

GRADO EN INGENIERIA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***SISTEMA DE VERIFICACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE INVERSORES PARA EL
AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO***

Alumno: Echeburua, Ducasse, Ignacio

Director: Mazón, Sainz-Maza, Ángel Javier

Curso:2018-2019

Fecha:17 de julio de 2019

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO

- *Alumno: Ignacio Echeburua Ducasse*
- *Profesor: Ángel Javier Mazón Sainz-Maza*
- *Departamento: Ingeniería eléctrica*
- *Título del Proyecto: Sistema de verificación del comportamiento de inversores para el autoconsumo fotovoltaico.*
- *Resumen: En el presente trabajo se realiza un sistema de verificación de un inversor DC/AC empleado en un sistema fotovoltaico destinado al autoconsumo con excedentes, incluyendo un protocolo de ensayos que sirva para la verificación del mismo. El resultado de este proyecto por lo tanto es la verificación del comportamiento de un inversor en un sistema eléctrico formado por paneles fotovoltaicos, cargas y la red de distribución.*
- *Palabras clave: inversor, corriente continua, corriente alterna, panel fotovoltaico.*
- *Abstract: the following document presents a system of verification of an inverter DC/AC which works in a photovoltaic system used to the self-supply with the possibility to give to the distribution network the excess of energy. It includes a protocol of verification and the result of the project is the verification of the inverter in an electric system form by photovoltaic panels, load and the distribution network.*
- *Keywords: inverter, direct current, alternating current, photovoltaic panel.*
- *Laburpena: Lan honetan, soberakinen autokontsumorako zuzenduta dagoen sistema fotovoltaikoan erabiltzen den etahonen egiaztaketarako saiakera-protokoloa edukitzen duen DC/AC-a inbertitzaile baten egiaztatze sistema egiten da. Beraz, proiektu honen emaitza, taula fotovoltaikoz, karga eta banaketasareekin eratutako sistema elektrikoaren inbertitzaile baten portaera egiaztatzea da.*
- *Gako-hitzak: inbertitzailea, zuzeneko korrontea, korronte alternatiboa, panel fotoboltaikoa.*

INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 CONTEXTO.....	3
2.1 GENERACIÓN PARA EL CONSUMO PROPIO	3
2.2 LA IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	5
2.3 FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	6
2.4 IMPORTANCIA DEL INVERSOR EN EL AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO	8
3 OBJETIVOS Y ALCANCE	9
4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	10
5 ANÁLISIS DE RIESGOS	11
6 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN	12
7 DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE ENSAYO.....	17
7.1 PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	17
7.1.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN PROGRAMABLE	17
7.1.2 PVSYST	19
7.2 INVERSOR HUAWEI SUN2000L-2KTL.....	25
7.3 RED DE DISTRIBUCIÓN.....	29
7.4 CARGAS	30
7.5 APARATOS DE MEDIDA	31
8 RESULTADOS DEL ENSAYO.....	32
9 PLANIFICACIÓN	37
9.1 DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS	37
9.2 DIAGRAMA GANTT DEL PROYECTO.....	38
10 PRESUPUESTO EJECUTADO DEL PROYECTO.....	39
10.1 AMORTIZACIONES	39
10.2 HORAS INTERNAS.....	39
10.3 GASTO TOTAL EJECUTADO	39
11 CONCLUSIONES.....	40
12 BIBLIOGRAFÍA.....	41

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Esquema sencillo de autoconsumo [3].....	1
Ilustración 2. Tipos de autoconsumo.....	3
Ilustración 3. Curvas características de un panel fotovoltaico a 25°C y 1000W/m ² [4].....	6
Ilustración 4. Curva de potencia-tensión e intensidad-tensión [5].....	6
Ilustración 5. Matriz de clasificación de riesgos.....	11
Ilustración 6. Esquema unifilar de nuestro circuito eléctrico.	12
Ilustración 7. Flujos de potencia en el esquema unifilar.	12
Ilustración 8. Puesto de ensayo para la verificación de un inversor.	13
Ilustración 9. Esquema eléctrico con baterías.	13
Ilustración 10. Fuente de alimentación continua programable.....	17
Ilustración 11. Cara frontal de la fuente de alimentación programable.	18
Ilustración 12. Base de datos del programa “Photovoltaic System”.....	19
Ilustración 13. Base de datos del programa.	20
Ilustración 14. Ficha de características del panel fotovoltaico a 1000 W/m ² y a 25 grados. .	20
Ilustración 15. Distribución de los paneles fotovoltaicos para la simulación.	21
Ilustración 16. Parámetros del panel fotovoltaico a 800 W/m ² y a 25 grados.	22
Ilustración 17. Parámetros del panel fotovoltaico a 600 W/m ² y a 25 grados.	22
Ilustración 18. Parámetros del panel fotovoltaico a 500 W/m ² y a 25 grados.	23
Ilustración 19. Parámetros del panel fotovoltaico a 400 W/m ² y a 25 grados.	23
Ilustración 20. Parámetros del panel fotovoltaico a 200 W/m ² y a 25 grados.	24
Ilustración 21. Esquema eléctrico desde la aplicación de Huawei.....	25
Ilustración 22. Huawei Sun2000L-2KTL.....	26
Ilustración 23. Estructura para el montaje del inversor con el inversor colocado.....	26
Ilustración 24. Conexiones del inversor.	27
Ilustración 25. Caja de resistencias.....	30
Ilustración 26. Vatímetros del equipo de laboratorio.	31
Ilustración 27. Funcionamiento del inversor con excedentes.	34
Ilustración 28. Funcionamiento del inversor sin excedentes.....	35
Ilustración 29. Diagrama Gantt del proyecto.	38
Ilustración 30. Datasheet de la fuente de alimentación programable.	49
Ilustración 31. Datasheet del inversor de la marca Huawei Sun2000L-2KTL.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Punto de máxima potencia.....	14
Tabla 2. Rendimiento del inversor a 800 W/m ²	14
Tabla 3. Rendimiento del inversor a 500 W/m ²	15
Tabla 4. Rendimiento del inversor a 200 W/m ²	15
Tabla 5. Funcionamiento del inversor con excedentes.....	16
Tabla 6. Funcionamiento del inversor sin excedentes.....	16
Tabla 7. Funcionamiento del inversor en isla.	16
Tabla 8. Punto de máxima potencia ensayado.....	32
Tabla 9. Rendimiento del inversor a 800 W/m ² ensayado.	32
Tabla 10. Rendimiento del inversor a 500 W/m ² ensayado.	33
Tabla 11. Rendimiento del inversor a 200 W/m ² ensayado.	33
Tabla 12. Funcionamiento del inversor con excedentes ensayado.	34
Tabla 13. Funcionamiento del inversor sin excedentes ensayado.....	34
Tabla 14. Funcionamiento en isla del inversor ensayado.....	35
Tabla 15. Amortizaciones.	39
Tabla 16. Horas internas.....	39
Tabla 17. Gasto total del proyecto.	39

1 INTRODUCCIÓN

Este documento define un puesto de ensayo para la verificación del comportamiento de un inversor para el autoconsumo fotovoltaico e incluye un protocolo para realizar el ensayo que verifique el funcionamiento del inversor en operación real.

Se define el autoconsumo cuando un usuario es capaz de generar energía eléctrica con el fin de cubrir parte de su demanda eléctrica o toda la demanda eléctrica del mismo. El autoconsumo tiene mucha importancia dentro de este documento ya que es la principal finalidad que tiene el estudio del funcionamiento de un inversor.



Ilustración 1. Esquema sencillo de autoconsumo [3].

El autoconsumo tiene muchas ventajas. Dentro de estas ventajas está la reducción de pérdidas de energía por el transporte de la misma y una reducción de la inversión necesaria para la transmisión de energía. Además, esta energía que se genera para el autoconsumo suele ser una energía renovable (concretamente solar renovable) que es otra ventaja para confiar en el autoconsumo.

Socialmente se está impulsando cada vez más al autoconsumo ya que, como bien se ha explicado en el párrafo anterior, se suelen utilizar energías renovables, y esto ayudará a la desaparición de plantas de generación eléctrica que expulsan dióxido de carbono.

Además, el uso del autoconsumo en una vivienda es muy sencillo y está muy poco restringido legalmente. Es decir, para que un usuario pueda producir energía eléctrica para cubrir demanda eléctrica tendrá que tener en cuenta muy pocas restricciones.

Desgraciadamente la inversión inicial que hay que hacer para poder generar esta energía es elevada, pero el usuario podrá vender a la red de distribución sus excedentes de energía.

Actualmente, el autoconsumo que se produce en las viviendas, se produce a través de paneles fotovoltaicos. Estos, aprovechan la energía procedente del sol para producir una corriente continua de electricidad, la cual es necesario convertirla en corriente alterna para poder consumirla o transmitirla. Para la conversión de esta energía de continua a alterna se debe usar un inversor, que es el objeto de estudio de este trabajo, y someterlo a un ensayo que verifique su perfecto comportamiento.

Para poder determinar si los aspectos de un inversor para el autoconsumo fotovoltaico son los adecuados, será importante hacer un protocolo de pruebas, el cual se propondrá en este documento, y así garantizar que el sistema (panel fotovoltaico, cargas, red de distribución e inversor) funcionará de una forma óptima. Es por ello que una de las funciones que se busca del inversor es si consigue establecer el punto de operación en el punto de máxima potencia.

No solo se busca en el comportamiento del inversor saber encontrar el punto de máxima potencia. También se debe verificar que el inversor permite exportar e importar energía de la red, en función del consumo de la vivienda.

2 CONTEXTO

2.1 GENERACIÓN PARA EL CONSUMO PROPIO

El Real Decreto 244/2019 [1] que habla de la regulación administrativa, técnica y económica para el autoconsumo. Este Real Decreto es una de las restricciones que se tendrán que tener en cuenta antes de poder tener autoconsumo en una vivienda. El documento establece todos los tipos de autoconsumo que existen y cuáles son los requisitos para poder tener autoconsumo en una vivienda. En este decreto se diferencia entre distintos tipos de autoconsumo.



Ilustración 2. Tipos de autoconsumo

Como se puede apreciar en la imagen, se hace referencia a dos tipos principales de autoconsumo como son el individual y el colectivo. La principal diferencia entre ambos es si el autoconsumo es realizado por un individuo o grupos de individuos (en el caso de una vivienda si el autoconsumo se produce por una sola vivienda o por un conjunto de viviendas). Además de esto, se aprecia que el autoconsumo colectivo solo se permite si es con excedentes y sin acogida a compensación además de unas cuantas condiciones adicionales.

El autoconsumo sin excedentes no permite que el sistema pueda volcar energía eléctrica a la red, es decir, el circuito eléctrico deberá contar con un sistema antivertido que sea el encargado de no enviar energía a la red cuando la demanda eléctrica sea menor que la energía auto producida. En este tipo de autoconsumo si se permite que la red proporcione energía en caso de que nuestra fuente de energía no sea capaz de abastecer toda la demanda generada. El autoconsumo con excedentes permite que si el generador aporta más energía que la necesaria se pueda enviar la energía restante a la red.

En el autoconsumo con excedentes, cuando la energía generada es mayor que la energía que consume nuestro sistema, al inyectar la energía sobrante a la red se compensará en la factura esa cantidad. Es decir, la red eléctrica de distribución nos compensará por el excedente de energía que le entreguemos y de esta manera se conseguirá que el autoconsumo sea un sistema más económico.

La diferencia que existe entre acogerse o no a compensación es que aquellos que se acogan a compensación tienen un contrato único con la comercializadora, de tal forma que al volcar energía a la red eléctrica compensará el coste de la energía comprada a la red valorada al precio medio del mercado o al precio acordado con la comercializadora. Si no se acoge a compensación, el excedente de energía simplemente se vende a la red eléctrica al precio que tenga la energía en ese momento.

Finalmente, si nos acogemos a compensación nos será útil en aquellos momentos del día en que el precio de la energía sea barata pero será menos beneficioso para un usuario a la hora en la que la energía es más cara. Si no nos acogemos a compensación será al revés. De modo que si se genera la energía a través de un panel solar fotovoltaico, el momento del día que más energía produce es a la hora del primer pico de demanda por lo que la energía tendrá mayor valor, es más interesante en este caso no acogerse a la compensación.

