

Anexo A EL PAPEL DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

A.1 EL PROBLEMA ENERGÉTICO ACTUAL

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico. A su vez, es dicho desarrollo tecnológico el que acaba determinando la utilización de ciertos tipos de energía y, por tanto, la disponibilidad de este recurso. Estos recursos energéticos son usados por el hombre con objeto de satisfacer algunas de sus necesidades, en la mayoría de los casos en forma de calor y trabajo.

Los combustibles fósiles comprenden principalmente el petróleo y sus derivados (gasolina, gasóleo, etc.), el gas natural y el carbón mineral. Al principio de la explotación de estos recursos, se consideraban ilimitados y su impacto ambiental era despreciable. Sin embargo, el extraordinario crecimiento de la población mundial (y nacional), junto con el aumento en el consumo per cápita de estos recursos, ha propiciado que solo queden reservas de petróleo disponibles para su explotación económica durante la primera mitad del siglo XXI.

Por otro lado, el consumo masivo de hidrocarburos está produciendo ya alteraciones de la atmosfera a nivel mundial. Los niveles de dióxido de carbono que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían en 1950. Esto produce el conocido efecto invernadero, que ya está causando un incremento en las temperaturas promedio mundiales. Los combustibles fósiles también son los causantes de la conocida lluvia acida, que en los bosques cercanos a las zonas altamente industrializadas está produciendo grandes daños a los suelos y por tanto a la flora y fauna. En las grandes ciudades la combinación de las emisiones de gases de combustión con otros fenómenos naturales produce efectos indeseables para la salud humana, como las altas concentraciones de ozono, y en general la concentración de componentes indeseables en la atmosfera. Fig. A.1 muestra la evolución de las emisiones de CO₂.

Tanto por razones económicas (próxima escasez de hidrocarburos) como ecológicas (alteración de la atmosfera y los suelos), es imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas que sean menos agresivas con el medio ambiente. El actual esquema de consumo energético tanto en España como a nivel mundial simplemente no es sostenible, es decir, no puede mantenerse indefinidamente sin amenazar su propia existencia.

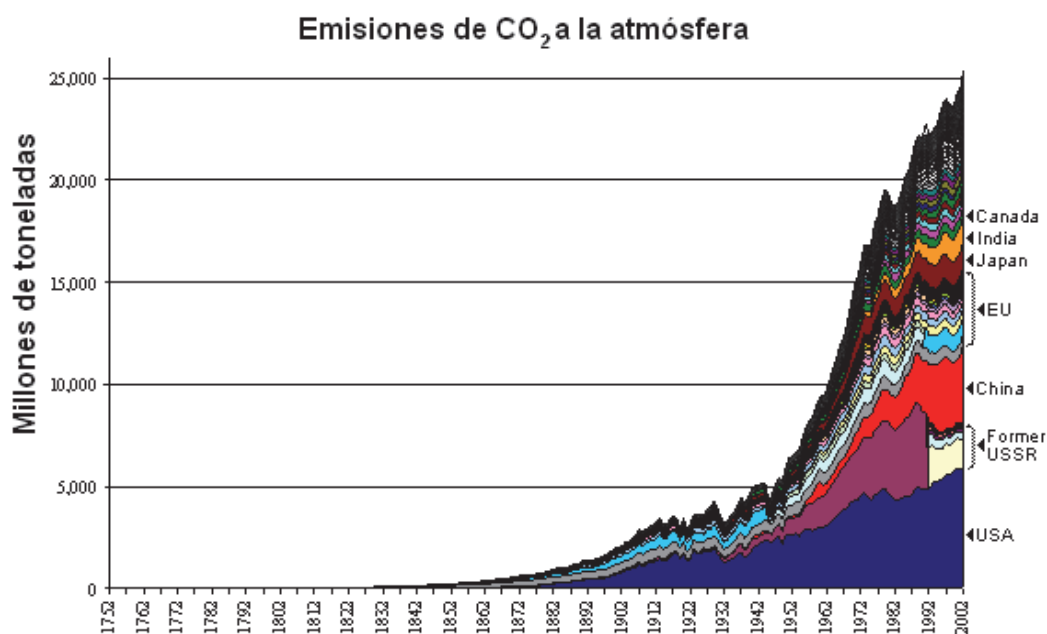


Fig. A.1 Evolución de las emisiones de CO₂ en los últimos 250 años

La energía solar es una de las principales fuentes de energía renovable no contaminante. Se trata de la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol. El proceso de transformación de esta energía se puede llevar a cabo de dos maneras:

- Utilizando una parte del espectro electromagnético de la energía del sol para producir calor. A esta energía se le llama energía solar térmica.
- Utilizando la otra parte del espectro electromagnético del sol para producir electricidad. A esta energía se le llama energía solar fotovoltaica. Esto es posible mediante los módulos fotovoltaicos.

La potencia de la radiación solar varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiancia se reciben aproximadamente 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones. La irradiancia directa normal (o perpendicular a los rayos solares) fuera de la atmósfera recibe el nombre de constante solar y tiene un valor medio de 1354 W/m^2 (que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2).

Si fuésemos capaces de utilizar de forma racional la energía contenida en la luz que nos llega continuamente del sol seríamos capaces de cubrir con ella todas nuestras necesidades.

De hecho, cada año el valor de la energía que se consume no llega al 0,025% (dato del año 2007) del total de energía que el sol hace llegar a la Tierra en el mismo periodo, con lo que un aprovechamiento mínimo de la misma serviría para garantizar tanto una independencia energética absoluta como evitar los residuos y emisiones contaminantes que produce el empleo de otros combustibles. Hay que tener en cuenta que en muchas zonas de España anualmente inciden sobre cada metro cuadrado más de 1.500 kWh de energía, siendo una cifra similar a la que se recibe en muchas áreas de América Central y África.

En los últimos años, las diferentes crisis económicas causadas por la variación del precio de la energía y los problemas de contaminación ambiental han provocado un fuerte interés por sustituir las energías tradicionales, procedentes de los combustibles fósiles, y empezar a utilizar en mayor medida energías obtenidas a partir de fuentes renovables. La crisis del petróleo de principio de los 70 hizo que la energía solar entrara por primera vez en competición con las fuentes de energía tradicionales, produciéndose grandes inversiones en centrales de experimentación. En Fig. A.2 puede observarse la evolución del precio del petróleo en los últimos 25 años.

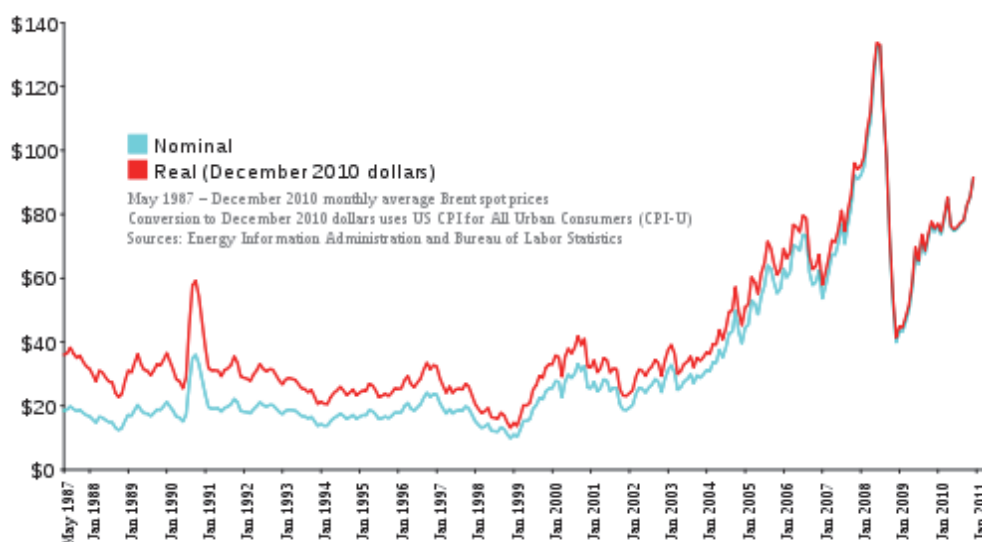


Fig. A.2 Evolución de los precios del petróleo durante los últimos 25 años.

