiente en células solares prácticas.

En la *Ilustración 2.2*, se puede observar el punto de máxima potencia "PMP" (P_{Max}). Es el producto del valor de tensión máxima (V_M) e intensidad máxima (I_M) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

Una propiedad que nos indica el rendimiento de una célula fotovoltaica en función a su curva V-I es el factor de forma (FF). Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

Este parámetro no tiene unidades y es un valor característico de cada célula fotovoltaica.

Ecuación 2.4

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad 2.18$$

2.1.1 . Circuito eléctrico equivalente

Para entender mejor el comportamiento eléctrico de la célula, se puede considerar un circuito eléctrico equivalente. Generalmente, consta de una fuente de corriente generada por acción de la radiación solar, un diodo, una resistencia en paralelo y una resistencia en serie.

La *Ilustración 2.3*, muestra el circuito eléctrico equivalente de un panel solar, se observa que está constituido por dos resistencias, una en serie R_s y otra resistencia en paralelo o shunt R_p . La resistencia serie es debida a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos. La resistencia shunt se debe a las no idealidades y a las impurezas cerca de la unión p-n. También se detalla una fuente de corriente I_L , que representa la corriente generada por la radiación solar, y un diodo conectado en paralelo que representa la curva característica I-V.

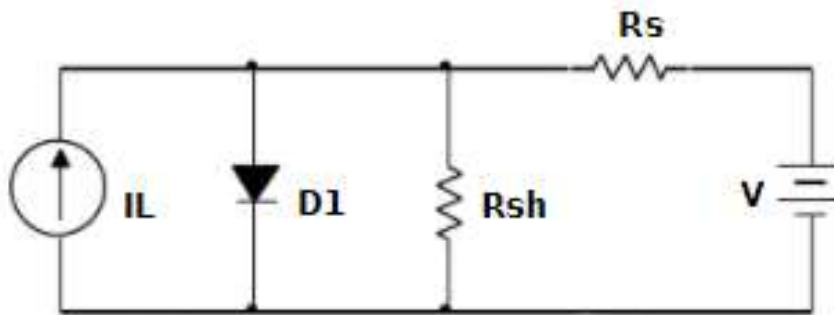


Ilustración 2.3. Circuito Eléctrico Equivalente [1]

2.2. Efectos medioambientales sobre la Célula (Temperatura e Irradiancia)

La tensión y corriente genera en una célula depende directamente de la iluminación recibida. La corriente de cortocircuito de la célula es directamente proporcional a la irradiancia como se muestra en la *Ilustración 2.4*, disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de circuito abierto varía

poco con la irradiancia, aunque también decrece, a efectos prácticos se puede considerar constante.

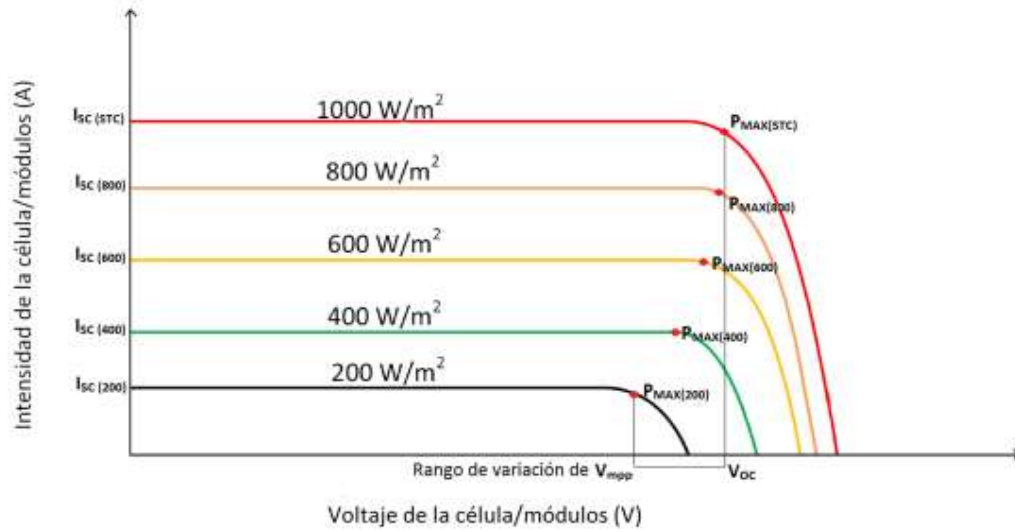


Ilustración 2.4. Curva V-I para varios niveles de Irradiancia. [Cortesía Isofotón]

La intensidad de cortocircuito, I_{SC} , varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal acorde a la ecuación 2.19.

$$I_{SC(G)} = G * \frac{I_{SC(CEM)}}{1000} \quad 2.19$$

$I_{SC(G)}$: intensidad de cortocircuito para una irradiación G (A).

$I_{SC(CEM)}$: intensidad de cortocircuito en condiciones CEM (A).

G: irradiancia (W/m²)

Por otro lado, la temperatura afecta de manera considerable a la tensión, tal y como muestra la Ilustración 2.5.

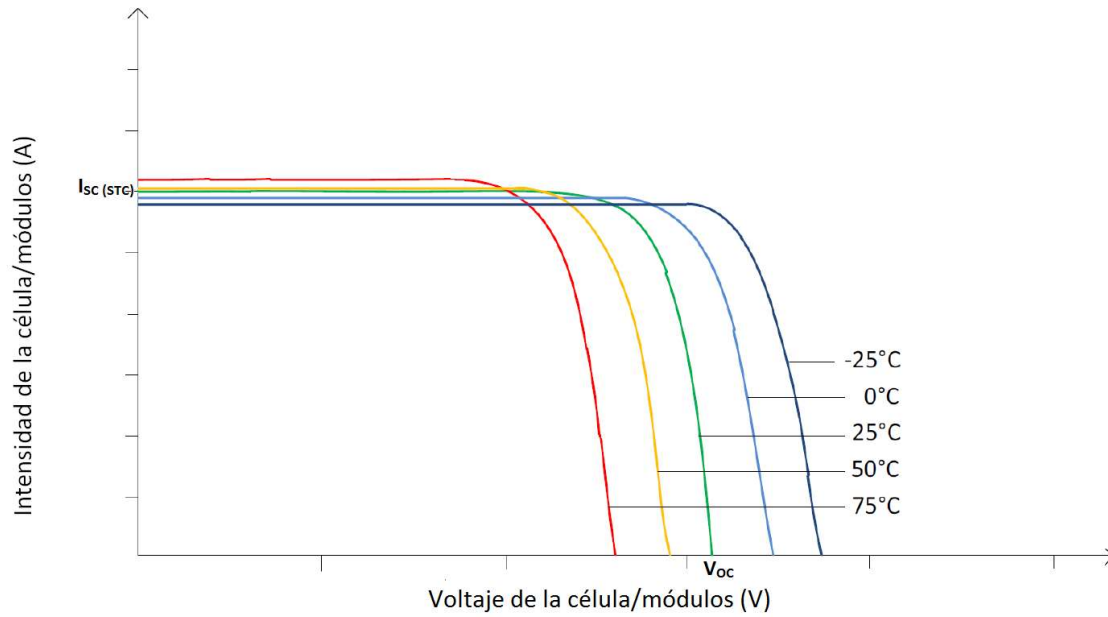


Ilustración 2.5. Curva V-I para varios niveles de temperatura. [Cortesía Isofotón]

Como se aprecia la tensión de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura. La intensidad de cortocircuito, sin embargo, aumenta cuando aumenta la temperatura, aunque la variación es muy pequeña y a efectos prácticos se considera constante.

Es evidente que si la tensión de la célula disminuye cuando aumenta la temperatura y la intensidad prácticamente se mantiene constante, la potencia entregada por la célula, disminuirá cuando aumente la temperatura de la célula, tal y como muestra la *Ilustración 2.6*.

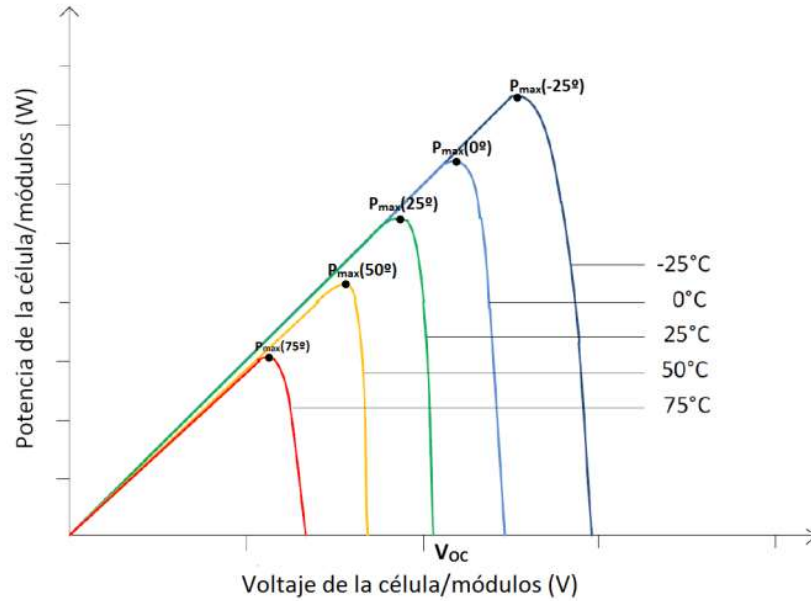


Ilustración 2.6. Curva P-V para distintos niveles de temperatura. [Cortesía Isofotón]

La temperatura de trabajo de una célula está íntimamente relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación y se puede obtener mediante el empleo de la temperatura TONC :

El valor de la temperatura de operación nominal de la célula (TONC) es un parámetro que se obtiene de las hojas características de los módulos fotovoltaicos, toma valores que van de 43°C a 49°C y si no se dispone de él se puede tomar 45°C como un valor razonable.

TONC o NOCT “Temperatura de operación nominal de la célula” corresponden a una irradiación en el plano del módulo de 800 W/m², con orientación normal a la radiación incidente al mediodía solar, temperatura ambiente de 20°C, velocidad del viento de 1 m/s y funcionamiento en circuito abierto. Por lo tanto, la relación entre la temperatura nominal de la célula y la TONC se ve reflejada en la ecuación 2.20.

$$T_c = T_a + G \frac{T_{ONC} - 20}{800} \quad 2.20$$

Donde:

T_c : temperatura de trabajo de la célula (°C)

T_a : temperatura ambiente (°C)

T_{ONC} : temperatura de operación nominal de la célula (°C)

G : irradiancia (W/m²)

2.3. Modelado de la Célula Solar en Matlab-Simulink.

Mediante la utilización de simulink (y en especial del add-on Power Electronics) y su amplia librería de bloques, es posible simular una célula solar como la de la Ilustración 2.8 y dibujar sus distintas curvas de funcionamiento de una forma muy intuitiva.

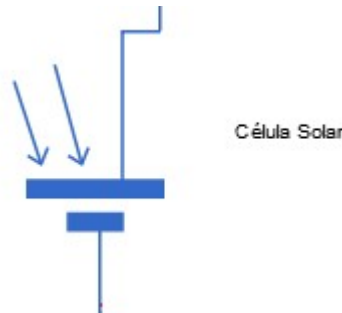


Ilustración 2.7. Bloque Célula solar en Simulink. [Captura Simulink]

Para poder entender el funcionamiento de la célula como tal, hay que tener presente el circuito eléctrico equivalente de la Ilustración 2.3.

De esta manera. La corriente de salida de la célula solar corresponde a la ecuación 2.21

$$I = I_{sc} \left[1 - e^{\frac{V_C - V_{OC} + I \cdot R_S}{N \cdot V_T}} \right] - \frac{N + I \cdot R_S}{R_p} \quad 2.21$$

La célula permite modificar algunos de estos parámetros para obtener la corriente deseada como muestra la Ilustración 2.8

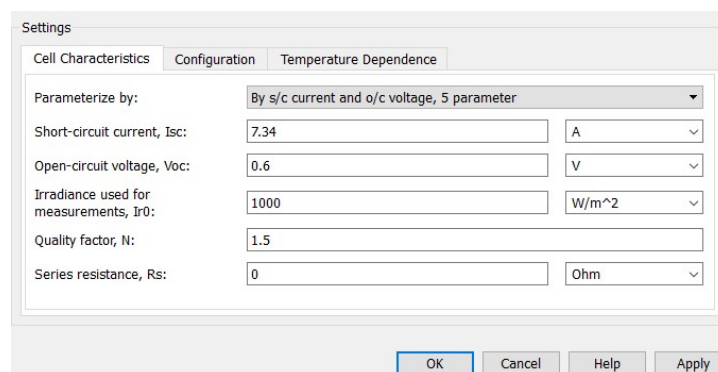


Ilustración 2.8. Parametrización célula solar. [Captura Simulink]

PowerElectronics permite la parametrización de la célula de forma más precisa variando la opción de “Parametrize by”.

En este apartado, modificaremos tanto la Tensión de circuito abierto (V_{oc}), como la Corriente de

cortocircuito (I_{sc}).

Para trazar la curva V-I que describe la célula con los parámetros previamente definidos, se definirá un circuito con los elementos necesarios para tal fin.

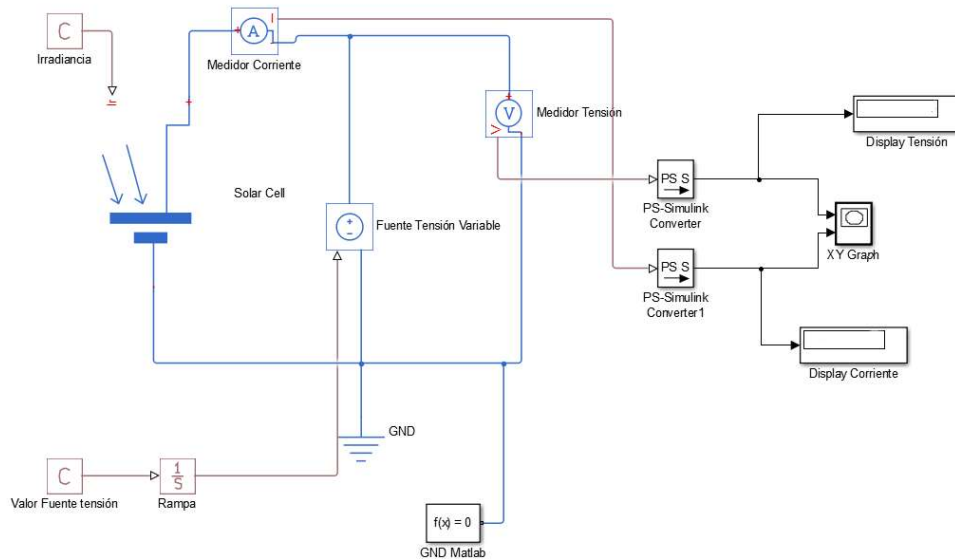


Ilustración 2.9. Circuito Simulink. Trazado curvas V-I. Célula Solar [Captura Simulink]

Se puede observar la célula solar conectada en paralelo con una fuente de tensión variable que obligará a la célula a trabajar en sus distintos puntos de tensión, desde 0 a 0.6V para este caso.

Para monitorizar los distintos puntos de trabajo, se conectará un medidor de corriente y tensión que irán conectados a un display y a su vez, a una Gráfica X-Y que permitirá visualizar la curva V-I.

Entre los distintos aparatos de medida y el display se han conectado dos convertidores de señales físicas (con unidad) a señales Simulink (PS-Simulink converter) que sí pueden ser representadas en las distintas herramientas de representación de datos que atesora Simulink.

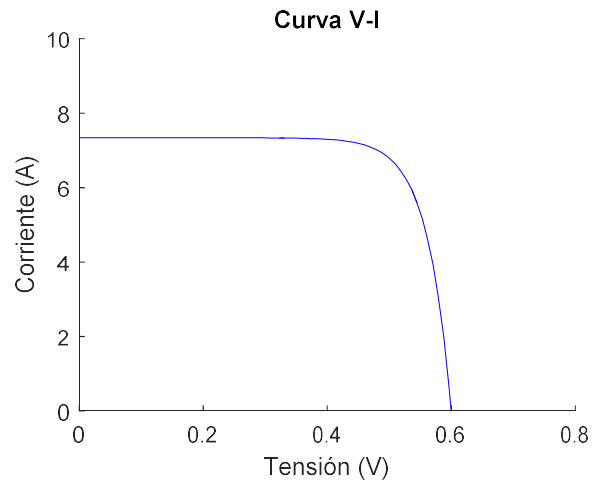


Ilustración 2.10. Curva V-I Célula Solar [Captura Simulink]

De la misma manera se puede obtener la curva P-V.

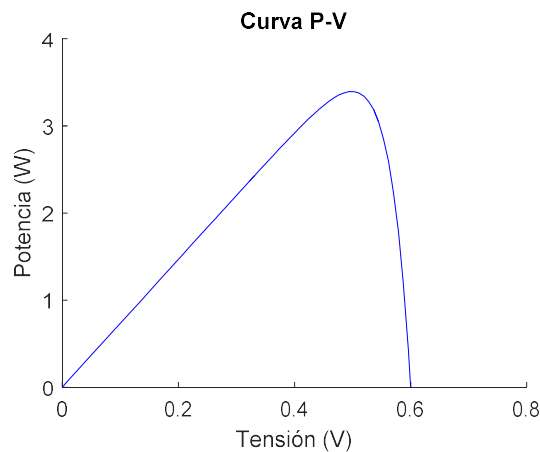


Ilustración 2.11. Curva P-V Célula Solar [Captura Simulink]

3 . Módulo Fotovoltaico : Generadores.

3.1. Asociación de las células. Caso Ideal.

Una vez entendido el funcionamiento de una célula solar individual, es posible comenzar a estudiar el funcionamiento de un módulo fotovoltaico, que consiste en una asociación de células configuradas de tal manera que puedan alcanzar valores de tensión e intensidad más elevadas para ser utilizadas, sobre todo, como generadores de energía eléctrica.

En el capítulo anterior, se estudia el comportamiento (característica V-I) de una célula individual mediante la ecuación 3.1 :

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{e-(V+I \cdot R_S)}{K \cdot T_C}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \quad 3.1$$

Esta expresión es tediosa de utilizar para una asociación de células, pues hay parámetros que varían en cada una de ellas y además, son difíciles de medir, por lo que, para hallar la curva V-I de un generador, se han de tomar las siguientes aproximaciones :

- Los efectos de la resistencia paralelo son despreciables ($\frac{V+IR_S}{R_p} = 0$)
- La corriente generada es igual a la de cortocircuito ($I_L = I_{SC}$)
- $e^{\frac{V+IR_S}{V_t}} > 1$ para cualquier valor de V, I, R_S y V_t
- Las células son todas iguales y trabajan bajo las mismas condiciones

Teniendo en cuenta los supuestos listados anteriormente, los valores de corriente y tensión se consiguen con la asociación serie y paralelo de las células.

$$I_G = N_p * I \quad 3.2$$

$$V_G = N_s * V \quad 3.3$$

Y teniendo en cuenta las ecuaciones 3.2 y 3.3 :

$$P_G = V_G * I_G \quad 3.4$$

Donde: I_G corresponde con la corriente del generador.

N_p es el número de células en paralelo.

V_G es la corriente del generador.

N_s es el número de células en asociación serie

P_G es la potencia del generador.

De forma ilustrativa :

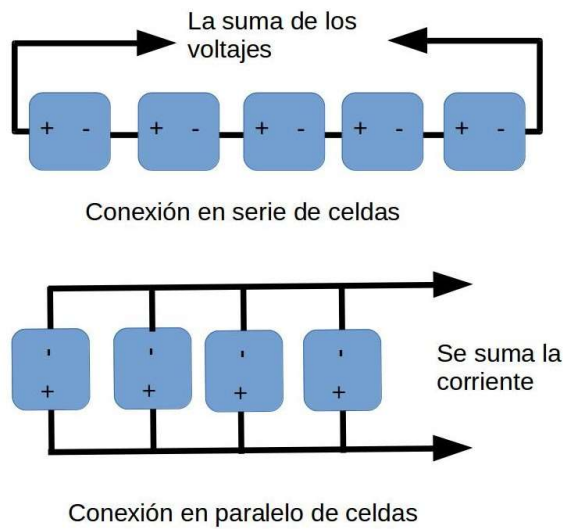


Ilustración 3.1. Asociación células. [5]

De esta manera también se puede considerar la Tensión de circuito abierto y corrientes de cortocircuito del generador con la ecuación 3.5 y 3.6.

$$I_{SCG} = N_s * I_{SC} \quad 3.5$$

$$V_{OCG} = N_s * V_{OC} \quad 3.6$$

Donde: I_{SCG} corresponde a la corriente de cortocircuito del generador.

V_{OCG} es tensión de cortocircuito del generador

3.2. Asociación de células. Caso real.

Hasta ahora, para facilitar el estudio y entendimiento de los generadores fotovoltaicos, se ha considerado que todas las células asociadas de una manera u otra son completamente iguales, y a su vez, trabajan bajo las mismas condiciones; pero esto no ocurre en la realidad.

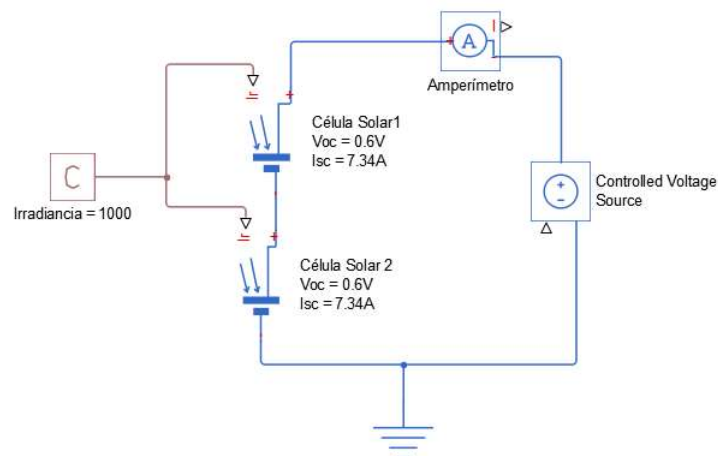
Dos células nunca son iguales, a nivel de fabricación, ya que a medida que pasa el tiempo, unas células se degradan más que otras, trabajando de forma práctica con distintos valores de corriente e intensidad, por lo tanto, distinta curva V-I.

A continuación, un ejemplo de ambos casos:

Una ejemplo de asociación serie de células similares bajo una misma irradiancia sería la propuesta en la Ilustración 3.2

Obteniendo la curva V-I de la Ilustración 3.3

Ilustración 3.2 Circuito Simulink. Asociación serie de células. [Captura Simulink]



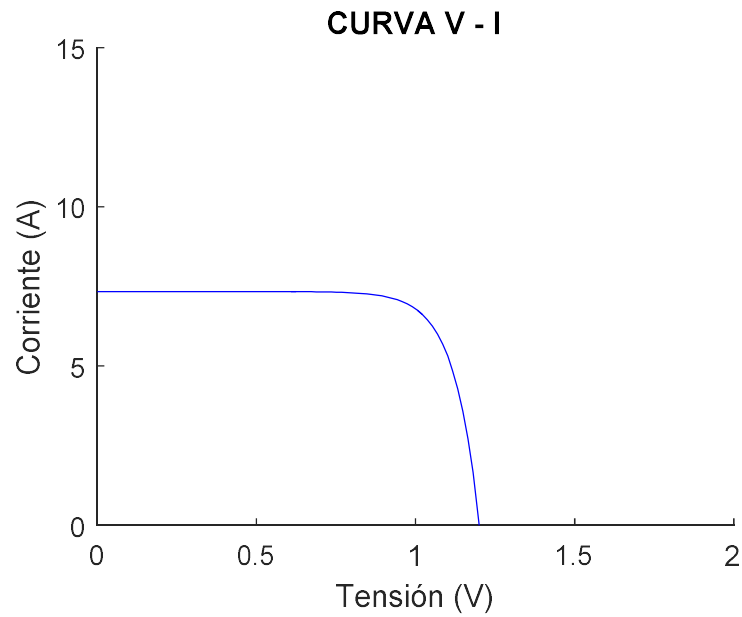


Ilustración 3.3 Circuito Simulink. Curva V-I Células serie. [Captura Simulink]

Se aplica ahora una reducción de la irradiancia aplicada en una de las células, como se observa en la Ilustración 3.4. Esta reducción puede darse debido al sombreado parcial de una de las células:

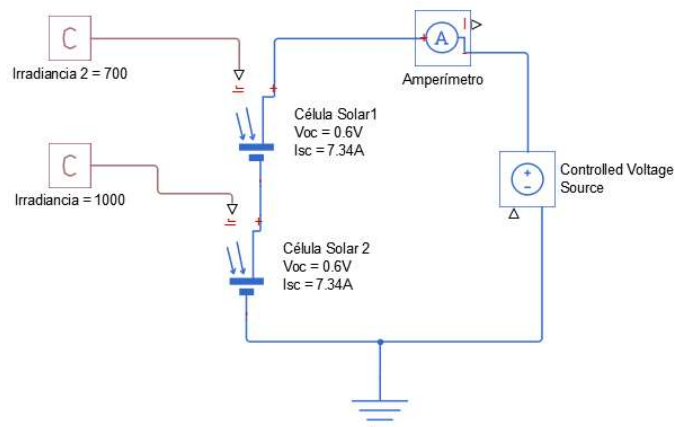


Ilustración 3.4 Circuito Simulink. Asociación células serie con sombreado. [Captura Simulink]

Obteniendo la siguiente curva V-I de la Ilustración 3.5 :

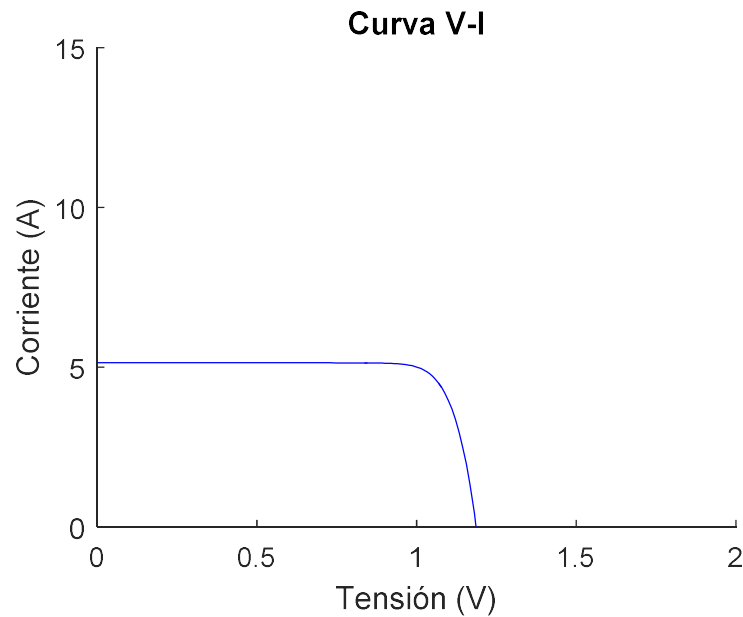


Ilustración 3.5. Curva asociada al circuito de la Ilustración 3.4. [Captura Simulink]

Se puede observar una bajada importante en el nivel de corriente de la rama de las células, esto se debe a que la célula que recibe menos irradiancia condiciona el nivel de corriente de la rama. En la Ilustración 3.6 el efecto que tiene sobre la potencia :

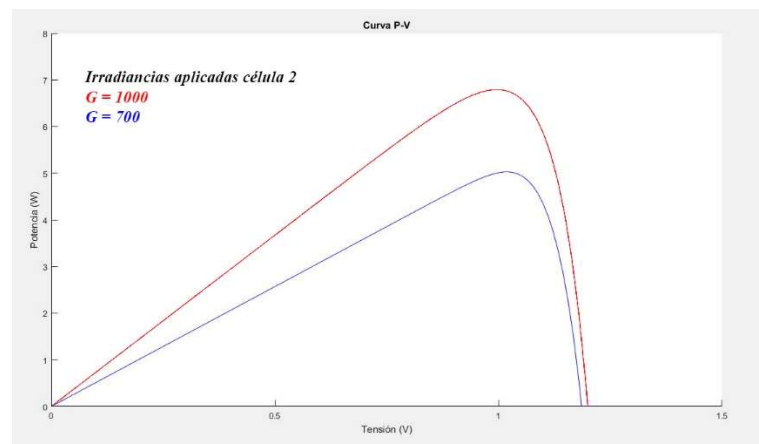


Ilustración 3.6. Curvas P-V para células que reciben distinto nivel de irradiancia (sombreado). [Captura Simulink]

En la Ilustración 3.7, se observa el impacto que tendría el “sombreado” sobre las dos células. La célula 2 no solo no genera potencia, si no que por debajo de un valor de tensión de 0.5V, absorbe la potencia generada por la Célula 1, provocando así un aumento de temperatura que, en exceso, puede acabar degradando la célula.

A este defecto se le llama “punto caliente”.

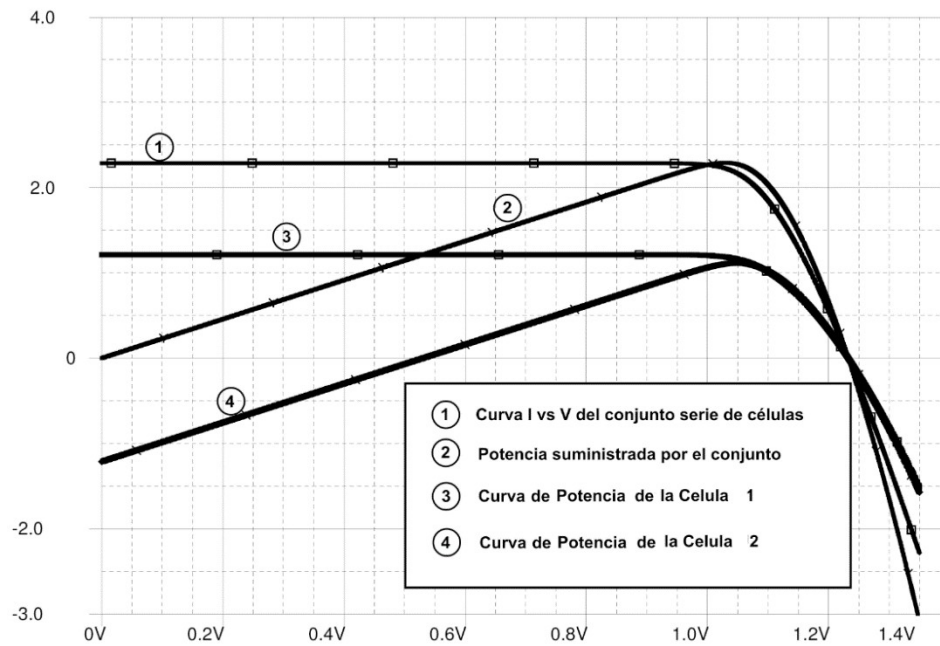


Ilustración 3.7. Curvas V-I del conjunto [2]

Para solucionar este defecto se utiliza el denominado “diodo de paso”. Este concepto consiste en situar un diodo en paralelo a un grupo de células, polarizándolo en sentido inverso a la rama. En el caso en que la rama de células se polarice de forma inversa debido a un sombreado, la corriente circulará a través del diodo de paso y evitará, de esta manera, que el resto de células absorban la potencia generada por la rama sombreada, como se observa en la Ilustración 3.8.

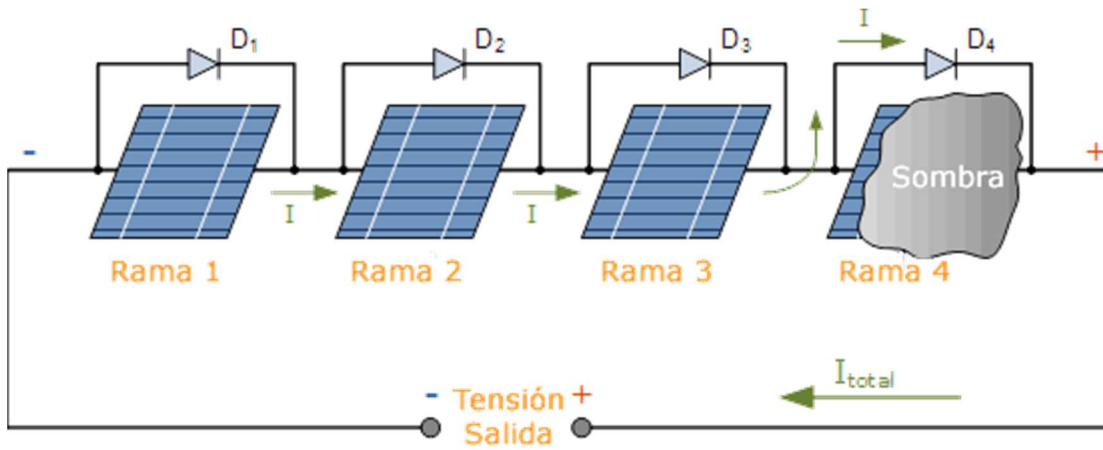


Ilustración 3.8 Aplicación de los diodos de paso [5]

Estos diodos no mejoran el comportamiento eléctrico del conjunto en sí, pero sí aseguran que las células de la rama afectada por el sombreado no se vean degradadas.

3.3. Condiciones estándares de medida.

A la hora de elegir un módulo fotovoltaico, las características del mismo vienen dadas bajo unas condiciones llamadas Condiciones estándares de medida (CEM).

Estas condiciones consisten en mediciones realizadas sobre el módulo bajo las siguientes propiedades :

$$G = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$AM = 1.5$$

Incidencia normal (90°)

$$T_{cél} = 25^\circ\text{C}$$

Para obtener la curva característica de un módulo fotovoltaico bajo condiciones CEM, utilizaremos los resultados obtenidos bajo unas condiciones genéricas (o aleatorias).

Inicialmente, bajo cualquier condición ambiental, se puede obtener $V_{oc,mod}$ $I_{sc,mod}$

Mediante el empleo de las siguientes ecuaciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, obtenemos tanto $V_{oc,CEM}$ e $I_{sc,CEM}$

$$I_{Sc} = \frac{G}{1000} * I_{Sc,CEM} \quad 3.7$$

$$V_{oc} = V_{oc,CEM} - 0.0023(T_c - 298) \quad 3.8$$

$$T_c = T_a + G \frac{T_{ONC} - 293}{800} \quad 3.9$$

$$P_M = \frac{P_{M,CEM} * G[1 - \beta(T_c - 298)]}{1000} \quad 3.10$$

Teniendo en cuenta :

T_{ONC} = *Característico del módulo* (Temperatura que alcanza el módulo bajo unas condiciones de trabajo específicas) Esta propiedad es fácil de encontrar en cualquier hoja de especificaciones.

T_a = *Temperatura ambiente.* (K)

β = *Derivada de la potencia con respecto a la temperatura.* W/K

G = *Irradiancia en el instante de la medida.* W/m^2

$V_{oc,CEM}, I_{Sc,CEM}, P_{M,CEM}$ *Distintas propiedades del módulo en CEM.*

3.4. Simulink. Módulo fotovoltaico.

Un módulo fotovoltaico consiste en una asociación de células fotovoltaicas con una configuración específica.

En Simulink, se utilizará el siguiente bloque para definir el módulo.

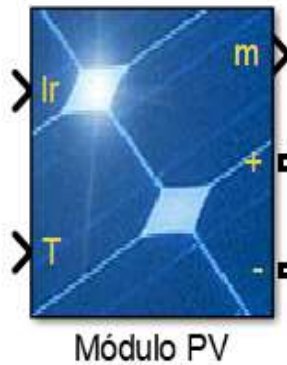


Ilustración 3.9. Bloque Módulo fotovoltaico. [Captura Simulink]

Haciendo doble click sobre el mismo, se accede a las propiedades del mismo :

Block Parameters: 40x10 Isofoton IS-210-32

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings: 1

Series-connected modules per string: 1

Module data

Module: User-defined

☐ Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
209.802	96
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
59.1	4.77
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
47.9	4.38
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.39941	0.041405

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 1000 W/m2 & specified temperatures

T_cell (deg. C) [45 25]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)

4.7818

Diode saturation current IO (A)

5.6847e-10

Diode ideality factor

1.0502

Shunt resistance Rsh (ohms)

336.5505

Series resistance Rs (ohms)

0.83068

OK Cancel Help Apply

Ilustración 3.10 Propiedades del bloque “módulo fotovoltaico”. [Captura Simulink]

En la ventana de la “imagen”, es posible modificar los siguientes parámetros :

- 1.4 Array Data (Configuración de la matriz) : permite añadir una configuración específica de módulos fotovoltaicos para formar un generador. Por ahora, y al estudiar únicamente un módulo en este apartado, se definirá 1 rama y 1 módulo por rama.

2.4 Module Data (Propiedades del módulo) :

- 2.1. Module : Permite la elección entre una serie de módulos de catálogo, definidos por fabricante y modelo. Si se elige un módulo específico, el resto de propiedades se verán modificadas según la hoja de características del mismo. La opción (user-defined) permite modificar todas las propiedades según desee el usuario,
- 2.2. Cells per module (Número de células por módulo)
- 2.3. Open circuit voltage : Tensión en circuito abierto (V_{oc})
- 2.4. Short circuit current : Corriente de corto- circuito (I_{sc})
- 2.5. Voltage at maximum power point V_{mp} : Tensión en el punto de máxima potencia (V_M)
- 2.6. Current at maximum power point I_{mp} : Corriente del punto de máxima potencia (I_M)
- 2.7. Temperature coefficient of V_{oc} : Coeficiente de variación de la tensión con la temperatura
- 2.8. Temperature coefficient of I_{sc} : Coeficiente de variación de la corriente con la temperatura.