2.2 LA IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Actualmente se están eliminando del mercado aquellas instalaciones que para generar energía eléctrica produzcan residuos contaminantes, como es el dióxido de carbono o los residuos de alta actividad radioactiva. Se ha optado por sustituir estas instalaciones por fuentes de energía renovables, como pueden ser la energía eólica o la energía solar.

Este grupo de energías renovables tienen muchas ventajas, principalmente su fuente de recursos es una fuente limpia e inagotable como bien pueden ser el sol o el viento y además estos recursos no tienen ningún coste. Desafortunadamente tienen una desventaja y es que no son fuentes de energía con las que podamos contar las horas que nosotros queramos sino que solo podemos obtener los recursos cuando los haya (es decir, no podemos obtener energía solar si no disponemos de luz solar). Aun así, estas fuentes de energía son actualmente el mejor sustituto para las tecnologías de generación convencionales.

Según los datos recogidos en la web de Red Eléctrica Española (REE) [2] en el año 2018, y siguiendo con las tecnologías de generación explicadas en este punto, las centrales de carbón generaron un 11,1% de la energía total y las centrales nucleares un 20,6%. Mientras, dentro de las energías renovables, la eólica generó un 22,6%, la solar térmica un 1,6% y la solar fotovoltaica un 3,0%. Resumiendo estos datos, se puede apreciar que las energías renovables están generando más que las convencionales pero aun así la generación total depende en gran cantidad de este grupo.

Centrándonos en la energía solar, hay varias maneras de aprovechar este recurso. Existen instalaciones que convierten esta energía para convertir el agua en vapor de agua para aprovecharlo después en una turbina, como pueden ser los colectores cilindro parabólico o los sistemas de torre. También hay sistemas para convertir de manera directa esa energía en una corriente continua y a estos se los conoce como sistemas de energía solar fotovoltaica.

Estos sistemas se componen de células fotovoltaicas que consisten en una unión semiconductor que al llegarles la radiación solar generan una corriente continua. Para poder conectar esta tecnología a la red de distribución, es importante que esté en la instalación un inversor que convierta la corriente continua en corriente alterna, y de ahí la importancia de este estudio.

2.3 FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Las características principales de los paneles fotovoltaicos vienen dadas por las curvas de intensidad – tensión. Estas curvas dependen de la radiación solar que absorbe el panel medida en W/m^2 . En ellas se pueden observar la intensidad de cortocircuito (I_{sc}), la tensión en vacío (V_{oc}), la intensidad en el punto de máxima potencia (I_{pmp}) y la tensión en el punto de máxima potencia (V_{pmp}).

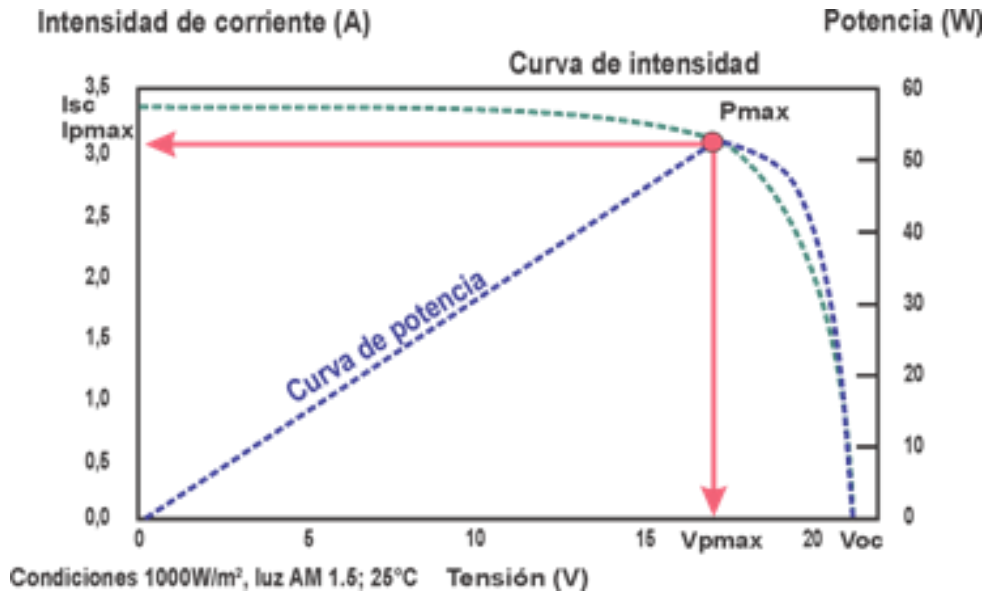


Ilustración 3. Curvas características de un panel fotovoltaico a $25^\circ C$ y $1000W/m^2$ [4].

En la ilustración 4 se especifica como en el punto de potencia máxima la intensidad no es máxima. Las variables que aparecen son la intensidad, potencia y tensión de potencia máxima, y la corriente de cortocircuito y la tensión en vacío, que siempre son un poco mayores de los valores de potencia máxima.

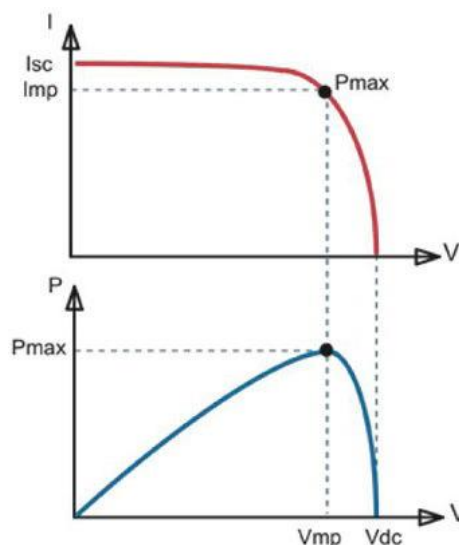


Ilustración 4. Curva de potencia-tensión e intensidad-tensión [5].

El estudio realizado del punto de máxima potencia servirá más adelante, en el comportamiento del inversor, ya que este debe funcionar a máxima potencia siempre y cuando no haya ninguna restricción que lo impida.

Un ejemplo de restricción se da cuando una comunidad no tiene el tipo de autoconsumo con excedentes, el inversor no va a trabajar en el punto de máxima potencia en los casos en los que el inversor exceda la potencia necesaria para el consumo de esa comunidad.

Cuando el inversor busca un punto que no sea el punto de máxima potencia, moviéndose por la curva de tensión – corriente, reduce la intensidad de entrada al inversor. Es decir, el nuevo punto de operación en el que trabaje el inversor tendrá una menor corriente que el punto de máxima potencia. Si nos fijamos en la ilustración 4, el punto de operación del inversor se encontrará entre el punto de máxima potencia y el punto de corriente nula.

2.4 IMPORTANCIA DEL INVERSOR EN EL AUTOCONSUMO FOTVOLTAICO

En este apartado se verá la importancia que tienen los inversores dentro del autoconsumo, más concretamente dentro del autoconsumo fotovoltaico.

Un inversor es un dispositivo eléctrico capaz de convertir la energía eléctrica que reciba en la energía eléctrica a la frecuencia que nosotros necesitemos. A partir de esta definición, existen muchas posibilidades, como por ejemplo, aumentar o disminuir la tensión, aumentar o disminuir la frecuencia,... Entre todas las variantes, la más interesante dentro del proyecto es la capacidad de convertir la energía en corriente continua que recibe del panel solar fotovoltaico a corriente alterna para bien consumirla o volcarla en la red de distribución.

El inversor, para convertir la energía de corriente continua a alterna, primero buscará dentro de la curva tensión – corriente del panel fotovoltaico el punto de operación para trabajar a partir de este. Es decir, el inversor no está obligado a trabajar en el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, aunque sí que será más interesante que el inversor sea capaz de trabajar en el punto de máxima potencia.

Aunque la función más importante del inversor sea convertir la energía de corriente continua a corriente alterna, también deberá cumplir otras funciones necesarias para el correcto comportamiento de un inversor que se utiliza para el autoconsumo. Como bien se ha visto anteriormente, dentro de los tipos de autoconsumo existe el autoconsumo sin excedentes, por lo que el inversor deberá saber funcionar sin volcar los excedentes de energía en ese caso.

Para poder cumplir esto último, el inversor deberá ser capaz de moverse a través de la curva tensión – corriente del panel solar fotovoltaico para trabajar en el punto de operación necesario para cubrir la demanda del usuario.

Por lo tanto, la importancia que tiene un inversor dentro de la generación de energía para el autoconsumo con o sin excedentes es el correcto cumplimiento de todas las restricciones además de ser el encargado de trabajar con la máxima eficiencia posible para obtener el mayor beneficio posible.

La última restricción que debe cumplir un inversor es que no puede trabajar si no está conectado a la red, es decir, no podrá trabajar en isla.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

En este proyecto hay tres objetivos principales que hay que cumplir. En primer lugar, debe comprobar que el inversor que se va a utilizar para el autoconsumo con excedentes cumpla con todas las operaciones de autoconsumo en las que va a trabajar cuando se ponga en funcionamiento. Estas operaciones son:

- **Operación 1**, si las cargas demandan más potencia de la que el panel fotovoltaico pueda proporcionar, entonces el inversor volcará toda la energía del panel a las cargas y además utilizará potencia de la red de distribución para poder entregar la energía restante necesaria.
- **Operación 2**, si las cargas demandan menos potencia de la que es capaz de producir el panel, el inversor enviará la energía necesaria a las cargas y el resto lo volcará en la red de distribución.
- **Operación 3**, si no hay cargas que demanden energía, se tendrá que comprobar que toda la energía producida por los paneles sea enviada a la red de distribución.
- **Verificación de funciones básicas**, además de estas operaciones, el inversor deberá buscar siempre el punto de funcionamiento óptimo dentro del funcionamiento del panel fotovoltaico. También se comprobará que el inversor tenga un comportamiento anti-isla, de tal forma que si se produce un fallo en la red de distribución que provoque una desconexión, el inversor no permita generar energía eléctrica.
- **Verificación del sistema antivertido**, se comprobará que el sistema antivertido funcione, esto es, que en las operaciones de autoconsumo 2 y 3 el inversor no ceda energía a la red.

El segundo objetivo que se debe cumplir es la creación de un protocolo para las operaciones y verificaciones de autoconsumo para un inversor cualquiera, no solo el inversor que se utilizará en este trabajo. La razón es principalmente que el protocolo pueda servir para otro tipo de inversores con distintas potencias nominales.

Finalmente, el tercer objetivo es la creación del puesto de ensayo que sirva para verificar el correcto funcionamiento de un inversor. Para ello se usará el material del equipo de laboratorio que hay en el departamento de ingeniería eléctrica para ensayar un inversor. La finalidad de este objetivo es conseguir demostrar el comportamiento del inversor con el protocolo creado.

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

En este apartado se explicarán las razones por las cuales este trabajo es beneficioso. Con este trabajo se busca principalmente conocer el funcionamiento exacto del inversor, conocer su comportamiento y obtener la capacidad para manejar el inversor eficientemente durante su funcionamiento en una situación real.

Aunque el ensayo no sea exactamente una situación real de funcionamiento del inversor, ya que se utiliza una fuente programable y el código de programación no contempla una situación meteorológica real, a partir de este trabajo se podrá conocer el comportamiento del inversor en cualquier situación de funcionamiento.

La necesidad de conseguir conocer el inversor de esta manera es para dar a conocer las ventajas que tiene el autoconsumo dentro de la sociedad. Al utilizar la energía solar fotovoltaica para la generación de electricidad que posteriormente se usará para la demanda doméstica de potencia, evitará la generación eléctrica a partir de plantas que contaminen, por ejemplo, plantas de carbón. De esta forma, se conseguiría reducir las emisiones de dióxido de carbono.

Para poder comprender el comportamiento de un inversor en situación real, este trabajo propone un protocolo de verificación del inversor y el ensayo de un inversor para ver cuál debe ser el funcionamiento del inversor ante distintas situaciones, y de esta manera impulsar el uso de paneles solares fotovoltaicos para el autoconsumo.

5 ANÁLISIS DE RIESGOS

Los riesgos que se pueden suceder en este proyecto son los siguientes:

- A, Fallo externo, es decir, fallo de los componentes que llegan al departamento.
- B, Falta de homologación de alguna parte del equipo para el ensayo.
- C, Fallo interno, es decir, fallo a la hora de tomar medidas en el ensayo.