A día de hoy existen tecnologías suficientemente desarrolladas que nos permiten aprovechar la energía solar con una eficiencia razonable. Por ello deberían tomarse mayores medidas para intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente de energía gratuita, limpia e inagotable. El desarrollo de los sistemas basados en la utilización de la energía solar podrá conseguir que los países se liberen de su dependencia del petróleo o de otras energías poco seguras, contaminantes o simplemente finitas. La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema muy importante, dado que la gran mayoría de los países, tanto los en vías de desarrollo como los industrializados, se ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales. A partir de los últimos años, se ha reconocido como inevitable que la oferta de

energía debe sufrir una transición desde su actual dependencia de los hidrocarburos hacia aplicaciones energéticas más diversificadas, lo que implica el aprovechamiento de la variedad de fuentes de energía renovables que se disponen. El sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre, provee una energía limpia, abundante y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre. Por lo tanto, puede liberarlo de los problemas ambientales generados por los combustibles convencionales, como el petróleo, y de otras alternativas energéticas, como las centrales nucleares. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos de las últimas décadas, el aprovechamiento de esta opción ha sido insignificante, comparándolo con el consumo global de energía en el mundo.

Actualmente, la energía solar fotovoltaica ha relevado en cierta medida a los sistemas de generación convencionales en ubicaciones remotas. En los lugares con acceso a la red de distribución cada vez se está más cerca de conseguirlo. En principio su uso más común era para hacer funcionar lámparas eléctricas, radios, televisores y otros electrodomésticos de bajo consumo en lugares donde no había acceso a la red eléctrica convencional. Actualmente esto ha cambiado, siendo prioritario la introducción de la energía solar fotovoltaica en las redes de distribución y transporte eléctrico, permitiendo que parte de la electricidad consumida en los grandes núcleos urbanos provenga de una fuente de energía renovable y absolutamente limpia.

A.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedoras de las energías renovables en el mundo. Sus principales ventajas son las siguientes:

- Los sistemas fotovoltaicos generan la electricidad directamente a partir de la luz del sol, por lo que son muy poco contaminantes. No consume combustibles fósiles y no genera residuos excepto los paneles al final de su vida útil. La materia prima de donde se extrae el silicio consiste en arena común, muy abundante en la naturaleza.
- Permite reducir la dependencia de los países productores de combustibles fósiles. El sol es una fuente inagotable con reservas que exceden de nuestras necesidades.
- La duración de estos sistemas es elevada. los módulos fotovoltaicos se fabrican de manera que son capaces de resistir condiciones meteorológicas adversas, como granizo, viento, temperatura, humedad. Los fabricantes dan garantías (incluyendo producción y rendimiento) de hasta 30 años.
- Ofrece una elevada fiabilidad y disponibilidad operativa excelente.

- La mayoría de instalaciones, excepto las que realizan seguimiento, no tienen partes móviles, por lo que no requieren casi mantenimiento. Además no producen ruidos, son totalmente silenciosas.
- Puede instalarse en zonas rurales donde no llega la red eléctrica general, siendo en muchas ocasiones una solución más económica que traer hasta allí la red de distribución.
- En el caso de sistemas conectados a red, es posible vender el excedente de electricidad a una compañía eléctrica, salvando las diferencias entre producción y demanda. Además gracias a ello es posible subvencionar el precio de venta, lo que ha provocado un gran aumento del número de instalaciones fotovoltaicas. Gracias a ello se han realizado progresos tecnológicos en la industria fotovoltaica nacional.
- La instalación de estos sistemas es simple, pudiendo aprovecharse los tejados de viviendas ya construidas sin ser necesario espacio ni estructuras adicionales.
- En sistemas ya construidos puede aumentarse fácilmente la potencia, mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos.
- Las instalaciones fotovoltaicas son seguras, no hay altas tensiones ni existe ningún riesgo potencial que pueda afectar a personas.

Por otro lado, los principales inconvenientes son:

- La variabilidad de la producción según la climatología del lugar y la época del año, que provoca que la generación tenga un carácter incontrolable. Esto unido al coste de almacenamiento de la energía eléctrica provoca que en muchos casos la energía solar deba complementarse con otros tipos de energía, dificultando el objetivo de una producción 100% renovable.
- Una instalación fotovoltaica requiere de una importante inversión inicial. Esto es debido a que la construcción y fabricación de los módulos fotovoltaicos es un proceso complejo y caro. No obstante, tiene una vida útil elevada y pocos costes de mantenimiento.
- En los sistemas aislados la necesidad de almacenamiento de energía eléctrica provoca un encarecimiento importante de los costes de inversión y mantenimiento. Las baterías son caras y tienen una vida útil varias veces menor al resto de la instalación, llegando a suponer un porcentaje importante del coste del sistema a lo largo de su vida útil.

- Gran dispersión de la energía solar sobre la superficie de la tierra. Debido a ello los países más alejados del ecuador necesitarían una instalación mucho mayor para obtener la misma producción.
- Los paneles fotovoltaicos todavía se encuentran en un estado prematuro de desarrollo, por lo que su rendimiento no es muy elevado en función de la energía disponible (que es mucha). Esto también provoca que sea necesario mucho espacio para una determinada potencia instalada en comparación con otros métodos de generación.

Por todas estas causas, actualmente la energía solar fotovoltaica no es por sí sola económicamente competitiva con otras energías actuales, el coste del kilovatio-hora es mayor que el procedente de otras fuentes. No obstante, el desarrollo y la mejora de los paneles fotovoltaicos, unido al incremento del coste de las energías tradicionales, debido a su escasez y el aumento de la demanda, pueden revertir esta situación en muy poco tiempo. La igualación del coste de la energía eléctrica generada mediante solar fotovoltaica con el precio de *pool* de venta de la electricidad es conocida como *grid parity*, y su cuando se alcance el sector podrá continuar desarrollándose por sí solo sin necesidad de subvenciones externas.

A.3 UNA ENERGÍA GRATUITA, LIMPIA E INAGOTABLE.

Una parte del problema energético actual consiste en que nuestra sociedad se ha hecho muy dependiente de las energías provenientes del petróleo. Por esto se ha retrasado el desarrollo tecnológico y, por tanto, la viabilidad económica de algunas alternativas energéticas. La energía solar es una de las alternativas más interesantes para nuestra sociedad, por ser muy abundante en España, y al mismo tiempo muy poco agresiva con el medio ambiente. No es la única alternativa, y en muchos casos no es la mejor, o al menos no la más económica, pero existen ciertas aplicaciones actuales y otras potenciales que vale la pena estudiar y ponerlas en funcionamiento siempre que sea posible. De esta forma se ahorran fuentes de energía convencionales, se alarga su duración y se disminuye el impacto ambiental que implica su utilización.

Para mantener un crecimiento económico sostenible, garantizando la conservación del medio ambiente y un suministro energético a largo plazo, es necesario el incremento de la eficiencia y la búsqueda de energías alternativas al petróleo. En realidad no existe un problema de recursos energéticos. Para sustituir la utilización masiva de petróleo, la mejor opción es aprovechar los recursos energéticos renovables: la energía solar, eólica, hidráulica, biomasa y residuos, geotérmica y la mareomotriz (oleajes, mareas, corrientes). Estas fuentes de energía se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, son además respetuosas con el medio ambiente. Marion King Hubbert predijo hace unos 50 años que el máximo de extracción de petróleo se produciría cerca del año 2000, como puede observarse en Fig. A.3. En la práctica se ha retrasado unos 10 años, es decir, estamos en él. Esto significa que hemos

llegado a un punto en el cual la subida continua de su precio es irreversible, porque cada vez hay más demanda y menos producción.