3.4 Display I-V characteristics of ... : Esta opción permite dibujar curvas V-I del módulo (o módulos) para varios valores de irradiancia y temperatura, funciona de 3 métodos distintos

- 3.1. One module @ 25 deg.C & specified irradiances : Permite dibujar varias curvas V-I a temperatura de célula 25°C y distintas irradiancias DE UN ÚNICO MÓDULO, como se observa en la Ilustración 3.11. Las irradiancias a emplear se incluirán en el vector (Irradiances (W/m²)).

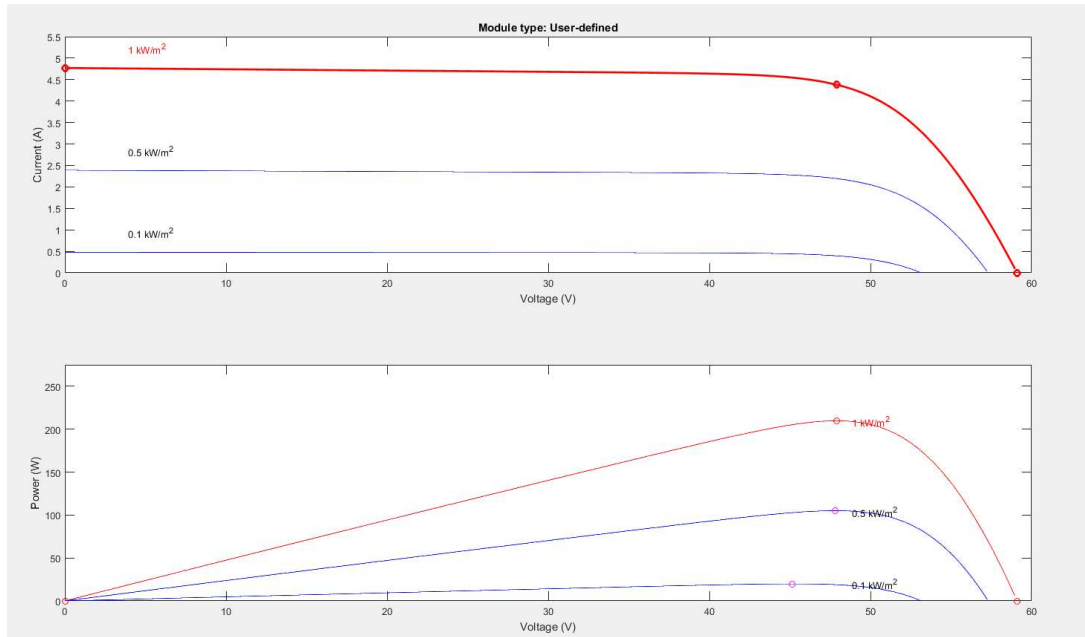


Ilustración 3.11 Curvas V-I para temperaturas de 1000, 500 y 100 °C. [Captura Simulink]

- 3.2. Array @ 25deg.C & specified irradiances. Similar a la opción a. pero tiene en cuenta la configuración de “Array Data”, considerando el número de módulos serie y paralelo elegidos inicialmente
- 3.3. Array @ 1000 W/m2 & specified temperatures : En este caso, lo que se mantiene constante es la irradiancia, permitiendo trazar varias curvas a distintas temperaturas que pueden ser modificadas en T_{cell} (deg.C), como en la Ilustración 3.12.

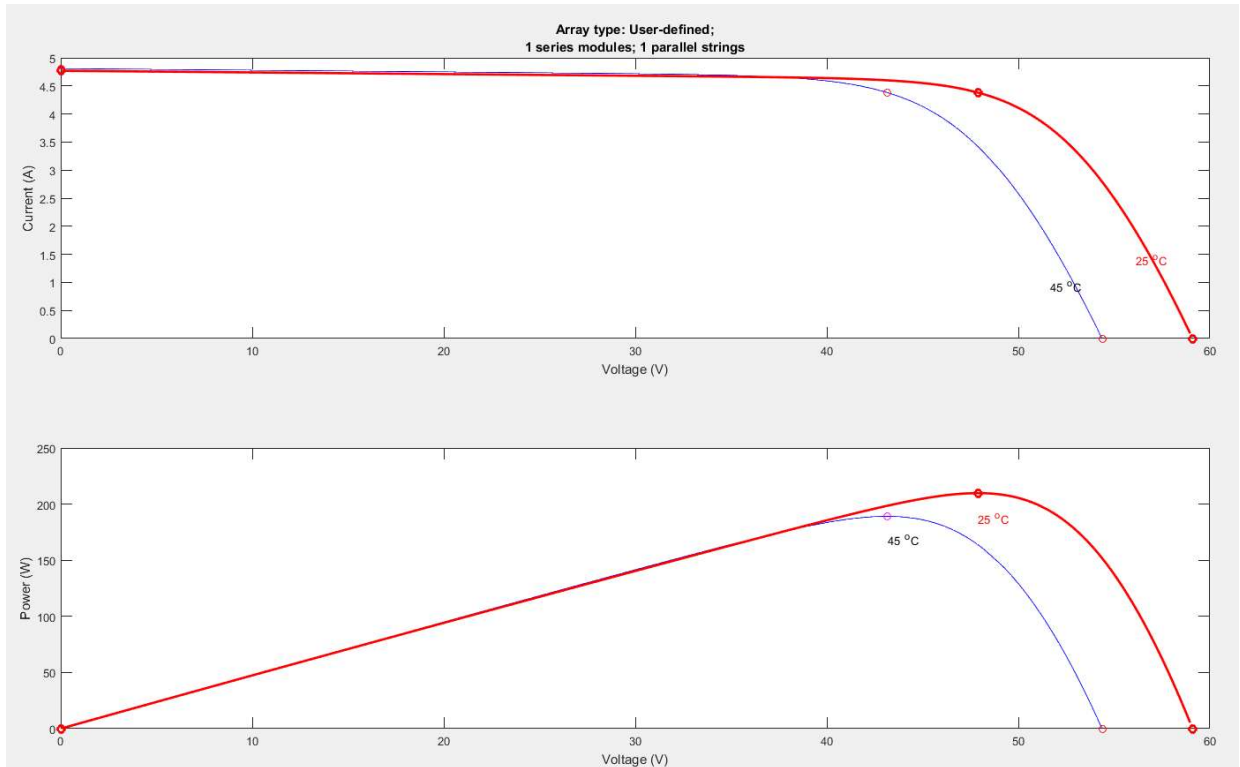


Ilustración 3.12 Curvas P-V según la temperatura de célula. 45 y 25 °C. [Captura Simulink]

4.4 Model Parameters (Parámetros del módulo) : Los valores incluidos en este apartado de la configuración del módulo son propiedades intrínsecas del modulo (o generador) que hayamos configurado y van relacionadas directamente con los datos del apartado 2.

Ahora que el bloque del módulo fotovoltaico es conocido, se procederá a simular el módulo bajo una serie de condiciones para observar su comportamiento :

El circuito a simular es el de la Ilustración 3.13.

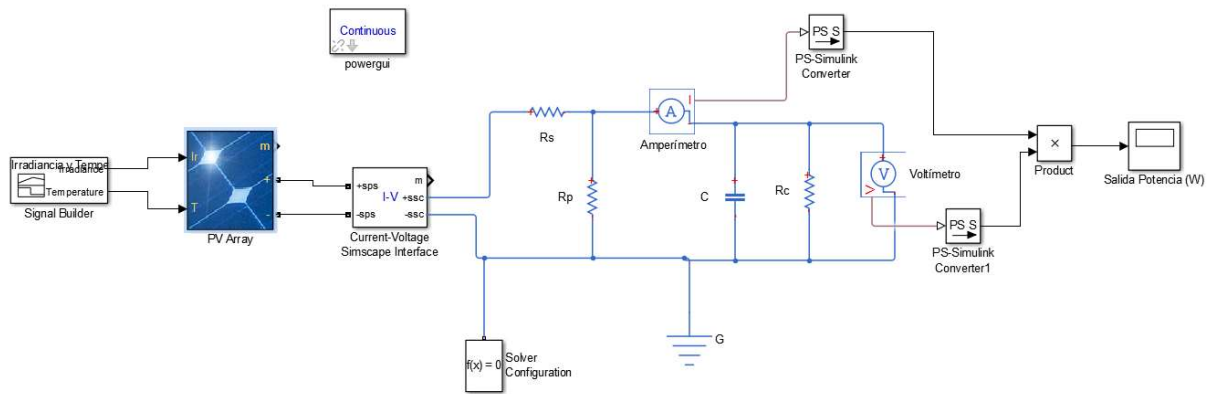


Ilustración 3.13 Circuito Simulink. Simulación módulo fotovoltaico. [Captura Simulink]

Se puede observar el módulo conectado a una serie de dispositivos que permitirán la correcta medida del módulo bajo unas condiciones que se aplican a la entrada.

Las señales de entrada quedarán definidas mediante el bloque “Signal Builder” de la Ilustración 3.14.

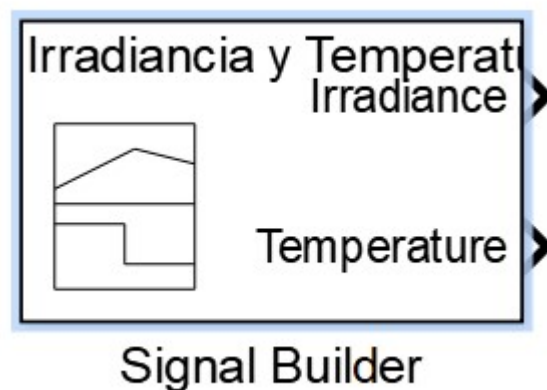


Ilustración 3.14 Bloque Signal Builder. [Captura Simulink]

Este bloque permite la generación de señales que pueden variar en el tiempo y condicionar el funcionamiento del módulo, en este caso, generaremos dos señales que simularán la Irradiancia y Temperatura que afectarán al módulo fotovoltaico en cuestión. Haciendo doble click, aparecerá la ventana de la Ilustración 3.15

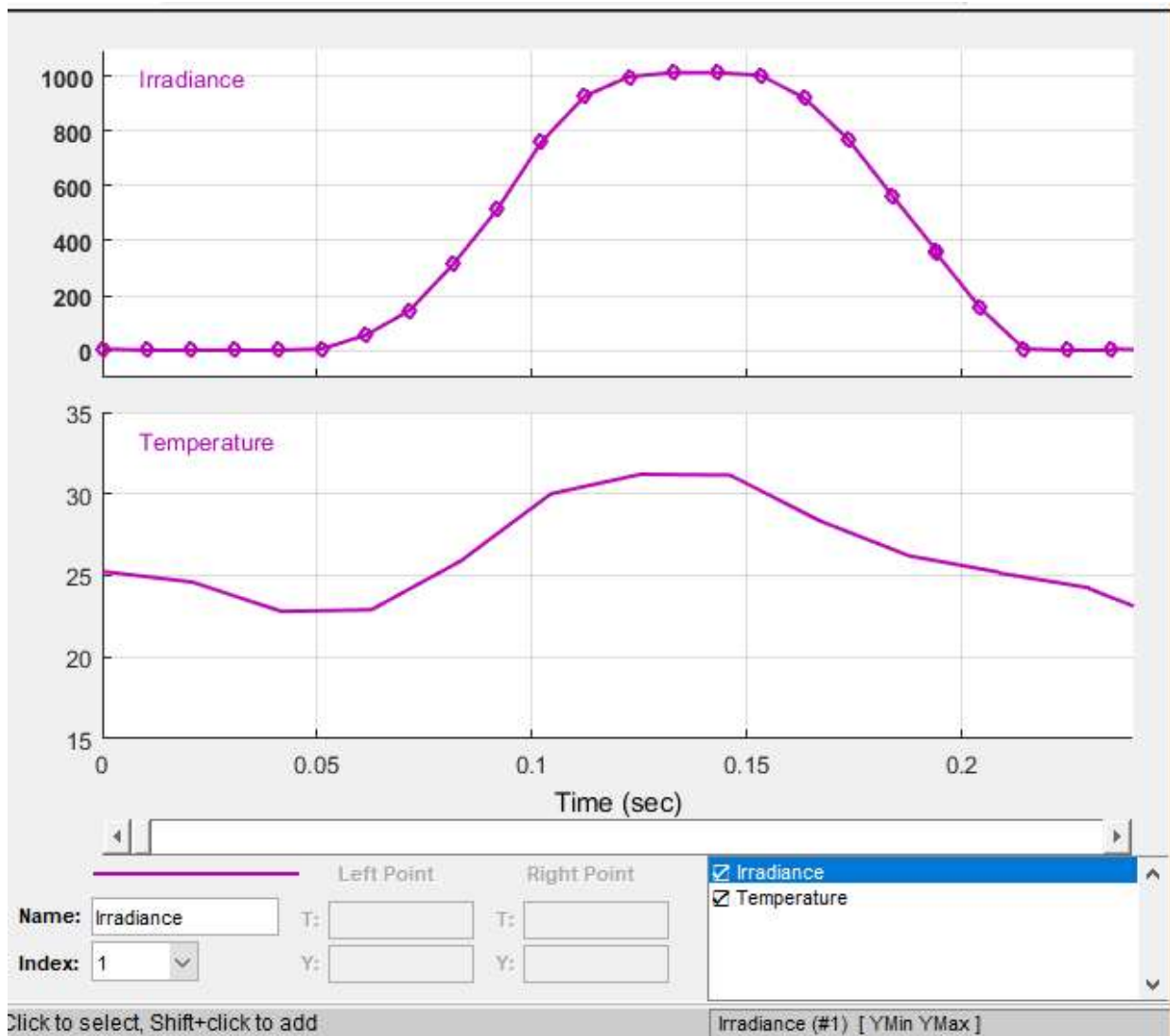


Ilustración 3.15 Propiedades del bloque “Signal Builder”. [Captura Simulink]

Es posible modificar los distintos valores que tendrán las señales de entrada. En el eje X, común para ambas señales, se sitúa el eje temporal (en este ejemplo se utilizará una simulación hasta 0.24s con saltos de 0.1s simulando las 24h del día).

El resto del circuito, consta de una resistencia paralelo, otra serie y una resistencia de carga sobre la que se realiza la medida y que, además, condiciona el punto de funcionamiento del módulo.

El módulo empleado para la simulación será el Soltech STH-215-P.

Para este caso, y trazando la curva V-I característica del módulo dentro de las opciones del mismo, obtenemos los números de la Ilustración 3.16:

Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

☐ Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
213.15	60
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
36.3	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
29	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.36099	0.102

Ilustración 3.16 Propiedades del módulo Soltech STH-215-P.

Y Para una temperatura de célula de 45°C aproximadamente, la curva V-I correspondiente al módulo elegido es la de la Ilustración 3.17 :

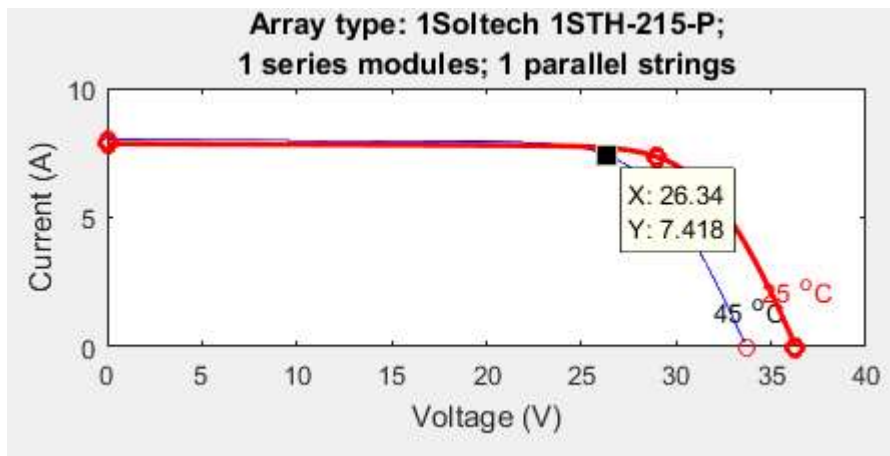


Ilustración 3.17 Curva V-I del módulo Soltech STH-215-P. [Captura Simulink]

El punto de máxima potencia se da para una corriente de 7.481A y una tensión de 26.34V.

Para conseguir estos valores, utilizaremos una resistencia de :

$$R_c = \frac{26.34V}{7.481A} = 3.52\Omega \quad 3.11$$

Dando este valor a la resistencia, se obtendría una curva de potencia a lo largo de las 24h del día tal y como la Ilustración 3.18:

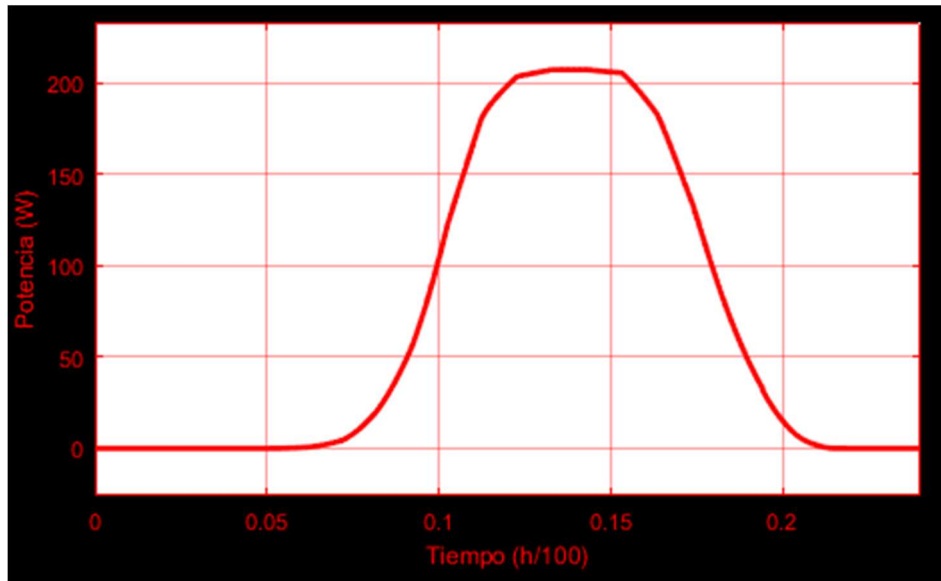


Ilustración 3.18. Potencia generada por el módulo durante las 24h del día.

4. Convertidores DC-DC. Aplicación a los sistemas fotovoltaicos.

4.1. Introducción

Conectar un generador fotovoltaico directamente a una carga, conducirá al generador a trabajar en un punto aleatorio de su curva V-I que, en la mayoría de los casos, estará lejos de ser el punto óptimo de trabajo (punto de máxima potencia).

Para darle una solución a este problema, y conseguir que, independientemente de la carga que conectemos al generador, el punto de trabajo sea el de máxima potencia, se emplean unos dispositivos denominados (seguidores de máxima potencia) o MPPT (*maximum power point tracker en inglés*).

El fundamento de estos dispositivos son los convertidores DC/DC, que mantienen a un lado del circuito un nivel de tensión determinado (generador) que lo obliga a trabajar en el punto de máxima potencia,

independientemente del nivel de tensión que haya al otro lado del convertidor.

A continuación, las configuraciones de los convertidores DC/DC.

4.2. Concepto de conmutación. Convertidor DC/DC

Los convertidores dc/dc son muy empleados en aplicaciones donde se requiere obtener una tensión media de salida que puede ser mayor o menor que la aplicada a su entrada, gobernando los tiempos en que el interruptor principal del convertidor conduce o no conduce (técnica PWM), generalmente a frecuencia constante. Los principales circuitos dc/dc se clasifican en convertidores dc/dc en modo conmutado o convertidores dc/dc conmutados. En un convertidor conmutado, el transistor funciona como un interruptor electrónico al estar completamente activado o desactivado (saturación o corte para un transistor bipolar BJT). Este circuito también se denomina troceador de continua (dc chopper).

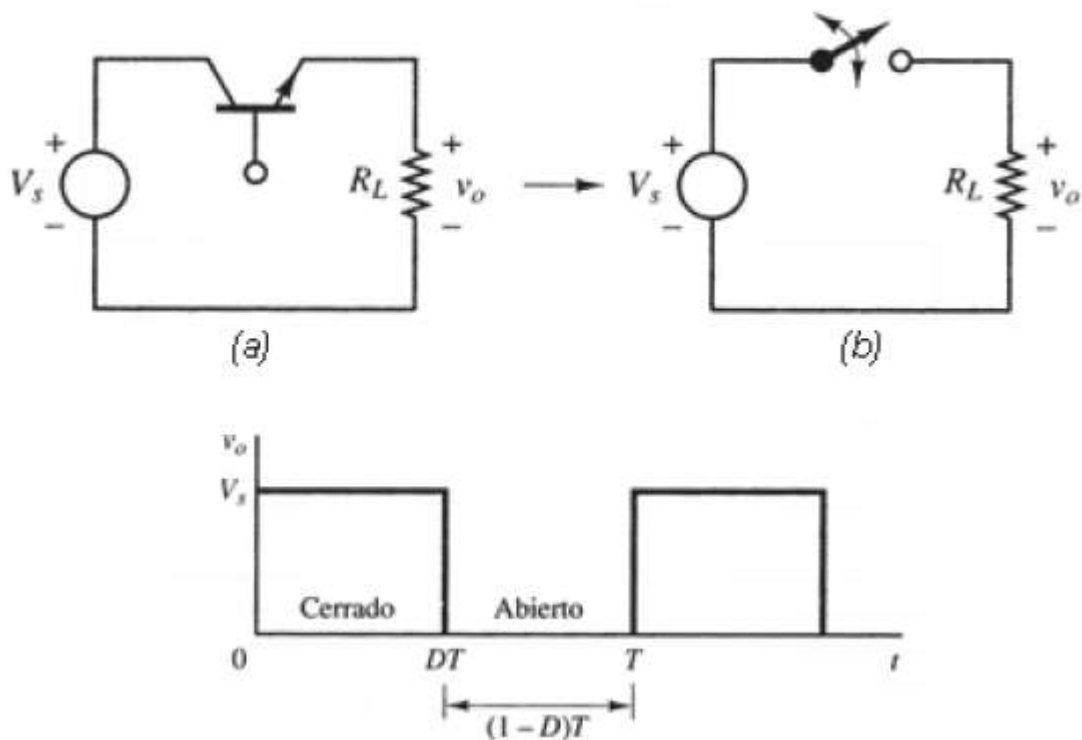


Ilustración 4.1 Convertidor DC-DC básico conmutado. [1]

Si suponemos que el interruptor de la *figura 4.1 (b)* es ideal, la salida es igual a la entrada cuando el interruptor está cerrado y es cero cuando está abierto. La apertura y cierre periódicos del interruptor produce la salida de pulsos mostrada en la *figura 4.1 (c)*. La media o componente continua de la salida es:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_s dt = V_I D \quad 4.1$$

La componente continua de salida se controla ajustando el ciclo de trabajo D , que es la fracción del período en la que el interruptor está cerrado:

$$D = \frac{t_{conduccion}}{t_{conduccion} + t_{corte}} = \frac{t_{conduccion}}{T} = t_{conduccion} \cdot f \quad 4.2$$

Siendo f la frecuencia de conmutación en hercios. En este circuito, la componente continua de salida será menor o igual a la de entrada.

La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero. Cuando el interruptor está abierto, no pasa corriente por él; cuando el interruptor está cerrado, no cae tensión en el mismo. Por tanto, la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia de energía es del 100%. En un interruptor real se producirán pérdidas, la tensión del interruptor no será cero cuando conduzca al pasar de un estado a otro.

4.2.1 . Convertidor reductor (Buck)

En algunas aplicaciones puede ser suficiente controlar la componente continua de una salida de pulsos como la mostrada en la figura Ilustración 6, pero muchas veces el objetivo es producir una salida continua pura. Una manera de obtener una salida continua en el circuito de la Ilustración 6 insertar un filtro paso bajo después del interruptor. En la Ilustración 4.2 se muestra un filtro paso bajo con una bobina y un condensador añadido al convertidor básico. El diodo proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor está abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Este circuito se denomina convertidor Buck o convertidor reductor, porque la tensión de salida es menor que la de entrada.

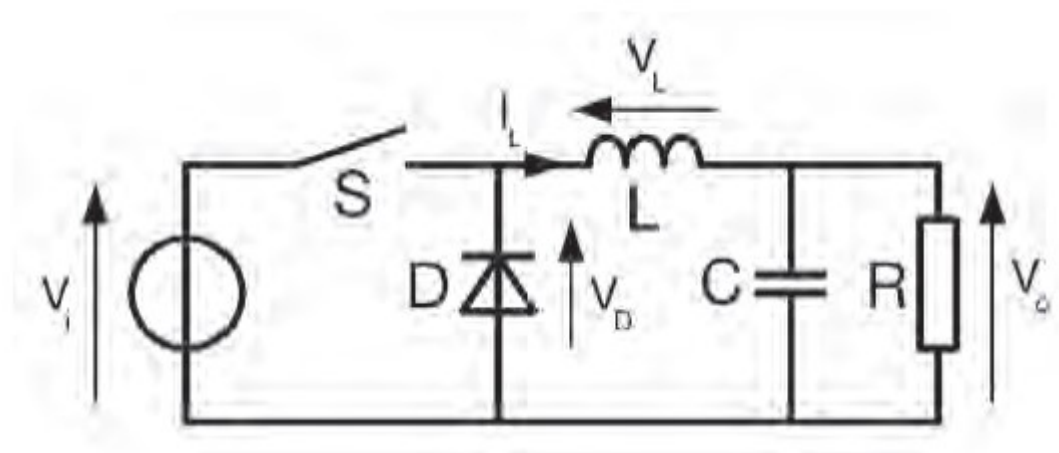


Ilustración 4.2. Esquema convertidor Buck. [1]

Si el filtro paso bajo es ideal, la tensión de salida es la media de la tensión de entrada del filtro. La entrada del filtro, V_D en la Ilustración 4.2, es V_i cuando el interruptor está cerrado y cero cuando está abierto, siempre que la corriente en la bobina sea positiva y el diodo conduzca. Si el interruptor se cierra de la forma periódica con un ciclo de trabajo D , la tensión media en la entrada del filtro es $V_i \cdot D$, como se indica en la ecuación 4.1. La corriente en la bobina que es positiva en todo el intervalo de conmutación se denomina corriente permanente. Por el contrario, la corriente discontinua se caracteriza porque la corriente de la bobina pasa por cero en cada periodo

La forma de analizar el funcionamiento del convertidor reductor, es examinar la tensión y la corriente de la bobina. Este método de análisis será útil para diseñar el filtro y también nos servirá para analizar los circuitos electrónicos de los demás convertidores.

Las propiedades a tener en cuenta cuando el convertidor funciona en régimen permanente son:

- La corriente en la bobina es periódica:

$$I_L(t + T) = I_L(t)$$

4.3

- La tensión media en la bobina es cero:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(t) dt = 0 \quad 4.4$$

- La corriente media en el condensador es cero:

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I_C(t) dt = 0 \quad 4.5$$

- La potencia entregada por la fuente es igual a la suministrada a la carga. Cuando los componentes no son ideales, la fuente también suministra las pérdidas:

$$P_I = P_O \text{ (Ideal)} \quad 4.6$$

$$P_I = P_O + \text{pérdidas (No Ideal)} \quad 4.7$$

La potencia entregada por la fuente es igual a la suministrada a la carga. Cuando los componentes no son ideales, la fuente también suministra las pérdidas:

Para analizar el convertidor de la Ilustración 4.2 comenzaremos suponiendo lo siguiente:

- El circuito opera en régimen permanente.
- La corriente en la bobina es permanente (siempre positiva).
- El valor del condensador es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante a una tensión VO.
- El periodo de conmutación es T. El interruptor estará cerrado un tiempo $D \cdot T$ y estará abierto el resto del tiempo, $(1 - D) \cdot T$
- Los componentes son ideales.

La clave del análisis para determinar la salida VO es examinar, en primer lugar, la corriente y la tensión en la bobina cuando el interruptor está cerrado y luego con el interruptor abierto. La variación neta de corriente en la bobina en un periodo debe ser cero en régimen permanente. La tensión media en la bobina es cero.

Cuando el interruptor S está cerrado, tiempo D·T, el diodo se polariza en inversa y la energía se transfiere de la fuente a la bobina, al condensador y a la carga. La tensión en la bobina es:

$$V_L = V_I - V_O = L \frac{dI_L}{dt} \rightarrow \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_I - V_O}{L} \quad 4.8$$

Como la derivada de la corriente es una constante positiva, la corriente aumenta linealmente como se muestra en la *Ilustración 4.3*. La variación de corriente cuando el interruptor está cerrado se calcula modificando la *ecuación 4.8*:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_I - V_O}{L} \rightarrow (\Delta I_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_I - V_O}{L}\right)DT \quad 4.9$$

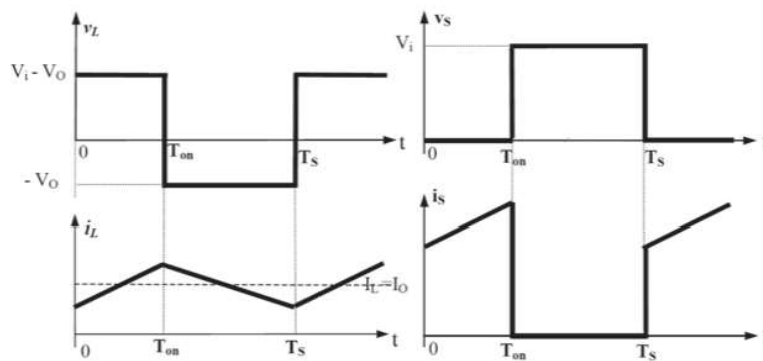


Ilustración 4.3 Evolución de las tensiones y corrientes en el tiempo en un convertidor Buck ideal en modo continuo [2]

Cuando el interruptor S está abierto, tiempo (1-D) · T, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina y el condensador a la carga. Por tanto, la tensión en la bobina es :

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad 4.10$$

La derivada de la corriente en la bobina es una constante negativa, y la corriente disminuye linealmente como se muestra en la Ilustración 4.3. La variación de corriente en la bobina cuando el interruptor está abierto es:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \rightarrow (\Delta i_L)_{abierto} = -\frac{V_o}{L}(1-D)T \quad 4.11$$

En la operación en régimen permanente es necesario que la corriente de la bobina sea la misma al final y al principio de cada ciclo de conmutación, por lo que la variación neta de la corriente de la bobina en un periodo será cero. Para ello se debe cumplir:

$$(\Delta i_L)_{abierto} + (\Delta i_L)_{cerrado} = 0 \quad 4.12$$

Sustituyendo en la ecuación 4.12 las ecuaciones 4.9 y 4.11:

$$\left(\frac{V_I - V_o}{L}\right)DT - \frac{V_o}{L}(1-D)T = 0 \rightarrow V_o = V_I \cdot D \quad 4.13$$

Observe que la tensión de salida sólo depende de la entrada y del ciclo de trabajo D. Si la tensión de entrada fluctúa, la tensión de salida puede regularse ajustando el ciclo de trabajo adecuadamente. Se precisa un bucle de realimentación para muestrear la tensión de salida, compararla con una referencia y configurar correctamente el ciclo de trabajo del conmutador.

La corriente media en la bobina debe ser igual a la corriente media en la resistencia de carga, porque la corriente media en el condensador debe ser nula cuando opera en régimen permanente, por consiguiente:

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad 4.14$$

Como la variación de corriente en la bobina se puede calcular utilizando las *ecuaciones 4.7* y

4.10, los valores mínimos y máximos de la corriente en la bobina se calcularán de la siguiente manera :

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D) T \right] = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{(1 - D)}{2Lf} \right] \quad 4.15$$

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D) T \right] = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1 - D)}{2Lf} \right] \quad 4.16$$

Siendo f la frecuencia en hercios.

Para que el análisis anterior sea válido, es necesario verificar que existe corriente permanente en la bobina. Una forma de comprobarlo es calcular la corriente mínima en la bobina utilizando la *ecuación 4.16*. Como el valor mínimo de la corriente en la bobina debe ser positivo para tener una corriente permanente, no está permitido que el mínimo calculado utilizando la *ecuación 4.16* sea negativo. El circuito funcionará con corriente discontinua en la bobina, pero el análisis anterior no será válido.

Podemos utilizar la *ecuación 4.16* para determinar la combinación de L y f que producirá corriente permanente. Como $I_{Lmin} = 0$ es el límite entre la corriente permanente y la corriente discontinua.

$$I_{min} = 0 = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1 - D)}{2Lf} \right] \rightarrow L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad 4.17$$

Si fijamos la frecuencia de conmutación deseada obtenemos L_{min} , la inductancia mínima necesaria para que exista corriente permanente.

Y como supusimos para hacer el análisis que los componentes utilizados eran ideales, la potencia entregada es igual a la suministrada a la carga, $P_o = P_i$ (*ecuación 4.5*). Por tanto, la potencia absorbida por la carga es:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} \quad 4.18$$

Sustituyendo la *ecuación 4.13* en la ecuación anterior, obtenemos la relación entre el ciclo de trabajo y la intensidad:

$$I_o = \frac{I_i}{D} \quad 4.19$$

Donde la *ecuación 4.13*, describe entonces la relación de conversión del voltaje $M(D)$ del convertidor reductor [2]:

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = D \quad 4.20$$

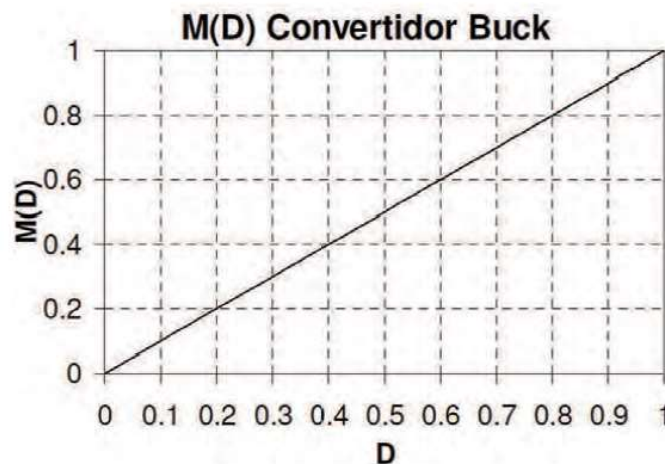


Ilustración 4.3. Relación de conversión $M(D)$ vs. Ciclo de trabajo D [2]

Como puede verse en la *figura 4.3*, corresponde a una relación lineal. Conforme aumenta el ciclo de trabajo, aumenta el voltaje de salida V_O de forma lineal respecto a su voltaje de entrada V_I a razón de $M(D)$.

De la *ecuación 4.20* se extrae la relación de conversión de la intensidad $M(D)I$ del convertidor Buck:

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{D} = M(D)_I \quad 4.21$$

Es importante indicar que al tratarse de un convertidor ideal $M(D)_i = M(D)$. Sin embargo, en convertidores no ideales (eficiencia menor a la unidad) $M(D)_i \neq M(D)$. A medida que aumenta el ciclo de trabajo D disminuye la corriente de salida a razón de $M(D)_i$, lo cual explica la compensación en la corriente de salida del convertidor respecto a su aumento de voltaje.

En la práctica, el ciclo de trabajo se limita a un valor fijo de acuerdo a la $M(D)$ máxima especificada en los criterios de diseño del convertidor y depende del comportamiento del circuito real del convertidor.

4.2.2 . Convertidor elevador o Boost.

Este tipo de convertidor, denominado Boost, es utilizado cuando deseamos un aumento de latensión de salida con relación a la tensión de entrada. La polaridad de la tensión de salida es la misma que la de entrada.