Tanto el fallo externo como la falta de homologación nos harían detener el proyecto hasta resolver el problema mientras que el fallo interno únicamente nos haría repetir el ensayo total o parcialmente en aquellas pruebas que sean erróneas.

Por ello el fallo externo y la falta de homologación tendrán más impacto que el fallo interno. Además, las probabilidades de que ocurran estos fallos son muy poco probables, por lo que aun siendo el impacto mayor o menor, el riesgo que tiene hacer este proyecto es muy bajo.

Es por ello que la tabla de riesgo quedará de la siguiente manera:

		IMPACTO		
		BAJO (0,1)	MEDIO (0,5)	ALTO (0,9)
PROBABILIDAD	BAJA (0,2)	0,02 Bajo	A,B 0,1 Bajo	0,18 Moderado
	MEDIA (0,5)	C 0,05 Bajo	0,25 Moderado	0,45 Alto
	ALTA (0,8)	0,08 Bajo	0,40 Alto	0,72 Alto

Ilustración 5. Matriz de clasificación de riesgos.

La manera de solucionar estos riesgos será:

- A, contar con equipo de calidad para el ensayo.
- B, tener todo el equipo de ensayo homologado al inicio del proyecto.
- C, seguir los pasos del ensayo que vienen en el proyecto para no cometer errores.

6 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE VERIFICACIÓN

A continuación se explicarán los pasos que se han de realizar para la verificación de un inversor. Para ello vamos a necesitar de una fuente de alimentación de corriente continua, una toma de contacto con la red de distribución, cargas, cuatro vatímetros y el inversor el cual se va a comprobar su funcionamiento.

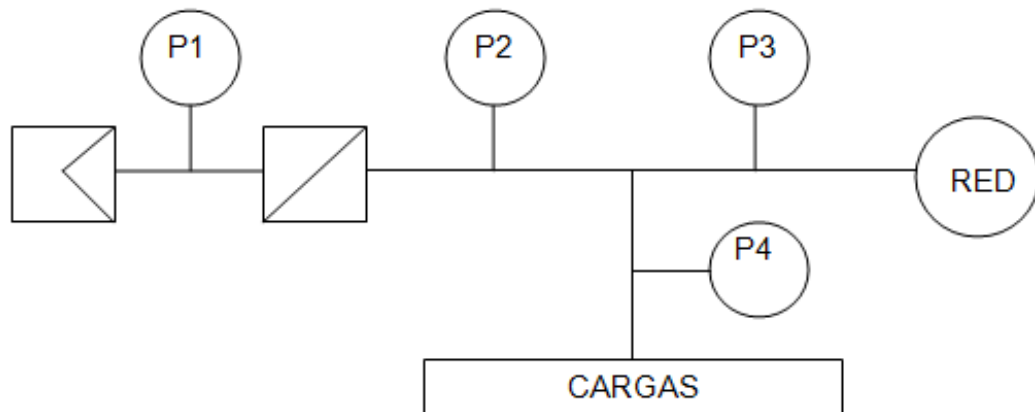


Ilustración 6. Esquema unifilar de nuestro circuito eléctrico.

La figura de la ilustración 6 muestra el esquema unifilar para comprender la disposición de los elementos nombrados anteriormente. El primer bloque representa una fuente de alimentación de corriente continua y el segundo bloque representa un inversor de corriente continua a alterna. Los elementos representados por una "P" son los vatímetros.

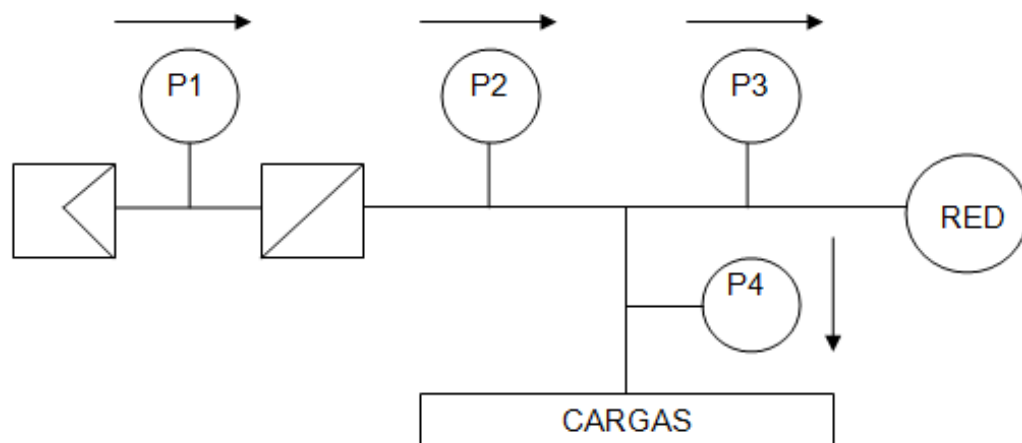


Ilustración 7. Flujos de potencia en el esquema unifilar.

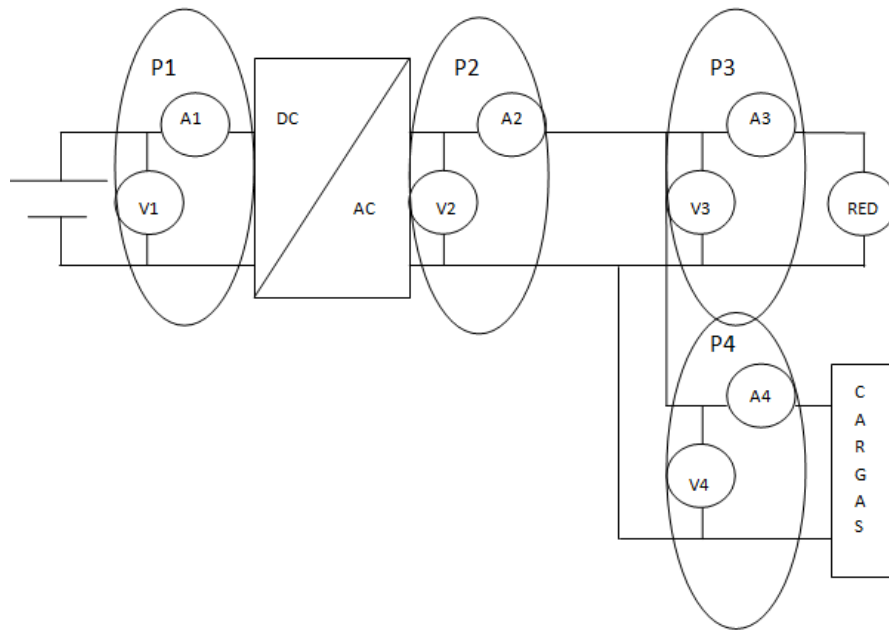


Ilustración 8. Puesto de ensayo para la verificación de un inversor.

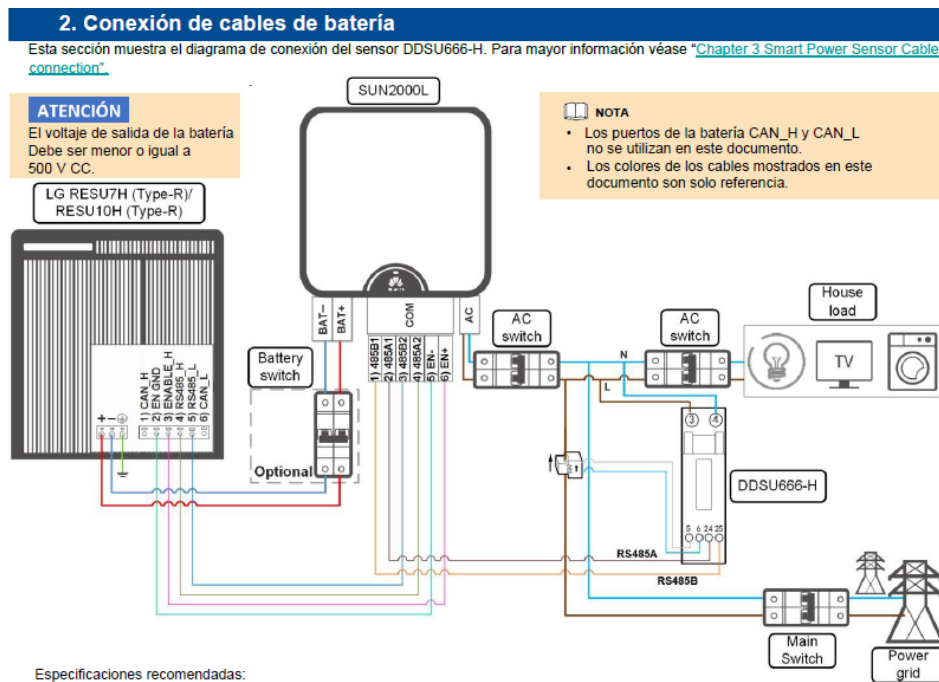


Ilustración 9. Esquema eléctrico con baterías.

Con los flujos de potencia definidos, se va a definir cuáles son los parámetros que se deben controlar para demostrar el correcto funcionamiento de un inversor.

Para ello, primero se debe comenzar por saber si el inversor encuentra correctamente el punto de máxima potencia con distintas radiaciones.

RADIACIÓN (W/m ²)	V _{pmp} (V)	I _{pmp} (A)	P _{pmp} (W)	Tiempo (s)
1000				
800				
600				
500				
400				
200				

Tabla 1. Punto de máxima potencia.

Para las radiaciones escogidas en esta tabla debemos de comprobar si la tensión, intensidad y potencia son las correctas. También se debe calcular el tiempo que tarda el inversor en encontrar el punto de máxima potencia. Los valores de V_{pmp}, I_{pmp} y P_{pmp} son los valores de tensión, intensidad y potencia que llegan del panel fotovoltaico al inversor.

A continuación, se calculará el rendimiento del inversor. Para ello, utilizando el esquema unifilar anteriormente descrito, se usarán los vatímetros P1 y P2 para conocer la potencia que entra y que sale del inversor, y así saber el rendimiento del mismo.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
800	5%				
800	10%				
800	20%				
800	30%				
800	50%				
800	100%				

Tabla 2. Rendimiento del inversor a 800 W/m².

Una vez conocida la potencia del punto de máxima potencia, se debe calcular los valores de las cargas a utilizar en el ensayo. Como se puede observar en la tabla, el valor de las distintas cargas será un porcentaje del P_{pmp}, y el valor máximo que alcanzarán las cargas en este ensayo será esta potencia. La razón por la que se usan estos porcentajes es para realizar el cálculo del rendimiento del inversor que sigue la siguiente expresión:

$$\eta_{EU} = 0.03 * \eta_{5\%} + 0.06 * \eta_{10\%} + 0.13 * \eta_{20\%} + 0.1 * \eta_{30\%} + 0.48 * \eta_{50\%} + 0.2 * \eta_{100\%}$$

Esta tabla con la que se ha realizado el cálculo del rendimiento del inversor se deberá completar para distintas radiaciones. A continuación se presentarán las tablas a completar para el estudio del rendimiento.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
500	5%				
500	10%				
500	20%				
500	30%				
500	50%				
500	100%				

Tabla 3. Rendimiento del inversor a 500 W/m².

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
200	5%				
200	10%				
200	20%				
200	30%				
200	50%				
200	100%				

Tabla 4. Rendimiento del inversor a 200 W/m².

A continuación, se demostrará el comportamiento del inversor con y sin excedentes. Para ello se usarán dos tablas idénticas con la condición de que la primera se permita volcar energía desde el inversor a la red y la segunda se restrinja este comportamiento.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P4 (W)	P2 (W)	P3 (W)
	25%			
	50%			
	75%			
	100%			
	125%			
	175%			

Tabla 5. Funcionamiento del inversor con excedentes.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P4 (W)	P2 (W)	P3 (W)
	25%			
	50%			
	75%			
	100%			
	125%			
	175%			

Tabla 6. Funcionamiento del inversor sin excedentes.

Queda decir que los valores de “P3” en la tabla 6 deben ser siempre negativos teniendo en cuenta los flujos de potencia escogidos, mientras que los valores de “P2” y “P4” serán siempre positivos. En la tabla 5 sin embargo, el valor de “P3” será positivo en algunos casos. La radiación escogida para esta parte del ensayo es arbitraria y el valor de la carga que debemos colocar depende de la potencia del punto máximo para la radiación escogida.