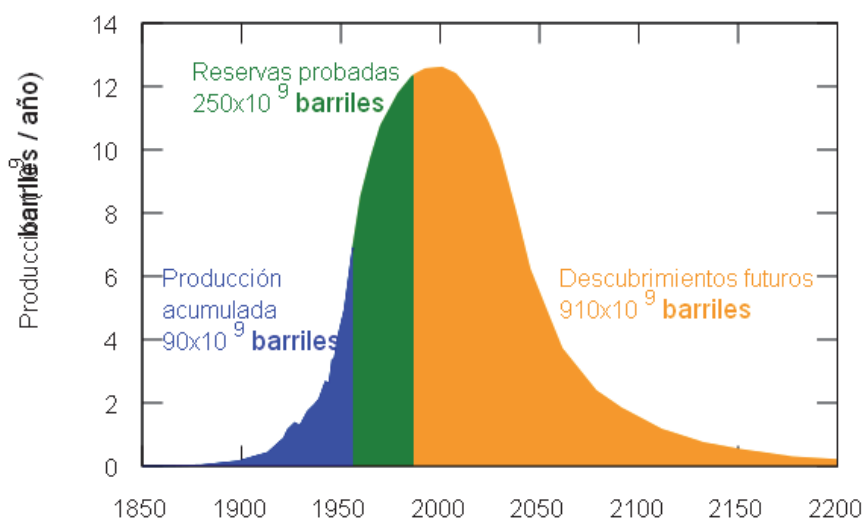


Fig. A.3 Pico de Hubbert, predicción elaborada en 1950

La energía solar fotovoltaica, como energía renovable, es más respetuosa con el medio ambiente que cualquier energía convencional, debido a que se dispone de recursos inagotables a escala humana para cubrir las necesidades energéticas. En ese sentido tiene que valorarse muy positivamente la posibilidad de aplicación en el ámbito local, lo que hace innecesaria la creación de infraestructuras de transporte eléctrico desde los puntos de producción a los de consumo. Es también importante destacar que la reducción de CO₂ en sistemas fotovoltaicos es significativa. Para la energía solar fotovoltaica, el impacto ambiental principal se produce en los procesos de extracción de la materia prima. En cualquier caso este impacto ambiental no es muy significativo dado que casi un 90% de las células fotovoltaicas se fabrican a partir de silicio, y este material es obtenido a partir de la arena y por lo tanto muy abundante en la naturaleza. Es cierto que el proceso de transformación necesario para conseguir silicio de grado solar necesita una importante cantidad de energía, pero en sí mismo no produce ningún residuo o efecto contaminante. Durante la fase de producción de electricidad las cargas ambientales son completamente despreciables, y por otra parte, después de transcurrida la vida útil del panel, pueden establecerse vías claras de reutilización o retirada tanto del panel como del resto de elementos del sistema fotovoltaico. El principal impacto de la fase de producción es el efecto visual sobre el paisaje. No obstante, es susceptible de ser reducido en la mayoría de las instalaciones con una adecuada integración en el paisaje o en los edificios. Desde un punto de vista biótico, no existen afecciones importantes ni sobre la calidad del aire, ni sobre los suelos, flora y fauna, no provocándose ruidos ni afectándose tampoco a la hidrología existente.

Anexo B FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGÍA SOLAR

En este capítulo se pretende dar una visión general de los fenómenos físicos en los cuales se fundamenta la energía solar fotovoltaica [15].

B.1 EL EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV, pueden ser reflejados o absorbidos. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, su energía se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentes dopadas, tipo P y tipo N, en las que se crea un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica.

Al colocar parte del semiconductor tipo P junto a otra parte del semiconductor tipo N, debido a la ley de difusión, los electrones de la zona N con alta concentración de electrones tienden a dirigirse a la zona P, que apenas los tiene. Sucede lo contrario con los huecos, que tratan de dirigirse de la zona P a la zona N, proporcionando su encuentro y neutralización en la zona de unión. Al encontrarse un electrón con un hueco desaparece el electrón libre, que pasa a ocupar el lugar del hueco, y por lo tanto también desaparece este último, formándose en dicha zona de la unión una estructura estable y neutra.

La zona N, en principio neutra, al colocarla junto a la zona P pierde electrones libres y cada vez va siendo más positiva, mientras que la zona P, al perder huecos, se hace cada vez más negativa. Así aparece una diferencia de potencial entre las zonas N y P, separadas por la zona de unión que es neutra. La tensión que aparece entre las zonas, llamada barrera de potencial, se opone a la ley de difusión, puesto que el potencial positivo que se va creando en la zona N repele a los huecos que se acercan de P, y el potencial negativo de la zona P repele a los electrones de la zona N, tal y como puede observarse en las ilustraciones de Fig. B.1.

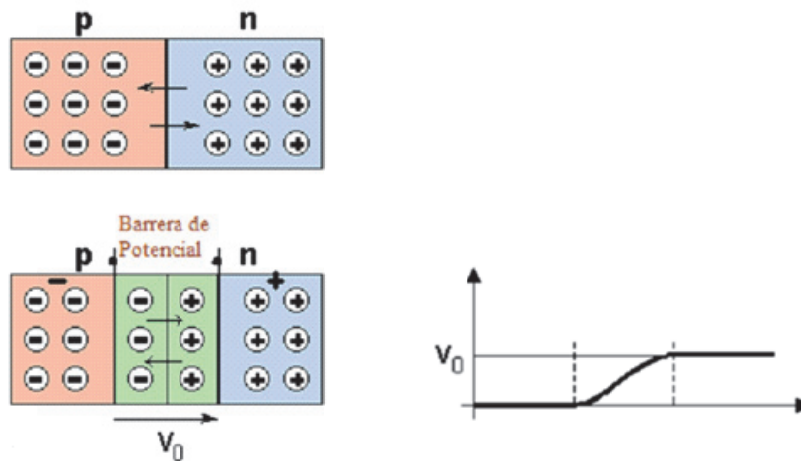


Fig. B.1 Formación de la zona de carga espacial

Cuando ambas zonas han perdido cierta cantidad de portadores mayoritarios que se han recombinado, la barrera de potencial creada impide la continuación de la difusión y por tanto la igualación de las concentraciones de ambas zonas. La barrera de potencial es del orden de 0.2 V cuando el semiconductor es de Ge y de unos 0.5 V cuando es de Si.

Es por ello que estas células se fabrican partir de este tipo de materiales, que actúan como aislantes a baja temperatura y como conductores cuando se aumenta la energía. Desgraciadamente no hay un tipo de material ideal para todos los tipos de células y aplicaciones. Además de los semiconductores, las células solares están formadas por una malla metálica superior, u otro tipo de contacto, para recolectar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa, y un contacto posterior para completar el circuito eléctrico. También en la parte superior de la célula hay un vidrio u otro tipo de material encapsulado transparente para sellarla y protegerla de las condiciones ambientales, así como una capa antirreflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos. Estos elementos pueden observarse en Fig. B.2. Las células FV convierten la energía de la luz en energía eléctrica. El rendimiento de conversión, esto es, la proporción de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, es fundamental en los dispositivos fotovoltaicos, ya que el aumento del rendimiento hace de la energía solar FV una energía más competitiva con otras fuentes. Estas células conectadas unas con otras, encapsuladas y montadas sobre una estructura soporte o marco, conforman un módulo fotovoltaico.

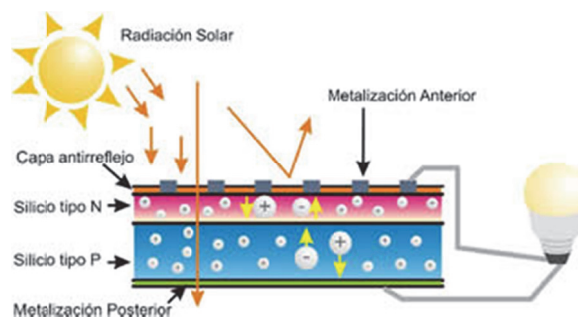


Fig. B.2 El efecto fotovoltaico

B.2 LA RADIACIÓN SOLAR

Se conoce por radiación solar al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Teóricamente, el sol se comporta como un cuerpo negro que emite energía a una temperatura de unos 6000 K, de acuerdo a la ley de Planck. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, como puede verse en Fig. B.3. No toda la radiación alcanza la superficie de la tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, especialmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la tierra. Su unidad es el W/m^2 .