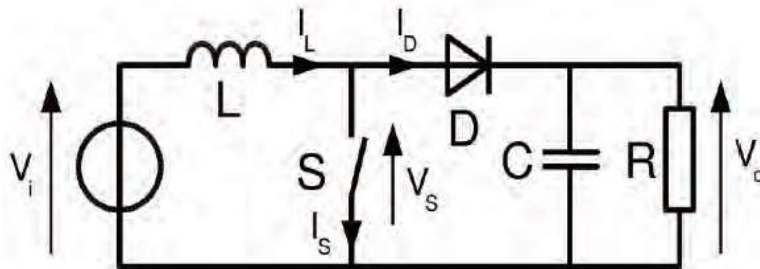


Ilustración 4.4. Esquema básico de un convertidor Boost. [1]

Para analizar el convertidor Boost seguiremos los mismos pasos y suposiciones vistos en el convertidor reductor

Análisis en el tiempo $D \cdot T$. Cuando el interruptor S de la Ilustración 4.4 está cerrado, las tensiones en la malla que incluye la fuente, la bobina y el interruptor cerrado son:

$$V_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{V_I}{L} = \frac{di_L}{dt} \quad 4.22$$

El ritmo de variación de la corriente es una constante, por lo que la corriente aumenta linealmente cuando el interruptor está cerrado (ver Ilustración 4.4). La variación de corriente en la bobina se calcula:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_I}{L} \rightarrow (\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{DTV_i}{L} \quad 4.23$$

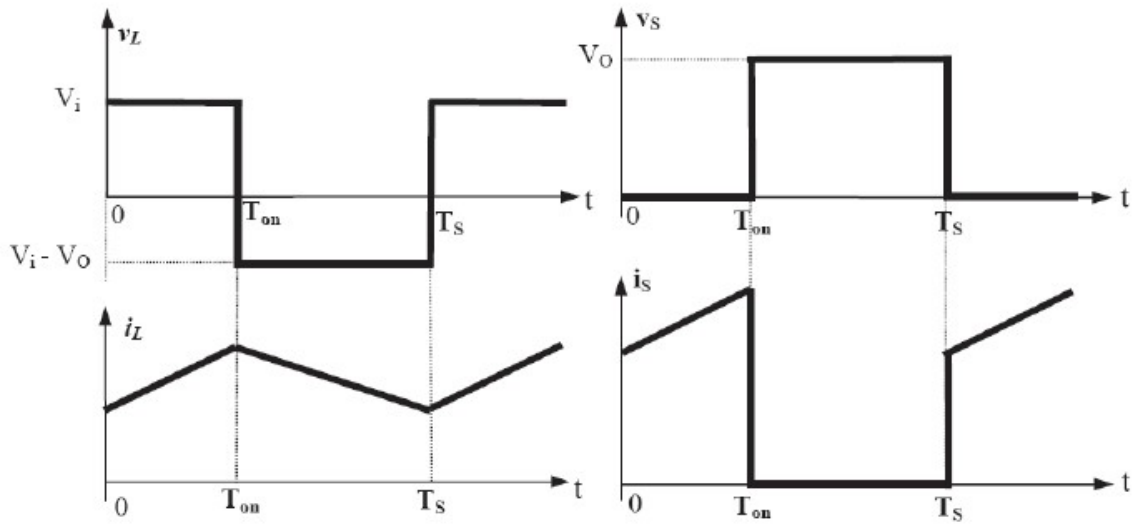


Ilustración 4.5. Formas de onda de corriente y tensión del convertidor elevador en conducción continua [1]

Análisis en el tiempo $(1-D) \cdot T$. Cuando el interruptor S de la Ilustración 4.4 está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino a la corriente de la bobina. La energía se transfiere de la fuente y de la bobina al condensador y a la carga. Suponiendo que la tensión de salida V_O es constante, la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_I - V_o = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_I - V_o}{L} \quad 4.24$$

El ritmo de variación de corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente debe variar linealmente cuando el interruptor esté abierto. La variación en la corriente de la bobina con el interruptor abierto es:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = \frac{V_I - V_o}{L} \rightarrow (\Delta i_L)_{abierto} = \frac{V_I - V_o}{L}(1-D)T \quad 4.25$$

En régimen permanente, la corriente total de la bobina debe de ser igual a cero, ya que la energía que almacena, es liberada durante el TOFF:

$$(\Delta i_L)_{abierto} + (\Delta i_L)_{cerrado} = 0 \quad 4.26$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.24 y 4.25 en 4.26 y despejando VO:

$$\frac{DTV_i}{L} + \frac{V_i - V_o}{L}(1-D)T = 0 \rightarrow V_o = \frac{V_I}{1-D} \quad 4.27$$

La corriente por la bobina la calcularemos teniendo en cuenta que la potencia entregada por la fuente es igual a la potencia absorbida por la carga.

La potencia media de entrada: $P_I = V_I I_I = V_I I_L$

La potencia media de salida: $P_O = \frac{V_o^2}{R}$

Igualando ambas ecuaciones: $V_I I_I = \frac{V_o^2}{R} = \frac{(\frac{V_i}{1-D})^2}{R}$

Obtenemos la intensidad media por la bobina despejando IL:

$$I_L = \frac{V_I}{(1-D)^2 R} \quad 4.28$$

La corriente máxima y mínima en la bobina se determinan utilizando el valor medio y la variación de corriente:

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_I}{(1-D)^2 R} + \frac{DTV_i}{2L} \quad 4.29$$

$$I_{Lmin} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_I}{(1-D)^2 R} + \frac{DTV_i}{2L} \quad 4.30$$

Al igual que para el convertidor Buck, hemos desarrollado los cálculos partiendo de la suposición de corriente continuada y positiva a través de la bobina. Para que podamos asegurar esto, tenemos que saber el valor límite de la inductancia en la bobina. Para ello debemos saber que cuando tenemos una $I_{Lmin} = 0$, en la *ecuación 4.30*, estamos en el valor de inductancia crítica. Despejando esta igualdad obtenemos la inductancia mínima para obtener una corriente permanente en el convertidor elevador:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad 4.31$$

Como supusimos para hacer el análisis que los componentes utilizados eran ideales, la potencia entregada es igual a la suministrada a la carga, $P_I = P_O$. Por tanto, la potencia absorbida por la carga es:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} \quad 4.32$$

Sustituyendo la *ecuación 4.27* en la ecuación anterior, obtenemos la relación entre el ciclo de trabajo y la intensidad:

$$I_o = I_i \cdot (1-D) \quad 4.33$$

Donde la *ecuación 4.34*, representa la relación de conversión del voltaje $M(D)$ del convertidor elevador :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad 4.34$$

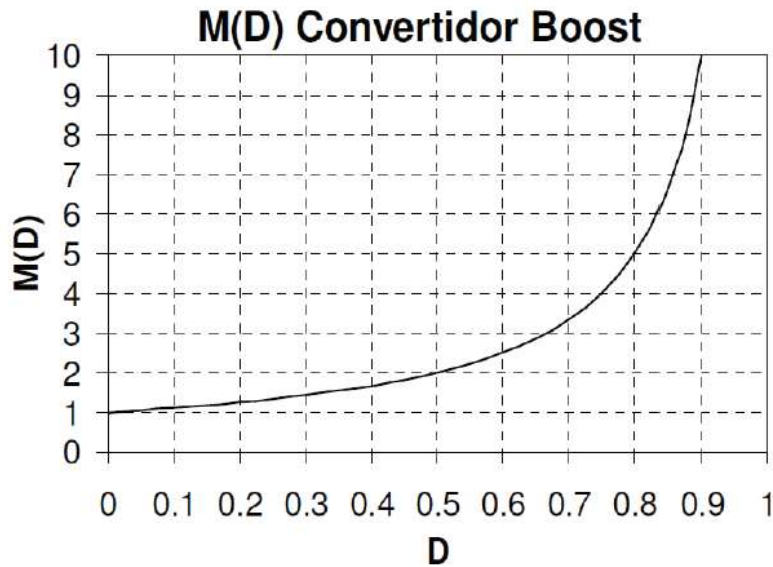


Ilustración 4.6. Relación de conversión $M(D)$ del convertidor Boost ideal [2]

En la Ilustración 4.6, puede verse la relación (no lineal) de conversión $M(D)$ con respecto al ciclo de trabajo D . A medida que aumenta el ciclo de trabajo, aumenta el voltaje de salida V_O respecto a su voltaje de entrada V_I a razón de $M(D)$.

De la ecuación 4.34 se define también la relación de conversión $M(D)I$ respecto a las corrientes de entrada y salida:

$$\frac{I_o}{I_i} = 1 - D = M(D)_i \quad 4.35$$

medida que aumenta el ciclo de trabajo D disminuye la corriente de salida a razón de $M(D)I$, lo cual explica la compensación en la corriente de salida del convertidor respecto a su aumento de voltaje.

4.2.3 . Convertidor Reductor-Elevador o Buck-Boost

Otro convertidor básico en modo conmutado es el convertidor reductor-elevador, que se

muestra en la *Ilustración 4.7*. La salida del convertidor reductor-elevador puede ser mayor o menor que la tensión de entrada.

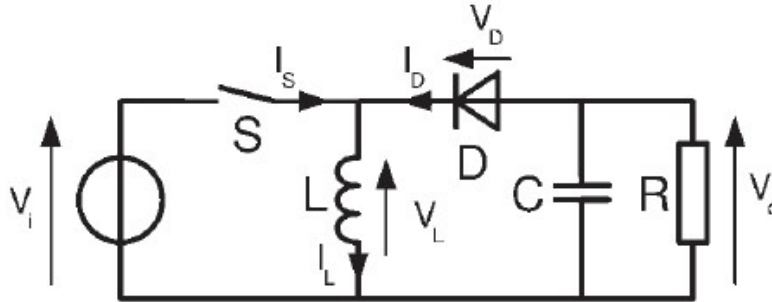


Ilustración 1.7 Esquema básico de un convertidor Buck-Boost [1]

Para analizar el circuito, seguiremos los mismos pasos y utilizando las mismas suposiciones vistas en el convertidor reductor.

Análisis en el tiempo D·T. Cuando el interruptor S está cerrado, el voltaje de entrada alimenta a la bobina y el condensador a la resistencia de carga. La tensión en la bobina es:

$$V_L = V_i = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \quad 4.36$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente en la misma aumenta linealmente. Podemos expresar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_L}{L} \quad 4.37$$

Calculando Δi_L con el interruptor cerrado:

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \frac{DTV_i}{L} \quad 4.38$$

Análisis en el tiempo $(1-D) \cdot T$. Cuando el interruptor S del circuito de la *figura 4.7* está abierto, la corriente en la bobina no puede variar instantáneamente, por lo que el diodo estará polarizado en directa y pasará corriente por la resistencia y el condensador. La energía almacenada en la bobina se descarga a través de la resistencia. Cuando esto ocurre la tensión en la bobina viene dada por:

$$V_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad 4.39$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es de nuevo constante, y se puede expresar como:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L} \quad 4.40$$

Despejando ΔI_L cuando el interruptor está abierto:

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(1-D)TV_o}{L} \quad 4.41$$

Cuando el circuito funciona en régimen permanente, la variación neta de la corriente en la bobina debe ser nula en un periodo. Utilizando las *ecuaciones 4.38 y 4.41* obtenemos que:

$$(\Delta i_L)_{abierto} + (\Delta i_L)_{cerrado} = 0 \quad 4.42$$

$$\frac{(1-D)TV_o}{L} + \frac{DTV_I}{L} = 0 \quad 4.43$$

Despejando V_o :

$$V_o = -V_I \left[\frac{D}{(1-D)} \right] \quad 4.44$$

La ecuación 4.43 muestra que la polaridad de la tensión de salida es opuesta a la de la tensión de la fuente. La tensión de salida del convertidor reductor-elevador puede ser menor o mayor que la de la fuente, en función del ciclo de trabajo del interruptor. Si $D > 0,5$ la salida será mayor que la entrada, y si $D < 0,5$ la salida será menor que la entrada. Por tanto, este circuito combina las características de los convertidores reductor y elevador.

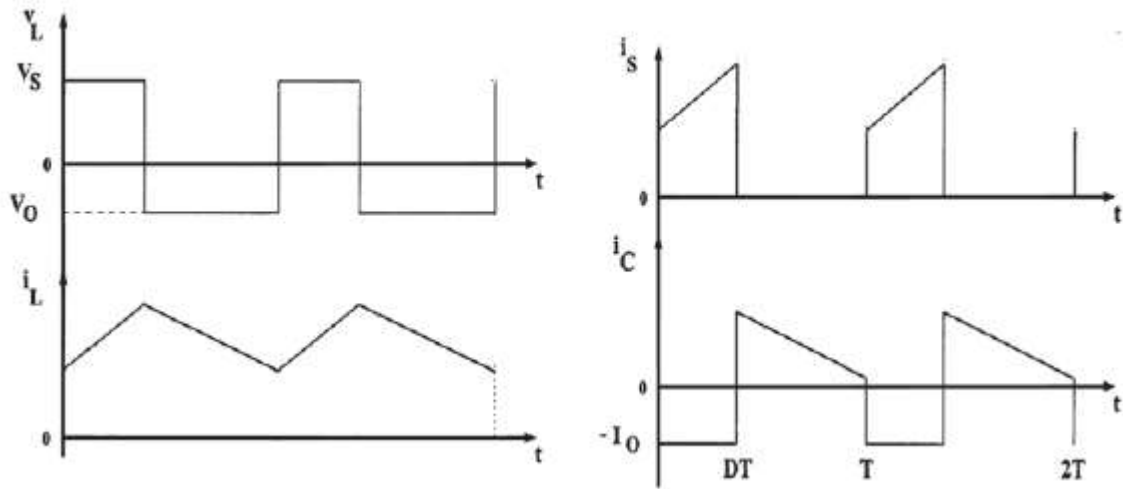


Ilustración 4.8. Formas de onda de corriente y tensión del convertidor elevador en conducción continua [2]

Para calcular el valor de la corriente media que atraviesa la bobina, haremos un balance de potencias en el circuito. Potencia absorbida por la carga debe ser la misma que entrega la fuente.

Potencia de salida:
$$P_O = \frac{v_O^2}{R}$$

Potencia de entrada:
$$P_I = V_I I_L$$

Relación entre I_I e I_O :
$$P_I = I_L D$$

Igualando ambas potencias:
$$\frac{v_O^2}{R} = V_I I_L$$

Sustituyendo la tensión de salida de la ecuación 4.42 y despejando I_L ,

$$I_L = \frac{V_O^2}{V_I R D} = \frac{P_O}{V_I D} = \frac{V_I D}{R(1 - D)^2} \quad 4.45$$

Las corrientes máximas y mínimas por la bobina se calculan utilizando las *ecuaciones 4.46* y

4.47:

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_I}{(1-D)^2 R} + \frac{DTV_i}{2L} \quad 4.46$$

$$I_{Lmin} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_I}{(1-D)^2 R} + \frac{DTV_i}{2L} \quad 4.47$$

Al igual que en las topologías anteriores, la corriente por la bobina debe de ser permanente. Para determinar la inductancia crítica igualaremos la I_{Lmin} a cero:

$$L_{min} = \frac{R(1-D)^2}{2f} \quad 4.48$$

La potencia entregada es igual a la suministrada a la carga, $P_i = P_o$ (Como supusimos al principio del convertidor reductor). Por tanto, la potencia absorbida por la carga es:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{I_i}{I_o} \quad 4.49$$

Sustituyendo la *ecuación 4.44* en la ecuación anterior, obtenemos la relación entre el ciclo de trabajo y la intensidad:

$$I_o = -I_i \left[\frac{1-D}{(D)} \right] \quad 4.50$$

Donde la *ecuación 4.51* proporciona la relación de conversión del voltaje $M(D)$ del convertidor reductor-elevador:

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad 4.51$$

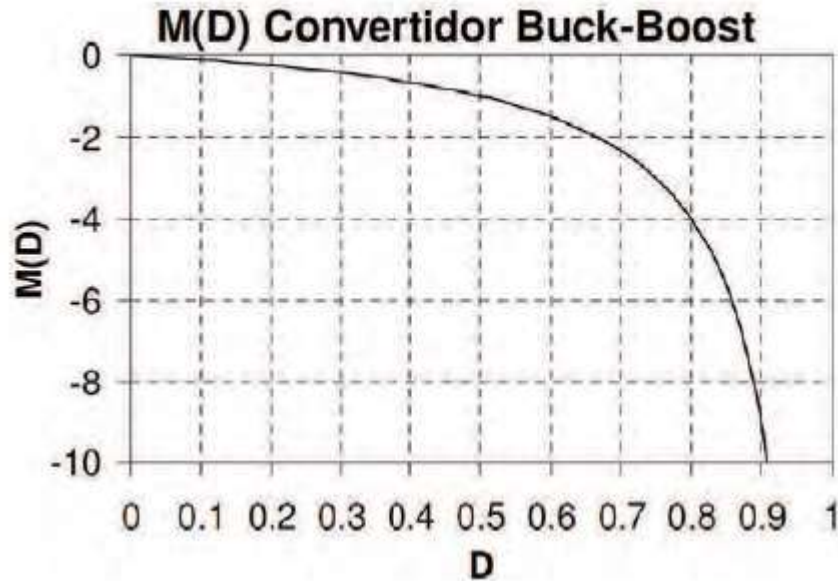


Ilustración 4.9. Relación de conversión $M(D)$ vs. Ciclo de trabajo D en un convertidor reductor-elevador [2]

La ilustración 4.9 muestra la relación de conversión del convertidor elevador-reductor. Como puede verse, cuando D está entre 0.0 y 0,5 el convertidor funciona como reductor y entre 0,5. y 0,9 como elevador. Sin embargo, si en los criterios de diseño electrónico se especifica un límite $M(D)$ para la etapa elevadora, entonces el margen de actuación de D se ve limitada.

La relación de las corrientes se puede extraer de la ecuación 4.50, llegando a la siguiente expresión:

$$M(D) = \frac{I_o}{I_i} = -\frac{1-D}{D} \quad 4.52$$

4.3. Comportamiento de los Convertidores DC/DC Acoplados a Módulos Fotovoltaicos.

4.3.1 . Comportamiento de un Convertidor Elevador

Para observar con detalle el comportamiento del convertidor, se conecta a su entrada un módulo fotovoltaico a condiciones estándares de medida (STC) y a su salida una carga resistiva fija Z , tal y como se muestra en *Ilustración 4.10*.

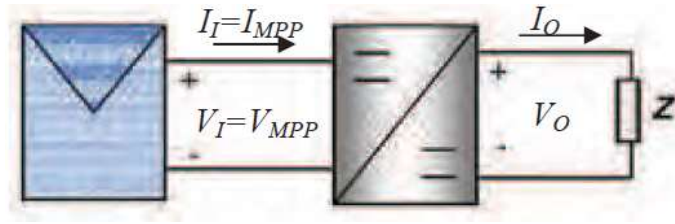


Ilustración 4.10 Diagrama de bloques del sistema Módulo convertidor DC/DC [2]

Se debe entonces relacionar el ciclo de trabajo D con Z , $V_I = V_{MPP}$ e $I_I = I_{MPP}$ (considerando la corriente y voltaje del módulo en el punto de máxima potencia). De las ecuaciones 4.34 y 4.35 y haciendo uso de la expresión de la impedancia del convertidor Z_I , se llega a:

$$Z_I = \frac{V_I}{I_I} = \frac{V_O}{I_O} \cdot (1 - D)^2 = Z(1 - D)^2 \quad 4.53$$

Donde Z_I corresponde a la impedancia de entrada del convertidor y Z a la impedancia aplicada a su salida. De la ecuación anterior podemos llegar a la siguiente expresión para D :

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \frac{1}{Z}} \quad 4.54$$

Esta última expresión muestra que, para valores constantes de V_{MPP} e I_{MPP} , el valor mínimo de Z (del orden de unos pocos ohmios) está condicionado al valor mínimo del ciclo de trabajo ("0"). Al aumentar el valor de Z empezará a incrementarse D y este aumento conducirá a elevar V_O y disminuir I_O de acuerdo a las ecuaciones 4.34 y 4.35. Este efecto se representa gráficamente en la forma de una hipérbola, que caracteriza el funcionamiento del convertidor elevador, tal y como se muestra en la Ilustración 4.11. Este caso concreto corresponde a la curva característica teórica del módulo I-94/12 de la empresa fabricante Isofotón acoplado al convertidor elevador ideal. El barrido de la curva fue realizado variando Z entre $2,25 \, \Omega$ (cuando $D=0$ y $V_O = V_{MPP}$) y $14,75 \, \Omega$ (cuando $D=0,62$ y $V_O = 35V$).

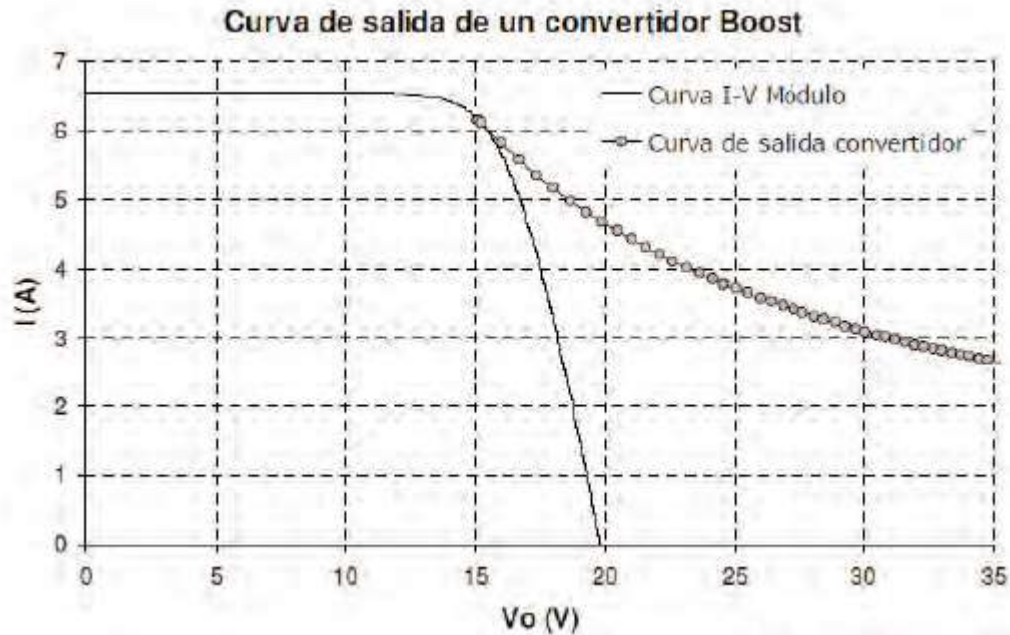


Ilustración 4.11. Curva característica teórica de un convertidor elevador acoplado a un módulo fotovoltaico y curva generada al variar su impedancia de salida. [2]

Como puede verse en la Ilustración 4.11, la curva de salida del convertidor traza una hipérbola que representa los valores V_O e I_O posibles para los cuales el convertidor debe mantener constante la potencia máxima del módulo ante un cambio en la carga de salida Z . Teóricamente, y en condiciones ideales, la hipérbola continúa indefinidamente representando el aumento del voltaje de salida a medida que aumenta Z . En la práctica, el ciclo de trabajo se limita a un valor razonable respecto a la relación de conversión del convertidor, lo que provoca que la hipérbola caiga al valor correspondiente de V_O que es limitado por $M(D)$ o lo que es lo mismo por D , es decir, para un valor del ciclo de trabajo $D=0,5$, $M(D)=2$ y el valor de $V_O=M(D) \cdot V_I = 2 \cdot 15V = 30V$. Si se hace ahora el caso inverso, y lo que se quiere es variar el punto de operación del módulo, se debe fijar el valor de Z en la ecuación 4.54. De esta forma, cualquier cambio en las condiciones de operación del módulo provocará un cambio en su punto de máxima potencia (V_{MPP} e I_{MPP}), ante esto el convertidor cambia su ciclo de trabajo D y esto da lugar a un cambio en su impedancia Z_I (esto puede verse al fijar Z en la ecuación 4.53), que al ser enfrentada al módulo, provoca un cambio en el punto de trabajo y convierte al convertidor en un adaptador de impedancia. Luego, si el convertidor incorpora un dispositivo controlado para cambiar D , entonces éste se convierte en un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) del módulo

fotovoltaico, llamado convertidor MPPT. Los diferentes métodos de decisión de cómo debe aumentar o disminuir D para seguir el punto de máxima potencia, se implementan en el microcontrolador.

4.3.2 . Comportamiento de un Convertidor Reductor

Tomando el mismo esquema de un módulo acoplado a un convertidor y éste a una carga Z mostrado en la *ilustración 4.10*, se busca una expresión que relacione el ciclo de trabajo D con Z y V_{MPP} e I_{MPP} del módulo. Haciendo uso de las *ecuaciones 4.20 y 4.21* y tomando como referencia la impedancia interna del convertidor, se llega a:

$$Z_I = \frac{V_I}{I_I} = \frac{V_O}{I_O} \cdot D^{-2} = Z D^{-2} \quad 4.55$$

Y la relación de D con el punto de máxima potencia y Z será:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \frac{1}{Z}} \quad 4.56$$

Esta última expresión muestra que para valores constantes de V_{MPP} e I_{MPP} , que corresponden al punto de máxima potencia del módulo, el valor más alto de Z (unas decenas de Ohms) está condicionado al máximo ciclo de trabajo de “1”. Al disminuir Z , en algunos casos disminuye D , esta disminución conduce a reducir V_O y aumentar I_O de acuerdo a las *ecuaciones 4.20 y 4.21*. Este efecto se representa gráficamente en la forma de una hipérbola, la cual caracteriza el funcionamiento del convertidor reductor al variar su impedancia de salida, tal y como se muestra en la *Ilustración 4.11*. Este caso concreto corresponde a la curva característica teórica del módulo I-94/12 acoplado al convertidor reductor ideal, variando Z entre 2.2Ω (cuando $D=1$ y $V_O=V_{MPP}$) y 0.5Ω (cuando $D=0.48$ y $V_O=6.4V$).

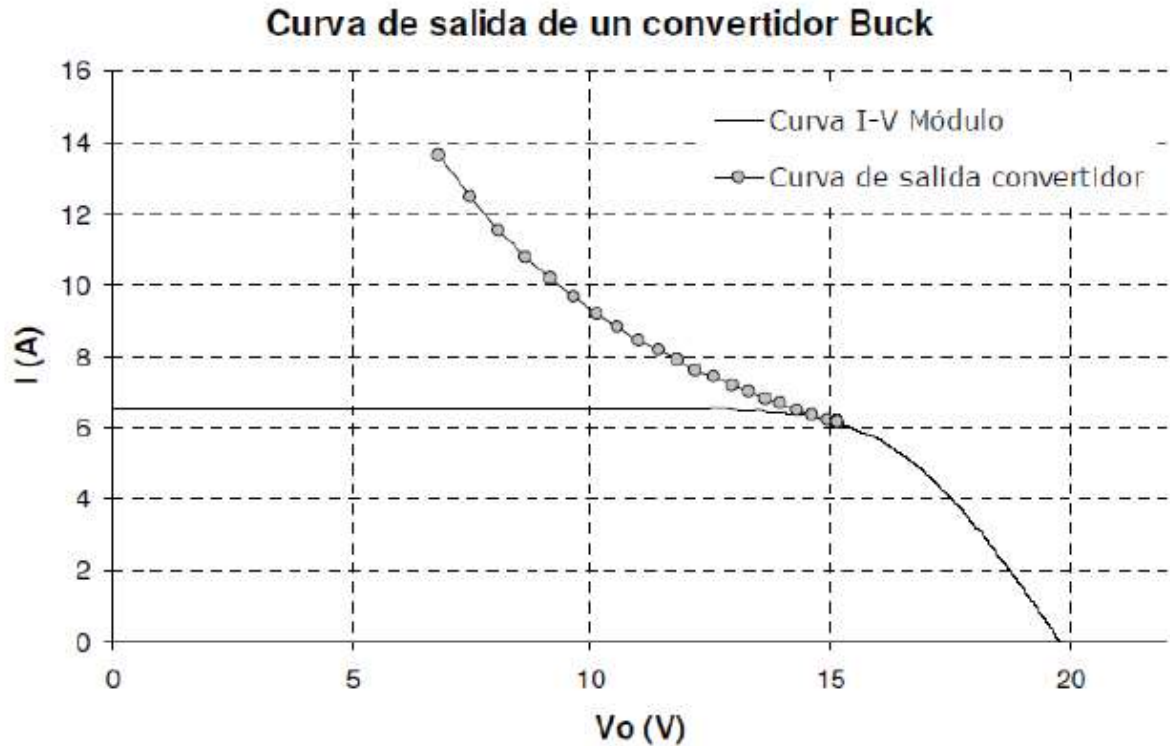


Ilustración 4.12 Curva característica teórica de un convertidor reductor al variar su impedancia de salida. [2]

En la *Ilustración 4.12* se muestra la curva de salida del convertidor, una hipérbola que representa los valores V_o e I_o posibles para los cuales el convertidor debe mantener constante la potencia máxima del módulo ante un cambio en la carga de salida Z . Teóricamente, y en condiciones ideales, la hipérbola continúa indefinidamente representando la disminución del voltaje de salida a medida que disminuye Z . En la práctica, el ciclo de trabajo se limita a un valor razonable respecto a la relación de conversión del convertidor, lo que provoca que la hipérbola caiga al valor correspondiente de V_o que es limitado por $M(D)$, o lo que es lo mismo por D ; es decir, para un valor del ciclo de trabajo $D=0,5$, $M(D)=0,5$, el voltaje e intensidad de salida son: $V_o = M(D) \cdot V_i = 0,5 \cdot 15V = 7,5V$ y $I_o = P/M(D) = 6.14A/0,5 = 12.28A$ respectivamente.

4.3.3 . Comportamiento de un Convertidor Reductor-Elevador

Como punto de partida, se adopta el mismo esquema de la *Ilustración 4.10*, un módulo acoplado a un convertidor y éste a una carga Z . Se trata entonces de hallar una expresión que relacione el ciclo de

trabajo D con Z , VMPP e IMPP. Haciendo uso de las *ecuaciones 4.51* y *4.52* y tomando como punto de partida la impedancia interna Z_I del convertidor, se llega a:

$$Z_I = \frac{V_I}{I_I} = \frac{V_o}{I_o} = \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 = Z \cdot M(D)^{-2} \quad 4.57$$

Luego, las ecuaciones que relacionan D con Z y el punto de máxima potencia del módulo son:

Para $\epsilon D [0 ; 0,5]$:

$$D = \sqrt{Z \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} (1-D) Z_I} = \frac{V_I}{I_I} = \frac{V_o}{I_o} = \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 = Z \cdot M(D)^{-2} \quad 4.58$$

Estas expresiones corresponden a dos ecuaciones implícitas en D . La *ecuación 4.58* proporciona información sobre el comportamiento del convertidor como reductor, mientras que la *ecuación 4.59* como elevador.

Para $\epsilon D [0,5 ; 1]$:

$$D = 1 - \frac{D}{\sqrt{Z \cdot \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}}}} \quad 4.59$$

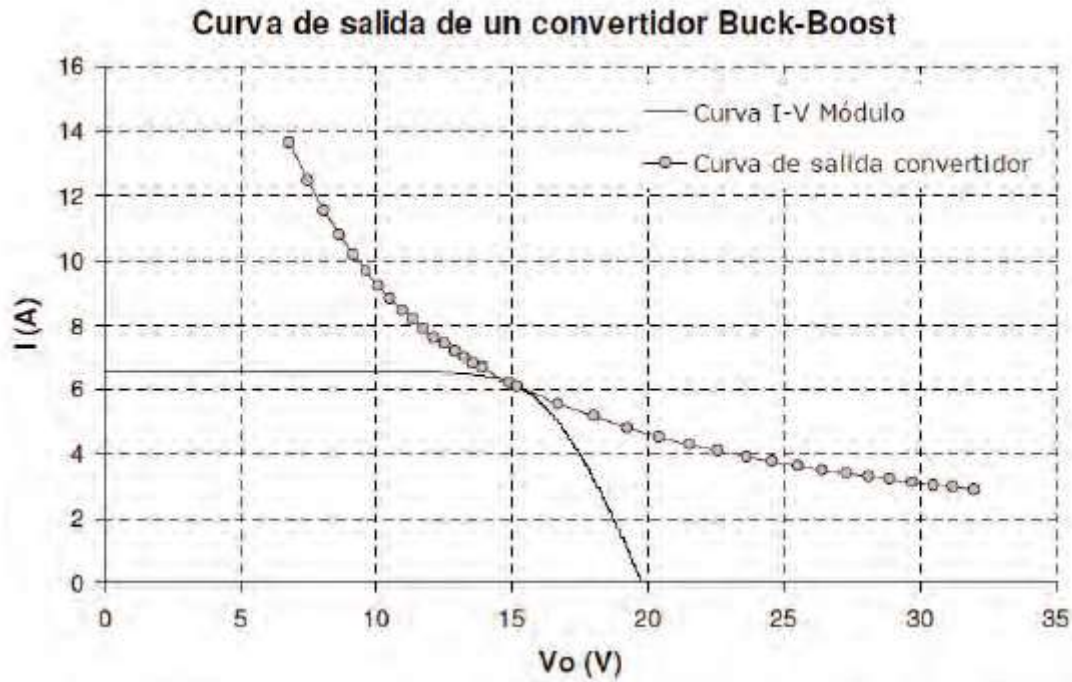


Ilustración 4.13. Curva característica teórica de un convertidor reductor-elevador al variar su impedancia de salida [2]

En la *Ilustración 4.13* se muestra un ejemplo de la curva característica teórica del módulo I-94/12 acoplado al convertidor reductor-elevador ideal. Al variar Z entre $0,5 \Omega$ (cuando $D=0,3$ y $V_O=6,8V$) y $2,4 \Omega$ (cuando $D=0,49$ y $V_O \approx V_{MPP}$) el convertidor funciona como reductor; mientras que, cuando incrementamos Z entre $2,5 \Omega$ (cuando $D=0,5$ y $V_O \approx V_{MPP}$) y 11Ω (cuando $D=0,69$ y $V_O=32V$), funciona como elevador.

4.4. Limitaciones de los convertidores DC/DC

La *Ilustración 4.14* muestra el diagrama de un módulo fotovoltaico conectado a un convertidor dc/dc, donde la resistencia reflejada a la entrada del convertidor viene representada por R_i y R_L es la resistencia de carga. A lo que concierne al módulo fotovoltaico, el convertidor es representado por su resistencia de entrada de valor de R_i .

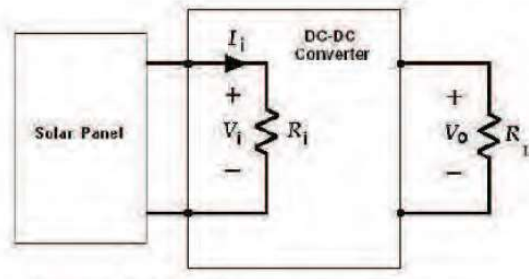


Ilustración 4.14. Conexión convertidor-módulo FV con carga

Asumiendo el convertidor sin pérdidas, la relación entre la resistencia de entrada y la carga se muestra en la *Tabla 4.1*, tanto para CCM como DCM. El modo de funcionamiento del convertidor está definido por la K constante (mirar la *Tabla 4.1*) donde L es la inductancia del convertidor, R_L su resistencia de carga y T el período de conmutación (el inverso a la frecuencia de conmutación). Si la K toma un valor inferior o igual que $K_{crítica}$, el convertidor funcionará en DCM. A la inversa, si la K excede el valor de $K_{crítica}$, el convertidor funcionará en CCM. Como observamos en la *tabla 4.1*, el valor de $K_{crítica}$ es diferente para cada tipo de convertidor. Haciendo uso de las *ecuaciones 4.17, 4.31 y 4.48* de apartados anteriores podemos elaborar la siguiente tabla resumen:

Convertidor	$K_{crítica}$	R_i (CCM)	R_i (DCM)
Reductor	$1-D$	$\frac{R_L}{D^2}$	$\frac{R_L}{4} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}}\right)^2$
Elevador	$D \cdot (1-D)^2$	$R_L \cdot (1-D)^2$	$\frac{4 \cdot R_L}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4D^2}{K}}\right)^2}$
Reductor-Elevador	$(1-D)^2$	$\frac{R_L \cdot (1-D)^2}{D^2}$	$\frac{K \cdot R_L}{D^2}$
Con $K = \frac{2L}{R_L T}$		DCM ocurre para $K < K_{crítica}$	

Tabla 4.1. Valores de R_i para los convertidores dc/dc básicos [3].

Las expresiones en la *Tabla 4.2* son deducidas de la *Tabla 4.1*, siendo las expresiones de R_i continuas en la D , para una exploración del ciclo de trabajo D del convertidor.

Convertidor	$\lim_{D \rightarrow 0} R_i$	$\lim_{D \rightarrow 1} R_i$
Reductor	∞	R_L
Elevador	R_L	0
Reductor-Elevador	∞	0

Tabla 4.2 Valores del límite de R_i cuando $D \rightarrow 0$ o $D \rightarrow 1$

El sistema de seguimiento del punto de máxima potencia modificará el valor de R_i , tratando de conseguir $R_i = RMPP$ ($RMPP = VMPP/IMPP$), siendo $RMPP$ la resistencia en el punto de máxima potencia. Sin embargo, esto no será posible si $RMPP$ no pertenece a la serie de valores permitidos por R_i , es decir, el sistema no alcanzará el punto de máxima potencia si $R_L > RMPP$ para sistemas fotovoltaicos con convertidor reductor o $R_L < RMPP$ para sistemas con convertidor elevador. Para sistemas con convertidor reductor-elevador, R_i puede tomar cualquier valor entre 0 y ∞ . Por consiguiente, las restricciones impuestas para la dos primeras topología de convertidores no tienen influencia en el convertidor reductor-elevador.

Para finalizar, se presenta una gráfica comparativa desde el punto de vista del rendimiento entre las distintas topologías de convertidores dc/dc.