En las tablas se puede observar que se ha escogido una columna para el valor de la carga y otra columna para el valor que nos devuelve el vatímetro “P4”. Esto se debe a que en la columna de carga el técnico que esté ensayando el inversor pondrá el valor de la carga que le corresponde, pero el vatímetro “P4” será el que muestre el valor real de la potencia que consume la carga.

Por último, debemos asegurarnos de que el inversor no funcione en isla. Es decir, si se produce un fallo en la red de distribución, el inversor debe dejar de funcionar.

P2 antes del fallo	P2 después del fallo

Tabla 7. Funcionamiento del inversor en isla.

Con la explicación dada, si se produce un fallo o una desconexión en la red, la potencia medida a la salida del inversor debe ser nula.

7 DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE ENSAYO

En el siguiente apartado se explicarán todos los elementos que tendrá el sistema eléctrico con el que se trabajará a para la verificación del inversor.

Para ello se explicará que dispositivos se usan para cada elemento del esquema eléctrico que aparece en la ilustración 8. Siguiendo un orden los elementos necesarios para la creación del puesto de ensayo son:

- El panel solar fotovoltaico.
- El inversor.
- La red de distribución.
- Las cargas.
- Aparatos de medida.

7.1 PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

7.1.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN PROGRAMABLE

Para la verificación del comportamiento del inversor se debe usar una fuente de alimentación continua que presente las características de un panel fotovoltaico. Para este trabajo se utilizará una fuente programable de corriente continua.



Ilustración 10. Fuente de alimentación continua programable

Esta fuente programable es capaz de funcionar como un sistema de paneles solares. Para su funcionamiento se debe escribir un programa con las características del panel equivalente al sistema de paneles mencionado. Es decir, la fuente de alimentación programable es capaz de generar la curva tensión – corriente que genera un panel solar fotovoltaico a través de las características del panel equivalente que nosotros introduzcamos dentro del código de programación.

La fuente programable tiene distintas formas de generar la curva tensión – corriente que se necesita para el ensayo. Pero la más común y la que se usará para el ensayo es añadir el código con las características necesarias para el mismo.

Para ello, el departamento de ingeniería eléctrica de la universidad dispone de una tarjeta de memoria en la cual se pueden añadir los programas con los códigos necesarios para el ensayo. Después, solo es necesario meter la tarjeta de memoria en la fuente para que genere la curva deseada.



Ilustración 11. Cara frontal de la fuente de alimentación programable.

Una vez introducida la tarjeta de memoria en la fuente programable, se debe seleccionar el programa deseado dentro de la tarjeta. Es decir, se pueden meter todos los programas deseados en la tarjeta y manejar la memoria de la tarjeta desde la fuente programable. Para ello, debemos escoger en el “display” la función de la fuente que se desea y pulsar el botón “select”.

Una vez hecho esto, se escoge el programa que se va a utilizar en ese momento y se vuelve a pulsar “select”. Finalmente, para que la fuente de alimentación programable transmita la corriente continua simulando un panel solar fotovoltaico, se debe pulsar el botón “output” y a continuación en la pantalla del “display” nos mostrará como la tensión y la corriente generada van en aumento hasta llegar al punto de operación que indique el inversor.

Para poder visualizar en la pantalla la curva de tensión – corriente, se debe pulsar el botón display hasta que esta aparezca. En el caso de que no aparezca la curva, será porque no se ha dado al botón de “output”.

Si se vuelve a pulsar el botón de “output”, la fuente de alimentación dejará de transmitir energía. Esto último será necesario cuando se necesite volver a cambiar de programa.

Para realizar el ensayo se debe tener en cuenta que la fuente programable puede aportar como máximo 1200 W de potencia. Además de esto puede aportar un máximo de 8 A de corriente y una tensión máxima de 150 V.

7.1.2 PVSYST

La fuente programable puede simular cualquier panel fotovoltaico que cumpla las características descritas anteriormente. Para la verificación del inversor se usará en este trabajo un panel fotovoltaico real, que se simulará posteriormente en la fuente. Para realizar la búsqueda de un panel fotovoltaico real para utilizar las características del mismo, se ha utilizado el programa PVSyst [6].

El programa guarda una base de datos con todos los paneles fotovoltaicos que hay o hubo en el mercado, permitiendo así encontrar un panel que se adapte al inversor y a la fuente programable.

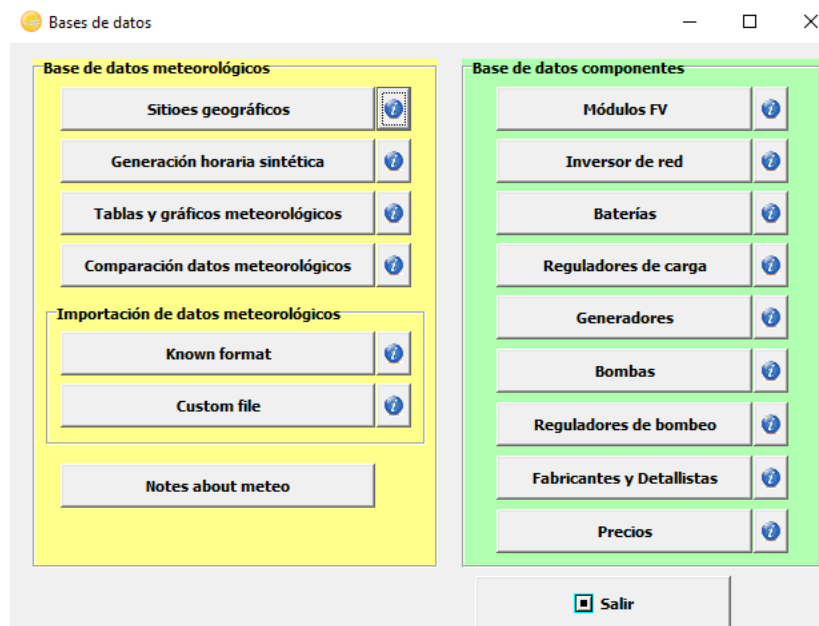


Ilustración 12. Base de datos del programa “Photovoltaic System”.

En la imagen 12 podemos observar que en la base de datos del programa no solo se puede encontrar paneles fotovoltaicos sino que también podemos encontrar más elementos eléctricos que sirven principalmente para el uso de paneles fotovoltaicos.

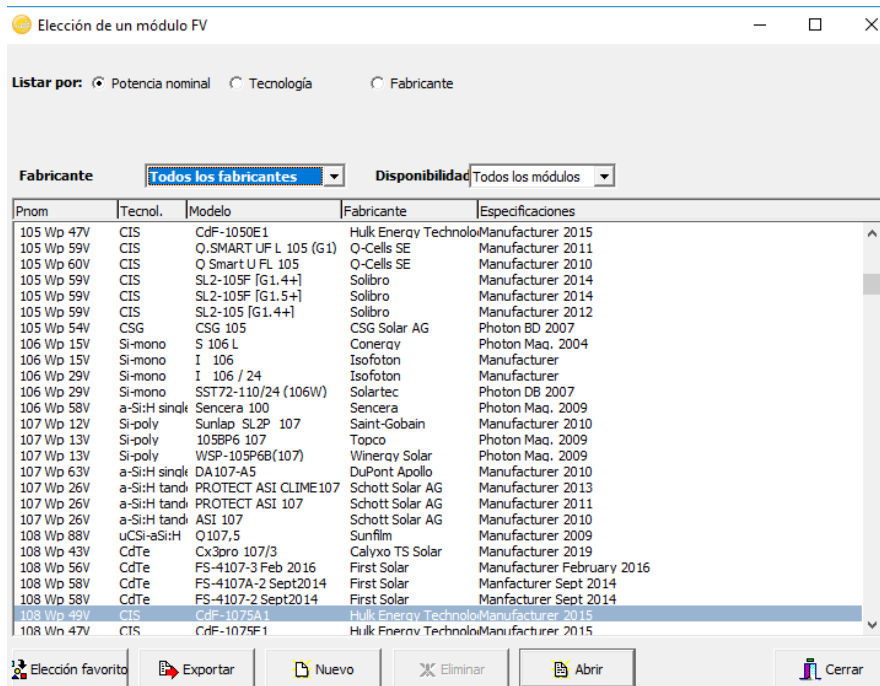


Ilustración 13. Base de datos del programa.

En la ilustración 13 se puede observar la base de datos que tiene el programa PVsyst, en este caso, todos los paneles solares fotovoltaicos ordenados por potencia nominal (aunque en la ilustración aparezcan solo los que entran en la ventana del programa).

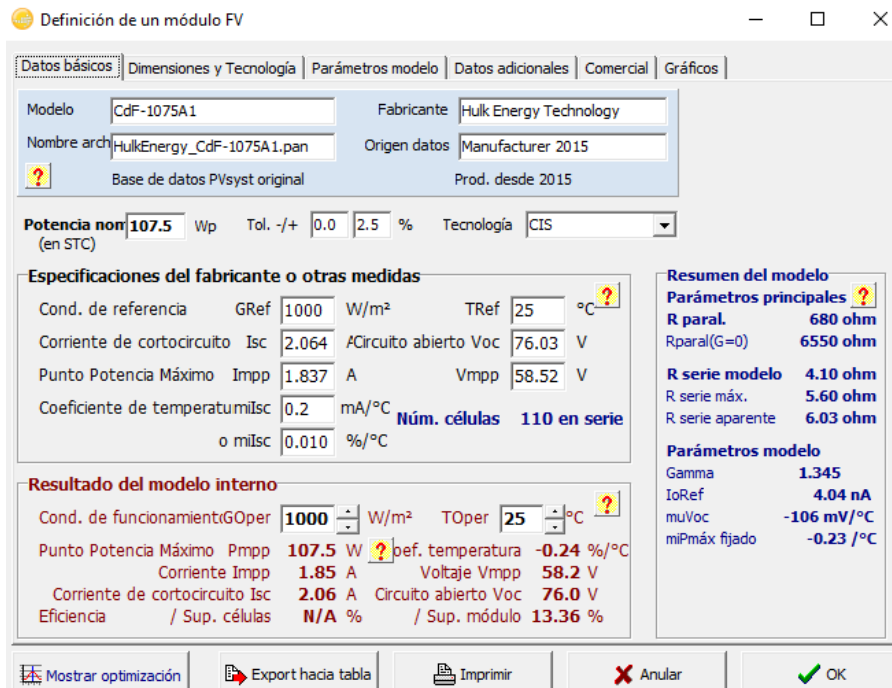


Ilustración 14. Ficha de características del panel fotovoltaico a 1000 W/m² y a 25 grados.

El programa sirve para conocer las características de un panel fotovoltaico para cualquier valor de la radiación, ya que entrega la información del fabricante y la información del modelo interno, la cual de la última es de donde se han obtenido todos los valores necesarios.

Con las características de tensión e intensidad que nos puede aportar la fuente programable, se ha buscado primero la mejor distribución para entregar la máxima potencia posible sin sobrepasar ninguno de los dos parámetros mencionados. La distribución mencionada es la siguiente.

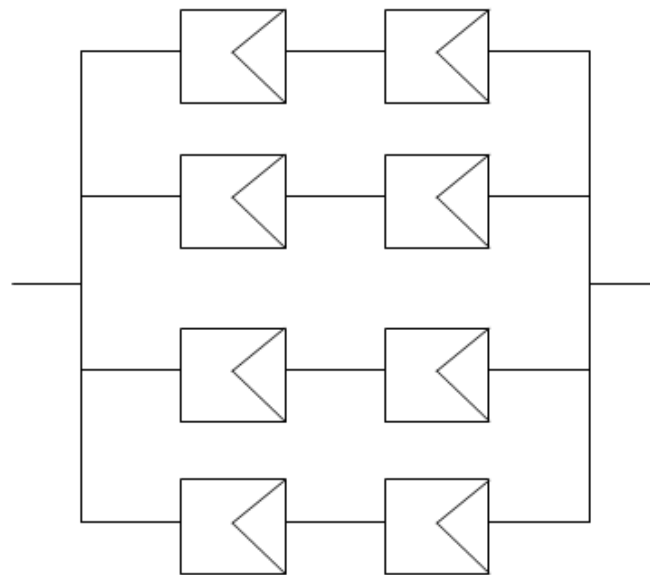


Ilustración 15. Distribución de los paneles fotovoltaicos para la simulación.