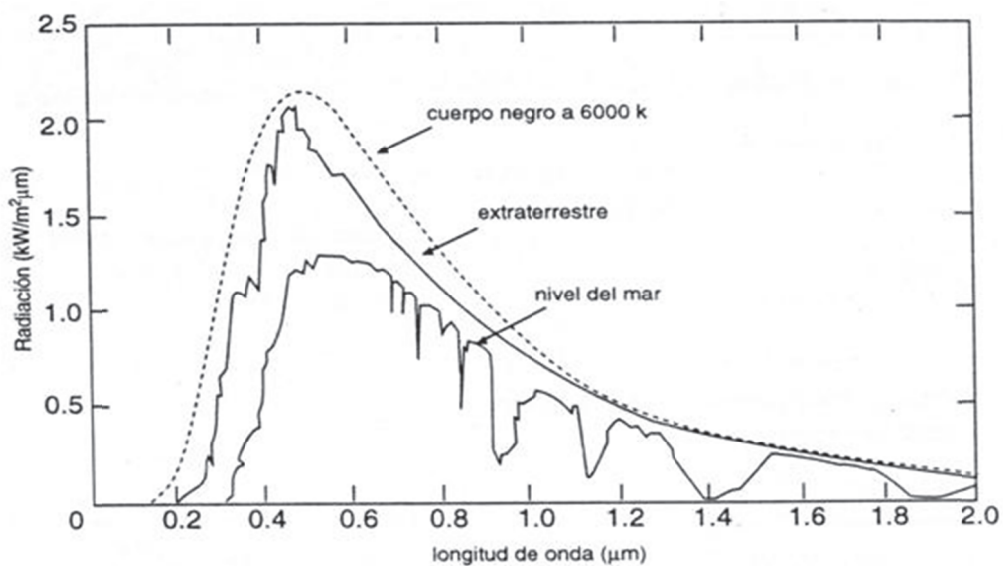


Fig. B.3 Distribución de la radiación solar

B.2.1 GENERACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

El sol es la estrella más cercana a la tierra y está catalogada como una estrella enana amarilla. Sus regiones interiores son totalmente inaccesibles a la observación directa y es allí donde hay temperaturas de unos 20 millones de grados, necesarios para producir las reacciones nucleares que producen su energía. La capa más externa es la que produce casi toda la radiación observada, se llama fotosfera y está a una temperatura de 6000 K. Tiene solo una anchura entre 200 km y 300 km. Por encima de ella está la cromosfera con una anchura de unos 15.000 Km. Más exterior aún es la corona solar, una parte muy tenue y caliente que se extiende varios millones de kilómetros y que sólo es visible durante los eclipses solares totales. La superficie de la fotosfera aparece conformada de un gran número de gránulos brillantes producidos por las células de convección. También aparecen fenómenos cíclicos que conforman la actividad solar como manchas solares, fáculas, protuberancias solares, etc. Estos procesos, que tienen lugar a diferentes profundidades, van acompañados siempre de una emisión de energía que se superpone a la principal emisión de la fotosfera. Provoca que el sol se aleje ligeramente en su emisión de energía del cuerpo negro a cortas longitudes de onda,

por la emisión de rayos X, y a largas longitudes por los fenómenos nombrados, destacando que no es la emisión igual cuando el sol está en calma que activo. Además la cromosfera y corona absorben y emiten radiación que se superpone a la principal fuente que es la fotosfera.

B.2.2 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR.

La aplicación de la Ley de Planck al sol con una temperatura superficial de unos 6000 K nos lleva a que el 99% de la radiación emitida está entre longitudes de onda 0,15 micrómetros o micras y 4 micras. Como 1 angstrom $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$, resulta que el sol emite un rango desde 1500 Å hasta 4000 Å. La luz visible se extiende desde 4000 Å hasta 7000 Å. La radiación ultravioleta u ondas cortas iría desde los 1500 Å a los 4000 Å y la radiación infrarroja u ondas largas desde las 0,74 micras a 4 micras. La atmósfera de la tierra constituye un importante filtro que hace inobservable radiaciones de longitud de onda inferior a las 0,29 micras por la fuerte absorción del ozono y oxígeno. Ello nos libra de la radiación ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a las 24 micras, esto no afecta a la radiación solar pero sí a la energía emitida por la tierra que llega hasta las 40 micras y que es absorbida. A este efecto se conoce como efecto invernadero. Pero la emisión solar difiere de la de un cuerpo negro sobre todo en el ultravioleta. En el infrarrojo se corresponde mejor con la temperatura de un cuerpo negro de 5779°C, así como en el visible. Por esto, la radiación solar no se produce en las mismas capas, y estamos observando la temperatura de cada una de ellas donde se produce la energía.

B.3 LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.

Los módulos fotovoltaicos o colectores solares fotovoltaicos (llamados también paneles solares, aunque esta denominación abarca otros dispositivos) están formados por un conjunto de células solares asociadas entre ellas en serie y paralelo. Una célula fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz solar en electricidad. La conversión se realiza mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico que consiste en generar una fuerza electromotriz cuando la superficie de la célula es expuesta a la irradiación solar. La tensión generada puede variar entre 0.3 V y 0.7 V, en función de diferentes parámetros como el material utilizado en la fabricación, la temperatura admisible por la celda y su envejecimiento. Habitualmente se utilizan células formadas por una unión P-N construidas en base de silicio monocristalino. Una celda fotovoltaica se fabrica con dos capas de silicio, una con dopado P (dopada de boro) y la otra con dopado N (dopada de fósforo), creando así la unión P-N. Cuando los fotones son absorbidos por el semiconductor, transmiten su contenido energético a los átomos de la unión P-N de tal modo que los electrones de estos átomos se liberan y crean electrones (carga N) y huecos (carga P). Este fenómeno produce una diferencia de potencial entre ambas capas. Las células fotovoltaicas se clasifican en tres grupos según el tipo de silicio que las componen.

B.3.1 CÉLULAS DE SILICIO POLICRISTALINO.

Son aquellas obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni tampoco un crecimiento controlado en su red cristalina. Se les da el nombre de policristalinas porque en la solidificación no se hace en un solo cristal, sino en múltiples. Su aspecto se muestra en Fig. B.4.

El primer rendimiento obtenido a finales de los 70 se situaba entre el 7% y el 8%. Actualmente se ha logrado llevar a valores próximos al 12%, siendo posible en los procesos de fabricación refinados llegar a valores del 14%. Una gran ventaja en la fabricación de células de silicio policristalino es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, lo que facilita enormemente la fabricación de paneles solares compactos sin posteriores mecanizaciones de célula. Hay diferentes tipos de silicio policristalino atendiendo al tamaño de los cristales que lo compone, que generalmente en los más modernos es mucho más pequeño que en las células más antiguas, lo que da un aspecto más homogéneo a su superficie.

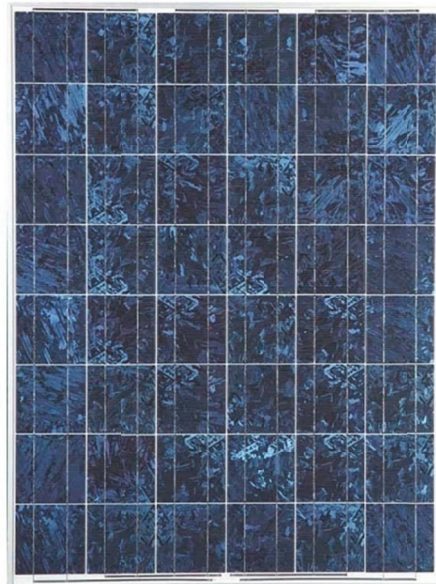


Fig. B.4 Panel fotovoltaico formado por células de silicio policristalino

B.3.2 CÉLULAS DE SILICIO AMORFO

La gran ventaja de la utilización del silicio amorfo para la fabricación de células fotovoltaicas es el espesor del material a utilizar, ya que puede llegar a ser 50 veces más finas que el equivalente fabricado en silicio monocristalino. En Fig. B.5 puede observarse el aspecto de una célula de silicio amorfo.

El silicio amorfo tiene unas propiedades totalmente diferentes al silicio cristalino. Por ejemplo, su elevada velocidad de recombinación producida por la gran cantidad de imperfecciones en la red cristalina, que crean núcleos activos para la recombinación. Este efecto se ve compensado en parte por la adición de hidrógeno que hace disminuir la velocidad

de recombinación de los portadores. Este tipo de silicio presenta también un alto coeficiente de absorción, lo que permite la utilización de espesores de material activo muy pequeños. Uno de los inconvenientes de la utilización de este tipo de células es la degradación que sufren al ser expuestas al sol después de un determinado tiempo. Además, las células fotovoltaicas fabricadas con silicio amorfo son las de menor rendimiento del mercado, con una eficiencia del 8%. El coste de fabricación de las células de silicio amorfo es mucho menor que el resto de tecnologías, por el poco material que se emplea y la facilidad de fabricación en masa. Una característica diferenciadora de las otras células solares es que se pueden fabricar de colores o incluso translúcidas, peculiaridades que les dan posibilidades de uso más amplio.



Fig. B.5 Lamina formada por células de silicio amorfo

B.3.3 CÉLULAS DE SILICIO MONOCRISTALINO

Son las más utilizadas en la actualidad debido a que gran parte de la industria perteneciente al silicio es la base de fabricación de todos los semiconductores (transistores, circuitos integrados y otros componentes activos electrónicos). Señalar que el silicio es el segundo material más abundante de la Tierra, después del oxígeno. En Fig. B.6 se muestra un ejemplo de este tipo de células.