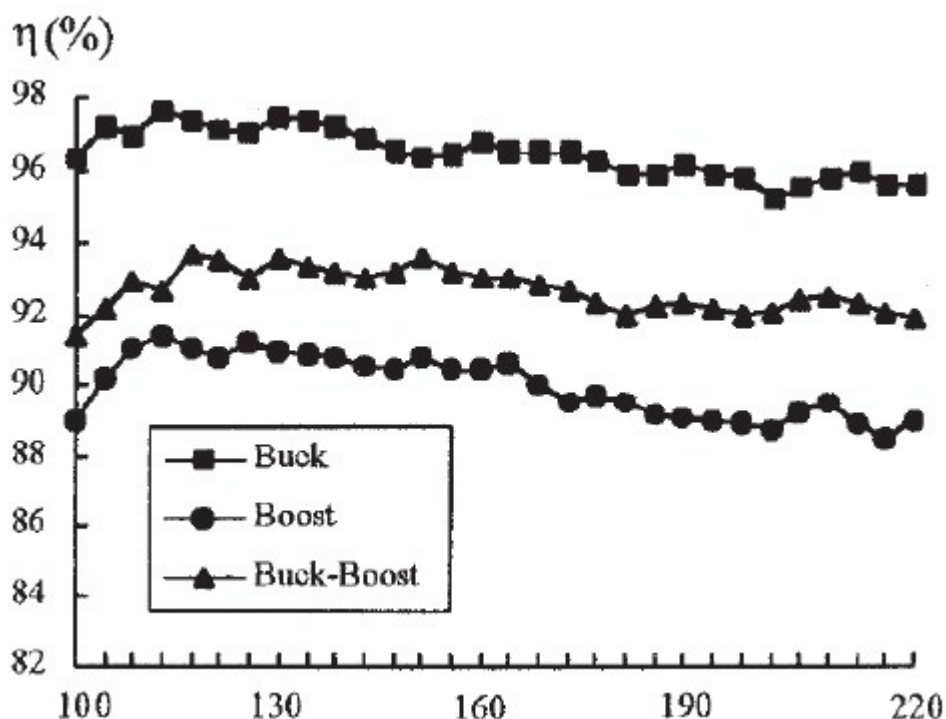


Ilustración 4.14. Eficiencia de los convertidores DC/DC [2]

Las curvas de rendimiento de la *Ilustración 4.14* muestran la diferencia entre convertidores Buck, Boost y Buck-Boost según la potencia requerida a la salida. La eficiencia del convertidor Buck es un poco más alta que los convertidores de Boost y Buck-Boost. Con algunos de los algoritmos de control MPPT que se verán en un apartado posterior, estos convertidores operan con alta eficiencia bajo el seguimiento del punto de máxima potencia.

4.5. Modelado del convertidores. Simulink.

Simulink permite una simulación precisa de los convertidores mediante los componentes de Simscape.

4.5.1 . Simulink. Convertidor buck

A continuación un ejemplo de un convertidor con tipología Buck.

El objetivo es simular un convertidor reductor (o buck) que determine una tensión de salida de 18V sobre una carga de 10Ω. La tensión de entrada será de 48V. El rizado sobre la carga no debe superar el 0.5%.

La frecuencia de conmutación es 40KHz

Para diseñar el convertidor reductor en cuestión, tomaremos la configuración del circuito de la Ilustración 3.11 y lo adaptaremos con elementos de Simulink y Simscape.

Un ejemplo de como quedaría tal circuito sería el de la Ilustración 4.15

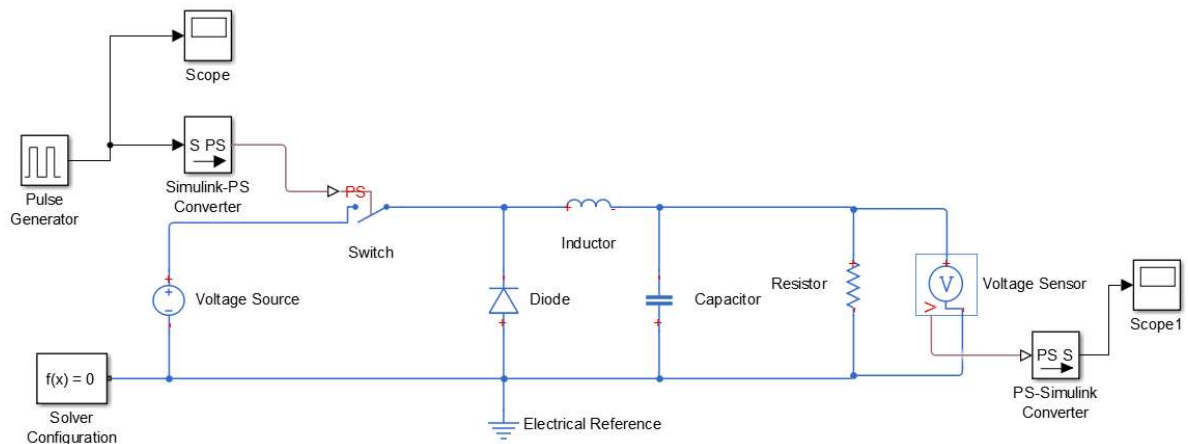


Ilustración 4.15. Circuito Simulink, convertidor con tipología Buck [Captura Simulink]

Inicialmente, y hasta que calculemos el valor de cada uno de los componentes del circuito, seleccionaremos un valor por defecto.

Se procederá a calcular el ciclo de trabajo mediante la ecuación 4.20

$$V_o = V_i \cdot D; \quad D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{18}{48} = 0.375 \quad 4.60$$

Teniendo en cuenta el ciclo de trabajo y la frecuencia de funcionamiento, es posible calcular la inductancia mínima que asegurará una corriente continua en la resistencia de carga. Se empleará la ecuación 4.17

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0.375) \cdot 10}{2 \cdot 40000} = 78.1 \mu H \quad 4.61$$

Cualquier valor de inductancia por debajo del obtenido, resultará en una corriente discontinua por la carga. Para asegurar el correcto funcionamiento del convertidor, se utilizará un valor por encima del obtenido, un 10% mayor, 86uH

Pese a que en régimen permanente, la variación de la corriente por la bobina debería ser 0, en condiciones reales no es así, por lo que para limitar el rizado por la carga, se utilizará un condensador cuyo valor de capacitancia será el siguiente:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} < 0.5 ; C > \frac{1-D}{8L(\frac{\Delta V_o}{V_o})f^2} = \frac{1-0.375}{8 \cdot 86 \mu H (0.005) 40 KHz^2} = 113 \mu F \quad 4.62$$

Se aplicarán los valores obtenidos anteriormente a cada uno de los componentes incluidos en el circuito de la Ilustración 4.15.

Haciendo doble click sobre cada uno de los componentes, se puede modificar el valor, como se observa en las Ilustraciones 4.15 y 4.16 Hay que prestar especial atención al bloque “Pulse Generator” que controla la conmutación del interruptor, la frecuencia hay que editarla mediante su inverso: el periodo. Para una mejor apreciación del efecto del convertidor, se aplicará un retraso de 0.3 segundos en la conmutación.

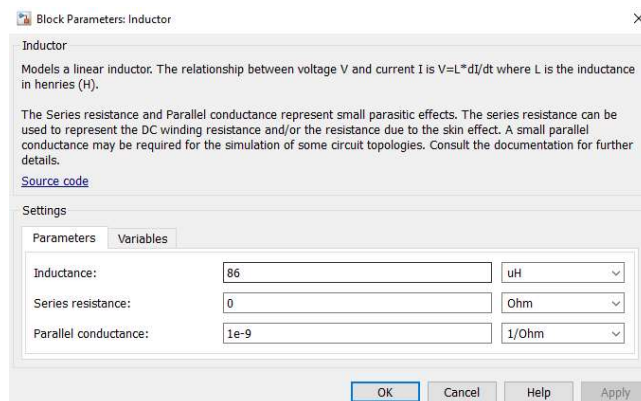
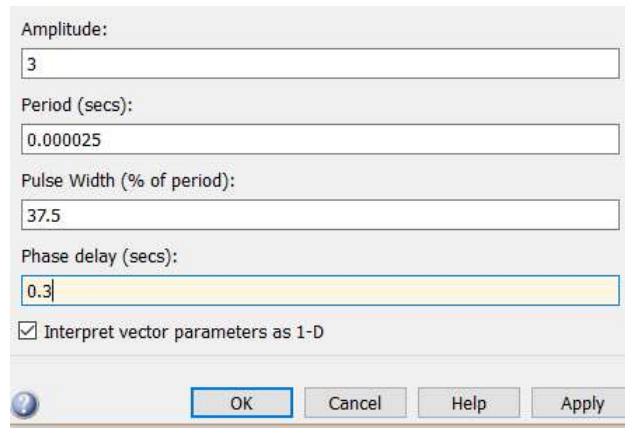


Ilustración 4.16. Edición de la Inductancia. [Captura Simulink]



Amplitude:
3

Period (secs):
0.000025

Pulse Width (% of period):
37.5

Phase delay (secs):
0.3

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Ilustración 4.17. Edición del generador de Pulsos. [Captura Simulink]

Una vez definidos los bloques, es el momento de comenzar con la simulación, su duración será de 1 segundo, como se observa en la Ilustración 4.18

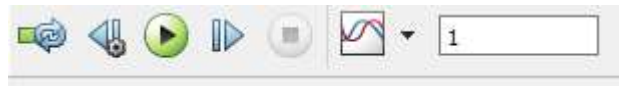


Ilustración 4.18 Configuración de la duración de la simulación. [Captura Simulink]

Una vez lanzada la simulación, los resultados quedarán grabados en el bloque Scope conectado al voltímetro de la resistencia de carga. Haciendo doble click :

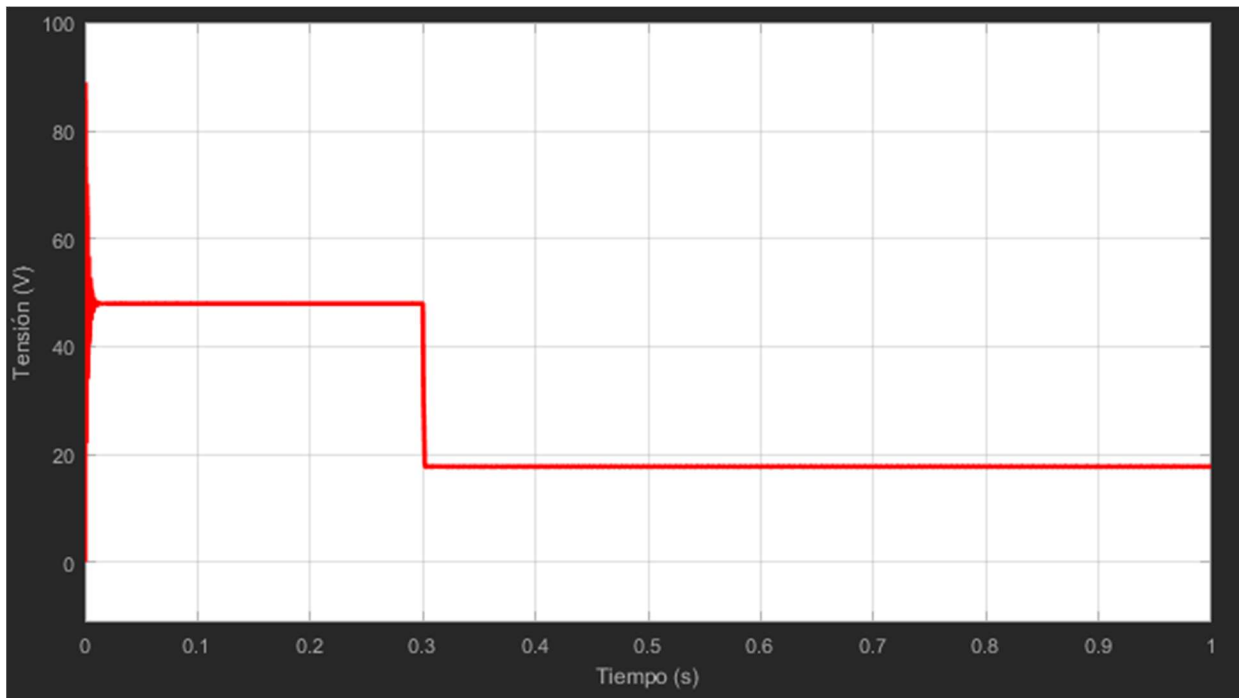


Ilustración 4.19. Tensión en la carga. [Captura Simulink]

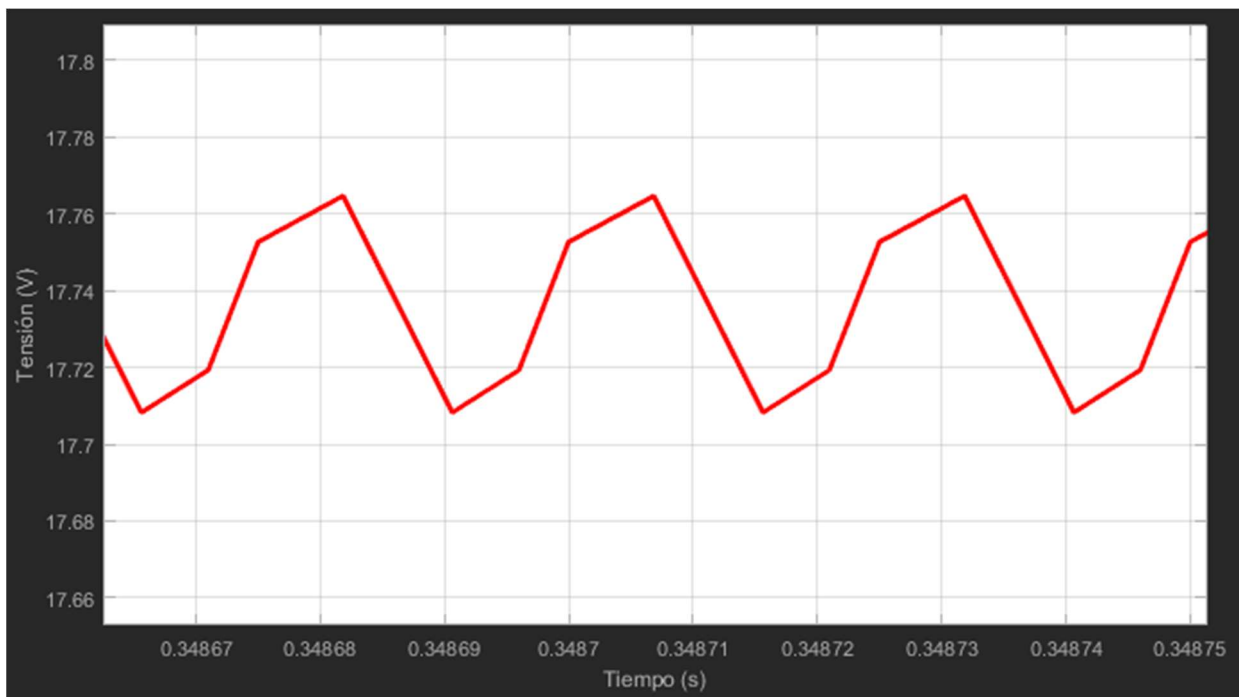


Ilustración 4.20. Efecto del rizado en la carga. [Captura Simulink]

En la Ilustración 4.19 se aprecia el efecto del convertidor, la tensión se ajusta a 18V pese a que la fuente que alimenta la carga es de 40V. La Ilustración 4.20 nos demuestra el efecto del condensador, que ajusta

el rizado a un valor de $\pm 0.07V$

4.5.2 . Simulink. Convertidor Boost.

A continuación un ejemplo de un convertidor con tipología Boost.

El objetivo es simular un convertidor elevador (o boost) que determine una tensión de salida de 220V a partir de una fuente de tensión de 50V. El rizado de la tensión de salida no debe superar el 0.5%. La carga sobre la que aplicaremos la tensión será de 15Ω y la frecuencia de conmutación en 35KHz.

Para conseguir esto, se construirá un circuito de bloques en simulink similar al de la Ilustración 4.15. Un ejemplo sería el de la Ilustración 4.21.

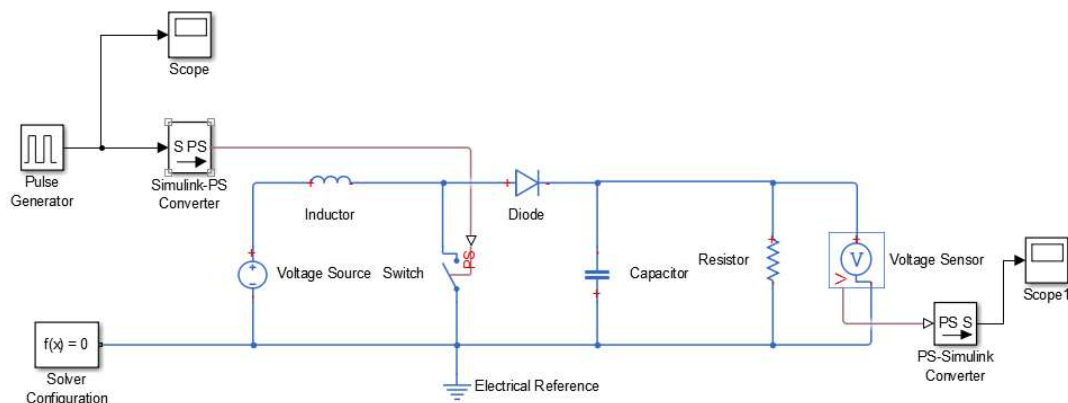


Ilustración 4.21 Circuito Simulink, convertidor con tipología Boost. [Captura Simulink]

Inicialmente, se hallará el ciclo de trabajo mediante la ecuación 4.34.

$$V_o = \frac{V_I}{1-D} ; D = 1 - \frac{V_I}{V_o} = 1 - \frac{50}{220} = 0.77 \quad 4.63$$

Con esta información es posible calcular el valor de uno de los componentes pasivos del circuito, la inductancia mínima, que asegurará una corriente continua por la carga, mediante la ecuación 4.30

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} = \frac{0.77(1-0.77)^2 \cdot 15}{2 \cdot 35000} = 8.73 \mu H \quad 4.64$$

Un valor de inductancia por debajo de 8.73uH resultaría en un valor de corriente discontinuo por la carga. Para asegurar que la corriente sea continua, se utilizará un valor del orden de un 10% mayor, 10uH en este caso.

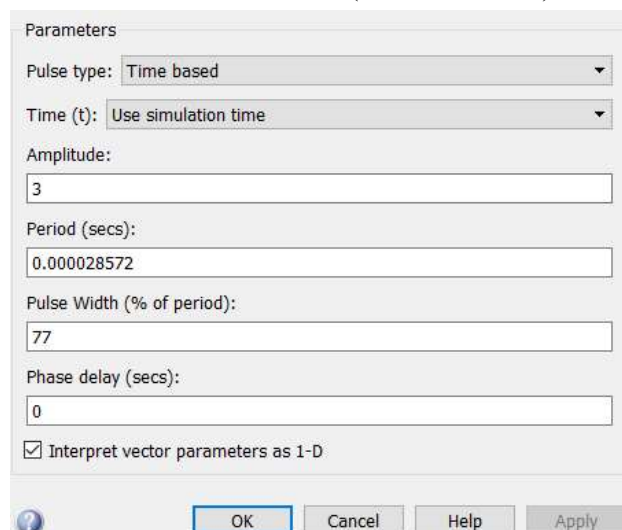
Pese a que en régimen permanente, la variación de la corriente por la bobina debería ser 0, en condiciones reales no es así, por lo que para limitar el rizado por la carga, se utilizará un condensador cuyo valor de capacitancia será el siguiente:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} < 0.5 ; C > \frac{D}{Rf(\frac{\Delta V_o}{V_o})} = \frac{0.77}{15 \cdot 35000 \cdot 0.005} = 293.33 \mu F \quad 4.65$$

Ecuación 4.67

Cualquier valor por encima del obtenido, aseguraría un rizado inferior al 0.5%. Para esta simulación, se utilizará un valor de 330uF.

Para aplicar los valores anteriormente calculados a cada uno de los componentes del circuito, nos limitaremos a hacer “click” en cada uno de ellos, como en la Ilustración 4.26. Especial atención al bloque “Pulse Generator” que controla el ciclo de trabajo, ya que este bloque de simulink funciona mediante el periodo, que es el inverso de la frecuencia (Ilustración 4.29). Para que los resultados de la



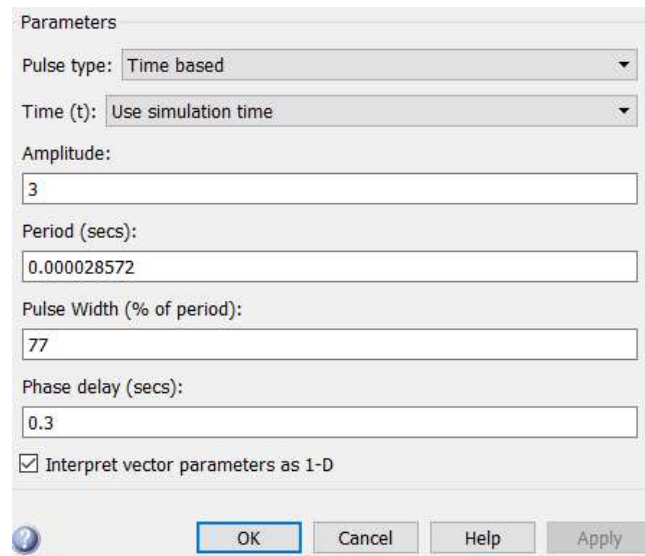


Ilustración 4.29. [Captura Simulink]

simulación sean más descriptivos y se aprecie con facilidad el momento del comienzo de la conmutación, le daremos un pequeño retraso de 0.3 segundos al comienzo de la simulación, “Phase delay” de la Ilustración 4.29.

La simulación puede durar tanto como el usuario desee, para este caso, configuraremos 1 segundo, como se aprecia en la Ilustración 4.30



Ilustración 4.30. [Captura Simulink]

Tras configurar todos los componentes del circuito, se procederá con la simulación. Los resultados quedaran grabados en el bloque “Scope”, que está conectado al voltímetro que mide la tensión en la carga.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

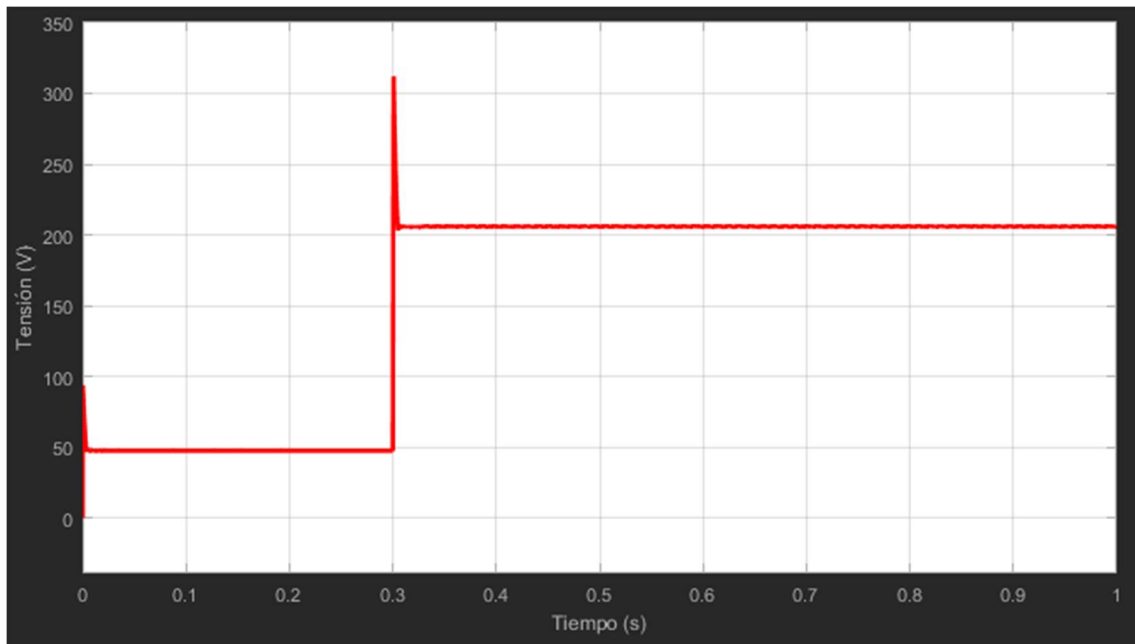


Ilustración 4.31. Tensión en la carga. [Captura Simulink]

En la Ilustración 4.31 se observa el efecto de la conmutación del interruptor, aumentando la tensión desde 50V a 220V.

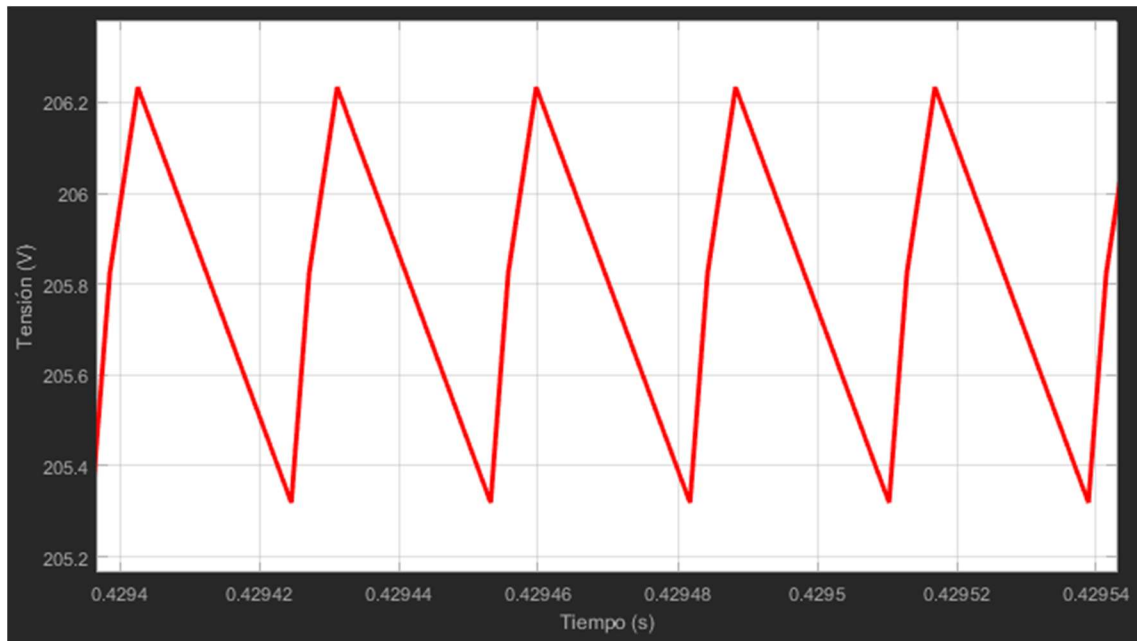


Ilustración 4.32. Medición del rizado en la carga. [Captura Simulink]

El rizado se aprecia haciendo zoom sobre la gráfica de la Ilustración 3.30 en cualquier momento posterior a la conmutación; el incremento de tensión es aproximadamente de 0.9V (Ilustración 4.31).

4.5.3 . Simulink. Convertidor Buck-Boost

Para la simulación de un convertidor Buck-Boost, como en apartados anteriores, se utilizará el circuito teórico correspondiente, en este caso, se realizará un circuito como el de la Ilustración 3.17.

El convertidor debe tener una tensión de entrada de 15V y una tensión de salida de -5V con rizado inferior a 0.1%. La carga sobre la que se aplicará la tensión será de 10Ω y la frecuencia de conmutación 30KHz.

Se comenzará con la creación del circuito en Simulink:

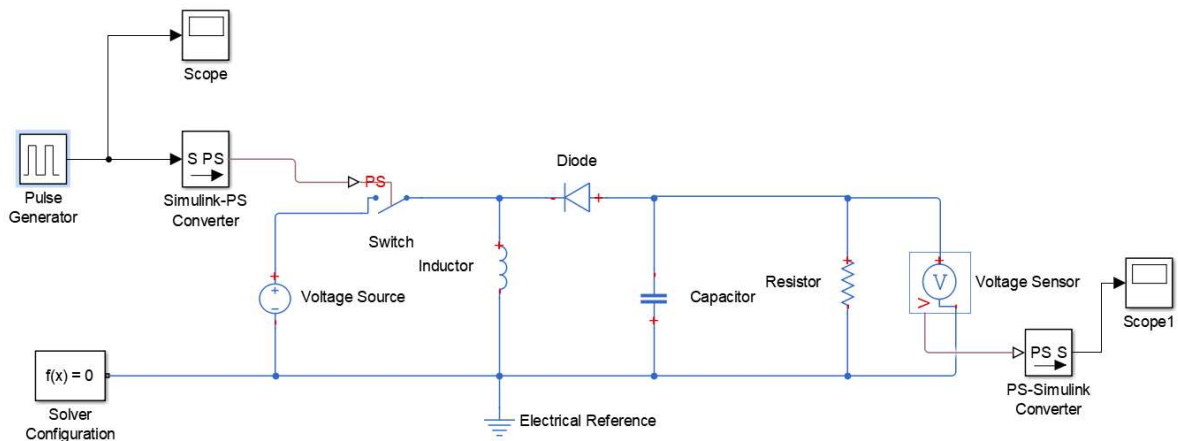


Ilustración 4.32. Circuito Simulink, convertidor con tipología Buck-Boost. [Captura Simulink]

El primer dato a calcular es el ciclo de trabajo mediante la ecuación 4.51.

$$V_o = -V_I \left[\frac{D}{1-D} \right]; D = \frac{V_o}{V_o - V_i} = \frac{-5}{-5 - 15} = 0.280 \quad 4.66$$

El segundo paso es asegurar un valor mínimo de la bobina que nos asegurará corriente continua en la salida, mediante la ecuación 4.48.

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} = \frac{(1-0.28)^2 \cdot 10}{2 \cdot 30000} = 86,4 \mu H \quad 4.67$$

Como en casos anteriores, al valor obtenido se le aplicará un coeficiente de seguridad del 10% : 95uH

Al igual que en los casos anteriores, para conseguir el rizado deseado se calculara el valor del condensador situado en paralelo a la carga :

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} < 0.01 ; C > \frac{D}{Rf \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right)} = \frac{0.28}{10 \cdot 30000 \cdot 0.001} = 933 \mu F \quad 4.68$$

Tras aplicar los valores a los distintos componentes del circuito, se procederá con la simulación, de la misma manera que en simulaciones anteriores, se aplicará un retraso de 0.3s a la conmutación del interruptor y una duración total de 1s.

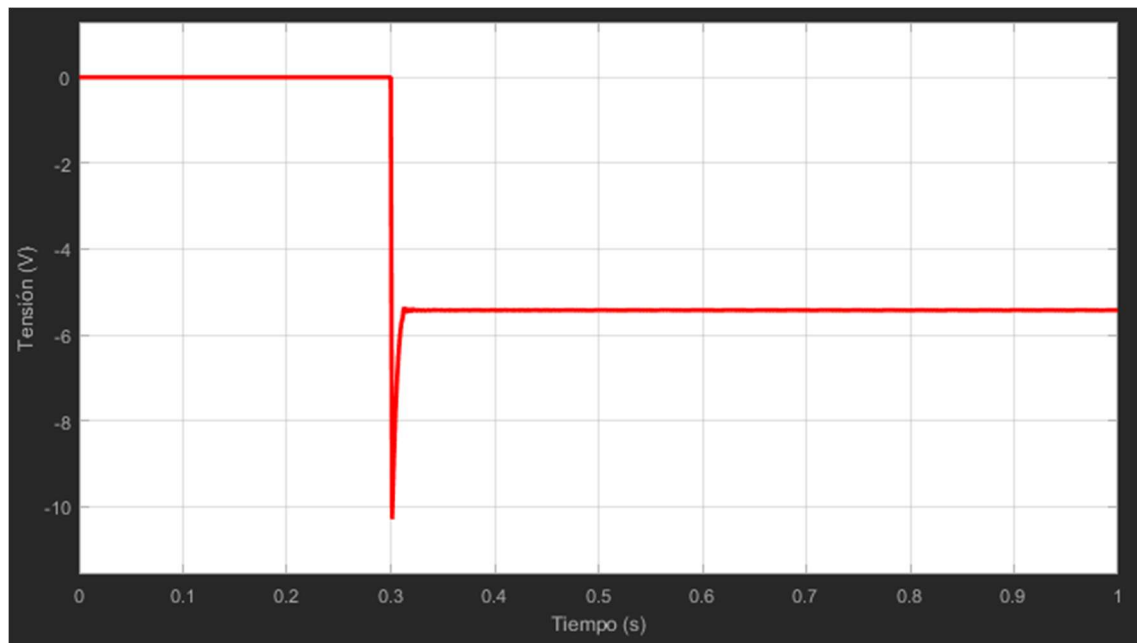


Ilustración 4.33. Tensión en la carga. [Captura Simulink]

En la *Ilustración 4.33* se observa la tensión en la carga debido al efecto del convertidor.

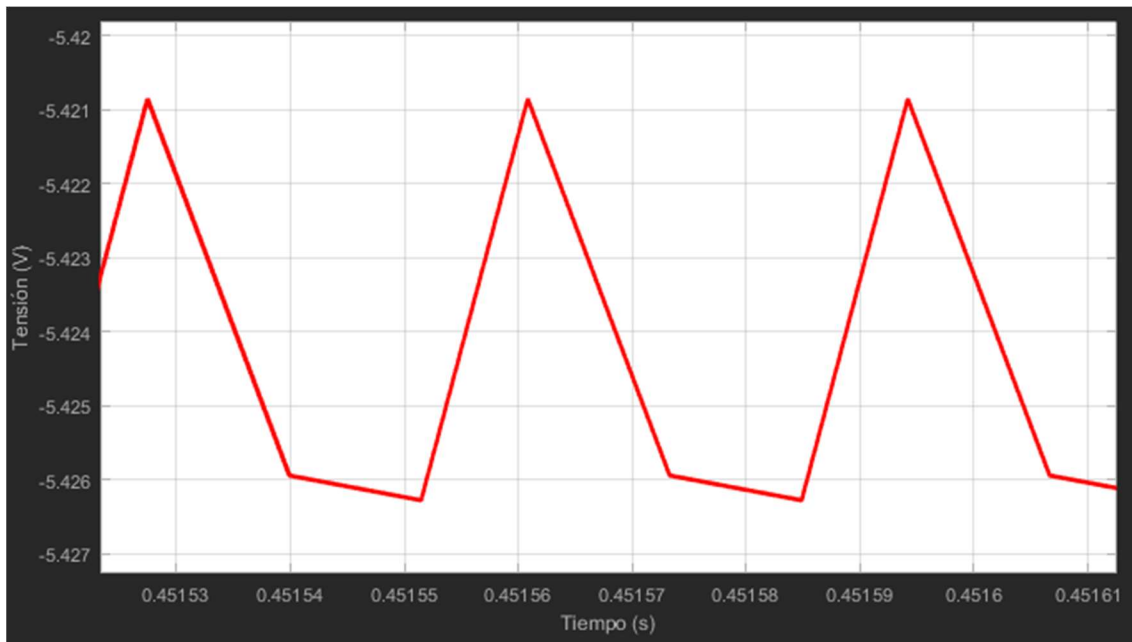


Ilustración 4.24. [Captura Simulink]

El rizado en la salida es de aproximadamente 0.05V (0.1%) de la tensión de salida, como se observa en la Ilustración 4.34.

5 . Seguidores del punto de máxima potencia (MPPT)

5.1. Introducción

Como se explica en el apartado 2.1. El punto de máxima potencia es el producto del valor de tensión máxima (V_M) e intensidad máxima (I_M) para los que la potencia entregada a una carga es máxima. Lo que se pretende es obtener el valor de potencia máxima que puede alcanzar el generador para valores cambiantes de irradiancia y temperatura ambiente. En este método, calcularemos la potencia máxima a partir de $I_{SC,STC}$, $V_{OC,STC}$, $I_{M,STC}$, $V_{M,STC}$, T_{ONC} y FF.

5.2. Clasificación de los Métodos de Seguimiento.

Para conseguir que un convertidor actúe como un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT), se debe implementar un lazo de realimentación con algoritmos capaces de buscar ese punto y regule en consecuencia, el ciclo de trabajo con que se deberá atacar al dispositivo interruptor (ver diagrama de bloques de la Ilustración 5.1)

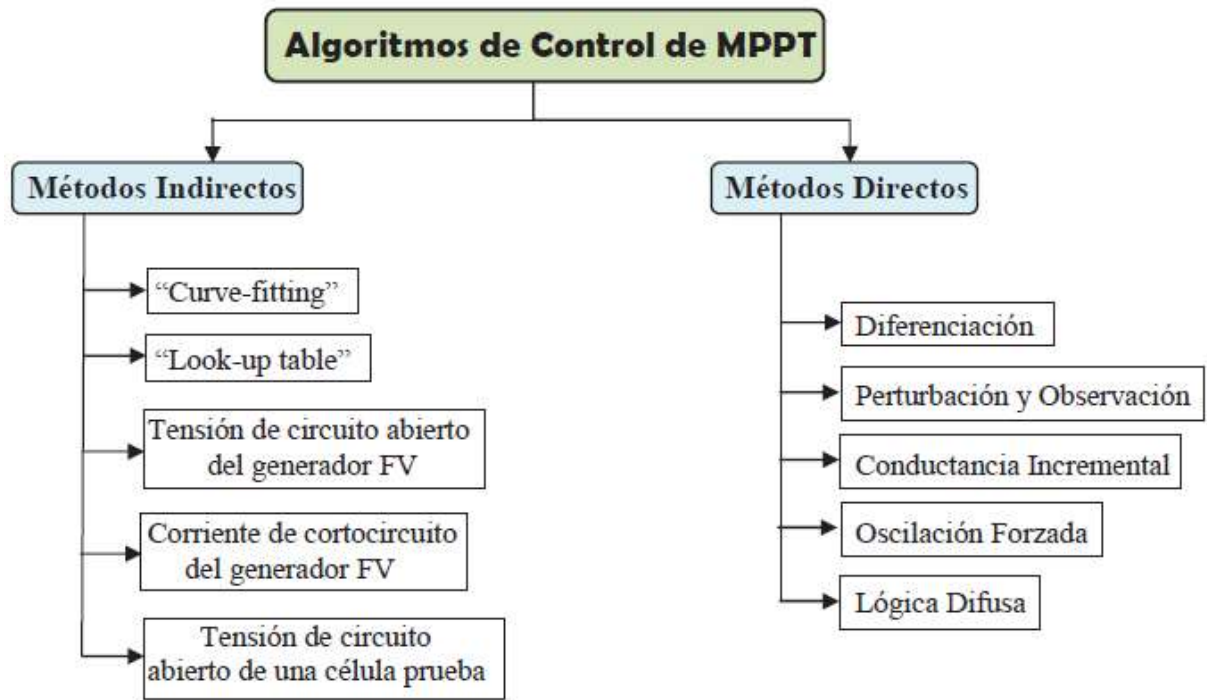


Ilustración 5.1. Diagrama de clasificación de los métodos de MPPT [2]

Los métodos desarrollados hasta el momento permiten clasificarlos y agruparlos en función de diversos parámetros, uno de ellos en función de los métodos o estrategias de control utilizados, *Ilustración 5.1*, esto nos lleva a dos categorías: Métodos indirectos y directos.