Siguiendo esta distribución junto con las condiciones de la fuente programable y el inversor, el panel fotovoltaico real escogido que nos aporte la máxima potencia posible, es el modelo CdF – 1075A1 de la marca Hulk Energy Technologies.

Las características del panel con una radiación de 1000 W/m^2 son 107.5 W la potencia máxima, 2 A la corriente de cortocircuito, 75 V la tensión en vacío, 1.85 A la corriente del punto de máxima potencia y 58.2 V la tensión del punto de máxima potencia. Calculando las características para el panel equivalente, para una radiación de 1000 W/m^2 , serían 860 W de potencia máxima, 8 A la corriente de cortocircuito, 150 V la tensión en vacío, 7.4 A la corriente del punto de máxima potencia y 116.4 V la corriente del punto de máxima potencia para la distribución de los paneles escogida anteriormente.

El resto de características de los paneles solares fotovoltaicos necesarios se muestran a continuación.

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Dimensiones y Tecnología | Parámetros modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: CdF-1075A1 Fabricante: Hulk Energy Technology
Nombre arch: HulkEnergy_CdF-1075A1.pan Origen datos: Manufacturer 2015
Base de datos PVsyst original Prod. desde 2015

Potencia nom: 107.5 Wp Tol. +/-: 0.0 2.5 % Tecnología: CIS

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Cond. de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	2.064	A	Circuito abierto Voc	76.03	V
Punto Potencia Máximo	Imp	1.837	A	Vmpp	58.52	V
Coeficiente de temperatura	αsc	0.2	mA/°C	Núm. células	110 en serie	
	αm	0.010	%/°C			

Resultado del modelo interno

Cond. de funcionamiento	GOper	800	W/m ²	TOper	25	°C
Punto Potencia Máximo	Pmpp	86.4	W	Def. temperatura	-0.24 %/°C	
Corriente	Imp	1.47	A	Voltaje Vmpp	58.6 V	
Corriente de cortocircuito	Isc	1.65	A	Circuito abierto Voc	75.1 V	
Eficiencia	/ Sup. células	N/A	%	/ Sup. módulo	13.42 %	

Resumen del modelo

Parámetros principales

R paral. 680 ohm
Rparal(G=0) 6550 ohm

R serie modelo 4.10 ohm
R serie máx. 5.60 ohm
R serie aparente 6.03 ohm

Parámetros modelo

Gamma 1.345
IoRef 4.04 nA
μVoc -106 mV/°C
miPmáx fijado -0.23 /°C

Mostrar optimización Export hacia tabla Imprimir Anular OK

Ilustración 16. Parámetros del panel fotovoltaico a 800 W/m² y a 25 grados.

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Dimensiones y Tecnología | Parámetros modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: CdF-1075A1 Fabricante: Hulk Energy Technology
Nombre arch: HulkEnergy_CdF-1075A1.pan Origen datos: Manufacturer 2015
Base de datos PVsyst original Prod. desde 2015

Potencia nom: 107.5 Wp Tol. +/-: 0.0 2.5 % Tecnología: CIS

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Cond. de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	2.064	A	Circuito abierto Voc	76.03	V
Punto Potencia Máximo	Imp	1.837	A	Vmpp	58.52	V
Coeficiente de temperatura	αsc	0.2	mA/°C	Núm. células	110 en serie	
	αm	0.010	%/°C			

Resultado del modelo interno

Cond. de funcionamiento	GOper	600	W/m ²	TOper	25	°C
Punto Potencia Máximo	Pmpp	64.9	W	Def. temperatura	-0.24 %/°C	
Corriente	Imp	1.10	A	Voltaje Vmpp	58.9 V	
Corriente de cortocircuito	Isc	1.24	A	Circuito abierto Voc	74.0 V	
Eficiencia	/ Sup. células	N/A	%	/ Sup. módulo	13.45 %	

Resumen del modelo

Parámetros principales

R paral. 680 ohm
Rparal(G=0) 6550 ohm

R serie modelo 4.10 ohm
R serie máx. 5.60 ohm
R serie aparente 6.03 ohm

Parámetros modelo

Gamma 1.345
IoRef 4.04 nA
μVoc -106 mV/°C
miPmáx fijado -0.23 /°C

Mostrar optimización Export hacia tabla Imprimir Anular OK

Ilustración 17. Parámetros del panel fotovoltaico a 600 W/m² y a 25 grados.

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Dimensiones y Tecnología | Parámetros modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: CdF-1075A1 Fabricante: Hulk Energy Technology
Nombre arch: HulkEnergy_CdF-1075A1.pan Origen datos: Manufacturer 2015
Base de datos PVsyst original Prod. desde 2015

Potencia nom: 107.5 Wp Tol. +/-: 0.0 2.5 % Tecnología: CIS

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Cond. de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	2.064	A	Circuito abierto Voc	76.03	V
Punto Potencia Máximo	Imp	1.837	A	Vmpp	58.52	V
Coeficiente de temperatura	mIsc	0.2	mA/°C	Núm. células	110 en serie	
	o mIsc	0.010	%/°C			

Resultado del modelo interno

Cond. de funcionamiento	GOper	500	W/m ²	TOper	25	°C
Punto Potencia Máximo	Pmpp	54.1	W	Def. temperatura	-0.25	%/°C
	Corriente Imp	0.92	A	Voltaje Vmpp	58.9	V
Corriente de cortocircuito	Isc	1.03	A	Circuito abierto Voc	73.3	V
Eficiencia	/ Sup. células	N/A	%	/ Sup. módulo	13.46	%

Resumen del modelo

Parámetros principales

R paral. 680 ohm
Rparal(G=0) 6550 ohm
R serie modelo 4.10 ohm
R serie máx. 5.60 ohm
R serie aparente 6.03 ohm

Parámetros modelo

Gamma 1.345
IoRef 4.04 nA
muVoc -106 mV/°C
miPmáx fijado -0.23 /°C

Mostrar optimización Export hacia tabla Imprimir Anular OK

Ilustración 18. Parámetros del panel fotovoltaico a 500 W/m² y a 25 grados.

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Dimensiones y Tecnología | Parámetros modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: CdF-1075A1 Fabricante: Hulk Energy Technology
Nombre arch: HulkEnergy_CdF-1075A1.pan Origen datos: Manufacturer 2015
Base de datos PVsyst original Prod. desde 2015

Potencia nom: 107.5 Wp Tol. +/-: 0.0 2.5 % Tecnología: CIS

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Cond. de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	2.064	A	Circuito abierto Voc	76.03	V
Punto Potencia Máximo	Imp	1.837	A	Vmpp	58.52	V
Coeficiente de temperatura	mIsc	0.2	mA/°C	Núm. células	110 en serie	
	o mIsc	0.010	%/°C			

Resultado del modelo interno

Cond. de funcionamiento	GOper	400	W/m ²	TOper	25	°C
Punto Potencia Máximo	Pmpp	43.3	W	Def. temperatura	-0.25	%/°C
	Corriente Imp	0.74	A	Voltaje Vmpp	58.8	V
Corriente de cortocircuito	Isc	0.83	A	Circuito abierto Voc	72.5	V
Eficiencia	/ Sup. células	N/A	%	/ Sup. módulo	13.46	%

Resumen del modelo

Parámetros principales

R paral. 680 ohm
Rparal(G=0) 6550 ohm
R serie modelo 4.10 ohm
R serie máx. 5.60 ohm
R serie aparente 6.03 ohm

Parámetros modelo

Gamma 1.345
IoRef 4.04 nA
muVoc -106 mV/°C
miPmáx fijado -0.23 /°C

Mostrar optimización Export hacia tabla Imprimir Anular OK

Ilustración 19. Parámetros del panel fotovoltaico a 400 W/m² y a 25 grados.

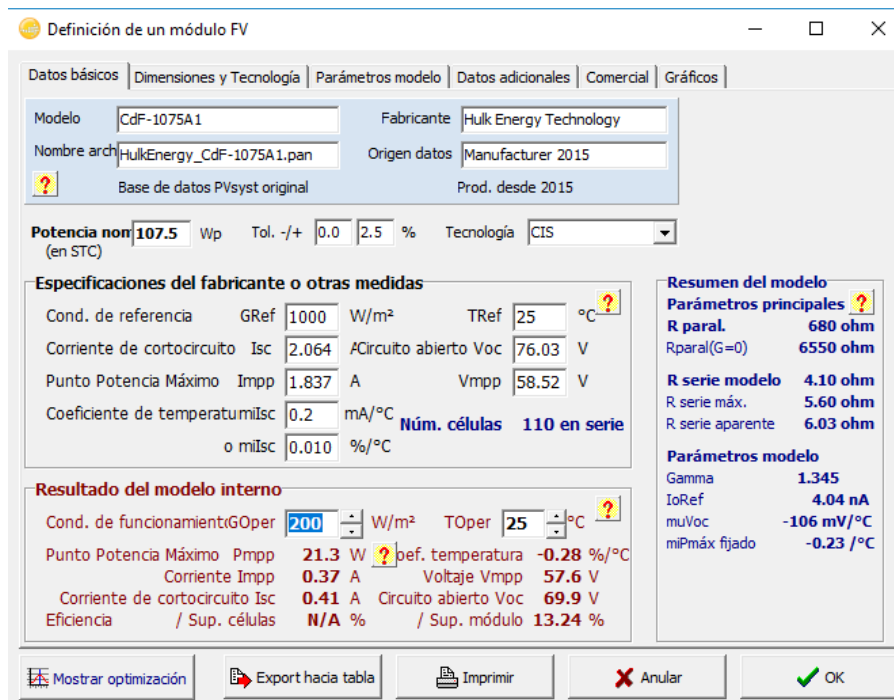


Ilustración 20. Parámetros del panel fotovoltaico a 200 W/m² y a 25 grados.

Para poder realizar correctamente el código que se insertará en la fuente programable se han utilizado los datos mostrados en las ilustraciones mostradas en este apartado. En concreto, los datos que aparecen en el apartado “Resultado del modelo interno” ya que nos permite conocer estos parámetros variando la radiación solar.

También hay que tener en cuenta que las características del panel fotovoltaico equivalente, el cual es el que se programará para que la fuente de alimentación para que lo simule, no son las que aparecen en las ilustraciones, ya que el panel solar fotovoltaico equivalente es el conjunto de paneles mostrado anteriormente. Para conocer los parámetros de este panel hay que sumar la corriente que circula por cada rama y sumar la tensión del número de paneles en una rama. De esta manera, habrá que multiplicar las corrientes de cortocircuito y de punto de máxima potencia por cuatro, y la tensión de vacío y la tensión de punto máximo de potencia por dos.

7.2 INVERSOR HUAWEI SUN2000L-2KTL

En este trabajo se va a ensayar el inversor de la marca Huawei Sun2000L-2KTL. El inversor es capaz de convertir hasta 2000 W de potencia de corriente continua a corriente alterna y necesita una tensión de 90 V mínimo desde la corriente alterna para funcionar. También es necesario que el inversor esté conectado a la red para funcionar.

Dentro de las funciones que tiene, el inversor puede conectarse a la red y mostrar el flujo y el valor de las potencias presentes en la instalación dentro de la aplicación de Huawei.

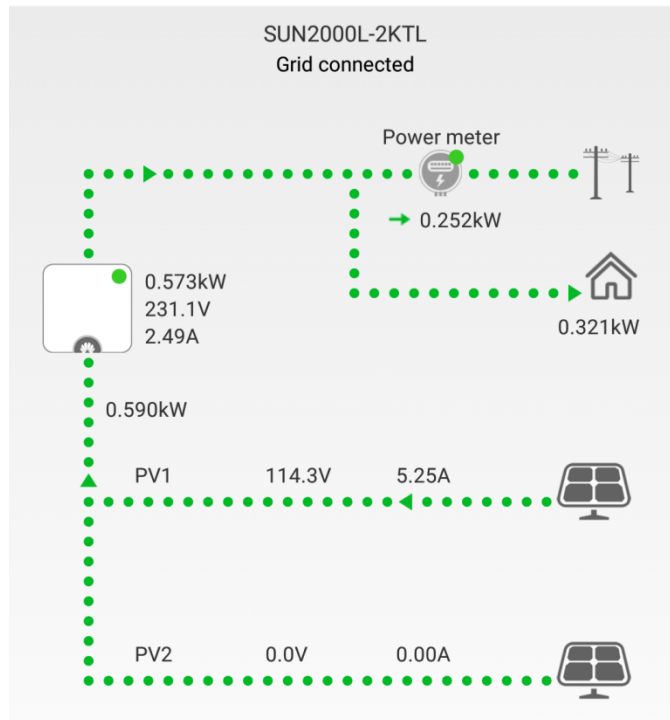


Ilustración 21. Esquema eléctrico desde la aplicación de Huawei.