El proceso al cual ha de someterse el silicio para reunir las características apropiadas para realizar la conversión fotovoltaica conlleva un aumento del coste final de la célula fotovoltaica. El silicio no se encuentra en estado puro y existen ciertos elementos que son difíciles de eliminar. Además, se ha de fundir y permitir el crecimiento para formar el monocristal, lo cual requiere una inversión de tiempo y energía elevada. Otro aspecto importante es que, por el momento, su uso está limitado al no poderse fabricar en grandes cantidades. La eficiencia de éste tipo de células oscila entre el 14% y el 18%, son las de mayor rendimiento del mercado actual. En Fig. B.7 se puede observar la geometría típica de una célula solar de silicio monocristalino.



Fig. B.6 Panel fotovoltaico formado por células de silicio monocristalino

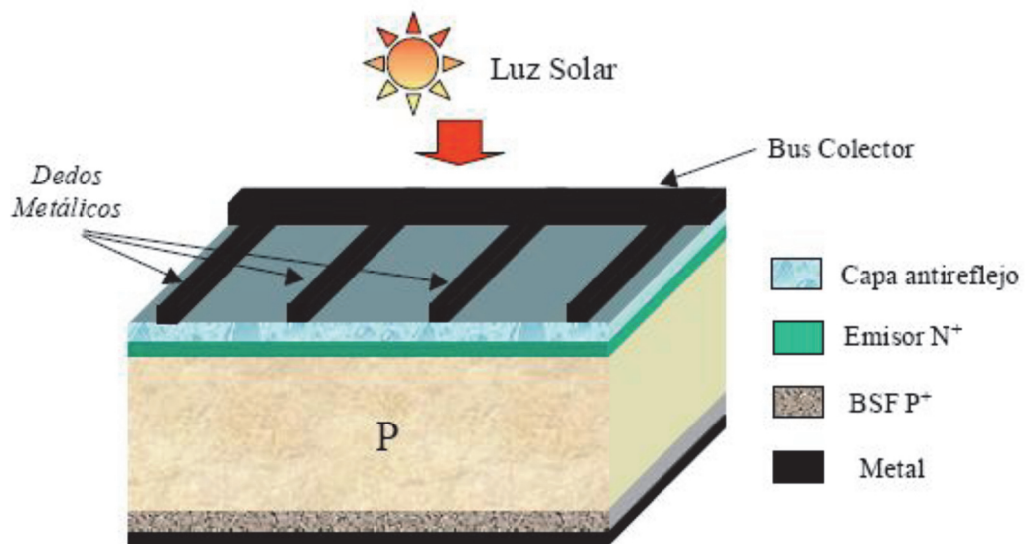


Fig. B.7 Esquema de una célula fotovoltaica de silicio monocristalino

B.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES

El funcionamiento de un panel fotovoltaico está determinado por su curva característica I-V, que representa la intensidad que es capaz de proporcionar a cada nivel de tensión. A partir de esta curva puede obtenerse la representación de potencia frente a intensidad P-V. Estas curvas dependen principalmente de la irradiancia que reciben los paneles y de la temperatura a la que se encuentran las células, así como del tipo y las características propias del módulo fotovoltaico.

B.4.1 DEPENDENCIA CON LA IRRADIANCIA

La irradiancia G es con diferencia el factor que más afecta a las curvas características. La potencia máxima que puede entregar el panel depende en gran medida de la irradiancia que recibe, como es de esperar. Un aumento de irradiancia desplaza la curva I-V del panel hacia arriba, por lo que la corriente y la potencia máxima que podrá suministrar serán mayores. La irradiancia afecta principalmente a la corriente de cortocircuito I_{sc} , de una forma directamente proporcional según la expresión B.1.

$$I_{sc}(G_2) = I_{sc}(G_1) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (\text{B.1})$$

$I_{sc}(G_2)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia G_2 , $I_{sc}(G_1)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia G_1 .

La ecuación no tiene en cuenta los efectos de la temperatura sobre la corriente de cortocircuito. Sin embargo podemos considerarlo como una buena aproximación ya que el error en I_{sc} es inferior al 0.5%. En Fig. B.8 y Fig. B.9 puede observarse el aspecto de las curvas características de un determinado panel fotovoltaico para diferentes niveles de irradiancia solar.

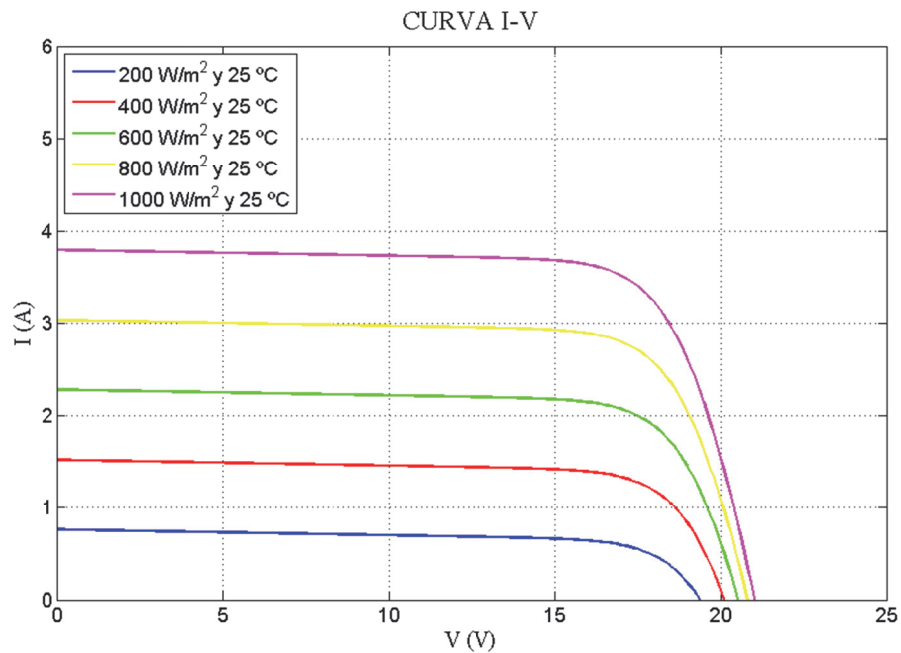


Fig. B.8 Variación de la curva característica I-V con la irradiancia

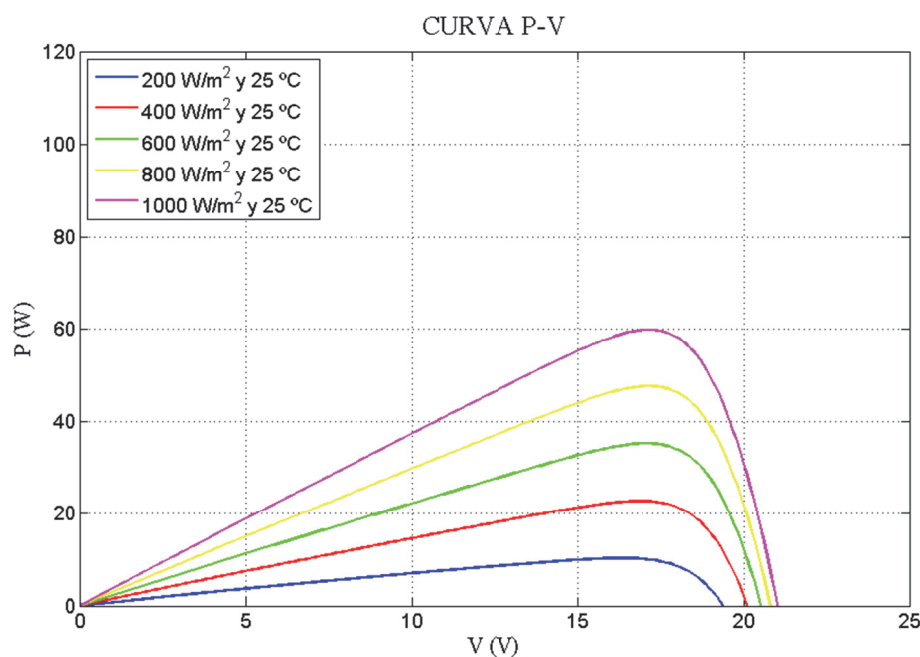


Fig. B.9 Variación de la curva característica P-V con la irradiancia

B.4.2 DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA

La temperatura es un factor que afecta a las curvas características I-V en menor medida que la irradiancia. Afecta principalmente a los valores de tensión, y tiene su mayor influencia en la tensión de circuito abierto, aunque también modifica ligeramente los valores del punto de máxima potencia y el valor de I_{SC} . Como consecuencia, si aumenta la temperatura la potencia en el MPP es menor. La variación de temperatura tiene efectos menores que la variación de irradiancia. En Fig. B.10 y Fig. B.11 se muestra un ejemplo de la variación de la curva característica I-V con la temperatura, manteniendo la irradiancia constante.