5.2.1 . Métodos indirectos

Los métodos indirectos se fundamentan en la utilización de una base de datos que incluye parámetros y datos como, por ejemplo, las curvas características del generador FV a diferentes irradiancias y temperaturas, o bien en la utilización de funciones matemáticas obtenidas a partir de datos empíricos para estimar el punto de máxima potencia. En la mayor parte de los casos, por tanto, se requiere de una evaluación previa de las características del generador FV involucrado. A este grupo pertenecen algunas de las técnicas que citadas en la *Ilustración 5.1*. Pero se tratará en detalle los siguientes algoritmos: Control por corriente de cortocircuito del generador FV y Control por tensión de circuito abierto del generador FV.

5.2.1.1 Control por tensión de circuito abierto del generador FV.

La base de este algoritmo es la observación de la curva característica del generador para diferentes condiciones de temperatura e irradiancia. De esta forma, se puede calcular el valor de VMPP (tensión en el punto de máxima potencia), mediante la relación que existe entre la VOC (tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico) y VMPP, *ecuación 5.1*:

$$K = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} < 1 \quad 5.1$$

Esta propiedad puede implementarse mediante un diagrama de flujo mostrado en la *Ilustración 5.2*.

Así, temporalmente, el generador fotovoltaico se aísla, de acuerdo con el ciclo de trabajo del convertidor dc/dc, con el fin de medir la tensión de circuito abierto. Posteriormente, se calcula el punto de máxima potencia (MPP), de acuerdo con la *ecuación 5.1*, y se ajusta la tensión de operación del generador. Este proceso se repetirá periódicamente. Aunque este método es simple, es difícil de seleccionar el valor óptimo de la constante K. la bibliografía reporta un valor de $K=0.76$ así como un intervalo típico de muestreo de 15 ms.

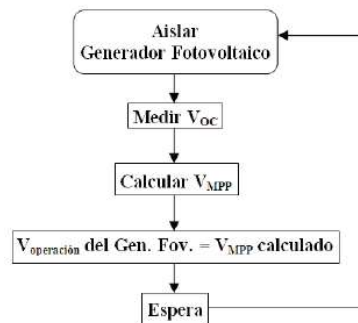


Ilustración 5.2. Diagrama de operación del método de tensión en circuito abierto del generador FV.

[2]

Puesto que el ajuste de la tensión de referencia al 76% de VOC es siempre una fracción fija, este método no puede integrarse en los métodos verdaderos de búsqueda del punto de máxima potencia. La exactitud del ajuste del voltaje de funcionamiento al voltaje de máxima potencia, VMPP, depende de la elección de esta fracción comparada con la relación real que existe entre VMPP y VOC. Ver *Ilustración*

5.3

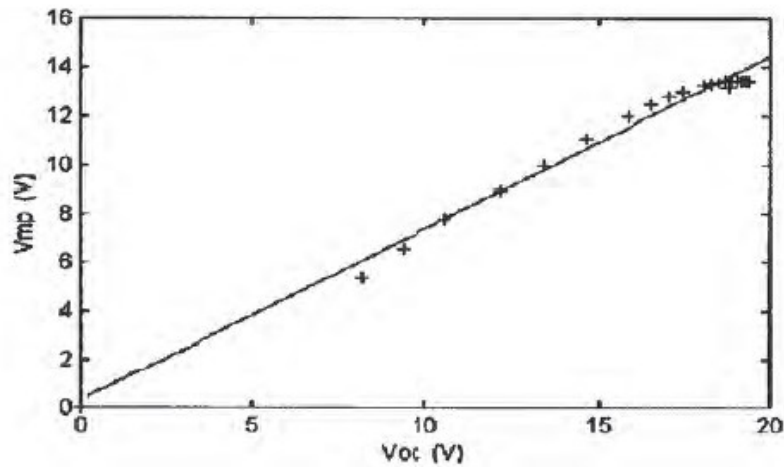


Ilustración 5.1. En la figura se puede observar la curva experimental de la dependencia de la tensión de circuito abierto en función de la tensión punto de máxima potencia [2]

Las ventajas de este método se puede resumir en: simple y económico, utiliza un único lazo de control.

Como inconveniente presenta:

- No tiene en cuenta la potencia real extraída de los paneles en la selección del punto de máxima potencia.
- Asume que una tensión de circuito abierto dada, determina con exactitud el punto de funcionamiento máximo. Si el punto de funcionamiento es incorrecto o ligeramente inexacto la potencia extraída no será la máxima.

5.2.1.2 Control por corriente de cortocircuito del generador FV.

Un método similar al procedimiento anterior, del que se basa en el hecho empírico de una dependencia lineal entre la corriente en el punto de máxima potencia y la de cortocircuito (ver *Ilustración 5.4*), cumpliéndose la *ecuación 5.1*. En cambio, para este método la constante, K , se estima alrededor de 0.85.

$$K = \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} < 1 \quad 5.2$$

El diagrama de flujo del control es, pues, similar al método de la tensión en circuito abierto, sustituyendo esta medida por la de la corriente del punto de máxima potencia y de cortocircuito del generador.

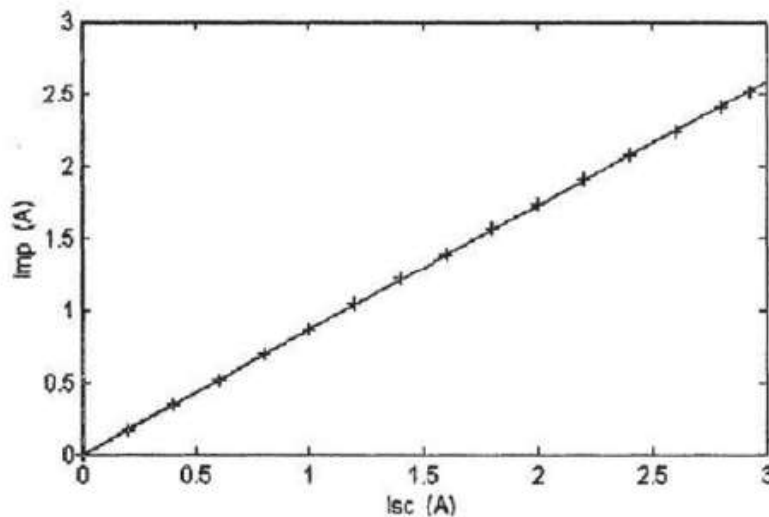


Ilustración 5.4. En la figura se puede observar la curva experimental de la dependencia de la corriente de cortocircuito en función de la corriente en el punto de máxima potencia. [2]

Este método presenta las mismas ventajas y desventajas por tensión ya que su única diferencia es la magnitud de muestreo. Resumiendo en general, los métodos indirectos presentan las siguientes desventajas:

- Para algunos de estos métodos, es necesario el mantenimiento de una gran base de datos y una gran capacidad de memoria de cálculo.
- No son totalmente versátiles con respecto a la carga.

- El seguimiento del punto de máxima potencia es independiente de la variación de los parámetros del panel solar. Es decir, la implementación debe ajustarse para un panel solar específico y tiene que actualizarse al variar los parámetros durante el tiempo.

En cambio presentan las siguientes ventajas:

- Son métodos relativamente simples y económicos.
- Casi todos, tienen un único lazo de control.

5.2.2 . Métodos Directos

En los métodos directos (ver *Ilustración 5.1*) se incluyen aquellos algoritmos que emplean medidas de tensión y corriente de entrada o salida, a partir de las cuales, y teniendo en cuenta la variación de los puntos de trabajo del generador fotovoltaico, se determina el punto de operación óptimo. Estos algoritmos tienen la ventaja de ser independientes del conocimiento, a priori, de las características del generador fotovoltaico. En este grupo se profundizará en los métodos de “Perturbación y Observación (P&O)” y el de “Conductancia Incremental” debido sus ventajas con respecto a otros métodos de control del seguimiento del MPP.

En estos procedimientos se hacen un muestreo de los valores de tensión y corriente en bornes del generador fotovoltaico. Posteriormente, mediante estrategias diversas, se obtendrá la potencia ofrecida por dicho generador. Tal muestreo tiene como finalidad determinar la evolución relativa de la mencionada variable. La anterior comparación entre los diferentes valores de potencia obtenidos proporcionara la información adecuada para que el circuito de control correspondiente aumente o disminuya el tiempo de conexión del conmutador, TON, para aproximarse al MPP. Acorde con este principio se procede a detallar los siguientes métodos de .seguimiento verdadero.

5.2.2.1 Método de Perturbación y Observación (PyO)

El método de .Perturbación y Observación (P&O). es el más ampliamente utilizado por la

mayoría de los sistemas de seguimiento. Es un método iterativo de aproximación al punto de máxima potencia que perturba el punto de funcionamiento del generador FV para encontrar la dirección de cambio. El control se alcanza forzando a que la derivada de la potencia del generador sea igual a cero ($dP_g/dV_g=0$).

Para ello, se altera periódicamente el voltaje de salida del generador FV, constituyendo, esta primera parte, la acción de *perturbar* el sistema y compara la potencia de salida del mismo con la obtenida en el ciclo anterior actuando en consecuencia. Esta última parte es la acción de *observar* el sistema. La lógica de este algoritmo se explicita en la Ilustración 5.5 y 5.6, donde se describe el algoritmo.

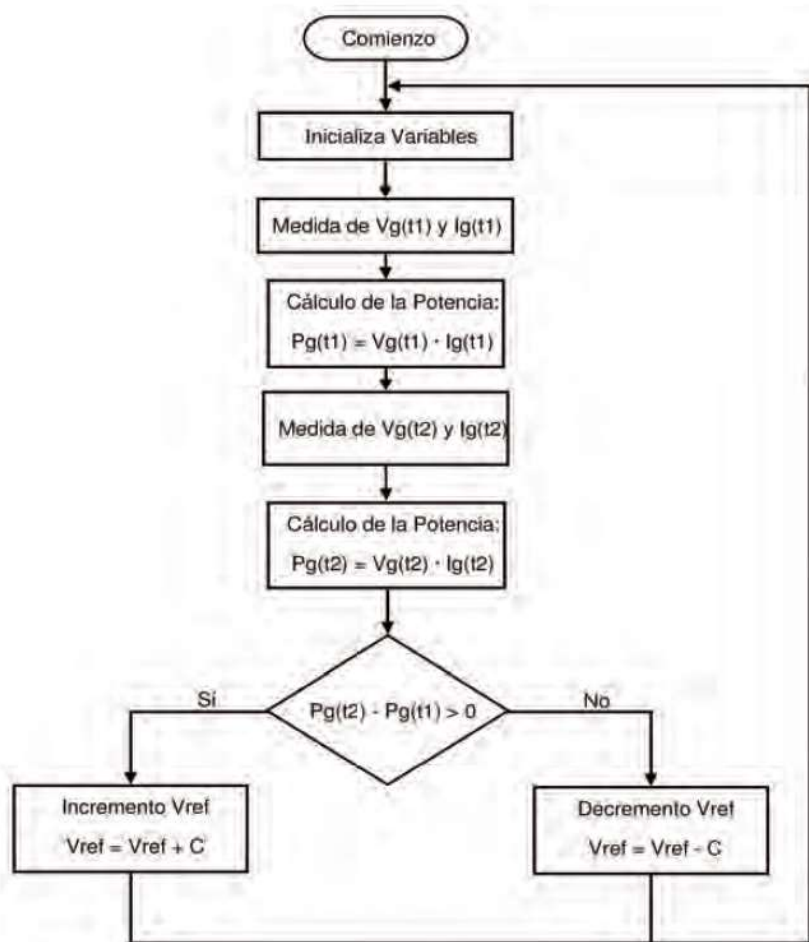


Ilustración 5.5 Diagrama de Flujo del algoritmo de P&O. “C” es el incremento de la perturbación.

[2]

ΔP_g	V_{ref}
> 0	+
< 0	-

Ilustración 5.6. Tabla asociada al algoritmo de Perturbación y Observación. El signo “+” hace referencia a un aumento y el signo “-” a una disminución. Siendo V_{ref} igual a $V_g(t_2)$. [2]

De acuerdo con la Ilustración 5.6, si la potencia se ha incrementado debe incrementarse la tensión de operación. En cambio si la potencia ha disminuido debe de hacer lo propio la tensión.

Sin embargo, un inconveniente de este método se presenta en el caso de un aumento repentino de la irradiancia. Para aclarar este fenómeno véase la Ilustración 5.7. Así, se considera el caso en el cual la irradiancia es tal que genera la curva característica P-V, curva 3. De este modo, el MPPT oscila, alrededor del punto máximo, de A a A1. Entonces, si se supone que estando en el punto A, que proviene de una disminución de la tensión, y antes de que se produzca la siguiente perturbación la irradiancia se incrementa, siendo ahora la curva característica la curva 2 y el punto de operación pasar al B1.

Precisamente, como ha habido un incremento positivo de la potencia continuará la perturbación en la misma dirección, es decir, disminuirá la tensión y se pasara al punto B. Además, si la irradiancia se incrementa, nueva y rápidamente a la curva 1 habrá otro incremento de la potencia positiva, con lo que el punto de operación será el C. es decir, que debido a dos incrementos de irradiancia el punto de operación se ha trasladado de A a C, alejándose del punto máximo. Este proceso permanece hasta que el aumento de la irradiancia se lentifique o finalice.

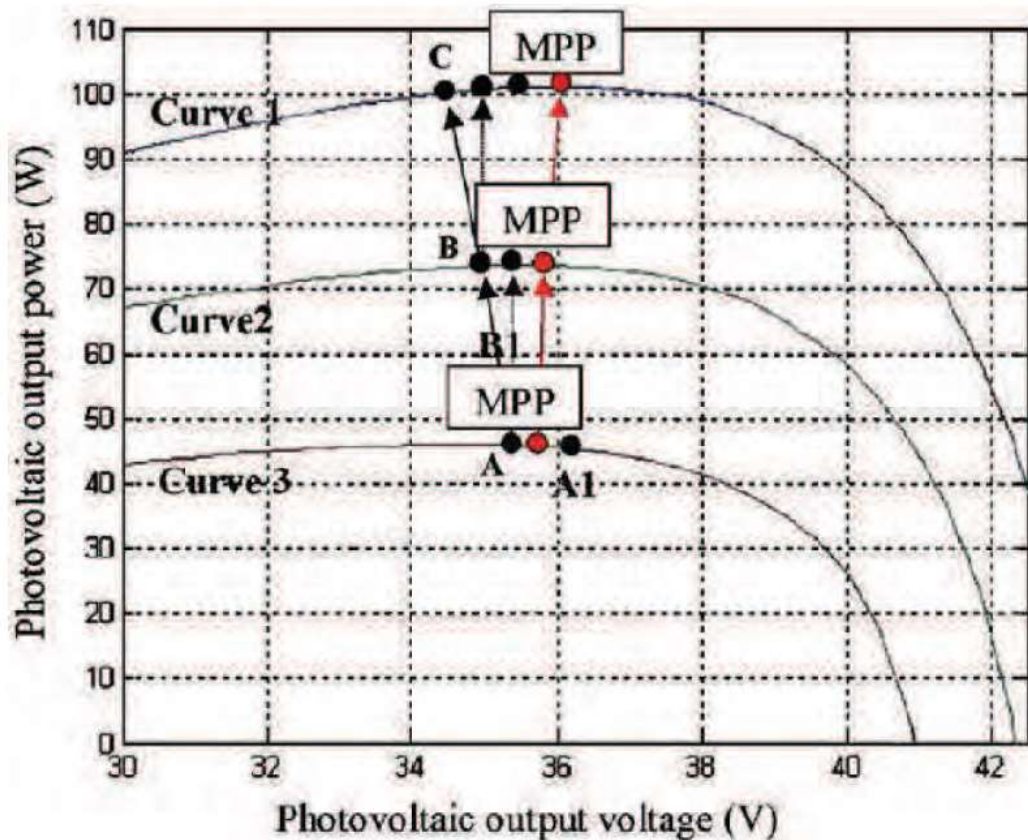


Ilustración 5.7 Desviación del punto de máxima potencia con el algoritmo de P&O, bajo cambios bruscos de irradiancia [2]

Las ventajas de este método se pueden resumir en:

- No se requiere un conocimiento previo de las características del generador FV.
- Método relativamente simple.

Sin embargo, presenta el siguiente inconveniente:

- Método inapropiado para aplicaciones con condiciones atmosféricas rápidamente cambiantes.

Se puede mejorar la respuesta incrementando la velocidad de ejecución del algoritmo de control

5.2.2.2 Conductancia Incremental.

Una alternativa al método de Perturbación & Observación es el algoritmo de la conductancia incremental. Se basa en el hecho de que la derivada de la potencia respecto a la tensión del generador fotovoltaico (pendiente de curva característica P-V), dP_g/dV_g , se anula en el punto de máxima potencia (MPP), *Ilustración 5.6*.

$$\frac{dP_g}{dV_g} = \frac{d(VI)_g}{dV_g} = I_g \frac{dV_g}{dV_g} + V_g \frac{dI_g}{dV_g} = I_g + V_g \frac{dI_g}{dV_g} = 0 \quad \text{en MPP} \quad 5.3$$

Reordenando la ecuación 5.3

$$-\frac{I_g}{V_g} = \frac{dI_g}{dV_g} \quad 5.4$$

El miembro izquierdo de la ecuación 5.4 representa el opuesto a la conductancia incremental, $G=I_g/V_g$, mientras el derecho constituye la conductancia instantánea. Las variaciones incrementales necesarias, dV y dI , pueden aproximarse a los incrementos que han experimentado ambos parámetros, ΔV_g y ΔI_g , para comparar los valores actuales medidos de V_g e I_g con los valores medidos en el instante o ciclo anterior, ecuaciones 5.5 y 5.6, respectivamente.

$$dV_g \approx \Delta V_g(t_2) = V_g(t_2) - V_g(t_1) \quad 5.5$$

$$dI_g \approx \Delta I_g(t_2) = I_g(t_2) - I_g(t_1) \quad 5.6$$

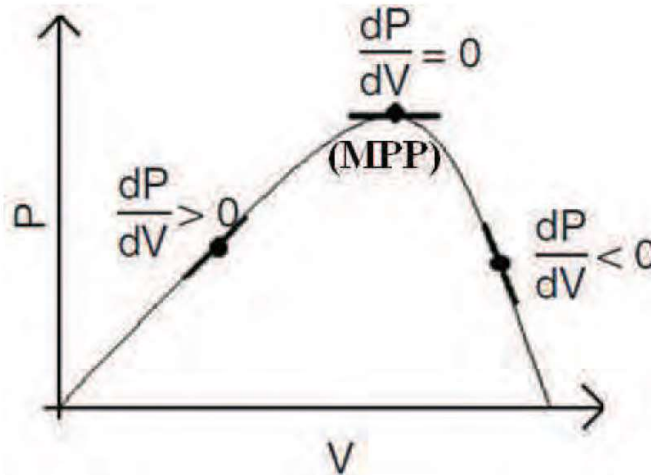


Ilustración 5.6. Curva de potencia-tensión del generador fotovoltaico. Variación de la derivada dP_g/dV_g [2]

Por tanto, analizando la derivada se puede comprobar si el generador FV opera en su punto

óptimo (MPP) o fuera de éste, *ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7*. La Ilustración 5.7 muestra el diagrama de flujo de este método.

$$\frac{dP_g}{dV_g} = 0 \text{ para } V_g = V_{MPP} \quad 5.5$$

$$\frac{dP_g}{dV_g} < 0 \text{ para } V_g > V_{MPP} \quad 5.6$$

$$\frac{dP_g}{dV_g} > 0 \text{ para } V_g < V_{MPP} \quad 5.7$$

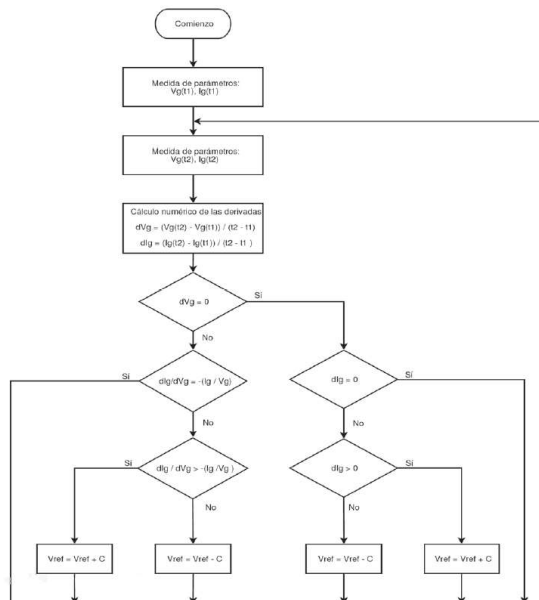


Ilustración 5.7 Diagrama de flujo de algoritmo de conductancia incremental [2]

Las ventajas de este algoritmo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Ofrece un buen rendimiento bajo condiciones atmosféricas rápidamente cambiantes.
- Consigue una oscilación menor alrededor del punto de máxima potencia.

Como inconveniente presenta :

- Requiere un circuito de control complejo que puede conllevar, como resultado a un elevado coste del sistema.

5.3. Simulink. Simulación de MPPT

El diseño de un MPPT tiene de peculiar con respecto al resto de diseños vistos hasta ahora la inclusión de un Algoritmo de control en lenguaje Matlab. A efectos prácticas, el diseño de este algoritmo se convierte en un bloque más de simulink que toma como dato de entrada una serie de variables del circuito y actúa sobre el conmutador del convertidor para variar el punto de trabajo del módulo fotovoltaico.

5.3.1 . Simulink. Método Indirecto. Control por tensión de circuito abierto.

El circuito a simular no es más que una combinación de los circuitos ya simulados con anterioridad en capítulos anteriores :

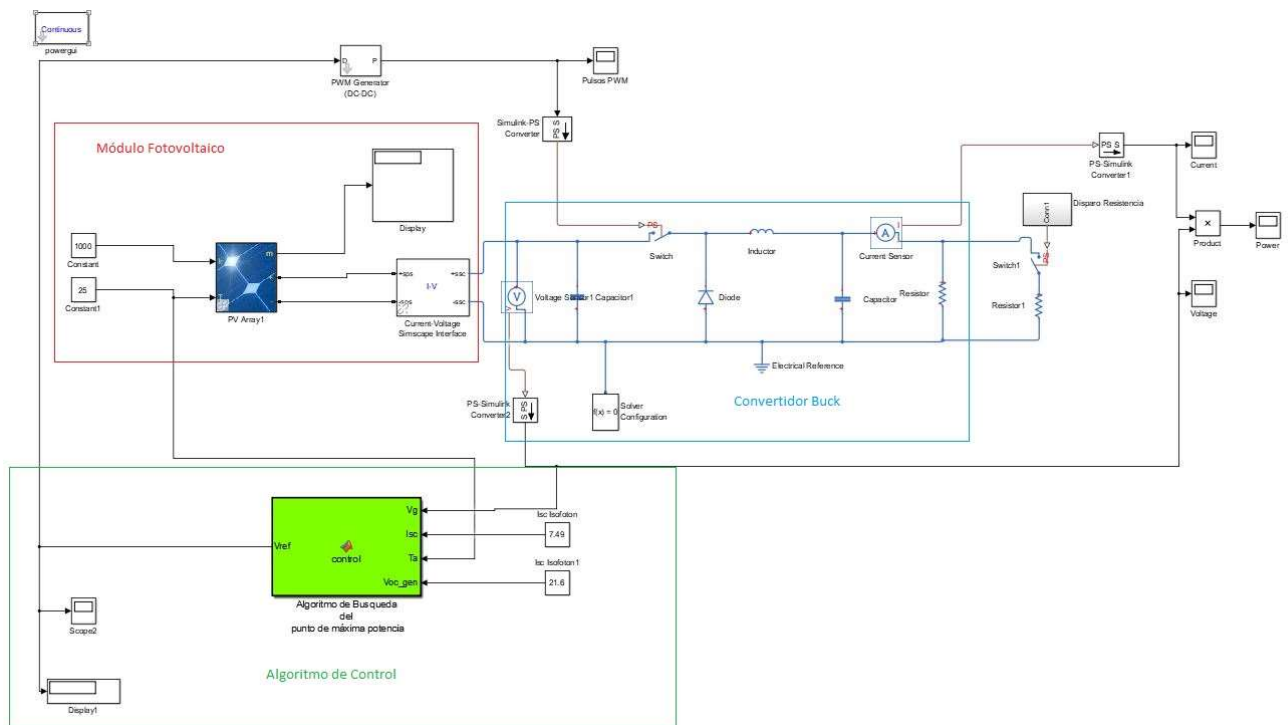


Ilustración 5.8 Circuito Simulink. MPPT Control indirecto por tensión de circuito abierto. [Captura Simulink]

Por un lado, tenemos la parte del generador fotovoltaico marcado dentro de un cuadrado rojo en la Ilustración 5.8, que irá conectado directamente a un convertidor Buck, el convertidor ajustará el nivel de tensión en la carga dependiendo del ciclo de trabajo. El circuito convertidor viene resaltado bajo un

cuadrado azul.

El algoritmo de control tomará medidas en tiempo real del nivel de tensión en el que trabaja el panel y actuará sobre el conmutador ajustando el nivel de tensión al deseado.

Este método considera el PMP a un nivel de tensión igual al 76% de la tensión de circuito abierto.

La función de Matlab que se empleará para el control del ciclo de trabajo será la siguiente :

```
function Vref = control(Vg,Isc,Ta,Voc_gen)
persistent ref;

% Fijamos un valor inicial del ciclo de trabajo

if isempty(ref)
    ref = 0.4;
end

% Calculo de la Tensión en el punto de máxima potencia mediante la constante
K = 0.71

Irrad = Isc*1000/3.24;
Voc = Voc_gen - 0.0023*(Ta+0.3*Irrad-25);
Vmp= Voc*0.71;

% Condición de aumento o disminución del ciclo de trabajo según la tensión
de salida del generador

if Vg > Vmp
    ref = ref + 0.005;
elseif Vg < Vmp
    ref = ref - 0.005;
end

% Limitación del valor máximo y mínimo del ciclo de trabajo

if ref > 0.99
    ref = 0.99;
elseif ref < 0.05
    ref = 0.05;
end
Vref =ref ;
```

Ilustración 5.9 Código Matlab de la función de control de tensión de circuito abierto. [Captura

Simulink]

La Ilustración 5.9 describe una función en código Matlab que contiene como entradas: Tensión del generador instantánea, Intensidad de cortocircuito , temperatura ambiente y tensión de circuito abierto del

generador en condiciones estándares.

La salida será un valor entre 0.05 y 0.99 que controlará el ciclo de trabajo del convertidor y ajustará el nivel de tensión al 71% de la V_{oc} del módulo fotovoltaico.

$$K = \frac{V_{PMP}}{V_{OC}} = 0.71 \quad 5.8$$

Para los componentes del convertidor reductor, dado que el ciclo de trabajo variará según el algoritmo de control, habría que calcular una L_{min} para el peor de los casos, es decir, un valor mínimo de inductancia que asegure corriente constante por la carga cuando el ciclo de trabajo es mínimo, 0.05 en este caso :

Para un convertidor Buck y teniendo en cuenta que la carga son 1.25Ω y la frecuencia de trabajo 30KHz :

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0.05) \cdot 1.25}{2 \cdot 30000} = 19.80\mu H \quad 5.9$$

Como en casos anteriores, se aplicará un coeficiente de seguridad de un 20%. Se utilizará una bobina de 25uH.

El rizado se limitará a un 0.5%. Al igual que para calcular el valor de L_{min} , se utilizará el ciclo de trabajo mas perjudicial, 0.05.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} < 0.5\% ; C > \frac{1-D}{8L\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)f^2} = \frac{1-0.05}{8 \cdot 25\mu H (0.005) 30KHz^2} = 113\mu F \quad 5.10$$

El rizado en este tipo de casos es bastante menos significativo, pues la variación continua del ciclo de trabajo debido al algoritmo de control provocará un “rizado” en los niveles de tensión mayor del que provoca el propio convertidor.

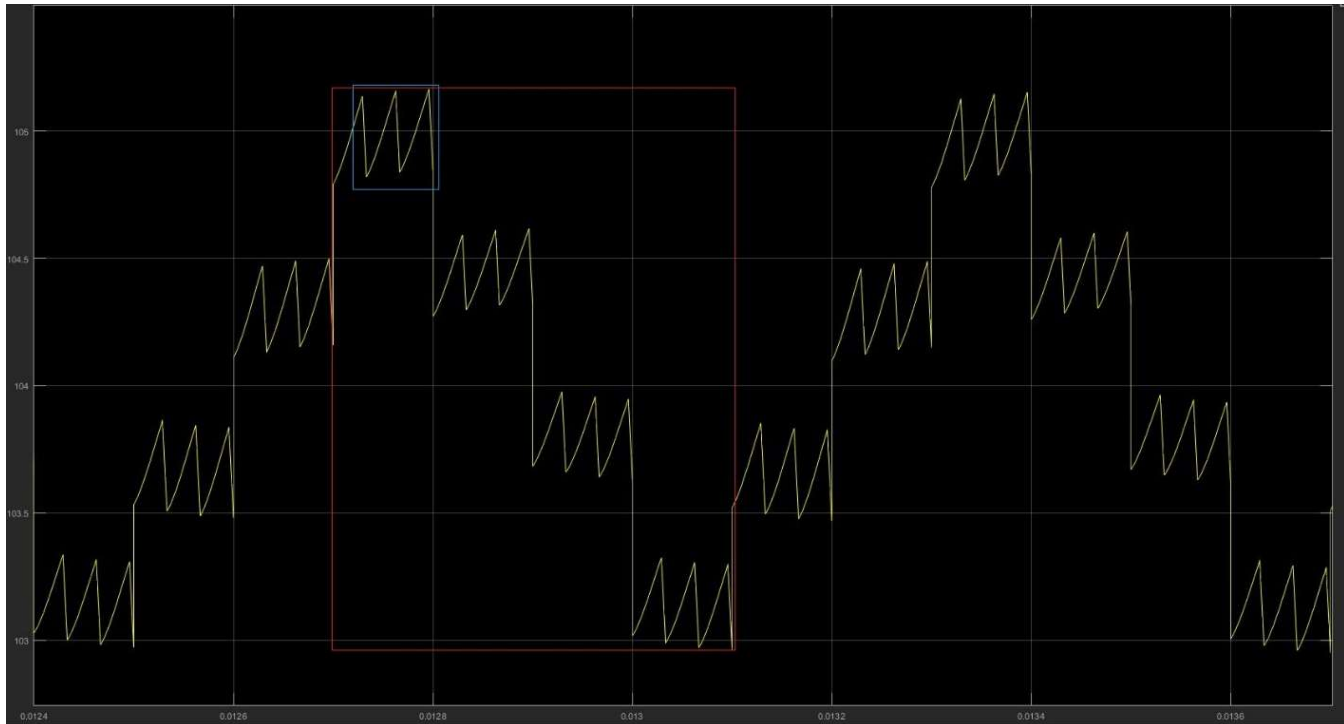


Ilustración 5.10. Zoom tensión de salida : Distintos tipos de rizado.

Como se observa en la *Ilustración 5.10*, el rizado causado por el convertidor (en azul) es mucho mas inferior que el causado por las variaciones del ciclo de trabajo (en rojo).

Para comprobar el funcionamiento del MPPT, se provocará una modificación en la carga que perturbará el funcionamiento en el punto de máxima potencia del módulo.

Para conseguir esto, utilizaremos el conjunto de bloques de la *Ilustración 5.11*.

Se trata de un conmutador que será accionado al pasar 0.12s, lo que incluirá un paralelo de una resistencia que modificará el punto de funcionamiento del módulo.

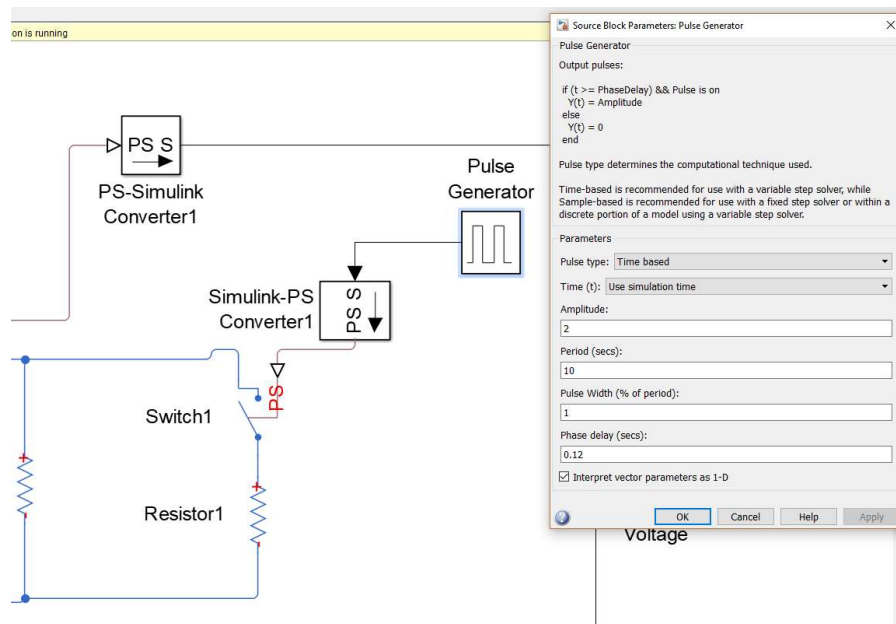


Ilustración 5.11 Disparo de resistencia para alterar la carga. [Captura Simulink]

A los 0.12 segundos, el algoritmo de control deberá modificar el ciclo de trabajo para adaptarse al nuevo nivel de tensión necesario para trabajar en el PMP con la nueva carga.

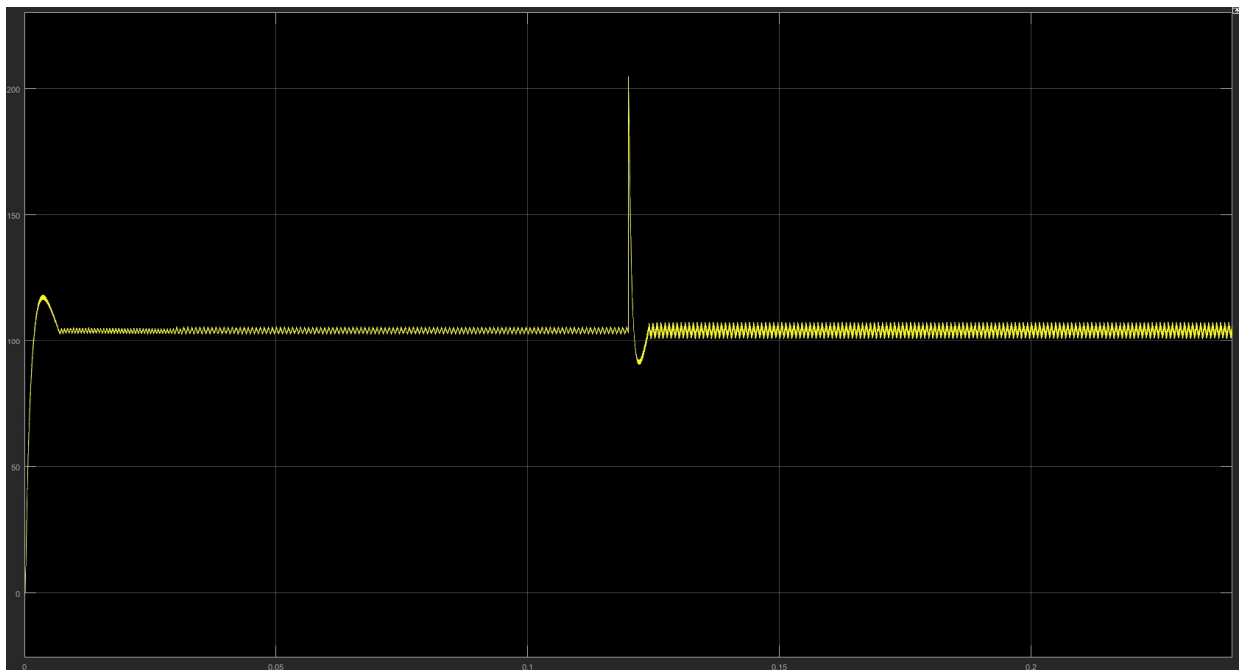


Ilustración 5.12. Niveles de potencia del módulo. Método control por tensión abierto.