Dentro de este esquema, se puede observar que se pueden disponer de dos paneles fotovoltaicos. Esto se debe a que el inversor tiene dos entradas por las cuales se puede conectar un panel o conjunto de paneles fotovoltaicos por cada entrada. De esta manera, si se dispone de una instalación con paneles fotovoltaicos en una vivienda, se puede disponer de un conjunto de paneles en una dirección y otro conjunto de paneles en otra para así aprovechar mejor la radiación solar durante el día.

Es aquí, en la aplicación de la marca Huawei, donde se pueden especificar las restricciones que se quieren a aplicar al inversor. Es decir, la aplicación no sirve únicamente para observar los flujos de potencia del circuito eléctrico, sino que también sirve para controlar el funcionamiento y comportamiento del mismo.



Ilustración 22. Huawei Sun2000L-2KTL.



Ilustración 23. Estructura para el montaje del inversor con el inversor colocado.

El montaje y uso del inversor de la marca Huawei es sencillo. El inversor tiene un cable de alimentación para conectarse a la red (cuando se vaya a realizar el ensayo de desconexión a la red, el procedimiento será desconectar el cable de alimentación de la red). También, tiene una entrada positiva y negativa para la entrada de la corriente continua del panel solar fotovoltaico. Esta entrada será la que se conecte con la fuente de alimentación programable que transmita la corriente continua que el inversor deba transformar.

Para la salida el inversor cuenta con tres salidas, una por fase, que se deberán conectar a la red para que el inversor pueda volcar los excedentes de energía a la red de distribución. Para que el inversor controle la entrega de los excedentes de energía, tiene un pequeño transformador que sirve para medir la intensidad, potencia y frecuencia que sale del transformador. En el caso de que pongamos la restricción de que no pueda volcar los excedentes de potencia a la red de distribución, este transformador será el encargado de controlar la salida de potencia del inversor para que el mismo pueda cumplir la restricción.

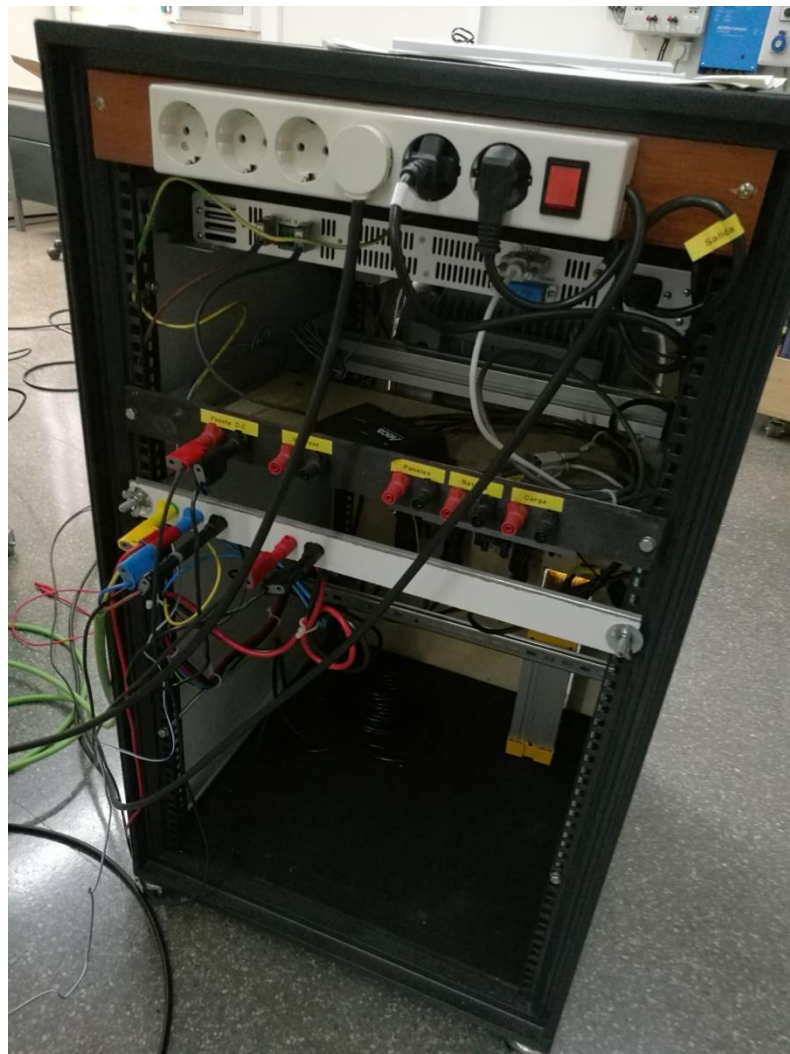


Ilustración 24. Conexiones del inversor.

En la ilustración 24 se pueden observar las conexiones del inversor en las dos filas de la parte inferior. En la primera fila se pueden conectar los dos conjuntos de paneles fotovoltaicos, un conjunto de baterías y dos conjuntos de cargas. En la fila siguiente tenemos la salida de corriente alterna.

Además, se puede controlar observando tres luces verdes que tiene el inversor en la parte frontal (en la ilustración 22 del inversor se puede observar una de estas luces) las conexiones que tiene el inversor. Las luces muestran si existe conexión con el panel fotovoltaico, la red de distribución y conexión a internet, esta última necesaria para poder controlar el inversor desde la aplicación.

7.3 RED DE DISTRIBUCIÓN

Para el puesto de ensayo es necesario una toma de corriente de la red de distribución. Como se ha explicado anteriormente, la toma nos servirá para poder volcar los excedentes de energía. Para poder realizar esta acción, el inversor dispone de una salida trifásica por la que sale la energía transformada del panel fotovoltaico.

Además, la toma nos sirve para alimentar aquellos dispositivos que requieran de alimentación para poder funcionar. El inversor de la marca Huawei necesita de esta alimentación para poder funcionar, y además, sirve para controlar si el inversor está trabajando en isla, comportamiento que el inversor no debe tener, para detener el funcionamiento del mismo. La fuente de alimentación programable también requiere de alimentación para poder generar la curva de tensión – corriente que requiere el ensayo para poder simular un panel fotovoltaico.

Por ello, es necesaria una toma directa de la red de distribución al puesto de ensayo para poder demostrar el comportamiento de un inversor.

7.4 CARGAS

Para realizar el ensayo se ha dispuesto de material del laboratorio. Este material se compone de una caja de resistencias para poder realizar el ensayo con consumo, los vatímetros y los cables que conectan todos los aparatos.

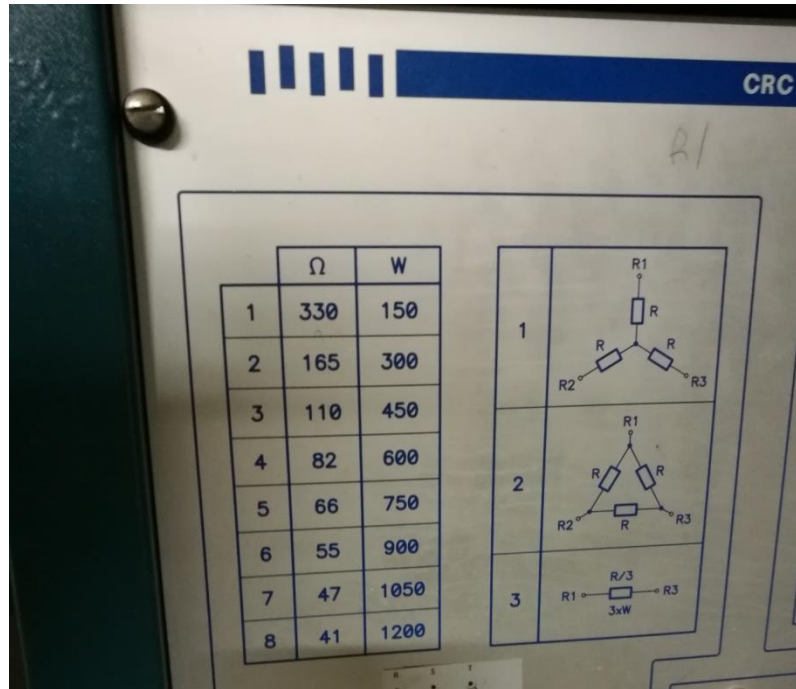


Ilustración 25. Caja de resistencias.

Se puede observar el valor de las resistencias y el valor de la potencia que consumen. De hecho, para la obtención de ese valor se ha aplicado la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Donde V es constante y de valor 230 V. Para poder obtener distintos valores, y siguiendo la misma ecuación, se han colocado las tres resistencias en serie o en paralelo.

7.5 APARATOS DE MEDIDA

Para saber el valor de la potencia en los puntos de interés se han utilizado cuatro vatímetros digitales del laboratorio. Los vatímetros han sido colocados tal y como se muestra en los circuitos eléctricos anteriores.



Ilustración 26. Vatímetros del equipo de laboratorio.

Los vatímetros digitales del equipo de laboratorio tienen la capacidad de conectarse en cualquier punto del circuito eléctrico para conocer la potencia del mismo donde haya sido conectado. Además, al ser un vatímetro digital y al haber sido utilizado para anteriores prácticas el uso del mismo será más sencillo a la hora de hacer el ensayo.

8 RESULTADOS DEL ENSAYO

Una vez realizado el ensayo del protocolo de verificación del inversor, con el inversor descrito en el apartado anterior y bajo las condiciones impuestas por el equipo de laboratorio se llega al resultado que nos muestra el comportamiento del inversor.

Siguiendo los pasos del protocolo descrito, se comienza con el punto de máxima potencia que el inversor debe alcanzar. Medimos la potencia obtenida y el tiempo que tarda en obtenerla.

RADIACIÓN (W/m ²)	V _{mp} (V)	I _{mp} (A)	P _{mp} (W)	Tiempo (s)
1000	114	7.033	801.72	224.33
800	114	5.30	604.20	176.82
600	114	3.99	454.86	135.62
500	110	3.48	382.80	112.99
400	110	2.82	310.20	93.11
200	111	1.44	159.84	49.45

Tabla 8. Punto de máxima potencia ensayado.

Las conclusiones obtenidas a partir de la tabla, a parte de la potencia máxima obtenida con las condiciones de laboratorio para distintas radiaciones, son que el tiempo que tarda en obtener el punto de máxima potencia es mayor cuanto mayor es la potencia a convertir.

A continuación, se estudia el rendimiento del inversor para distintas radiaciones.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
800	50	588	571	17	97.11
800	75	591	574	17	97.12
800	150	588	571	17	97.11
800	200	591	574	17	97.12
800	300	590	573	17	97.12
800	600	586	569	17	97.11

Tabla 9. Rendimiento del inversor a 800 W/m² ensayado.

Hecho el ensayo se puede observar que la potencia perdida en el inversor es la misma para distintos valores de la carga, así como la potencia que llega al inversor, y como conclusión se obtiene que el rendimiento del inversor, para distintas cargas, sea constante.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
500	50	376	363	13	96.5
500	75	375	363	12	96.8
500	150	375	362	13	96.5
500	225	374	362	12	96.8
500	350	373	361	12	96.8

Tabla 10. Rendimiento del inversor a 500 W/m² ensayado.

En la tabla se puede observar que no hay ninguna carga equivalente a la carga con valor del 5% de la potencia máxima. Esto se debe a que el equipo de laboratorio no cuenta con cargas de valor tan bajo (en potencia) y no se ha podido realizar la medición con ese valor. Aun así se puede observar que llegamos a la misma conclusión que en la tabla anterior.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P1 (W)	P2 (W)	P1-P2 (W)	RENDIMIENTO (%)
200	50	151	143	8	94.7
200	75	152	144	8	94.7
200	150	153	145	8	94.8

Tabla 11. Rendimiento del inversor a 200 W/m² ensayado.

Se puede observar que en la tabla faltan más valores que en la anterior ya que el equipo de laboratorio no es capaz de trabajar con valores de potencia tan bajos.