Para evitar en la medida de lo posible el aumento de temperatura es conveniente colocar los módulos fotovoltaicos en lugares que estén ventilados y que tengan una ligera brisa de aire.

Existen tres coeficientes α , β y γ que representan la variación de los parámetros fundamentales de la curva característica I-V del generador fotovoltaico con la temperatura. Así, α expresa la variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura, β la variación de la tensión de circuito abierto y γ la variación de la potencia máxima. Estos tres coeficientes suelen aparecer en las hojas de características que proporcionan los fabricantes de paneles.

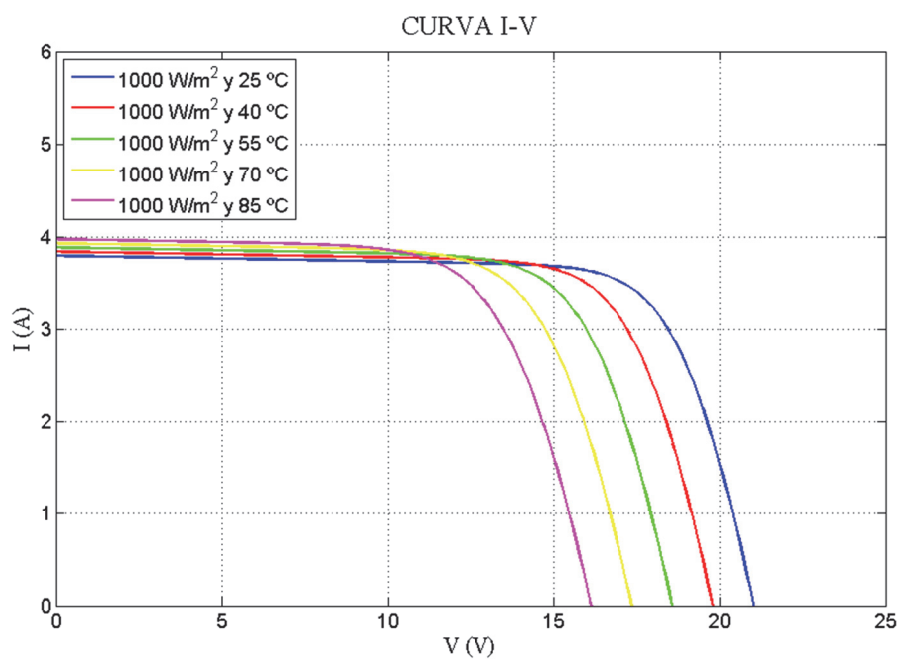


Fig. B.10 Variación de la curva característica I-V con la temperatura

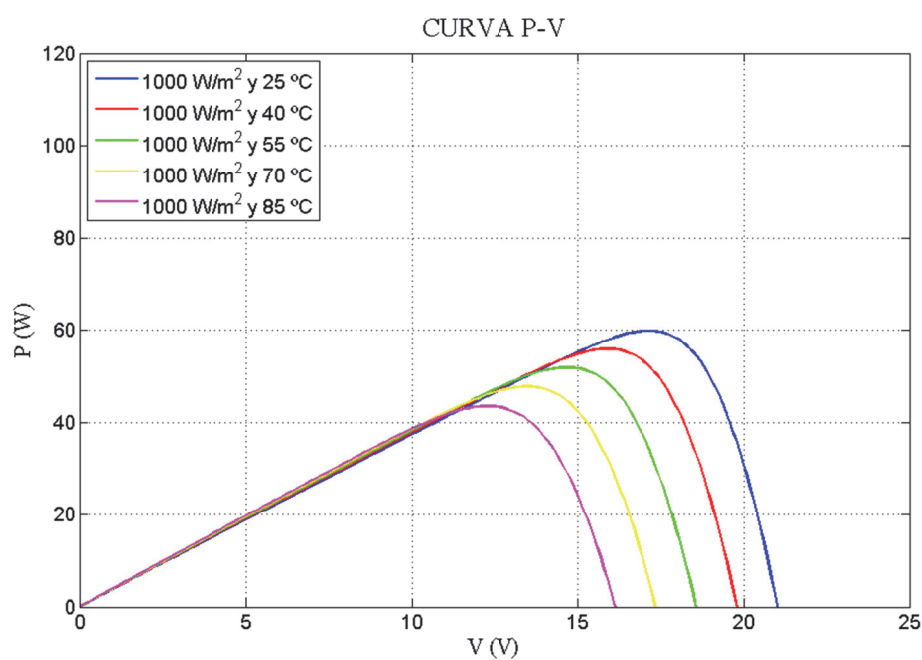


Fig. B.11 Variación de la curva característica P-V con la temperatura

B.4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PANELES

El parámetro estandarizado para clasificar la potencia de los paneles se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas STC, que son:

- Radiación de 1000 W/m^2
- Temperatura de célula de 25°C (no temperatura ambiente)
- Airmass de 1.5

Los módulos están diseñados para suministrar electricidad a una determinada tensión, normalmente 12 V o 24 V . La estructura del módulo protege a las células del medio ambiente y son muy durables y fiables. Los generadores o módulos fotovoltaicos producen corriente continua (DC) y pueden ser conectados en serie o en paralelo para poder producir cualquier combinación de corriente y tensión. Un módulo o generador FV por sí mismo no bombea agua o ilumina una casa durante la noche. Para ello es necesario un sistema FV completo que consiste en un generador FV junto a otros componentes. Los elementos necesarios dependen del tipo de aplicación o servicio que se quiere proporcionar.

El punto de trabajo queda determinado mediante la intersección de la curva característica I-V con la línea determinada por la resistencia de la carga conectada al panel, como puede verse en Fig. B.12. Por tanto, para extraer toda la potencia posible de los paneles fotovoltaicos, es necesario operar en el punto de estas curvas en el que el producto de intensidad por tensión es máximo. Este punto es conocido como MPP, punto de máxima potencia.

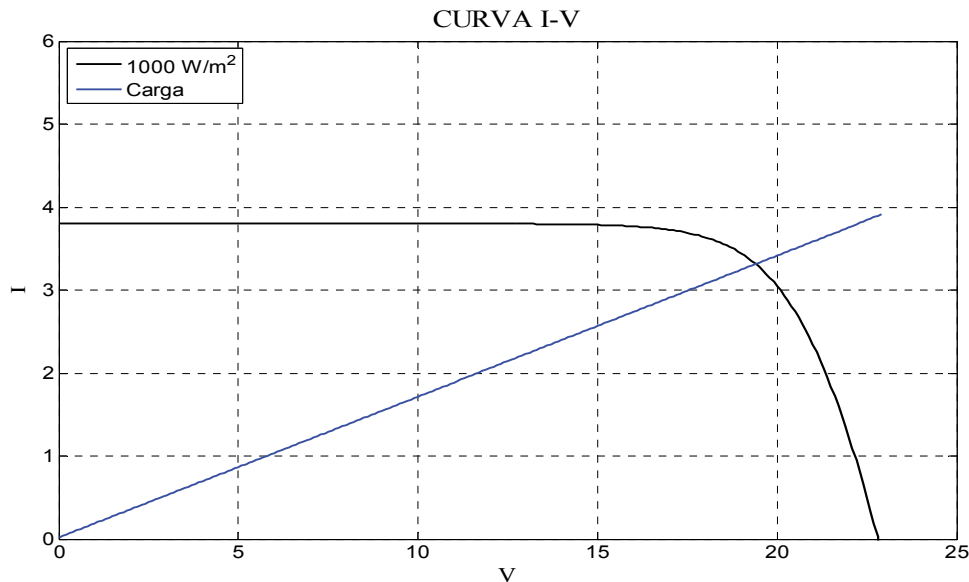


Fig. B.12 Punto de trabajo de un panel fotovoltaico

Anexo C ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DEL MPP

Se muestra un resumen de cada uno de los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia que aparecen en la tabla comparativa de la memoria. Para obtener más información de cada una de estas técnicas consultar las referencias [8], [9] y [10]. Se han excluido algunos por estar explicados en la memoria principal.

C.1 Tensión Constante.

Ya explicado en la memoria principal.

C.2 Tensión Proporcional a la de Circuito Abierto

Ya explicado en la memoria principal.