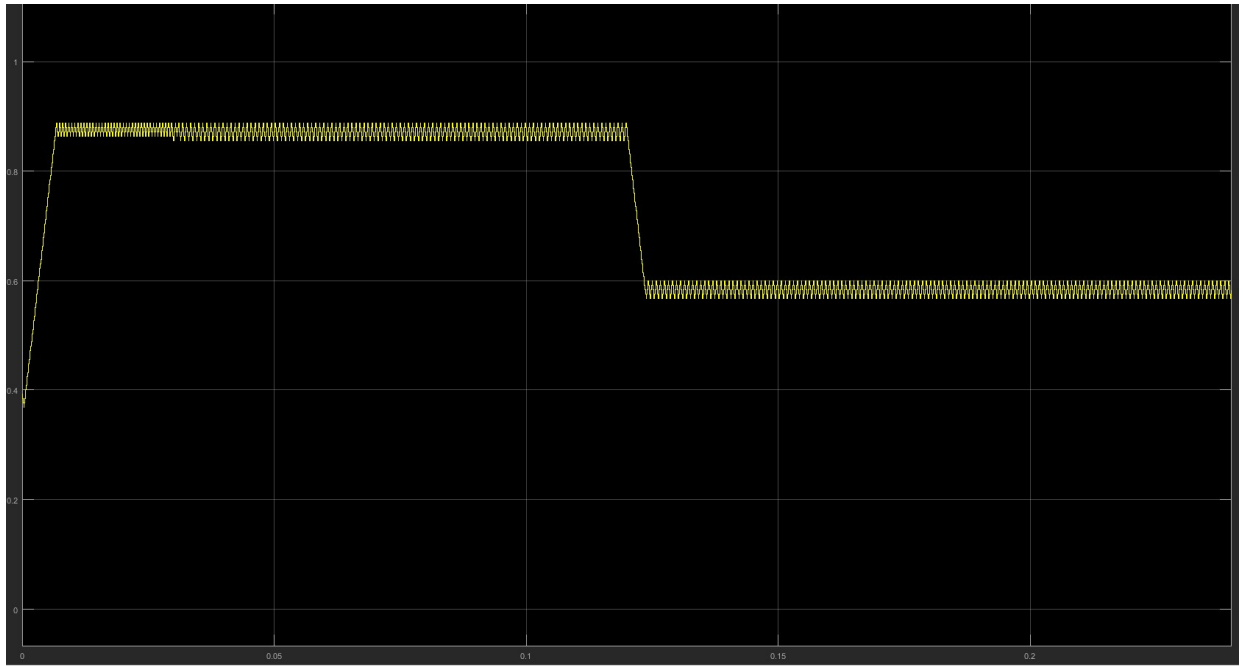


Ilustración 5.13 Variación del ciclo de trabajo. Metodo de control por tensión de circuito abierto

Las simulaciones realizadas hasta ahora han sido bajo unas condiciones CEM continuas durante toda la duración de la simulación.

Para reflejar la realidad, se introducirán condiciones variables de trabajo en el módulo fotovoltaico, simulando un día real con distintos niveles de irradiancia y temperatura, por lo que utilizaremos el bloque “Signal Builder” de la *Ilustración 3.14*.

Los resultados obtenidos son los siguientes :

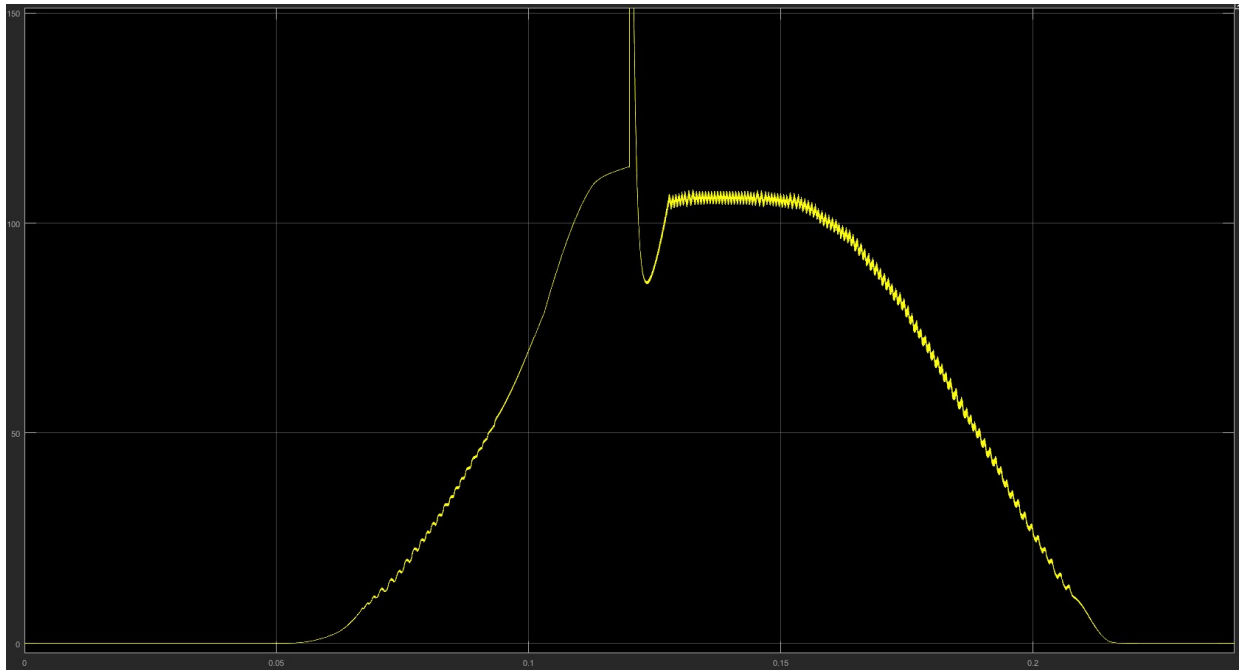


Ilustración 5.14. Variación de la potencia para las condiciones de irradiancia y temperatura de la Ilustración 3.15

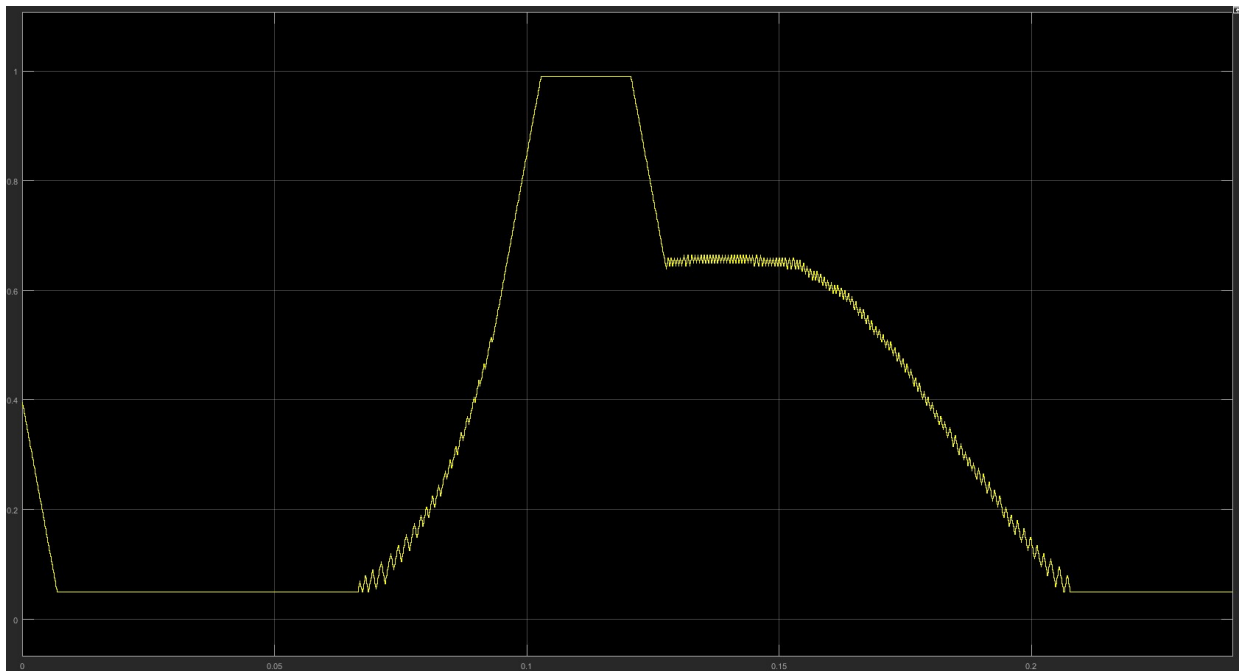


Ilustración 5.15. Variación del ciclo de trabajo para las condiciones de irradiancia y temperatura de la Ilustración 3.15

5.3.2 . Simulink. Método Indirecto. Control por corriente de cortocircuito

Para este caso, se empleará también un convertidor tipo Buck. El circuito a simular es muy similar al

de la *Ilustración 5.8*, pero en este caso, la muestra que toma el algoritmo de control se basa en la corriente de cortocircuito.

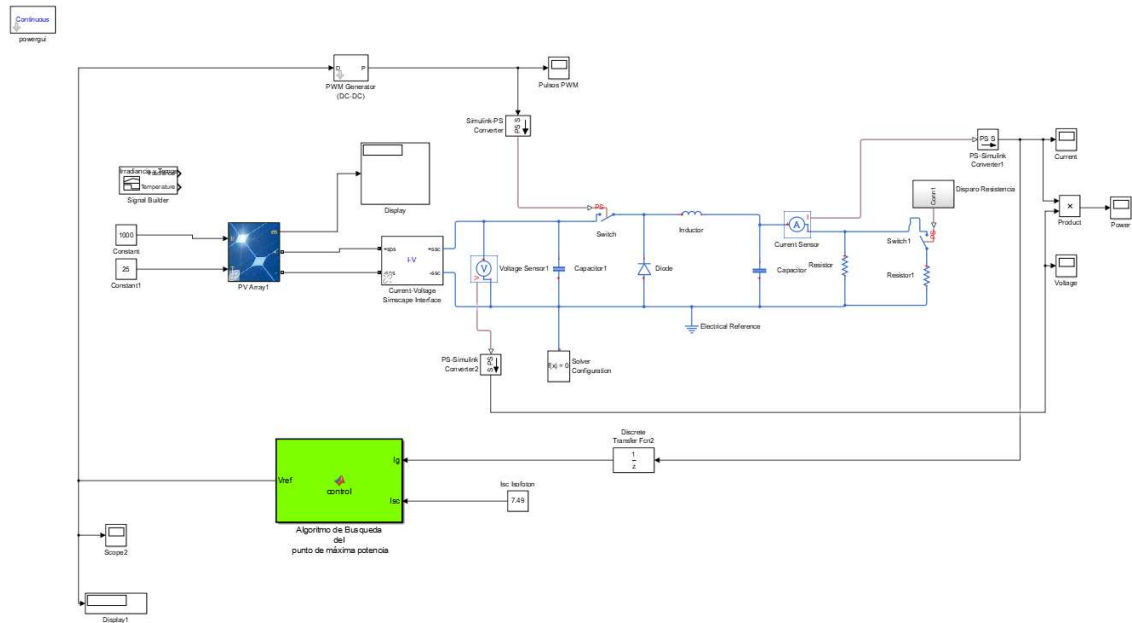


Ilustración 5.16 Circuito Simulink. Control indirecto por corriente de cortocircuito. [Captura Simulink]

Como se observa en la *Ilustración 5.16*, la única diferencia con respecto al control por tensión de circuito abierto de la *Ilustración 5.8* es la entrada del algoritmo de control. En este caso, el algoritmo toma el valor de la intensidad que circula por la carga y mediante la variación del ciclo de trabajo del convertidor, la ajusta a un 85% del valor de la Intensidad de cortocircuito del módulo.

$$K = \frac{I_{PMP}}{I_{sc}} = 0.86 \quad 5.11$$

```
function Vref = control(Ig,Isc)
persistent ref;

% Fijamos un valor inicial del ciclo de trabajo
if isempty(ref)
    ref = 0.5;
end
% Calculo de la Corriente en el punto de máxima potencia mediante la
constante K = 0.85
```

```

%Irrad = Isc*1000/3.27;
%Isc = Isc_gen*Irrad/1000;
Imp= Isc*0.86;
% Condición de aumento o disminución del ciclo de trabajo según la tensión
de salida del generador
if Ig > Imp
    ref = ref - 0.001;
elseif Ig < Imp
    ref = ref + 0.001;
end
% Limitación del valor máximo y mínimo del ciclo de trabajo
if ref > 0.99
    ref = 0.99;
elseif ref < 0.05
    ref = 0.05;
end
Vref =ref ;

```

Ilustración 5.17. Código Matlab de la función de control de corriente de cortocircuito

Para esta simulación, se utilizarán los mismos valores para los elementos del circuito del convertidor del apartado anterior.

Los resultados obtenidos bajo condiciones CEM son los siguientes:

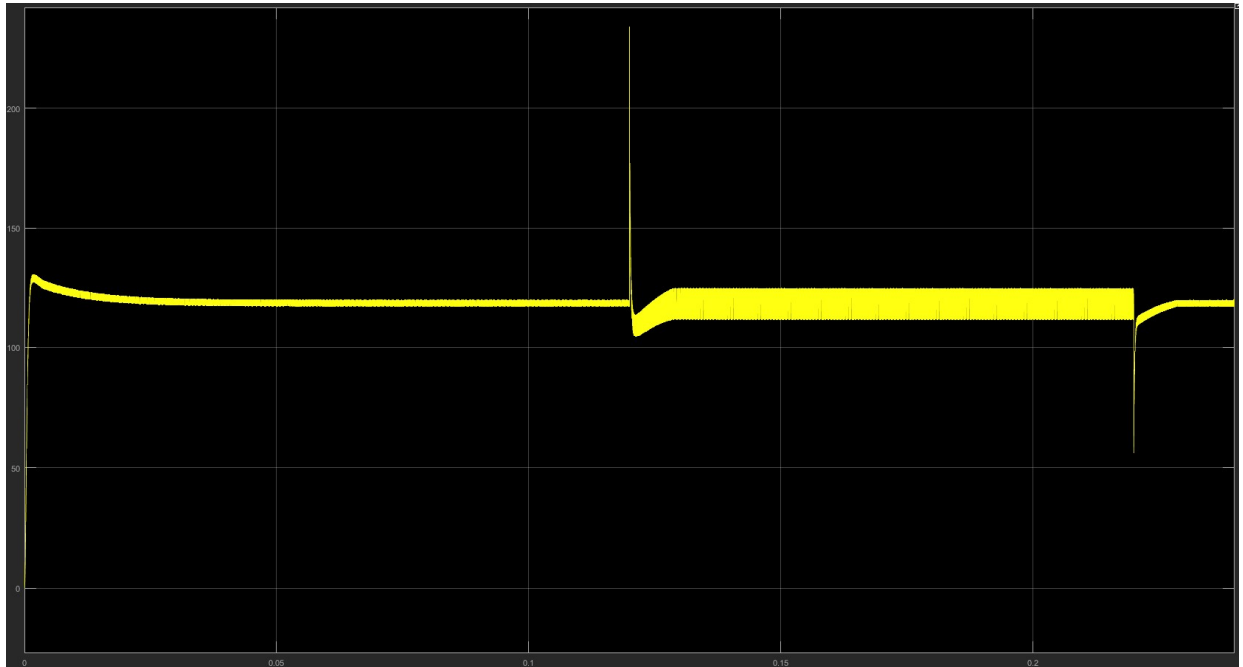


Ilustración 5.18 Variación de la potencia del módulo en condiciones CEM. [Captura Simulink]

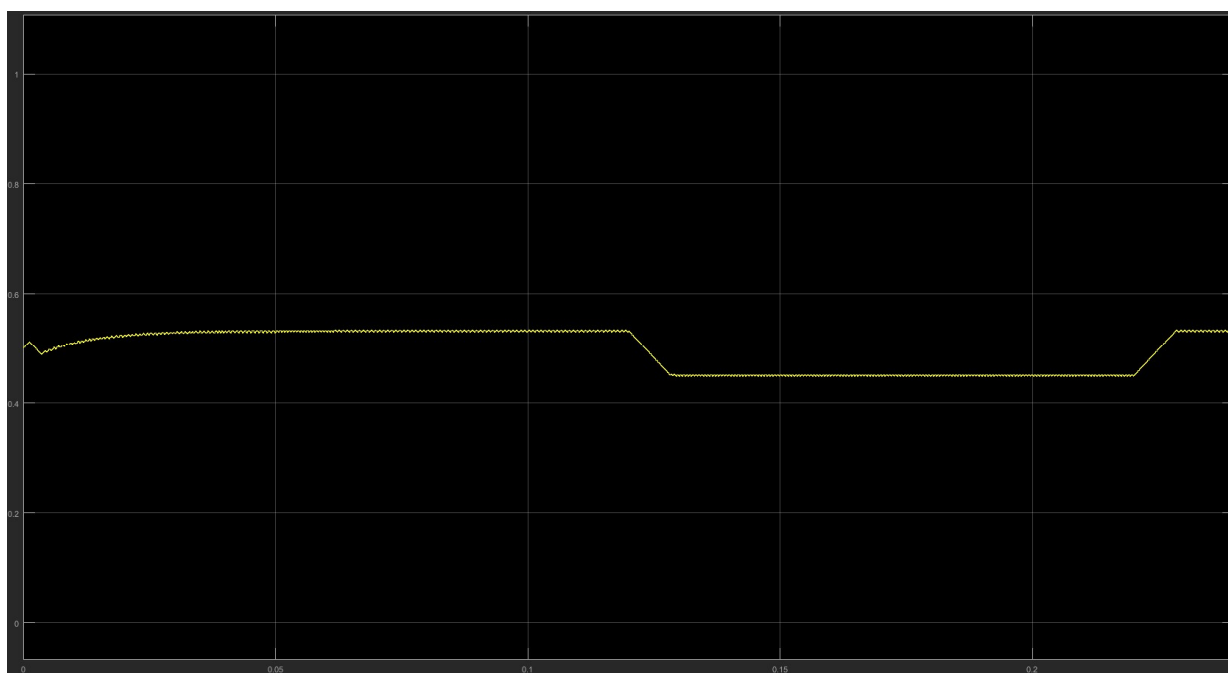


Ilustración 5.19. Variación del ciclo de trabajo. [Captura Simulink]

En condiciones reales utilizando el bloque “Signal Builder” de la *Ilustración 3.14*, los resultados obtenidos son los siguientes :

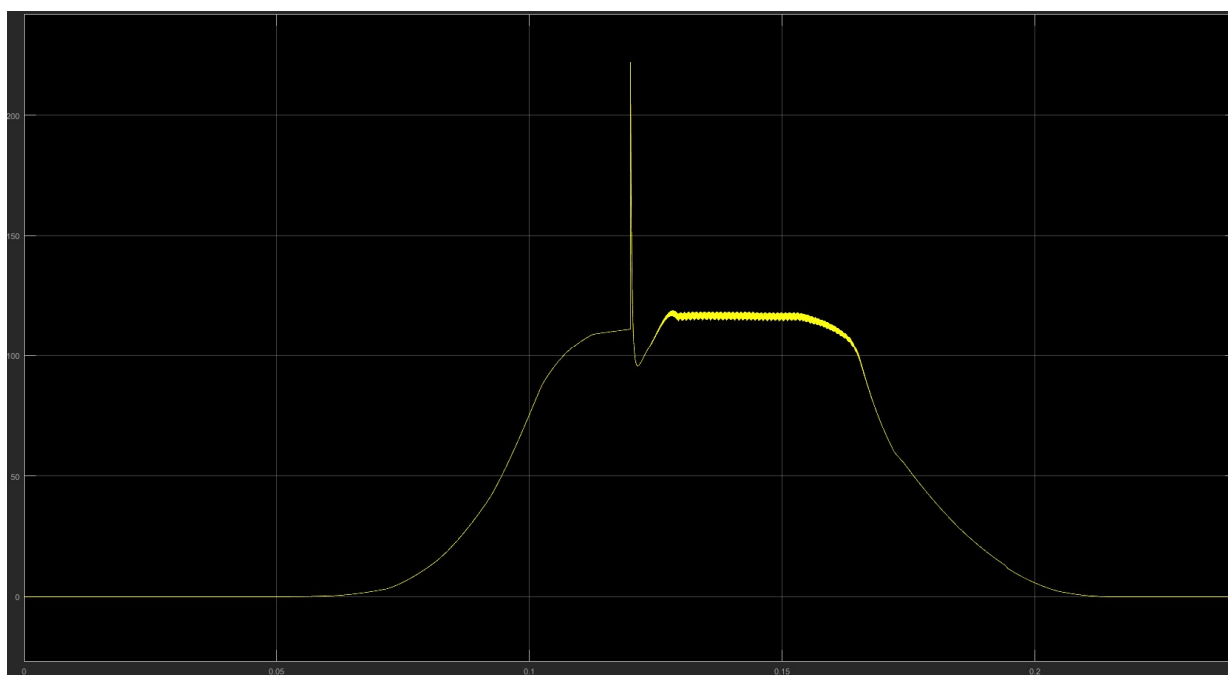


Ilustración 5.20 Variación de la potencia del módulo en condiciones de irradiancia y temperatura de la Ilustración 3.15. [Captura Simulink]

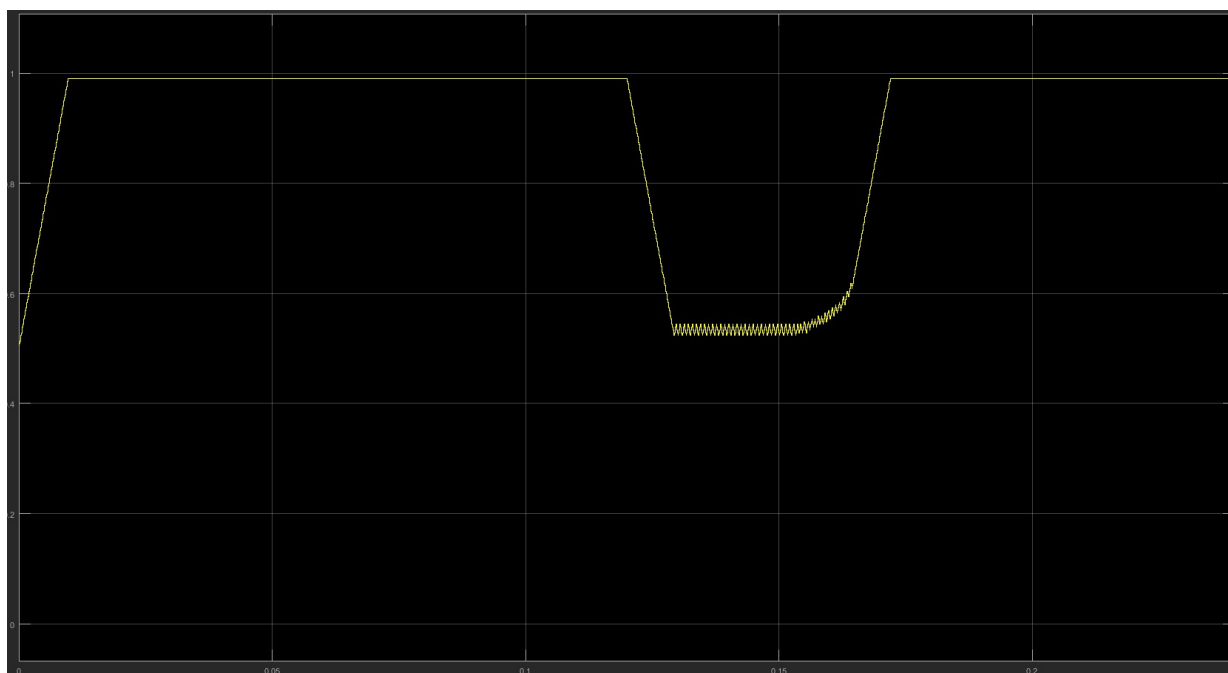


Ilustración 5.21 Variación del ciclo de trabajo. [Captura Simulink]

5.3.3 . Simulink. Método Directo. Perturbación y Observación.

La ventaja de este tipo de métodos con respecto a los indirectos es que no es necesaria ningún tipo de información previa sobre el generador a utilizar. En los anteriores, partíamos de la premisa de la I_{sc} o V_{oc} del módulo. En este caso, el algoritmo de control toma valores de la V_g e I_g para calcular la potencia del generador en tiempo real (t) y las compara con las muestras del instante anterior ($t-1$). Una vez comprobado el valor de potencia se comparan los valores de tensión del generador en los mismos instantes. Esto se comprueba para saber en que zona de la curva característica del generador nos encontramos si por encima del punto de máxima potencia o por debajo. Según la zona incrementaremos o de decrementaremos la tensión de referencia para colocar la potencia en el punto óptimo.

```
function Vref = control_PyO (Ig,Vg)
persistent ref Vk1 Potencia_gen;

% Redondeo y Truncamiento de valores que toma Vg, Ig, pot en tiempo de
ejecución
Vg = fix(Vg*10000)/10000;
Ig = fix(Ig*10000)/10000;
pot = fix(Vg*Ig*10000)/10000;

% Inicialización de Variables
if isempty(Vk1)
    Potencia_gen = 0;
    ref = 0.65;
    Vk1 = 0;
end
%Comparativa tensión
if pot > Potencia_gen
    if Vg > Vk1
        ref = ref - 0.01;
    else
        ref = ref + 0.01;
    end
else
    if Vg > Vk1
        ref = ref + 0.005;
    else
        ref = ref - 0.005;
    end
end
% Limitamos los valores máximos y mínimos de la Tensión de Control del PWM.
if ref > 0.99
    ref = 0.99;
elseif ref < 0
    ref = 0.05;
end
```

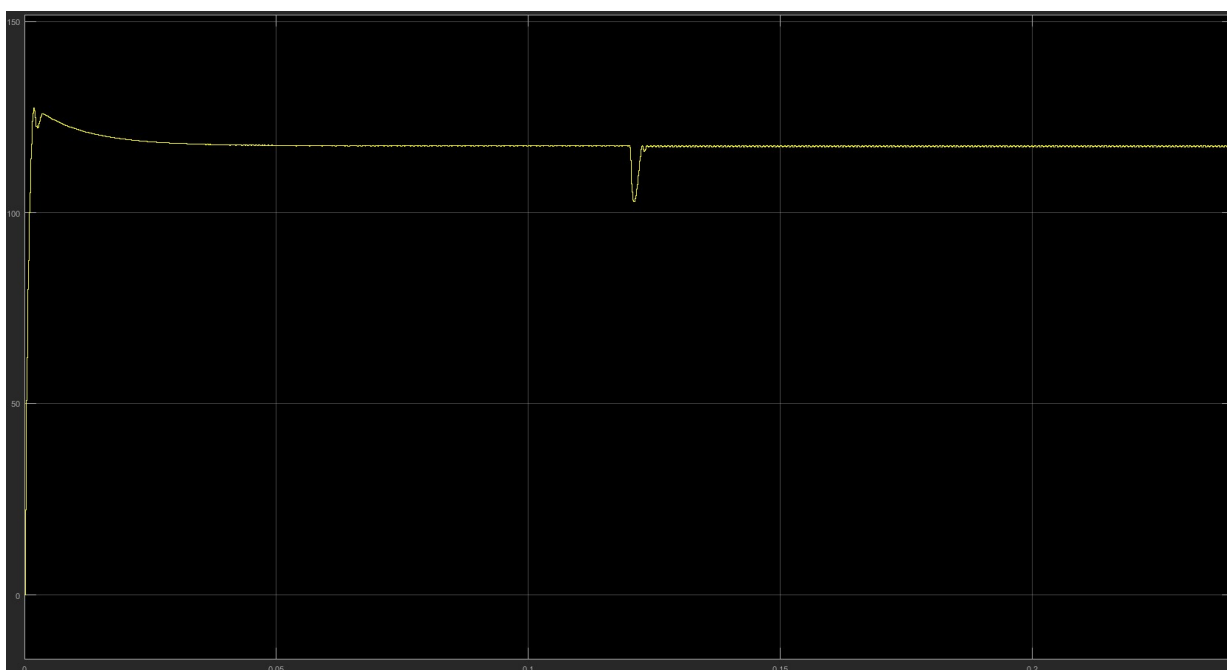



Ilustración 5.24. Potencia del generador en condiciones CEM. Método de perturbación y observación. [Captura Simulink]

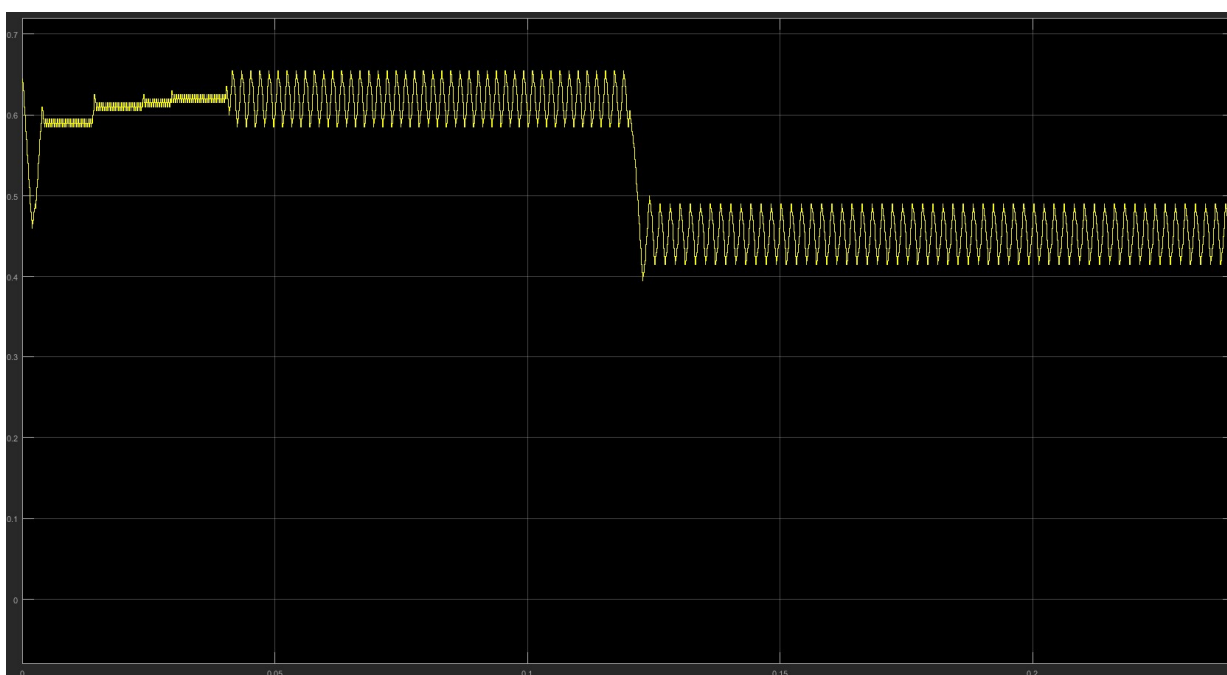


Ilustración 5.25 Variación del ciclo de trabajo. Método de perturbación y Observación. [Captura Simulink]

Para unas condiciones reales mediante el bloque “Signal Builder” :

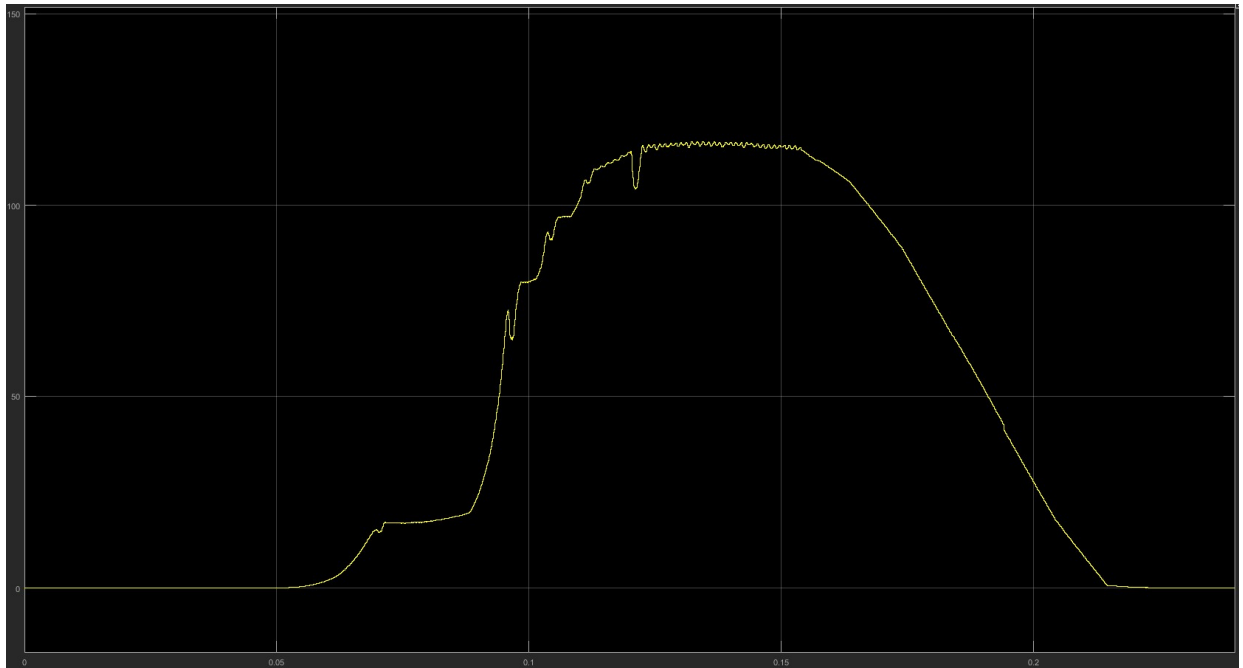


Ilustración 5.26. Potencia del generador en condiciones reales. Método de perturbación y observación. [Captura Simulink]

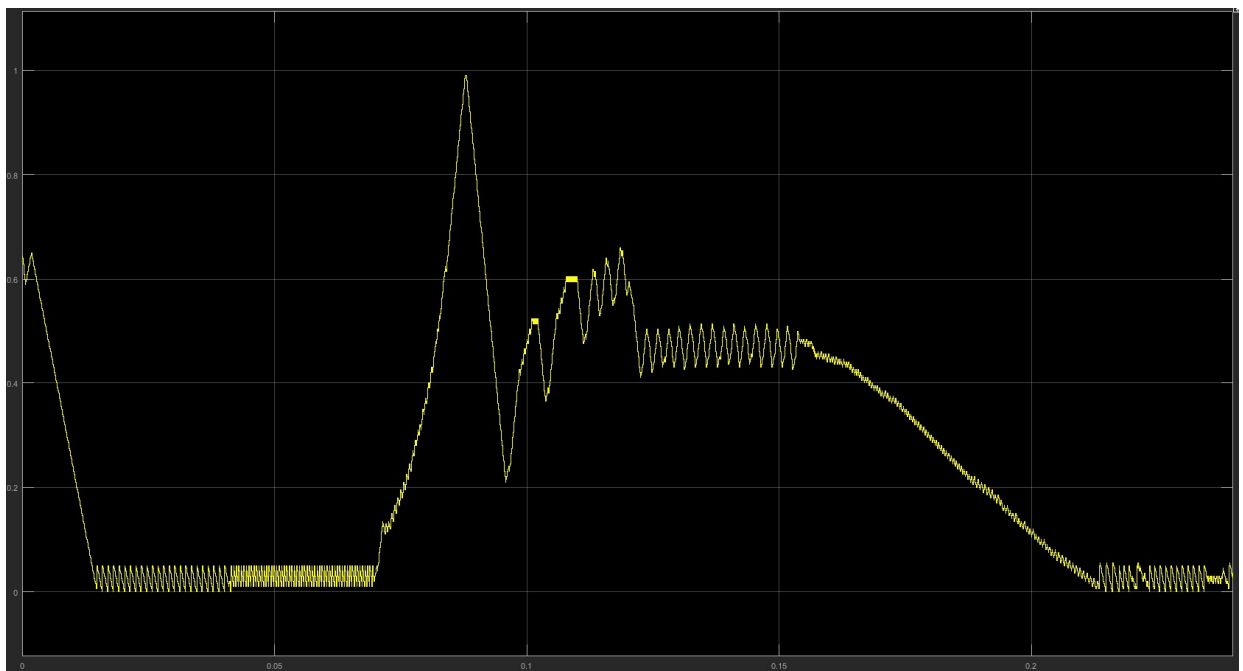


Ilustración 5.27. Potencia del generador en condiciones reales. Método de perturbación y observación [Captura Simulink]

5.3.4 . Simulink. Metodo Directo. Conductancia Incremental.

Este método es el más complejo con respecto al código a emplear en la simulación, pues en cada muestra que tome el algoritmo, hay que calcular la derivada de la potencia del generador con respecto a

la tensión del generador, para comprobar si el generador está trabajando en el punto de máxima potencia, como se observa en la *Ilustración 5.6*.