Además de las conclusiones obtenidas en las distintas tablas, se observa que el rendimiento del inversor es mayor a medida que la radiación que llega al panel aumenta. Esto se debe a que las pérdidas de potencia que se producen en el inversor no aumentan de la misma manera a la que aumenta la potencia del panel para distintas radiaciones llegando así a rendimientos mayores.

Se comprobará ahora el comportamiento del inversor cuando carece de restricciones y cuando trabaja con una restricción. En este caso la restricción será, como se ha explicado anteriormente, no volcar los excedentes de energía a la red de distribución.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P4 (W)	P2 (W)	P3 (W)
800	150	190	572	382
800	300	335	569	234
800	450	489	570	81
800	600	636	570	-66
800	750	789	573	-216
800	1050	1097	572	-525

Tabla 12. Funcionamiento del inversor con excedentes ensayado.

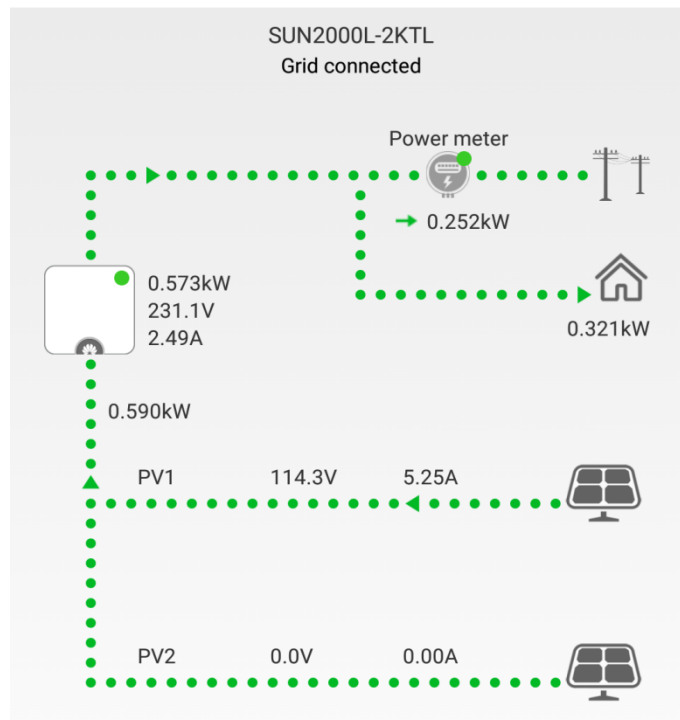


Ilustración 27. Funcionamiento del inversor con excedentes.

RADIACIÓN (W/m ²)	CARGA (W)	P4 (W)	P2 (W)	P3 (W)
800	150	164	144	-20
800	300	325	303	-22
800	450	476	458	-18
800	600	636	571	-65
800	750	796	570	-226
800	1050	1100	573	-527

Tabla 13. Funcionamiento del inversor sin excedentes ensayado.

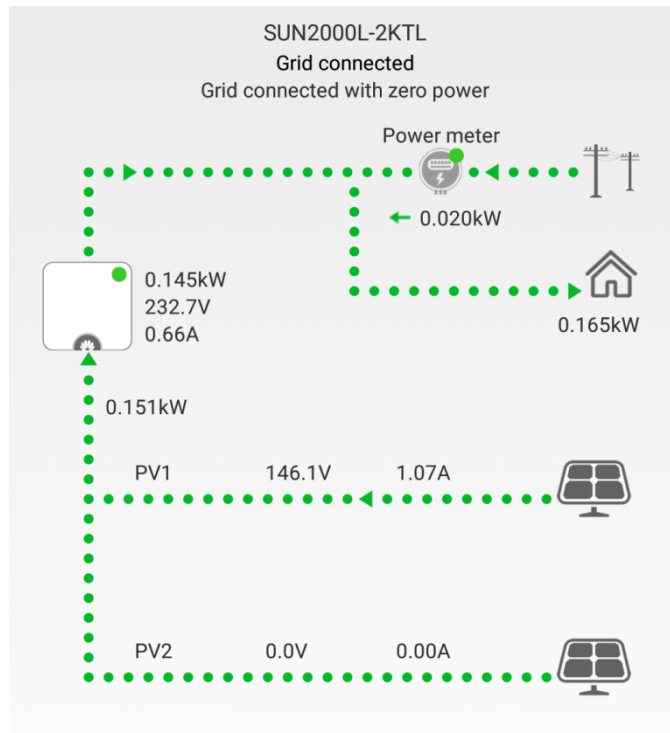


Ilustración 28. Funcionamiento del inversor sin excedentes.

Con ambas tablas se demuestra que el inversor al funcionar sin excedentes no trabaja en el punto de máxima potencia con el fin de entregar la energía necesaria para el consumo de las cargas.

La interpretación que se obtiene a partir de esta última tabla es que la suma de la potencia que sale del inversor más la potencia que entra de la red (teniendo en cuenta que las potencias salientes son valores positivos y las potencias que entran valores negativos como se ha explicado anteriormente en el esquema eléctrico unifilar) es la potencia que consumen las cargas. En la tabla en la que se ensaya el funcionamiento del inversor con excedentes, esto ocurre así también, teniendo en cuenta los signos negativos.

Cuando la carga tiene un valor menor que la potencia máxima que puede entregar el inversor, la red entrega energía al sistema. Esto se debe a que el inversor necesita la energía de la red para poder funcionar, por lo que parte de la potencia que necesita para el consumo de las cargas sale de la red aunque el inversor pudiese entregar la potencia él solo.

Finalmente, para concluir con el ensayo del inversor, falta por saber si el inversor no funciona en isla.

P2 antes del fallo (W)	P2 después del fallo (W)
568	0

Tabla 14. Funcionamiento en isla del inversor ensayado.

Se demuestra así que el inversor no es capaz de funcionar en isla, y que si ocurre un fallo o una desconexión de la red, el inversor deja de funcionar.

9 PLANIFICACIÓN

9.1 DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

La primera tarea es la preparación. La duración de esta tarea es de 43 días y se compone de recibir la documentación, formarse para realizar el proyecto y la recepción del inversor que se va a ensayar. Cuando se hayan realizado todas las actividades se obtendrá el hito “información para la realización del trabajo”.

La segunda tarea es la definición de objetivos del proyecto, que tiene una duración de 5 días. El resultado de la tarea es obtener el hito “Objetivos definidos”.

La siguiente tarea tiene una duración aproximada de 26 días y es el procedimiento y desarrollo del proyecto. A partir de esta tarea se realizan las actividades de selección de equipo de laboratorio para el ensayo, selección del panel fotovoltaico para la simulación en la fuente programable y montaje del equipo y ensayo. Se obtiene el hito “Resultados del ensayo”.

Finalmente queda la tarea de redacción del trabajo cuya duración es aproximadamente de 4 días, y el hito final es “Trabajo redactado”.

9.2 DIAGRAMA GANTT DEL PROYECTO

La duración total del proyecto es de 78 días. La fecha de comienzo es el 3 de abril de 2019 y acaba el 16 de julio.

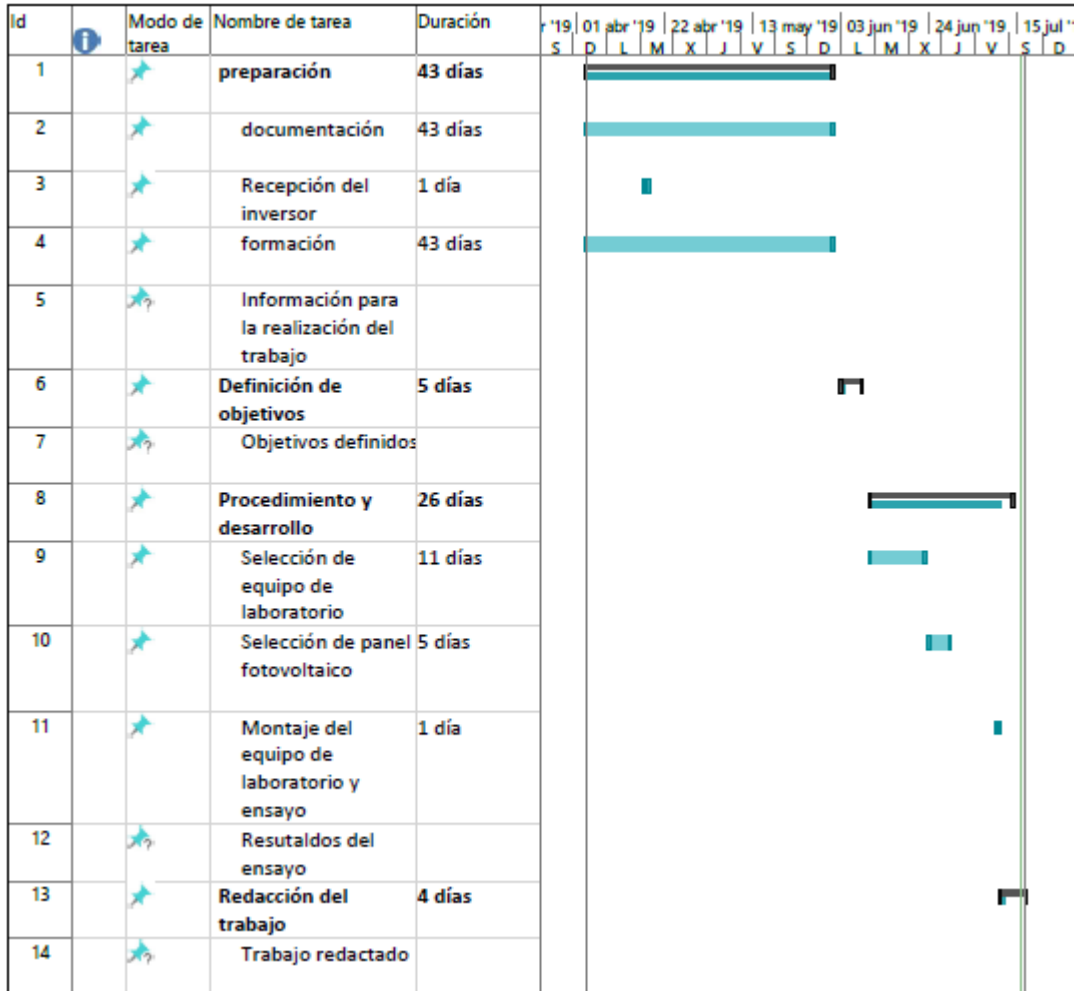


Ilustración 29. Diagrama Gantt del proyecto.

10 PRESUPUESTO EJECUTADO DEL PROYECTO

10.1 AMORTIZACIONES

Para el cálculo de las amortizaciones en el proyecto únicamente tendremos en cuenta el coste del inversor, el coste del ordenador utilizado y el coste del equipo de laboratorio.

Sabiendo el coste y la vida útil de cada concepto, y sabiendo el uso de cada concepto dentro del proyecto, calculamos el subtotal de las amortizaciones.

AMORTIZACIONES	coste (€)	vida útil (horas)	uso (horas)	total (€)
Ordenador	800,00	43800,00	200,00	3,65
Inversor	841,95	43800,00	10,00	0,19
equipo de laboratorio	298,87	87600,00	10,00	0,03
SUBTOTAL AMORTIZACIONES (€)				3,88

Tabla 15. Amortizaciones.

10.2 HORAS INTERNAS

Para la realización del trabajo se ha necesitado un ingeniero técnico y un ingeniero superior. Teniendo en cuenta las horas realizando el proyecto se puede obtener el subtotal de horas internas.

HORAS INTERNAS	horas de trabajo	coste horario (€)	total (€)
Ingeniero superior	50	50	2500
Ingeniero técnico	200	25	5000
SUBTOTAL HORAS INTERNAS (€)			7500

Tabla 16. Horas internas.

10.3 GASTO TOTAL EJECUTADO

Teniendo en cuenta las amortizaciones y las horas internas, además de un porcentaje de imprevistos, se obtiene el gasto total del proyecto.

	Coste (€)
Amortizaciones	3,88
Horas internas	7500,00
subtotal	7503,88
Imprevistos (2%)	150,08
GASTO TOTAL	7653,96

Tabla 17. Gasto total del proyecto.

11 CONCLUSIONES

En este apartado se van a presentar las conclusiones que se obtienen a partir del resultado del trabajo teórico y práctico que se realiza en este trabajo.