C.3 Intensidad Proporcional a la de Cortocircuito

Se trata de un método equivalente al anterior pero en este caso basado en la intensidad en vez de en la tensión. Asume que la intensidad que el sistema fotovoltaico produce en el MPPT es directamente proporcional a su intensidad de cortocircuito.

$$I_{mpp} = k_i \cdot I_{sc} \quad (1.1)$$

El problema es que medir I_{sc} es bastante más complicado que medir V_{oc} . Hace falta un conmutador en paralelo para crear el cortocircuito, aunque puede utilizarse el transistor que llevan algunos convertidores DC-DC, como es el caso del *boost*. Los resultados no son muy precisos porque en la medida de la corriente de cortocircuito influyen mucho las resistencias intrínsecas de los cables y conductores. Al igual que en el caso anterior, mientras se realiza la medida de I_{sc} el sistema no produce electricidad. Las únicas variables a medir son la corriente I_{sc} y I_{pv} .

C.4 Panel Piloto

Los dos métodos anteriores tienen la desventaja de que mientras realizan las medidas de tensión o de intensidad se corta la producción de energía. Una opción para evitar esto consiste en añadir una pequeña célula solar adicional utilizada exclusivamente para realizar las medidas de tensión de circuito abierto V_{oc} o de corriente de cortocircuito I_{sc} , evitando los ceses en la producción de energía. Esta célula sería de un tamaño reducido para que sea barata. El mayor problema es conseguir que las características de la célula de muestra sean exactamente igual a las del sistema fotovoltaico. Hay que recordar que con el paso del tiempo las células sufren una degradación que puede no ser exactamente igual en todas ellas. Las variables a medir son las mismas que en cualquiera de los dos métodos anteriores.

C.5 Perturbación y Observación

Ya explicado en la memoria principal.

C.6 CONDUCTANCIA INCREMENTAL

Ya explicado en la memoria principal.

C.7 GRADIENTE DE TEMPERATURA

La tensión de circuito abierto depende fundamentalmente de la temperatura a la que se encuentran los paneles T , según la expresión

$$V_{oc} = V_{ocSTC} + (T - T_{STC}) \cdot \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (1.2)$$

Los valores STC son los obtenidos en condiciones estándar, siendo constantes que dependen sólo de las características de los módulos fotovoltaicos. Por tanto, la única variable de esta expresión es la temperatura. El resto del método es similar al de tensión de circuito abierto. La principal ventaja sobre él es que evita los instantes de medida de V_{oc} durante los cuales no se genera energía. Sin embargo, el valor de V_{oc} obtenido no será tan preciso. El sistema requiere un medir la temperatura de las células así como la tensión de trabajo del sistema.

C.8 GRADIENTE DE TEMPERATURA E IRRADIANCIA

Una variante del método anterior permite calcular directamente la tensión del MPP a partir de la temperatura de célula T y la irradiancia G , según la expresión

$$V_{mpp} = (u + G \cdot v) - T \cdot (w + G \cdot y) \quad (1.3)$$

Los valores u , v , w , y son constantes que dependen de las características de los paneles solares y es difícil conocerlos con precisión, pudiendo variar incluso entre células del mismo modelo y fabricante. Los resultados son generalmente más precisos que con el método anterior pero para ello se requiere una medida precisa de la irradiancia, siendo necesario un piranómetro de elevado coste. También requiere medir la temperatura y la tensión de los paneles.

C.9 LÓGICA DIFUSA

Los controles basados en lógica difusa tienen la ventaja de que funcionan bien con entradas no del todo precisas y no necesitan un modelo matemático perfecto, permitiendo no linealidades. Existen microcontroladores específicamente diseñados para implementar estas técnicas.

Su funcionamiento, bastante complejo, se basa en la transformación de las variables numéricas en lingüísticas y viceversa, en función de una escala de niveles y una función de pertenencia respectivamente.

Se ha demostrado que estos modelos funcionan bien sobre todo en días de nubes y claros. Sin embargo, para ello requieren una implementación muy precisa, especialmente en cuanto al valor de error de computación.

C.10 REDES NEURONALES

Las redes neuronales son otra técnica que se adapta bien a los microcontroladores. Estas redes están formadas por capas de neuronas que están interconectadas entre si. El número de capas intermedias y su tamaño debe ajustarse al problema. Su buen funcionamiento depende de la correcta elección de estos parámetros, así como del correcto entrenamiento de la red neuronal, que consiste en determinar los pesos de cada neurona. Las características de los paneles cambian debido a su degradación, por lo que será necesario reentrenar el sistema periódicamente. Es un método complejo y caro pero que puede funcionar bastante bien.

C.11 CAPACITANCIA PARÁSITA

Se trata de un método similar al de conductancia incremental pero que tiene en cuenta la capacitancia intrínseca de los paneles solares, debida fundamentalmente a las cargas de las uniones p-n. La siguiente expresión está basada en el modelo circuital equivalente del panel fotovoltaico que incluye esta capacidad, que se representa como condensador en paralelo con las células solares. Suele ser del orden de decenas de picofaradios.

$$I = I_L - I_0 \left[\frac{V_p + R_s I}{a} - 1 \right] + C_p \frac{dv_p}{dt} = F(v_p) + C_p \frac{dv_p}{dt} \quad (1.4)$$

Multiplicando la parte derecha de la anterior expresión por la tensión del módulo se obtiene la siguiente

$$\frac{dF(v_p)}{dv_p} + C_p \cdot \left(\frac{\dot{V}}{V} + \frac{\ddot{V}}{\dot{V}} \right) + \frac{F(v_p)}{v_p} = 0 \quad (1.5)$$

Los términos representan, respectivamente, la conductancia instantánea, la conductancia incremental y la señal inducida por la capacitancia parásita. En el caso $C_p=0$ se obtiene la ecuación del algoritmo de conductancia incremental.

En la práctica este algoritmo es muy difícil de utilizar, puesto que las etapas electrónicas, especialmente los convertidores CC-CC, incluyen condensadores y filtros que dificultan la medida de la capacidad intrínseca de los paneles.

C.12 CORRELACIÓN DEL RIZADO DE ONDA

Cuando se conecta un panel a un convertidor, las conmutaciones de este convertidor determinan la corriente y la tensión en el panel. Por ello, el bus del panel está sujeto a rizado. Este método usa el rizado para determinar el MPPT. Se analizan las variaciones de v , de i y de

p. Si $p'v'$ o $p'i'$ es positivo el sistema está a la izquierda del MPP, si no a la derecha. De este modo se define el ciclo de servicio del convertidor como:

$$\begin{aligned}d(t) &= -k_3 \int \dot{p}v dt \\d(t) &= -k_3 \int \dot{p}i dt\end{aligned}\tag{1.6}$$

Este método se puede implementar analógicamente, dependiendo de la precisión, la velocidad de convergencia, la frecuencia de conmutación del convertidor y de la ganancia de este circuito analógico. Con un buen diseño este método converge rápidamente y es preciso, funcionando bien incluso con cambios bruscos de irradiancia. Además, no necesita ser calibrado ni requiere información previa sobre los paneles. La primera ecuación no es afectada por la capacitancia parásita. La segunda si, por lo que falla debido al desfase provocado por esta capacitancia parasita.

C.13 BARRIDO DE CORRIENTE

Este método barre la curva característica IV de los paneles cada cierto tiempo, permitiendo obtener el MPP. Para realizar este barrido se utiliza una forma de onda con unas funciones matemáticas especiales muy complejas. El barrido puede llegar a durar tan solo 50 ms, durante los cuales no se genera energía. En la práctica esta técnica es factible solo si el consumo del seguidor es menor que el aumento de energía que se consigue con él. Es lento en converger.

C.14 CONTROL DE PENDIENTE DEL CONDENSADOR DEL BUS DE CONTINUA

Esta técnica sólo puede utilizarse en un sistema fotovoltaico conectado a la red de alterna. Se basa en que, mientras se mantiene constante la tensión del bus de continua, incrementar la corriente (variando el duty del convertidor DC-DC) provoca un incremento de potencia.

En el momento que la tensión empieza a caer significa que ya se ha alcanzado la máxima potencia que puede entregar el panel, es decir, que se ha pasado el MPP. Este método puede implementarse mediante electrónica analógica. Sin embargo, es menos preciso que otros métodos que miden directamente la potencia en bornes de los paneles. Requiere medir la tensión del bus de continua, como puede verse en Fig. C.1.