Al igual que para el método de perturbación y observación, las entradas serán la V_g e I_g en tiempo real, con la peculiaridad de que ahora, el algoritmo necesita saber en qué instante se toman las muestras, para calcular la variación con respecto al tiempo (derivadas); para ello, se incluirá un “timer” como entrada del algoritmo, como se observa en el circuito de la *Ilustración 5.28*. Se usará, como en casos anteriores, un convertidor Buck.

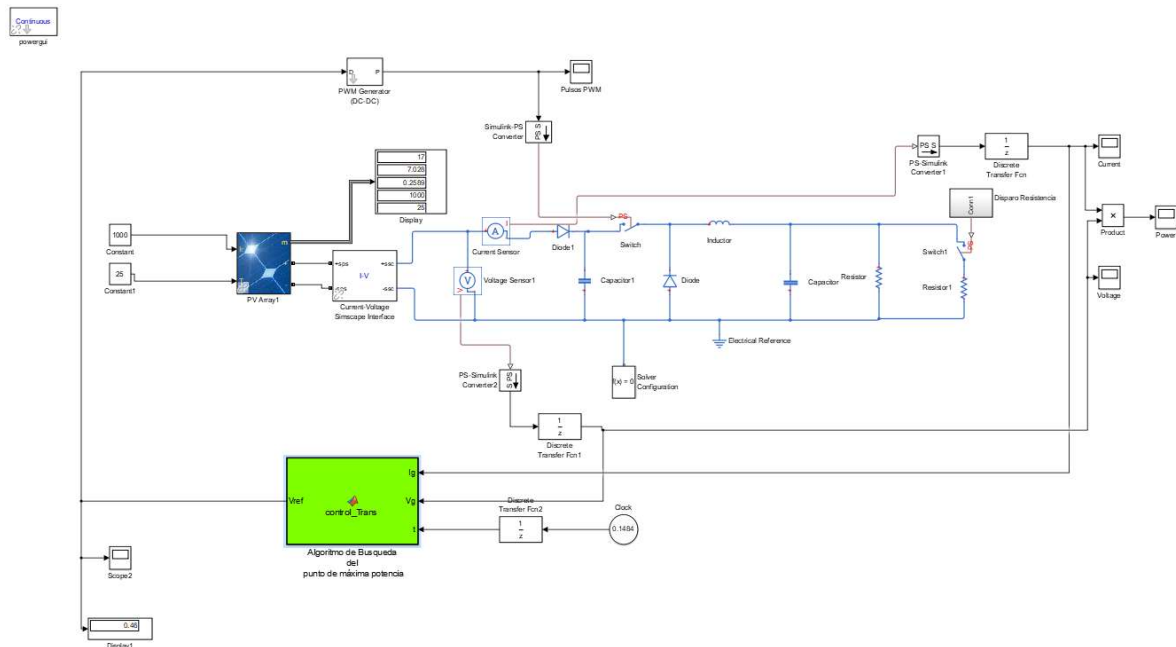


Ilustración 5.28. Circuito Simulink. Método directo, conductancia incremental.

Inicialmente se definirán unas funciones secundarias que serán llamadas en la función principal con cada muestra. Estas funciones quedan definidas en la *Ilustración 5.29*.

Ilustración 5.29 Funcion derivada I_g y derivada V_g . [Captura Simulink]

La función principal queda definida en la Ilustración 5.30

```
function Vref = control_Trans(Ig,Vg,t)
persistent ref;
% Truncamos los valores de Vg y Ig con una precisión de 0.0001
Vg = fix(Vg*10000)/10000;
Ig = fix(Ig*10000)/10000;
% Inicializamos variables.
if isempty(ref)
    ref = 0.65;
    Vref =ref;
end

% Se calcula el valor de la derivada numérica de la Tensión y la Intensidad
del generador
dV = deriva_Vg(Vg,t);
dI = deriva_Ig(Ig,t);

% Planteamiento del Algoritmo de Transconductancia.
if dV == 0
    if dI ~= 0
        if dI > 0
            ref = ref - 0.01;
        else
            ref = ref + 0.01;
        end
    end
else
    if (dI/dV) ~= (-Ig/Vg)
        if (dI/dV) > (-Ig/Vg)
            ref = ref - 0.01;
        else
            ref = ref + 0.01;
        end
    end
end
% Limitación máxima y mínima de los valores que puede tomar la tensión de
control del PWM.
if ref > 0.95
    ref = 0.95;
elseif ref < 0.05
    ref = 0.05;
end
Vref = ref;

function derivada = deriva_Vg (Vinstante,t)
persistent tiempo_Vmuestra;
persistent muestra_V;
if isempty(tiempo_Vmuestra)
    tiempo_Vmuestra = t;
    muestra_V = Vinstante;
end
paso = t - tiempo_Vmuestra;
derivada = ((Vinstante - muestra_V)/(paso));
muestra_V = Vinstante;
tiempo_Vmuestra = t;
```

```

function derivada = deriva_Ig (Iinstante,t)
persistent tiempo_Imuestra;
persistent muestra_I;
if isempty(tiempo_Imuestra)
    tiempo_Imuestra = t;
    muestra_I = Iinstante;
end
paso = t-tiempo_Imuestra;
derivada = ((Iinstante - muestra_I)/(paso));
muestra_I = Iinstante;
tiempo_Imuestra = t;

```

Ilustración 5.30. Código Matlab para la simulación del método directo de conductancia incremental.

[Captura Simulink]

Simulando para condiciones CEM :

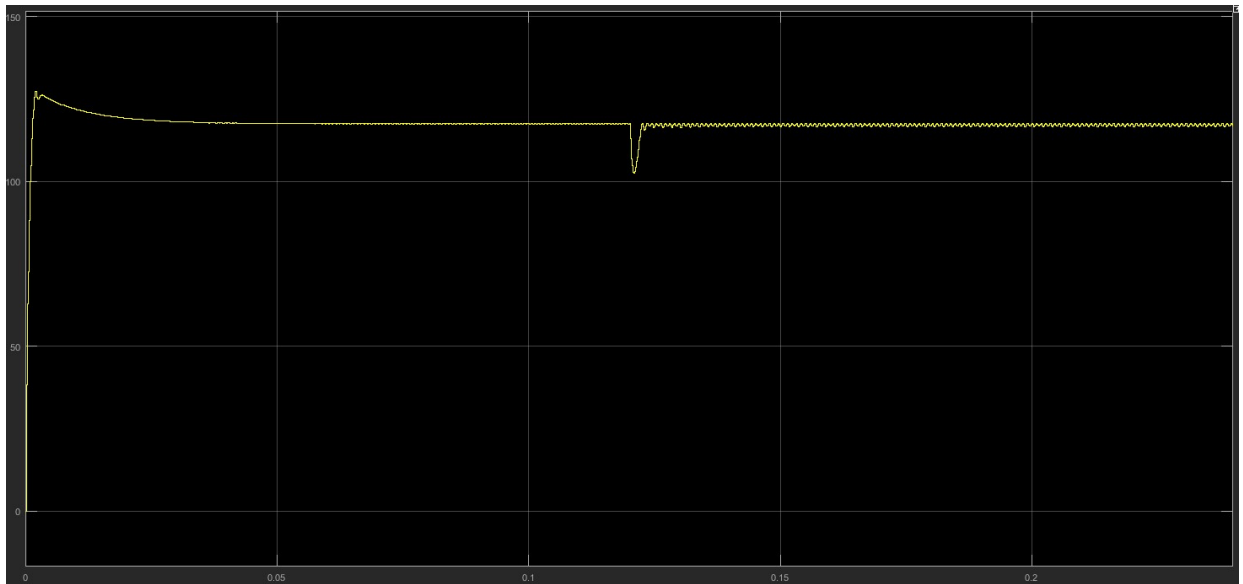


Ilustración 5.31. Potencia del generador en condiciones CEM. Método de conductancia incremental.

[Captura Simulink]

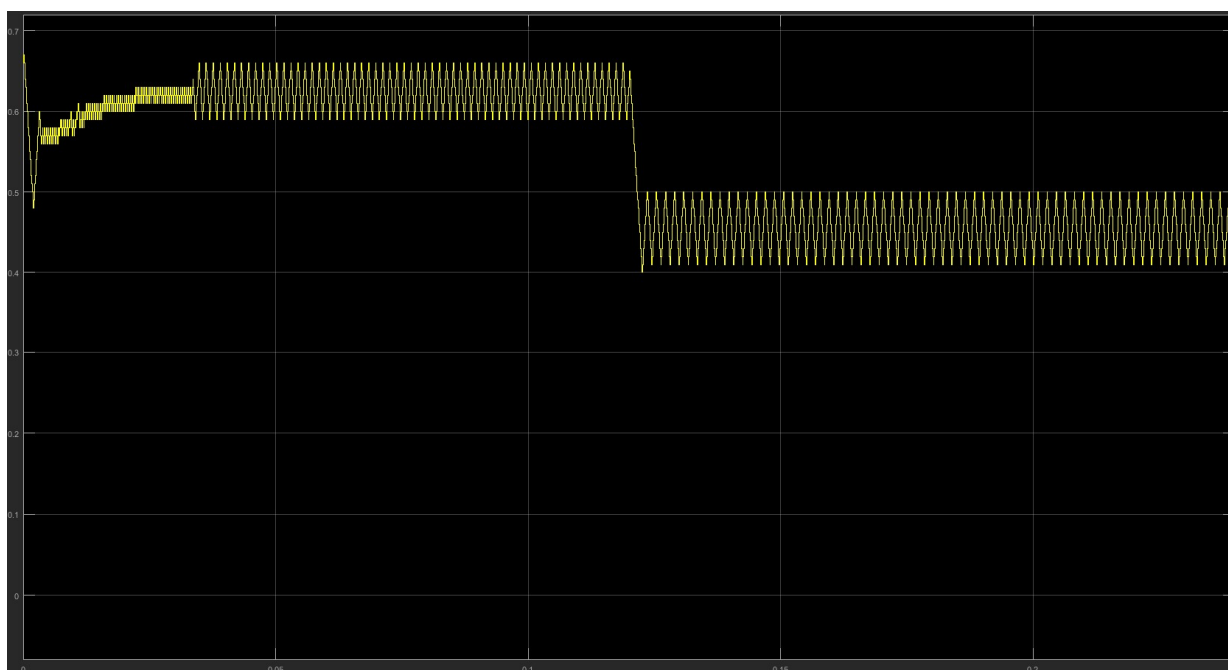


Ilustración 5.32 Variación del ciclo de trabajo. Método de conductancia incremental. [Captura Simulink]

Para condiciones reales :

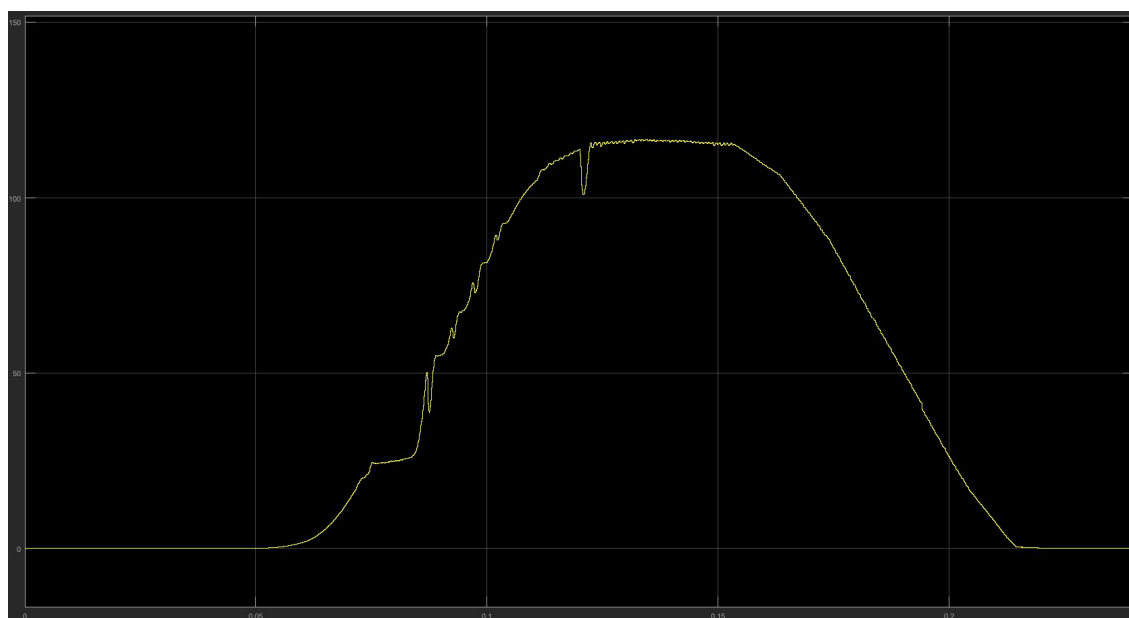


Ilustración 5.33 Potencia del generador en condiciones Reales. Método de conductancia incremental. [Captura Simulink]

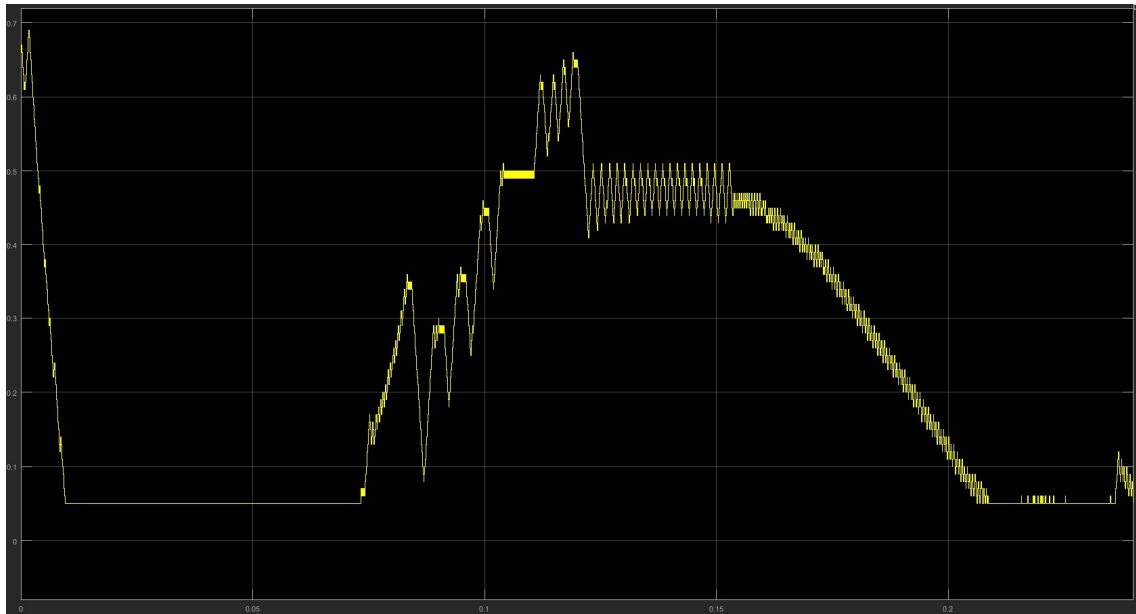


Ilustración 5.34 Variación del ciclo de trabajo. Método de conductancia incremental. [Captura Simulink]

6. Anexo

6.1. Bloques Simulink

A continuación, una descripción breve de cada uno de los bloques utilizados en las simulaciones :



Ilustración 6.1

Powergui : permite seleccionar el tipo de simulación que se desea hacer :
continua, discreta o por fasores. Este bloque debe de encontrarse en el circuito

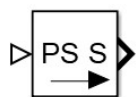
siempre que se utilicen bloques de Simscape.



Simulink-PS
Converter

Simulink-PS Converter : Transforma las señales Simulink/Matlab en señales físicas utilizables por circuitos Simscape.

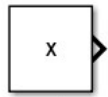
Ilustración 6.2



PS-Simulink
Converter

El análogo del bloque anterior, transforma señales físicas de circuitos Simscape a señales legibles para los bloques de Simulink, ideal para dibujar las gráficas de corriente e intensidad de los circuitos Simscape.

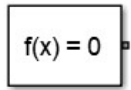
Ilustración 6.3



Constant

Crea una señal simulink constante para toda la simulación igual a X.

Ilustración 6. 4



Solver
Configuration

El bloque Solver Configuration debe ir conectado a todo circuito Simscape. Define los parámetros de la simulación que el circuito necesita antes de que comience la simulación

Ilustración 6. 5

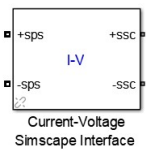


Ilustración 6. 6

Conecta bloques simulink con circuitos eléctricos de Simscape, mantiene los valores de corriente y tension en ambos lados del bloque.

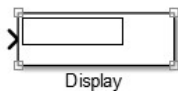


Ilustración 6. 7

Muestra en el propio bloque el valor de la entrada.

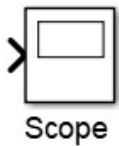
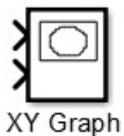


Ilustración 6. 8

Almacena los datos que recibe durante la duración de la simulación, dibujando una gráfica que enfrenta los datos almacenados en el eje Y frente a la duración de la simulación en el eje X.



XY Graph

Ilustración 3

Permite dibujar una variable frente a otra, ideal para dibujar curvas V-I e V-P.



Product

Determina el producto de ambas señales de entrada en la salida

Ilustración 6.9

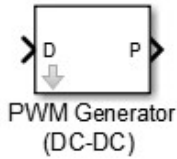


Ilustración 6.10

Genera a la salida una señal PWM cuyo ciclo de trabajo viene definido por el valor de la entrada, que podrá variar de 0 a 1. La frecuencia de la señal PWM es constante durante la simulación y viene definida al hacer doble-click en el propio bloque.

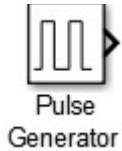


Ilustración 6.11

Genera una señal PWM, en este caso, tanto el ciclo de trabajo son constantes y vienen definidos en las propiedades del bloque.

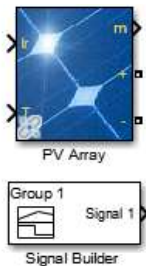


Ilustración 6.12

Debido a la complejidad de los mismos, Tanto el bloque PV Array como signal builder han quedado definidos en el apartado 3.4, para la simulación de un módulo fotovoltaico.

6.2. Bloques Simscape.

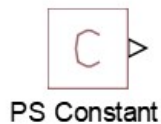


Ilustración 6.13

Crea una señal Simscape constante para toda la simulación.

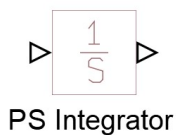


Ilustración 6.14

Crea una señal rampa en la salida desde un valor inicial editable en las propiedades del bloque hasta el valor que se le aplique a la entrada.

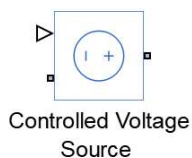


Ilustración 6.15

Fuente de tensión controlada, el valor de tensión se define a la entrada del bloque.

Resistor



Resistencia de valor constante, doble-click para definir el valor óhmico.

Ilustración 6.16



Inductor de valor constante, doble-click para definir el valor de inductancia.

Inductor

Ilustración 6.17



Condensador de valor constante, doble-click para definir el valor de capacidad

Capacitor

Ilustración 6.18



Diodo estándar, limita la corriente a un solo sentido. Doble-click para definir tensión de codo

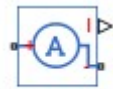
Ilustración 6.19



Voltage Sensor

Voltímetro estándar, toma medidas de tensión en sus extremos. IMPORTANTE:
Devuelve, en la salida, una señal Simulink.

Ilustración 6.20



Current Sensor

Amperímetro estándar, toma medidas de la corriente que circula por él.

IMPORTANTE : Devuelve, en la salida, una señal Simulink.

Ilustración 6.21



Solar Cell

Célula solar, Voc e Isc ajustables en las propiedades. Dispone de una entrada para ajustar la irradiancia, la temperatura es constante para toda la simulación.

Ilustración 6.22



Electrical Reference

Tierra virtual

Ilustración 6.23

6.3. Circuitos SIMULINK.

Archivos de circuitos Simulink utilizados en este trabajo:

“celulasolarVI.slx”

“convertidorboost50a220.slx”

“convertidorreductor48a18.slx”

“convertidorbuckboost.slx”

“IndirectMPPTControlCORRIENTEBuck.slx”

“IndirectMPPTControlTensionBoost.slx”

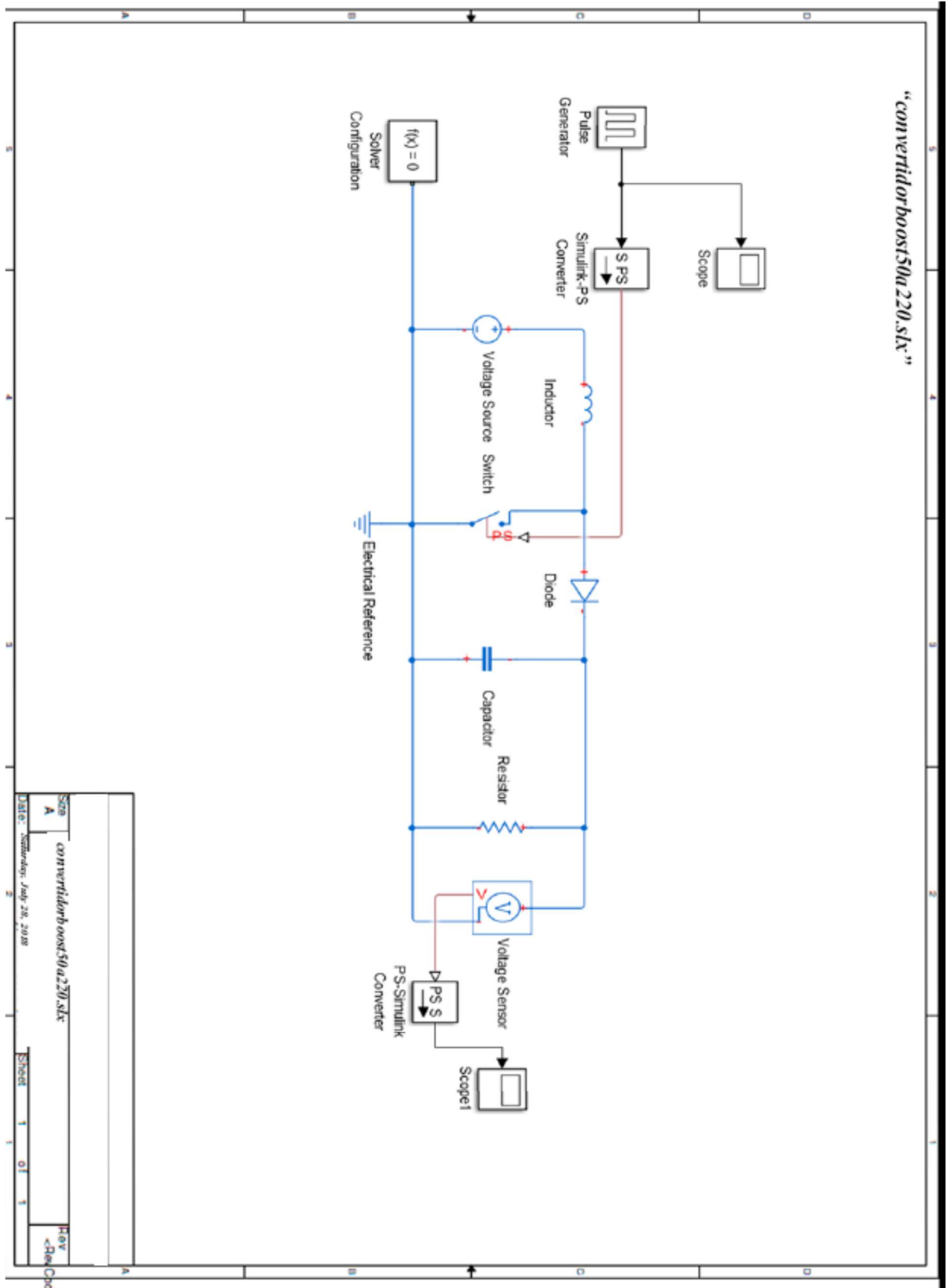
“IndirectMPPTControlTensionBuck.slx”

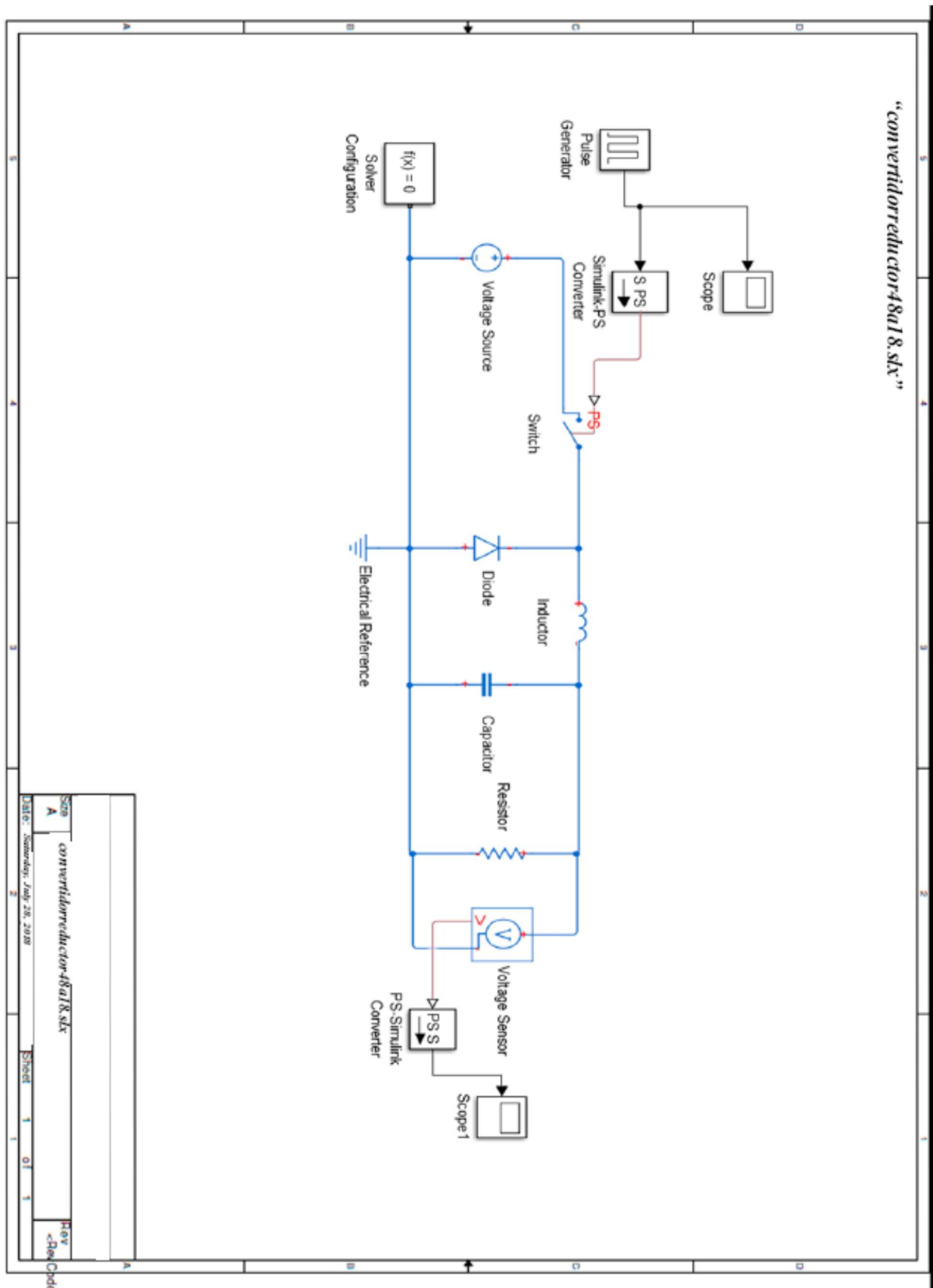
“DIRECTMPPTConductanciaBoost.slx”

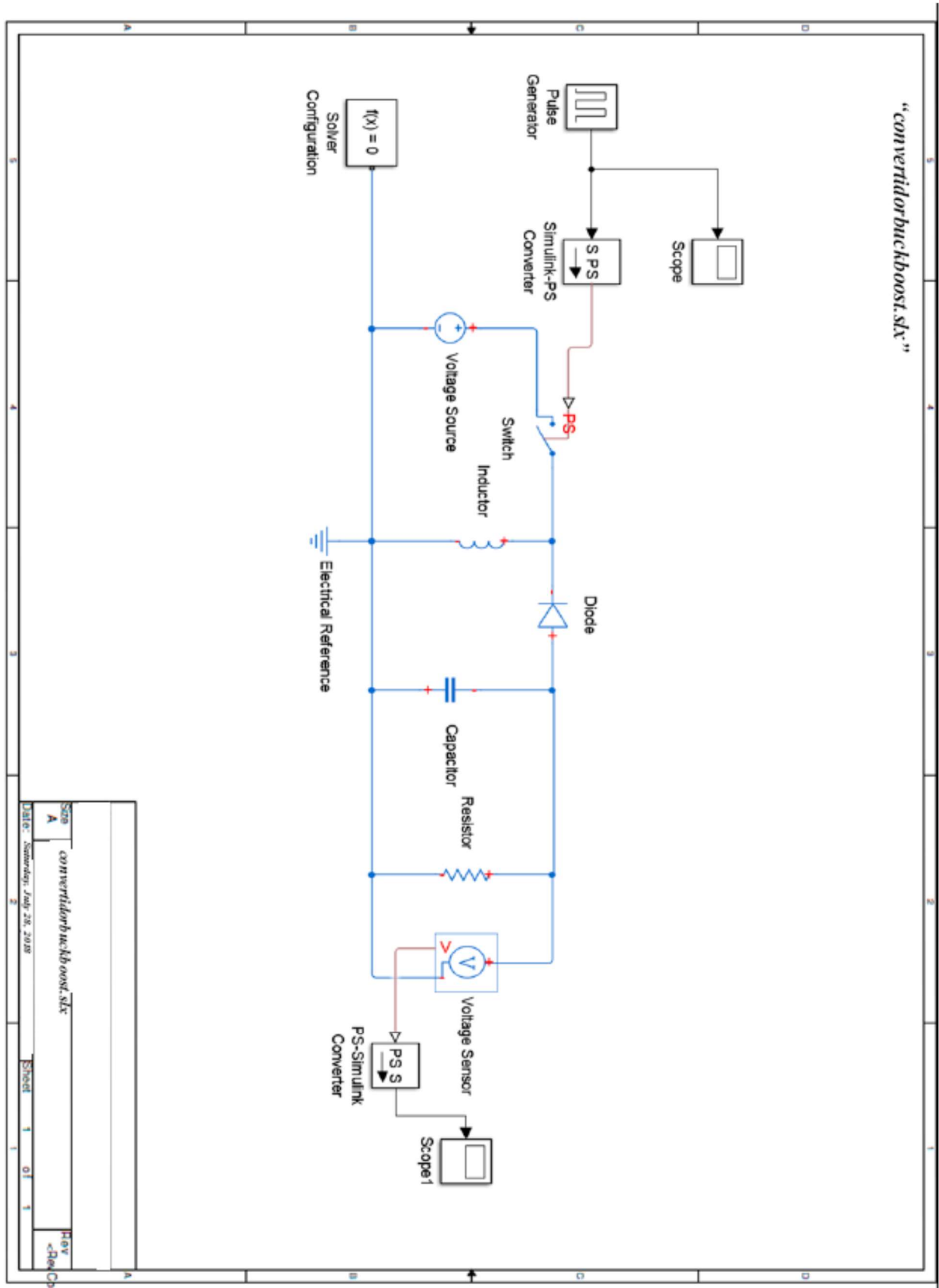
“DIRECTMPPTConductanciaBuck.slx”

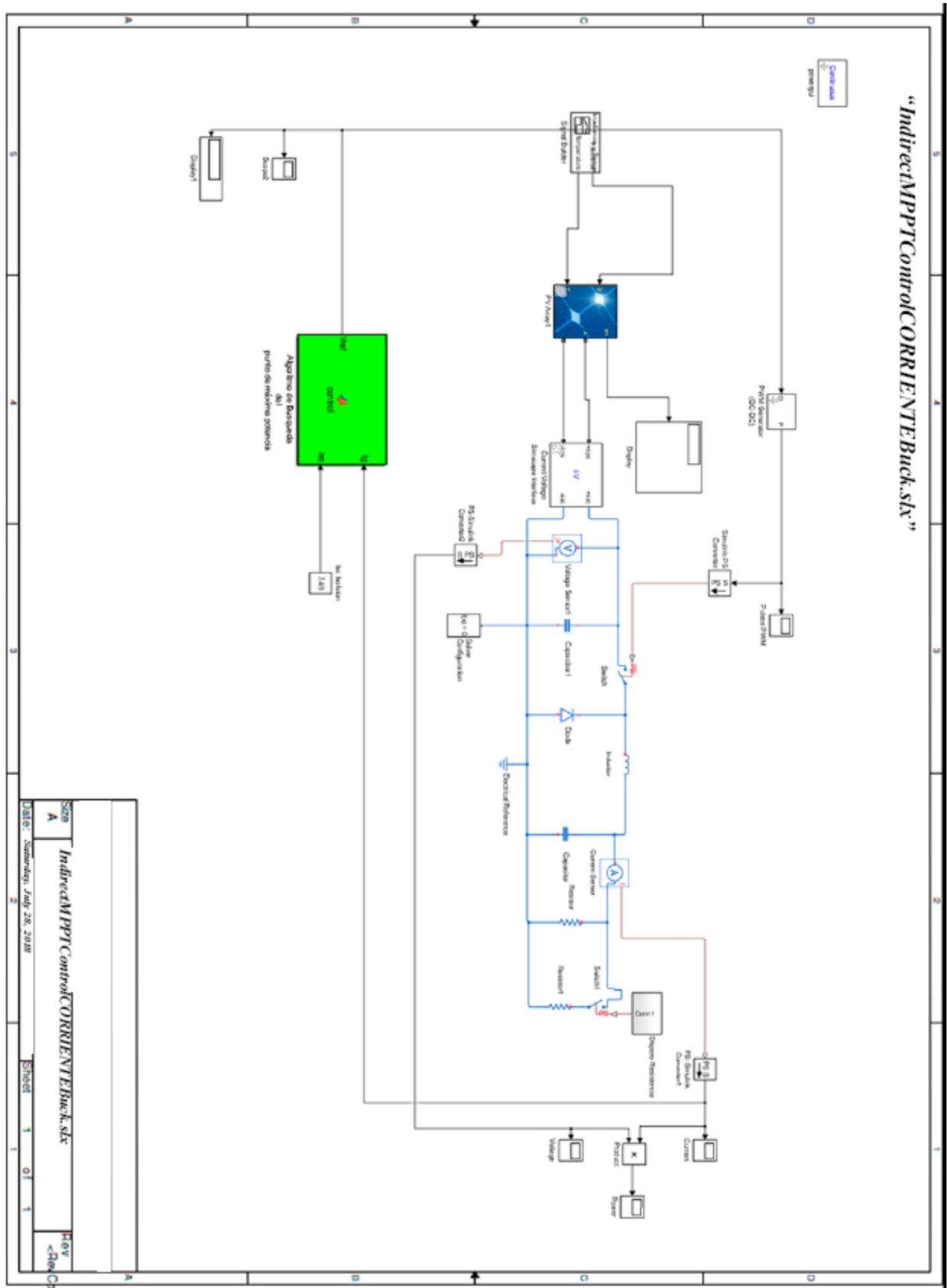
“DIRECTMPPTPyOBoost.slx”