Para la realización del mismo se ha presentado una fuente programable para producir la curva de tensión – intensidad necesaria para hacer el ensayo, cuya base de programación es muy básica. También se presenta el programa PVSyst, necesario para la búsqueda de un panel fotovoltaico real que cumpla las características necesarias para el ensayo.

Además, se introduce la creación de un protocolo de verificación que demuestra de una forma clara el funcionamiento del inversor para las distintas funciones, con la aplicación o no de restricciones. El protocolo también comprueba cuál es el rendimiento del inversor para distintas radiaciones y demuestra que no puede trabajar cuando se desconecta de la red de distribución.

Finalmente, en este trabajo se demuestra cómo, con el equipo de laboratorio utilizado, el inversor de la marca Huawei Sun2000L-2KTL cumple con el funcionamiento deseado en un inversor.

Además se muestra el uso de la aplicación de Huawei Fusion Home que facilita el flujo de potencia de nuestro circuito eléctrico, aunque para la realización del ensayo se hayan utilizado los vatímetros del equipo de laboratorio.

12 BIBLIOGRAFÍA

[1] Real Decreto Ley 244/2019.

[2] Red Eléctrica Española, << Estadísticas del sistema español eléctrico>>, [En línea]: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/balance-diario> [Último acceso 4 de junio de 2019].

[3] Barbercoll, << Autoconsumo solar>>, [En línea]: <https://www.barbercoll.com/que-es-el-autoconsumo-solar/> [Último acceso 18 de julio de 2019].

[4] AutoSolar, << Curva tensión – corriente de un panel solar>>, [En línea]: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga> [Último acceso 16 de junio de 2019].

[5] AutoSolar, << Curva de potencia de un panel solar>>, [En línea]: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-mppt> [Último acceso 16 de junio de 2019].

[6] PVSyst, [En línea]: <https://www.pvsyst.com/> [Último acceso 26 de junio de 2019].

A. A. Bayod, “Sistemas Fotovoltaicos”. Prensas universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-92521-94-4. 2009.

A. Medina, J. de la Casa, F. Jurado “Generación de Energía Eléctrica con Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red”. Printex SL. ISBN 978-84-92669-20-2. Año 2010.

ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE

Real Decreto Ley 244/2019, de 5 de abril, en el cual se definen las nuevas modalidades de autoconsumo, incluyendo el nuevo concepto de autoconsumo colectivo, y por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de dichas modalidades de autoconsumo de energía eléctrica.

Ley 24/2013, de 26 de diciembre, para la regulación del Sector Eléctrico.

Real Decreto Ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes de para la transición energética y la protección de los consumidores.

IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms Seventh Edition, IEEE, IEEE Std 100-2000, 2000

Real Decreto-ley 15/2018 de medidas urgentes para la transición energética y la protección de consumidores.

Real Decreto 900/2015 por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y producción de autoconsumo.

Real Decreto 1955/2000 por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

Real Decreto 1699/2011 por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia.

Real Decreto 222/2008 por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica.

Real Decreto 842/2002 por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico de baja tensión.

Real Decreto 337/2014 por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23.

Real Decreto 1110/2007 por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.

Real Decreto Legislativo 2/2004 por el que se aprueba el texto refundido de la Ley Reguladora de las Haciendas Locales.

Ley 49/1960 sobre la propiedad horizontal.

ANEXO II: CÓDIGO

Código de programación usado para la realización de los ensayos.

Funcionamiento del panel para una radiación de 1000 W/m².

```
#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.
```

```
#Curva 1000W/m2 -- 25 grados
```

```
PV
```

```
IMPP 7.40
```

```
I 8.00
```

```
UMPP 116.40
```

```
U 150.00
```

```
#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 861.36 W A 25 GRADOS.
```

```
RUN
```

Funcionamiento del panel para una radiación de 800 W/m².

```
#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.
```

```
#Curva 800W/m2 -- 25 grados
```

```
PV
```

```
IMPP 5.88
```

```
I 6.6
```

```
UMPP 117.2
```

```
U 150
```

```
#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 689.136 W A 25 GRADOS.
```

```
RUN
```

Funcionamiento del panel para una radiación de 600 W/m².

#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.

#Curva 600W/m2 -- 25 grados

PV

IMPP 4.40

I 4.96

UMPP 117.8

U 148.00

#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 518.32 W A 25 GRADOS.

RUN

Funcionamiento del panel para una radiación de 500 W/m².

#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.

#Curva 500W/m2 -- 25 grados

PV

IMPP 3.68

I 4.12

UMPP 117.8

U 146.6

#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 433.504 W A 25 GRADOS.

RUN

Funcionamiento del panel para una radiación de 400 W/m².

#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.

#Curva 400W/m2 -- 25 grados

PV

IMPP 2.96

I 3.32

UMPP 117.6

U 145

#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 348.096 W A 25 GRADOS.

RUN

Funcionamiento del panel para una radiación de 200 W/m².

#Script Modulo fotovoltaico. Marca Hulk Energy Technology. Modelo cdf-1075A1.

#Curva 200W/m2 -- 25 grados

PV

IMPP 1.48

I 1.64

UMPP 115.2

U 139.8

#LA POTENCIA MAXIMA ESPERADA ES DE 170.496 W A 25 GRADOS.

RUN

ANEXO III: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS

Datasheet de la fuente de alimentación programable:

SPECIFICATIONS - COMMON TO ALL DCP MODELS

DC OUTPUT	
Operation Modes	Constant Voltage, Constant Current, Constant Power, Constant Resistance
Programming Accuracy	$\pm 0.05\% + 2\text{ mV}$
Voltage Regulation	$\pm 0.05\% + 2\text{ mV}$
Current Regulation	$\pm 0.1\% + 2\text{ mA}$
Dynamic Response	$< 2\text{ ms (typ.)}$
Ripple	$< 0.2\% \text{ (typ.)}$
Stability	$\pm 0.05\%$
Line Regulation	$< \pm 0.1\% + 2\text{ mV}$
Load Regulation	$< \pm 0.1\% + 2\text{ mV}$
Isolation	3000V

MEASUREMENTS	
Voltage Range	See Model Tables
Accuracy	$\pm 0.05\% + 2\text{ mV}$
Current Range	See Model Tables
Accuracy	$\pm 0.1\% + 2\text{ mA}$
Power Range	See Model Tables
Accuracy	$\pm 0.2\% + 4\text{ mW}$

PROTECTION MODES	
Protection Modes	Over Current
	Over Voltage
	Over Power
	Over Temperature
OVP Range	0 - 120% Vmax

INTERFACE OPTIONS	
Available Type	USB, LAN, GPIB, RS232 or RS485
Command Syntax	ASCII
GPIB Compatibility	IEEE488.1

DIGITAL & ANALOG I/O	
Digital Inputs	Analog I/O Enable Output Disable (+5V to +10V)
Digital Outputs	Output Enabled Status
Analog Inputs	Set V, I, OVP / 0-5 V or 0-10 V for Full Scale / Isolated
Analog Outputs	Monitor Vset, Vmeas, Iset, Imeas, Pmeas / 0-5 V or 0-10 V for Full Scale / Isolated

POWER INPUT	
AC Voltage	90 -264 Vac
Optional 3 Phase Inputs	208V, 400V, 440V, 480V $\pm 10\%$
Frequency	47-63 Hz standard, 400Hz Optional
Power Factor Correction	Active
DC Voltage	250Vdc - 750Vdc Optional
Efficiency	up to 94%

DIMENSIONS & WEIGHT	
Dimensions (H x W x D)	
1U Models	44.5 x 483 x 440mm / 1.75" x 19" x 17.3"
2U Models	89 x 483 x 440mm / 3.5" x 19" x 17.3"
Weight (net)	7 kg / 15.4 lbs
shipping	10 kg / 22 lbs

ENVIRONMENTAL	
Cooling	Fan Cooled
Operating Temperature	0 to 50 °C / 32 to 122 °F
Storage Temperature	-20 to 70 °C / -4 to 158 °F
Humidity	$< 80\%$, non-condensing
Altitude (max.)	2000 m / 6500 feet
Vibration Resistance	10 - 55 Hz, 1 minute, 2 G XYZ
Shock	$< 20\text{ G}$

SAFETY & REGULATORY	
Safety Standard	EN 60950
EMC Emissions	EN61000-6-4:2007
EMC Immunity	EN61000-6-2:2005
Product Category	EN61010-1:2006 (Measurement, Laboratory and Control Equipment)
Approvals	CE Mark

MISCELLANEOUS FEATURES AND OPTIONS	
PV Simulation Mode	I-V Curve, MPP
Master/Slave Interface	Active Parallel Mode, Max. 20 kW
Option -SD	SC-Card Reader: Measurement Data logging, Command Scripting, Output Sequencing
Option -ATE	Removes front panel knob and buttons for remote control only applications

Ilustración 30. Datasheet de la fuente de alimentación programable.

Datasheet del inversor de la marca Huawei Sun2000L-2KTL



SUN2000L-2/3/3.68/4/4.6/5KTL

Especificaciones técnicas	SUN2000L-2KTL	SUN2000L-3KTL	SUN2000L-3.68KTL	SUN2000L-4KTL	SUN2000L-4.6KTL	SUN2000L-5KTL
Eficiencia						
Máxima eficiencia	98,4 %	98,5 %	98,5 %	98,6 %	98,6 %	98,6 %
Eficiencia europea ponderada	97,1 %	97,6 %	97,6 %	97,9 %	98,0 %	98 %
Entrada						
Alimentación fotovoltaica máxima recomendada	3000 Wp	4500 Wp	5500 Wp	6000 Wp	6800 Wp	7500 Wp
Tensión máxima de entrada	600 V / 495 V ¹					
Rango de voltaje de operación ¹	90 V - 600 V / 80 V - 495 V ¹					
Voltaje de arranque	120 V					
Rango de voltaje MPPT de potencia máxima	120 V - 480 V	180 V - 480 V	195 V - 480 V	210 V - 480 V	260 V - 480 V	260 V - 480 V
Tensión nominal de entrada	380 V					
Corriente de entrada máxima por MPPT	11 A					
Corriente de cortocircuito máxima	15 A					
Cantidad de rastreadores MPPT	2					
Cantidad máxima de entradas por MPPT	1					
Salida						
Monofásica						
Potencia de salida nominal	2000 W	3000 W	3680 W	4000 W	4600 W	5000 W ²
Potencia aparente máxima	2200 VA	3300 VA	3880 VA	4400 VA	5000 VA ³	5500 VA ⁴
Tensión de salida nominal	220 V/230 V/240 V					
Frecuencia nominal de red de CA	50 Hz/60 Hz					
Corriente máxima de salida	10 A	15 A	16 A	20 A	23 A ⁵	25 A ⁵
Factor de potencia ajustable	0,9 capacitivo... 0,9 inductivo					
Distorsión armónica total máxima	≤ 3 %					
Protección						
Protección contra islas eléctricas	Sí					
Protección contra polaridad invertida de CC	Sí					
Monitorización de aislamiento	Sí					
Protección contra descargas atmosféricas de CC	Sí					
Protección contra descargas atmosféricas de CA	Sí					
Monitorización de corriente residual	Sí					
Protección contra sobrecorriente de CA	Sí					
Protección contra cortocircuito de CA	Sí					
Protección contra sobretensión de CA	Sí					
Protección contra sobrecalentamiento	Sí					
Datos generales						
Rango de temperatura de operación	-30 ~ +60 °C (Disminución de la capacidad eléctrica por encima de los 45 °C a potencia de salida nominal)					
Humedad de operación relativa	0 % HR ~ 100 % HR					
Altitud de operación	0 - 4000 m (Disminución de la capacidad eléctrica a partir de los 2000 m)					
Enfriamiento	Convección natural					
Pantalla	Indicadores led					
Comunicación	RS485, WLAN					
Peso (incluido mínimo de montaje)	10,5 kg (23,4 lb)					
Dimensiones (incluido mínimo de montaje)	375 x 375 x 161,5 mm (14,8 x 14,8 x 6,4 pulgadas)					
Grado de protección	IP65					
Compatibilidad de la batería						
Batería	LG Chem RESU 7H_R / 10H_R					
Rango de tensión	350 - 450 VDC					
Corriente máxima	10 A					
Comunicación	RS485					
Cumplimiento de estándares (más opciones disponibles previa solicitud)						
RoHS compliant	RoHS compliant / RoHS compliant					

Ilustración 31. Datasheet del inversor de la marca Huawei Sun2000L-2KTL.