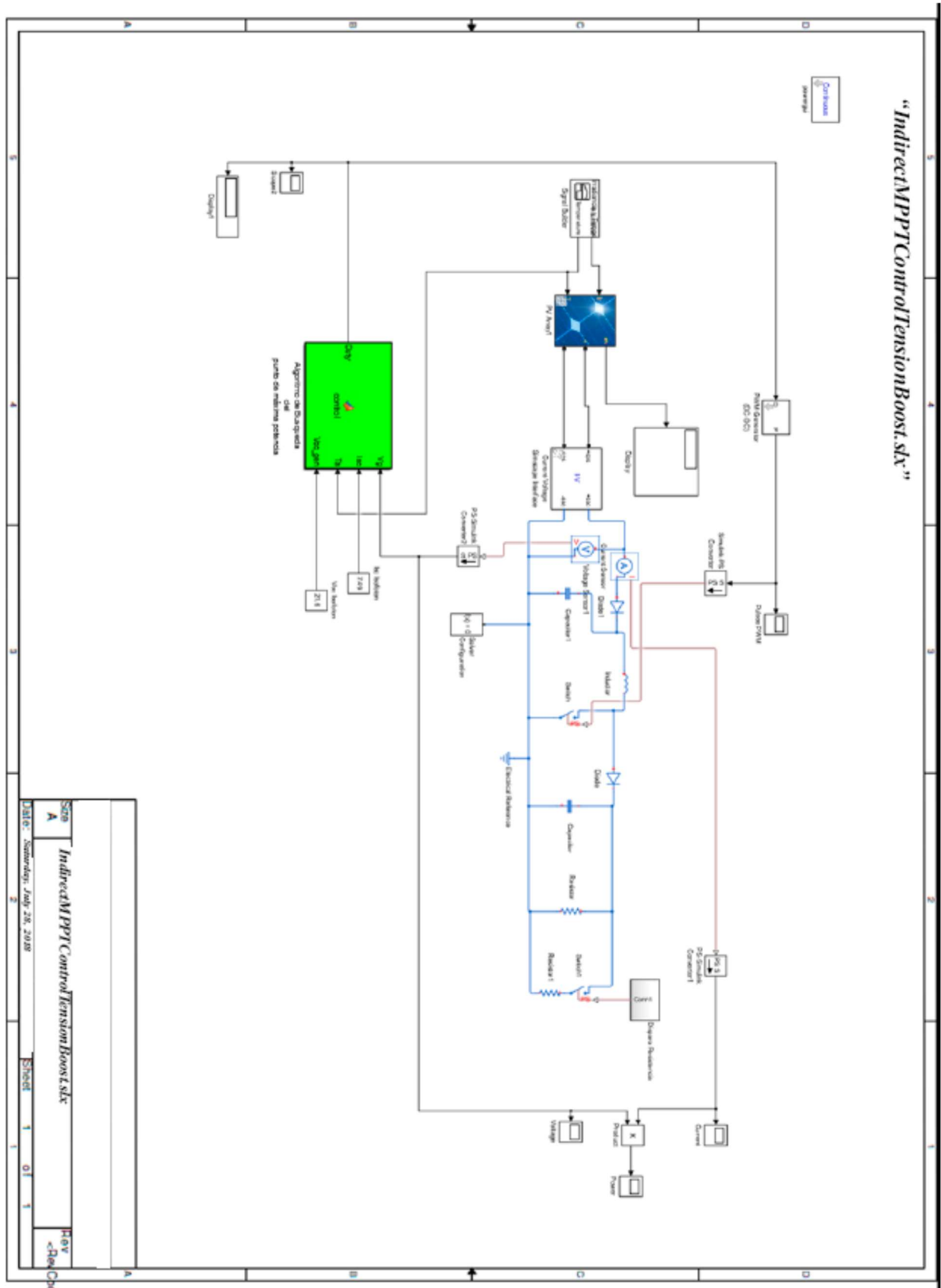
“DIRECTMPPTPyOBuck.slx”

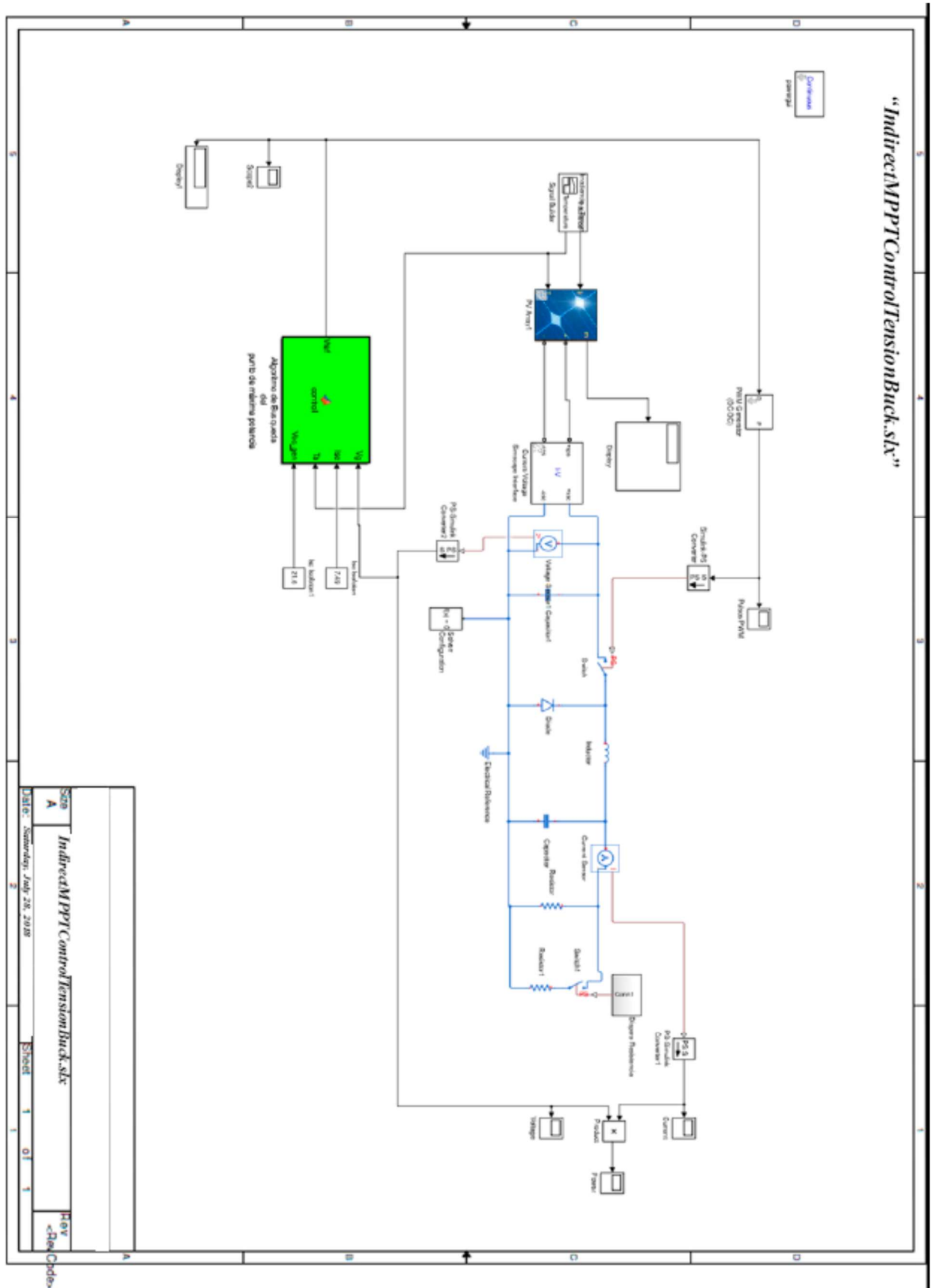


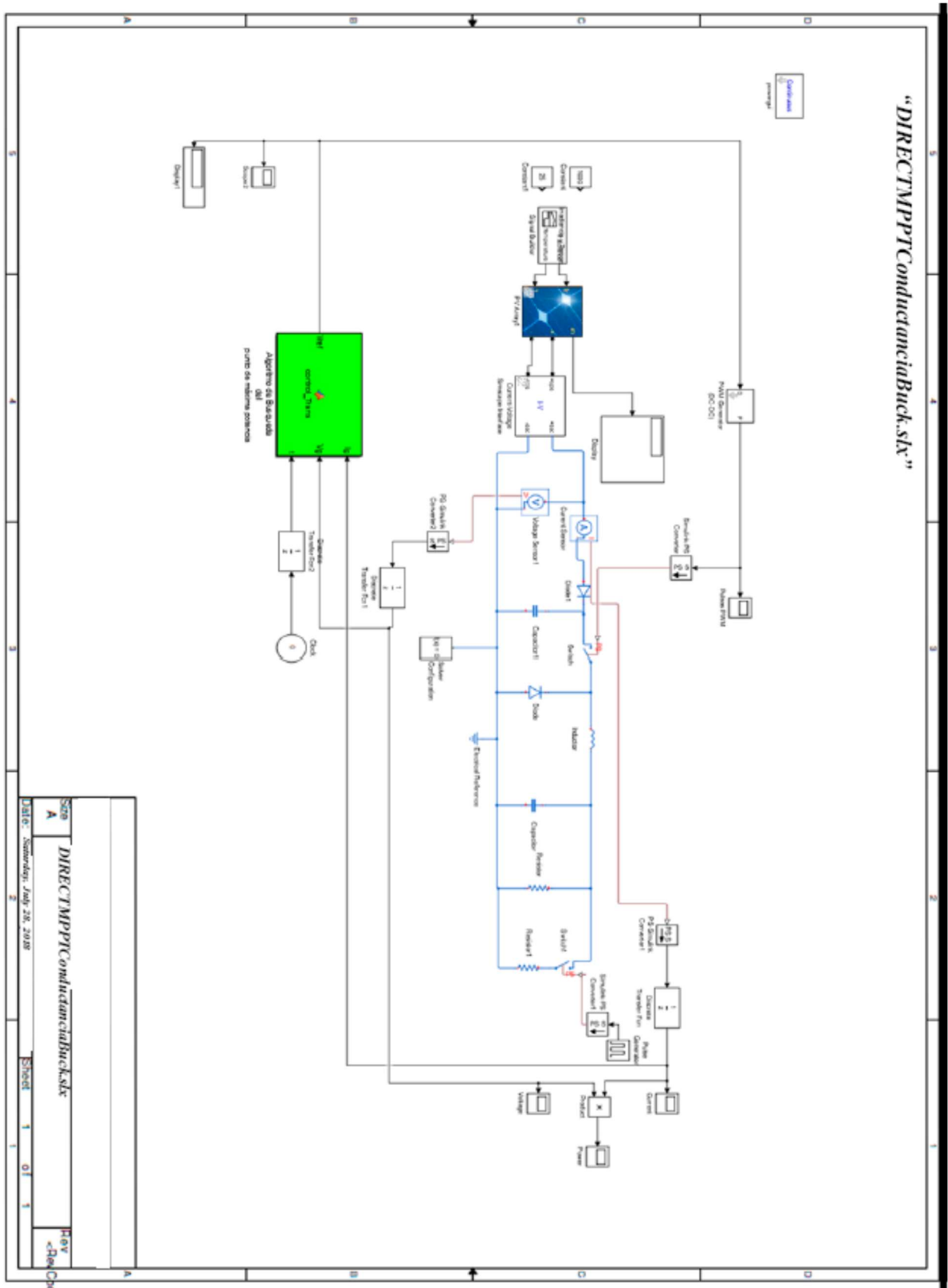


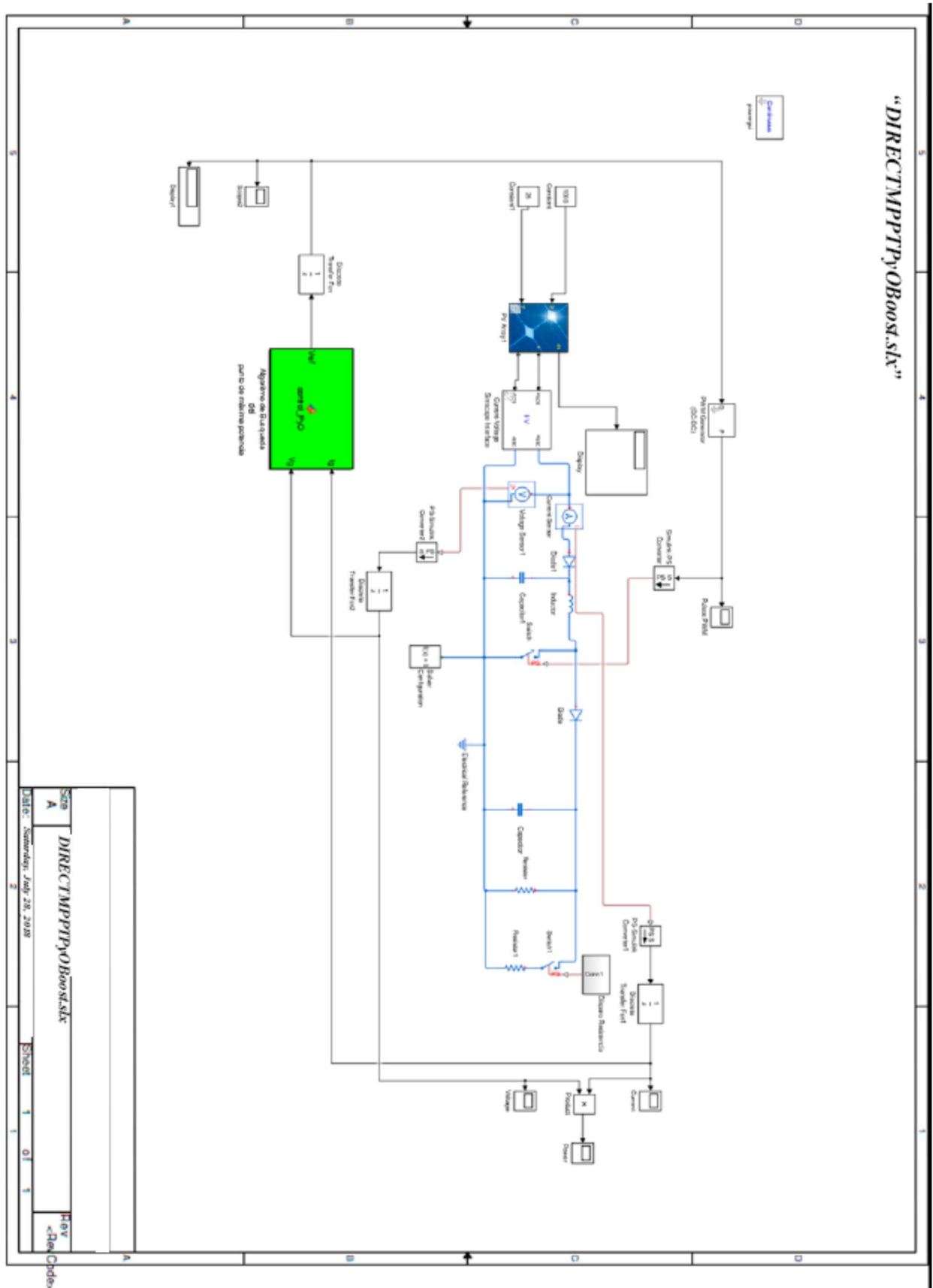


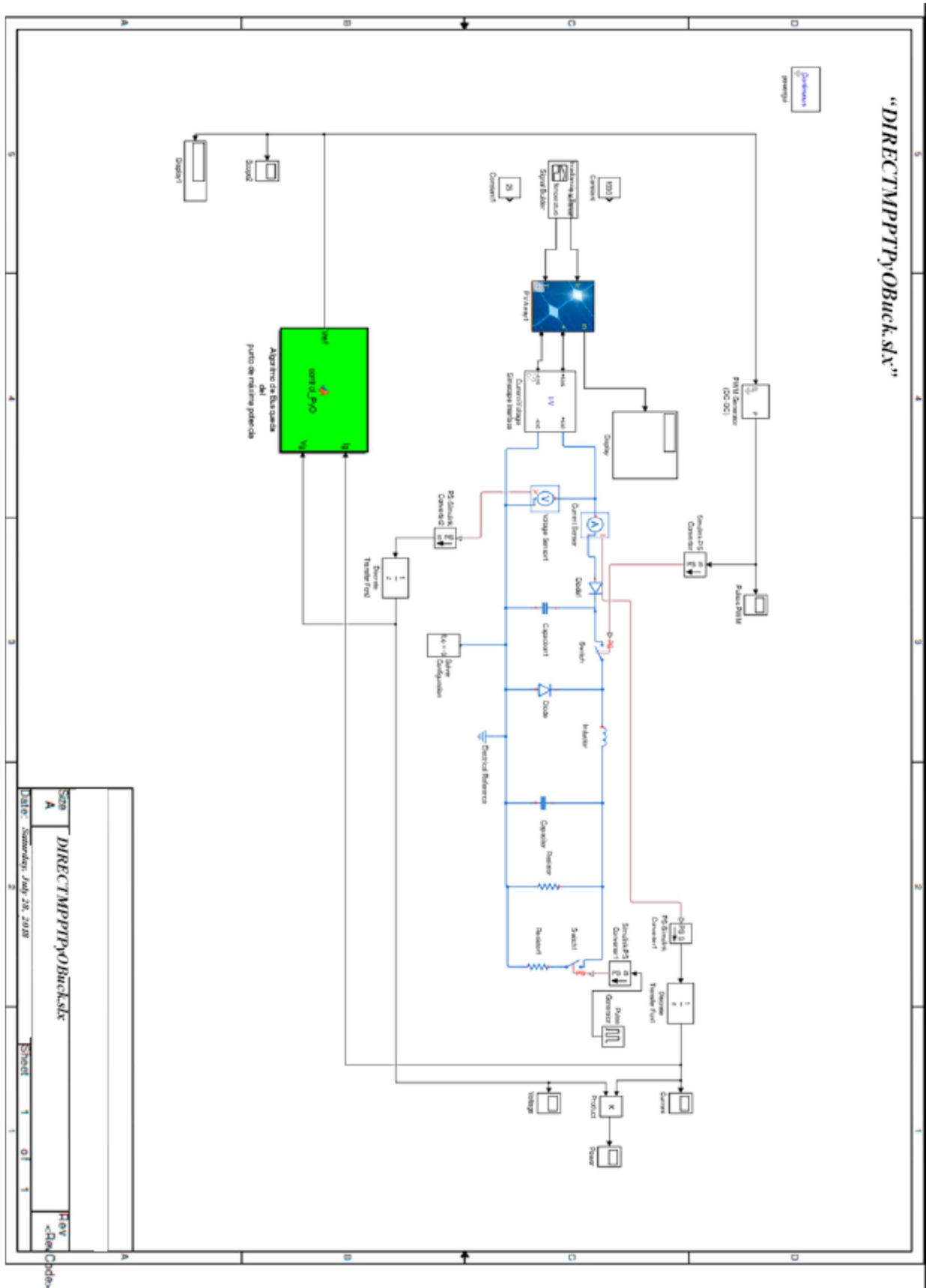












6.4 Ejercicios Prácticos

Práctica 1 : Modelado y ensayo de célula fotovoltaica. Simscape.

1. Introducción

Gracias al bloque célula solar de Simscape, es posible simular una célula solar trabajando en varias condiciones e estudiar su comportamiento, que será el objetivo principal de esta práctica.

Una vez conseguido esto, se dibujaran las gráficas características de la célula.

Como objetivo de esta práctica, además de mejorar el entendimiento de la célula fotovoltaica, se tiene también el familiarizar al alumno con el entorno Simulink.

2. Modelo de Célula Solar.

El modelo utilizado para simular la célula es el siguiente :

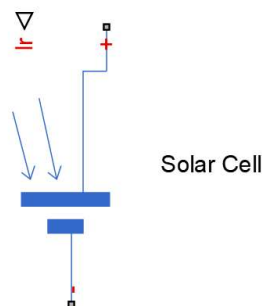


ilustración 1.4 Bloque célula solar.

El bloque contiene dos polos para extender el circuito Simscape y una entrada Simulink para definir la Irradiancia que actúa sobre la célula, que puede ser constante o variar durante la simulación.

Las propiedades del bloque son las siguientes :

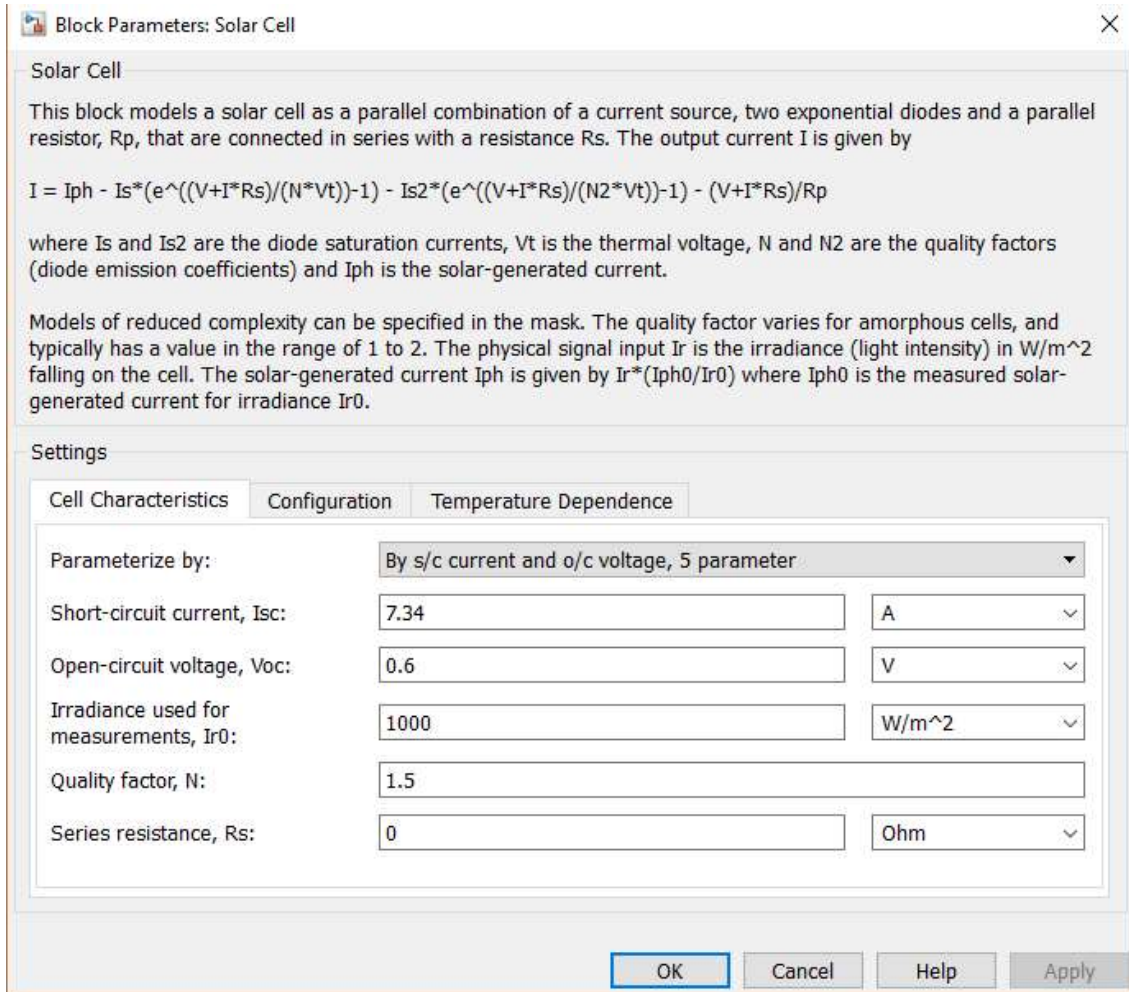


ilustración 1.5 Propiedades del bloque célula solar

La célula puede venir definida por varios parámetros, según la opción que seleccionemos el “Parametrize by :”. En este caso, quedará definida según la Voc e Isc, aunque también cabe la posibilidad de definir los valores del circuito equivalente (R_s , R_p , y corrientes de saturación).

Ap.1 : Diseña un circuito básico en Simulink que dibuje las curva V-I y V-P de la célula. Utiliza el bloque “Graph X-Y” de simulink para tomar dos datos de dos bloques simultáneamente.

Práctica 2 : Modelado y ensayo de un Módulo fotovoltaico y Generador fotovoltaico.

1. Introducción

Durante la práctica 1, se ha estudiado el funcionamiento de una única célula solar. El siguiente paso es abarcar el módulo fotovoltaico, que no es más que una asociación de células fotovoltaicas individuales y se acerca más a los casos prácticos que se dan en la realidad.

Una vez comprendido el funcionamiento del módulo, se pasará a simular un generador fotovoltaico al completo, para comprobar los resultados de energía y potencia generada durante un día estándar con distintos niveles de irradiancia y temperatura (24h).

2. Objetivos.

El objetivo principal de esta práctica es aprender a utilizar el bloque PV Array. Se trata de un bloque fundamental en la simulación de módulos fotovoltaicos mediante Simulink.

Como objetivo final de la práctica, se profundizará un poco más en el uso de Simulink y Matlab como herramienta en el estudio de la energía fotovoltaica.

3. Estudio del Bloque PV Array

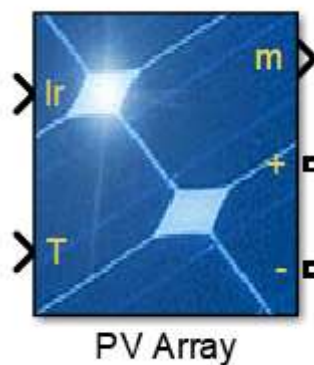


ilustración 6. Bloque PV Array.

Este versátil bloque permite la simulación desde una único módulo fotovoltaico, hasta un array completo con la configuración deseada.

Permite elegir desde una lista de módulos predefinidos disponibles en la web NREL (Enero 2014) e incluso crear un modelo nuevo (a partir de una hoja de características).

ilustración 7. Propiedades del bloque PV Array.

4. Realización de la práctica

Se dividirá la práctica en dos partes, inicialmente la parte de simulación de un único módulo, como segunda parte, se simulará el generador al completo.

4.1. Simulación del Módulo fotovoltaico.

Inicialmente, y mediante el uso de la hoja de características del Anexo “IS_210.pdf”, se comprobarán los datos más relevantes del módulo: sus características en condiciones CEM :

$I_{sc,STC}$, $V_{oc,STC}$ y $P_{M,STC}$ una vez hecho esto, se comprobarán con los datos que hay en el propio bloque de simulink y comprobaremos que son correctos.

4.2. Simulación de un generador fotovoltaico

El objetivo de la segunda parte es simular un generador de 8.4KW utilizando únicamente módulos fotovoltaicos del tipo Isofotón IS-210-32, por motivos de limitación del seguidor de máxima potencia, no deberá superar una $I_{sc,G}$ del conjunto de módulos no deberá superar 20A. Una vez dimensionado, se simulará en simulink y se compararán los resultados obtenidos para condiciones CEM.

Una vez construido el generador, se dibujará la curva de potencia a lo largo del día para el generador en cuestión.

Práctica 3 : Análisis y diseño de convertidores DC/DC.

1. Introducción

Los convertidores son dispositivos electrónicos encargados de transformar la señal suministrada a la entrada en otra de características predeterminadas. El concepto de conversión estática de energía constituye un aspecto esencial para cualquier sistema basado en componentes electrónicos.

2. Objetivos.

Con este ejercicio práctico nos proponemos que los alumnos puedan llegar a comprender, diseñar y analizar el funcionamiento del convertidor conmutado. Conozcan las principales formas de onda de la etapa de potencia y utilicen como principal herramienta Simulink y Matlab.

3. Diseño de Convertidores.

Para comenzar con el diseño de convertidores, hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- La mayoría de los convertidores reductores están diseñados para funcionamiento con corriente permanente.
- Para la elección de la frecuencia de conmutación se debe tenerse en cuenta que:
 - Las altas frecuencias de conmutación reducen el tamaño de la bobina a utilizar, pero presentan un aumento de pérdida de potencia en los interruptores con lo que, disminuye la eficiencia del convertidor.
 - Las frecuencias típicas de conmutación se deben elegir el rango comprendido entre 20 kHz y 50 kHz.
- *Orden de cálculo para el diseño del convertidor:*
 1. Elección de la tensión de salida.
 2. Cálculo del ciclo de trabajo.
 3. Elección de la frecuencia de conmutación.
 4. Cálculo de la inductancia mínima para trabajar en régimen permanente.
 5. Valor del condensador para fijar el rizado máximo en tensión admisible para el diseño.

4. Realización de la práctica.

4.1. Convertidor Buck.

El objetivo es simular un convertidor reductor (o buck) que determine una tensión de salida de 18V

sobre una carga de 10Ω . La tensión de entrada será de 48V. El rizado sobre la carga no debe superar el 0.5%. La frecuencia de conmutación es 40KHz

Inicialmente, se procederá a calcular el ciclo de trabajo.

$$V_o = V_i \cdot D; \quad D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{18}{48} = 0.375 \quad 3.1$$

4.2 Simulink. Convertidor Boost.

El objetivo es simular un convertidor elevador (o boost) que determine una tensión de salida de 220V a partir de una fuente de tensión de 50V. El rizado de la tensión de salida no debe superar el 0.5%. La carga sobre la que aplicaremos la tensión será de 15Ω y la frecuencia de conmutación en 35KHz.

4.3 Simulink. Convertidor Buck-Boost

Para la simulación de un convertidor Buck-Boost, como en apartados anteriores, se utilizará el circuito teórico correspondiente, en este caso, se realizará un circuito como el de la ilustración 3.17.

El convertidor debe tener una tensión de entrada de 15V y una tensión de salida de -5V con rizado inferior a 0.1%. La carga sobre la que se aplicará la tensión será de 10Ω y la frecuencia de conmutación 30KHz.

Práctica 4 : Análisis de Lazos

de control aplicados a la Fotovoltaica en

Convertidores DC/DC

M.P.P.T.

1. Introducción

La conexión directa de una carga a un generador fotovoltaico, conduce al punto de trabajo que resulta de interceptar las características I-V de ambos. En general, este punto de trabajo no tiene por qué coincidir con el de máxima potencia del generador y, por ello, cabe hablar de unas pérdidas de utilización. Por lo tanto, se utilizan los denominados “seguidores de máxima potencia” o “MPPT” para obligar al módulo a trabajar en su punto de máxima potencia independientemente de la carga que se conecte al módulo.

2. Objetivos.

Con esta práctica, se persigue simular los distintos tipos de MPPT existentes y comprobar los valores obtenidos en la simulación con los resultados teóricos. El alumno profundizará también en el uso tanto de Matlab y Simulink, esta vez, incluyendo algoritmos en lenguaje matlab y circuitos retroalimentados.

3. Diseño de un Seguidor de máxima potencia.

El fundamento del diseño de un MPPT se basa en la retroalimentación del módulo. Tomando como base los valores de corriente y tensión en la carga, se modificará el funcionamiento del convertidor empleado en el circuito para variar el punto de trabajo del módulo acorde a la situación del mismo.

Los distintos MPPT a simular son:

- Métodos Indirectos
 - Por control de tensión de circuito abierto
 - Por control de corriente de cortocircuito
- Métodos Directos
 - Perturbación y observación
 - Conductancia incremental

4. Realización de la práctica.

Inicialmente, definiremos el módulo al cual conectaremos al seguidor de máxima potencia : APOLLO ASEC-120G6M. Se calcularán los valores de I_{sc} , V_{oc} y P_M para una serie de conjuntos de valores de G y T que se pueden dar en un día aleatorio utilizando la hoja de características del módulo:

HORA	G W/m ²	Temp. Célula °C	Isc Generador (A)	Voc Generador (V)	Pm Generador (W)
0	0	25,25			
1	0	24,60			
2	0	24,60			
3	0	23,20			
4	0	22,80			
5	0	22,90			
6	55	22,90			
7	145	24,50			
8	315	25,90			
9	515	28,50			
10	760	30,00			
11	930	30,50			
12	1000	31,20			
13	1015	31,10			
14	1015	31,15			
15	1005	29,90			
16	921	29,00			
17	770	28,35			
18	565	27,10			
19	355	26,50			
20	145	25,20			
21	5	25,15			
22	0	24,80			
23	0	24,20			

Tabla 1. Datos funcionamiento del módulo ASEC-120G60

Con estos datos, se simularán los distintos circuitos y se comprobará que la potencia obtenida de forma horaria coincide con los resultados teóricos.

4.1. Simulación Método Indirecto : Control por tensión de circuito abierto.

Obtener la potencia generada por un módulo Isofotón IS-210-32 para los valores de temperatura e irradiancia de la *tabla 1*. Este módulo deberá de trabajar en todo momento en su punto d máxima potencia. Considera una variación en la carga a las 12:00am conectando una resistencia de 5Ω en paralelo con la carga.

4.2. Simulación Método Indirecto : Control por corriente de cortocircuito.

Repetir el enunciado del apartado 4.1, pero utilizando un seguidor por control de corriente de cortocircuito.

4.3. Simulación Método Directo : Perturbación y Observación :

Repetir el enunciado del apartado 4.1, pero utilizando el método de perturbación y observación.

4.4. Simulación Método Directo : Conductancia Incremental.

Repetir el enunciado del apartado 4.1, pero utilizando el método de conductancia elemental

7. REFERENCIAS:

-
- [1] Juan D. Aguilar Peña, Juan Francisco Merino Baena, "Electrónica aplicada a los sistemas fotovoltaicos" Capítulo 7, Apartados 4.3, 4.4. 2014
- [2] Juan José Marín Mera, "PFC : Aproximación al diseño y simulación de circuitos electrónicos de potencia en sistemas fotovoltaicos : Convertidores DC/DC y algoritmos de control del MPPT" Capítulos 2,3. Junio 2008
- [3] M. A. Green. Solar Cells. Operating principles. Technology and System Applications, Prentice Hall. New Jersey, 1982.
- [4] Grupo IDEA, Universidad de Jaén, "La Célula Solar". Apartado 4, Básico. Disponible en :
solar"https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm
- [5] Blog Ingelibre, "Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica", [online] Artículo completo. Disponible en : <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [6] Blog Energía y Desarrollo, "Conexiones serie y paralelo de celdas". Artículo completo. Disponible en : <http://energiaydesarrollo.com/que-es-un-panel-solar-fotovoltaico/conexiones-en-serie-y-paralelo-de-celdas/>
- [7] Blog Aprendiendo Ingeniería, "Simulación de sistemas físicos usando Simscape". Artículo completo. Disponible en : <http://aprendiendoingenieria.es/simulacion-modelos-fisicos-usando-simscape/>
- [8] Eduardo Lorenzo, Gerardo L. Araujo, Andrés Cuevas, Miguel Ángel Egido, Juan Carlos Miñano, Roberto Zilles. "Electricidad Solar. Ingeniería de los sistemas Fotovoltaicos". Instituto de Energía Solar. Universidad Politécnica de Madrid. Ed. PROGENSA (Promotora General de Estudios S.A.). Sevilla, España. 1994.
- [9] Entwistle, R.; Bleijs, J. A M, "Investigation of distributed maximum power point tracking systems through the use of an outdoor test rig and computer model," Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE , vol., no., pp.002363,002368, 19-24 Junio 2011
doi: 10.1109/PVSC.2011.6186426

[Disponible

en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6186426&isnumber=6185829>]

- [10] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro, Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 90, Issue 11, 6 July 2006, Pages 1555-1578, ISSN 0927-0248, [Disponible en : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.023>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024805003582>]
- [11] Esmar, T.; Chapman, P.L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.22, no.2, pp.439,449, June 2007 doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
[Disponible en : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4207429&isnumber=4207419>]
- [12] T. Kawamura, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka, T. Oshiro, H. Nakamura, M. Imataki, Analysis of MPPT characteristics in photovoltaic power system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 47, Issues 1–4, October 1997, Pages 155-165, ISSN 0927-0248, [Disponible en : [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00036-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00036-6).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024897000366>]
- [13] Liu L, Liu C. Deliberating on renewable and sustainable energy policies in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;17 (1):191–8.
- [14] Liu L, Sun Z, Liu C. MATLAB-based DC voltage superposition principle to study the output characteristics on PV array at partial shading. *Prz Elektrotech* 2012;88(12a):284–6.
- [15] Bhubaneswari P, Iniyas S, Goic R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:1625–36.
- [16] Baltas P, Tortoreli M, Russell PE. Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays. *Solar Energy* 1986;37(2):147–63.
- [17] Chander M, Chopra KL, Joshi JC, Mukerjee AK. Comparative study of different orientations of photovoltaic system. *Solar & Wind Technology* 1988;5 (3):329–34.
- [18] Ramamurthy V, Tiku P, Radhamohan V, Rao MVB. Evaluation of outdoor performance of polycrystalline silicon photovoltaic panel. In: *Proceedings of 6th international photovoltaic science and engineering conference*, New Delhi, February 10–14; 1992. p.917–23
- [19] Snyman DB, Enslin HR. Novel technique for improved power conversion efficiency in systems with battery back-up. *Renewable Energy* 1994; 4(3):349–57.
- [20] Teulings WJA, Marpinard JC, Capel A, O'Sullivan D. A new maximum power point tracking system. In: *Proceedings 24th annual IEEE Power Electronics specialists conference*; 1993. p.833–8.

- [21] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris NC. Development of a microcontroller- based, photovoltaic maximum power point tracking control system. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2001;16(21):46–54.
- [22] Al-Diab A, Sourkounis C. Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems. In: *Proceedings of optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM) conference*; 2010.
- [23] Marcelo Gradella Villalva JRG, Ernesto Ruppert Filho. Analysis and simulation of the P&O Algorithm Using A Linearized PV array model. In: *Proceedings of industrial electronics conference, IECON' 09*; 2009.p.231–6.
- [24] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, and J.M. Andujar, "A new Application of the Buck-Boost-Derived Converters to obtain the I-V curve of PV Modules", *Proc. of the 38th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007*, Orlando, EEUU, pp. 413-417, June 17-21, 2007.
- [25] Landsman, "A Unifying Derivation of Switching dc-dc Converter Topologies", *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC1979*, pp. 239-243.
- [26] J. White, and W. Muldoon, "Two-Inductor Boost and Buck Converters", *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC1987*, pp. 387-392.
- [27] R. Erickson, "Synthesis of Switched-Mode Converters", *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC1983*, pp. 9-22.
- [28] R. Tymerski, and V. Vorperian, "Generation, Classification and Analysis of Switched-Mode DC-to DC Converters by the use of Converter Cells", *Proc. IEEE International Telecommunications Energy Conference*, 1986 pp. 181-195.
- [29] D. Maksimovic, and S. Cuk, "General Properties and Synthesis of PWM DC-to-DC Converters", *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC1989*, pp. 515-525.
- [30] J. Wang; W.G. Dunford; and K E. Mauch, "Synthesis of two inductor DC-DC converters", *Proc IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC1997*, pp. 1367-1373, vol. 2.
- [31] J.Chen, D. Maksimovic, and R. Erickson, "Buck-Boost PWM Converters having two Independently controlled Switches", *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC2001*, pp. 736-741.