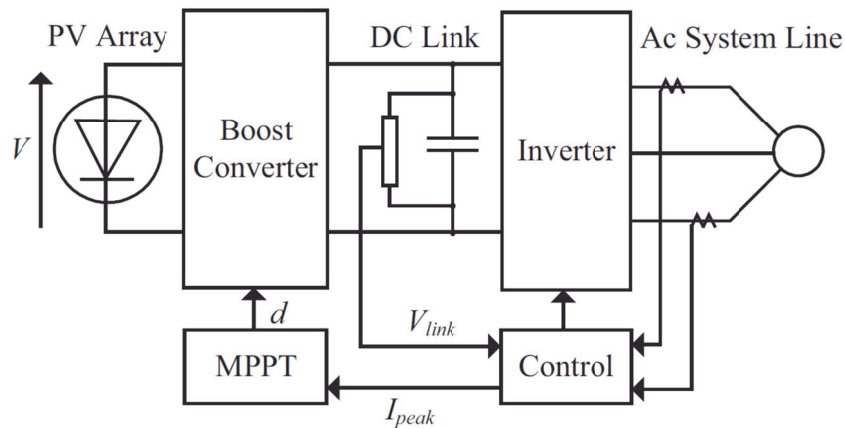


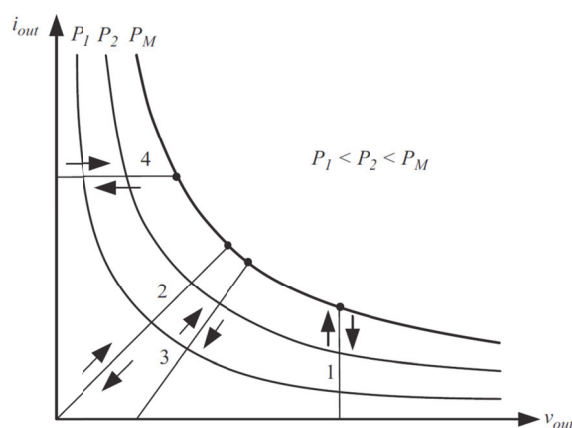
Fig. C.1 Control de pendiente del condensador

C.15 MAXIMIZACIÓN DE LA POTENCIA EN LA CARGA

Este método busca maximizar la potencia que llega a la carga. Asumiendo que los conversores no tienen pérdidas, es equivalente a maximizar la potencia en bornes del panel. Como normalmente la tensión en la carga está determinada, bien sea por una batería o por la conexión a red, se busca maximizar la corriente. Es poco preciso, en la práctica casi nunca trabaja en el MPP.

C.16 REALIMENTACIÓN DE dP/dV Ó dP/dI

Consiste en calcular la pendiente de las curvas dP/dV o dP/dI y realimentar esta información al convertidor DC-DC. El modo de realizar los cálculos de la pendiente de las curvas, que pueden verse en Fig. C.2, es muy variable. Es un método muy rápido, pues el MPP se alcanza en decenas de microsegundos. Sin embargo, es bastante complejo.

Fig. C.2 Realimentación de dP/dV

Anexo D COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

En este capítulo se van a explicar los elementos más comunes en una instalación fotovoltaica, a excepción de los paneles fotovoltaicos que ya han sido explicados en el anterior apartado [15]. Es importante señalar que existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos, los conectados a red y los aislados. Hay determinados componentes que son más habituales en uno de estos dos tipos, como puede verse en Fig. D.1. Por ejemplo en sistemas aislados es habitual la presencia de baterías, siendo poco habituales en sistemas conectados a red, especialmente porque están prohibidas en caso de recibir subvención por la venta de energía.

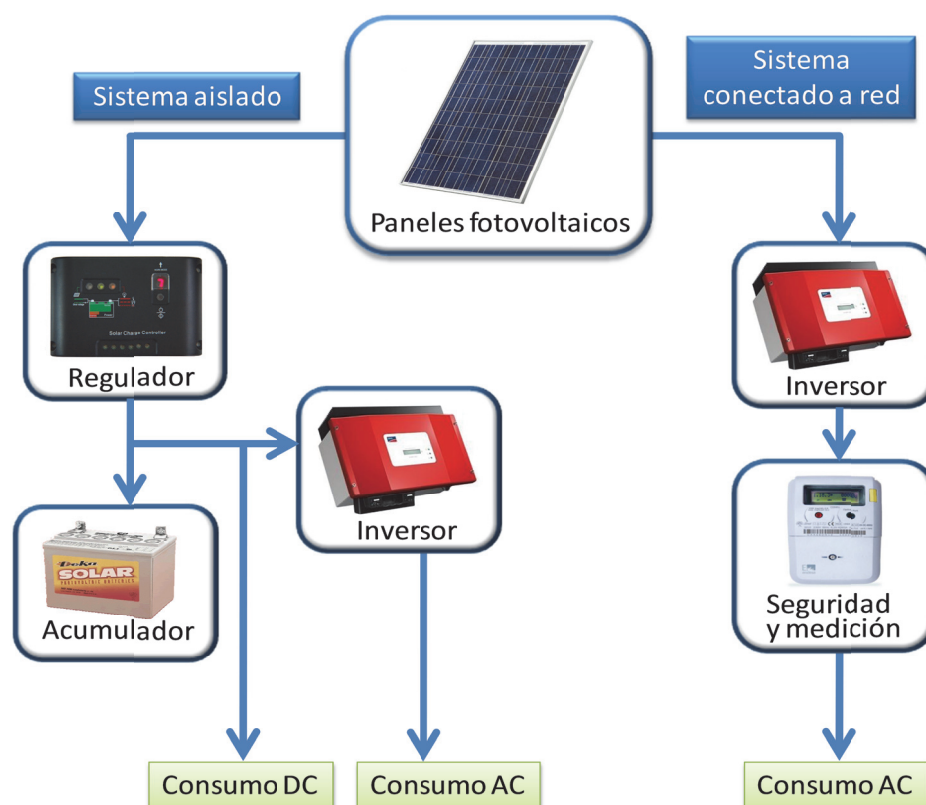


Fig. D.1 Esquema de sistema fotovoltaico aislado y conectado a red

D.1 REGULADOR

El regulador es el enlace entre los paneles, las baterías y las cargas en sistemas aislados. Asegura que la batería funcione en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobredescarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería. El procedimiento que utiliza para ello es determinar el estado de carga de la batería a partir de la tensión a la que ésta se encuentra.

En sistemas pequeños no es un elemento imprescindible, pero sí muy aconsejable. A medida que la instalación se vuelve más compleja, es necesario considerar otros aspectos, como la posibilidad de desconectar las cargas menos prioritarias en caso de escasez de energía o arrancar el generador de back-up, si existe, para evitar descargar en exceso la batería. Es

importante que el dispositivo muestre información sobre el estado actual del sistema, como el de Fig. D.2. Algunos reguladores más avanzados incorporan seguimiento del punto de máxima potencia, aunque existen convertidores DC-DC independientes para ello.

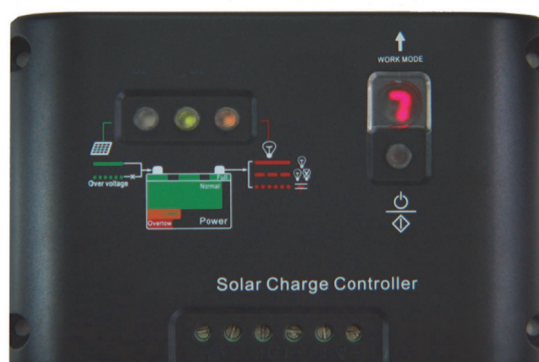


Fig. D.2 Regulador fotovoltaico

D.2 INVERSOR

Es el equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico, en forma de corriente continua, adaptándola a las condiciones requeridas por las cargas y al suministro a la red, en caso de sistemas conectados. En Europa normalmente se emplea corriente alterna a 230 V y 50 Hz.

Los inversores están caracterizados principalmente por la tensión de entrada, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia. Los dos primeros factores dependen directamente de la instalación fotovoltaica. En cuanto a la eficiencia, es importante que sea elevada también en cargas parciales. Deben incluir protecciones contra cortocircuitos y sobrecargas, así como ante variaciones excesivas de frecuencia de red.

Otras características que debe tener son: posibilidad de rearme y desconexión automáticos, admisión de picos de potencia del 150% de su potencia máxima, baja distorsión armónica (salida similar a una senoide), bajo consumo, aislamiento galvánico, disponibilidad de sistema de medidas y monitorización, y por supuesto que cumpla con los requisitos que establece el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Normalmente estos dispositivos tienen incorporado seguimiento del punto de máxima potencia, implementado en un convertidor DC-DC incluido justo antes de la etapa inversora. En Fig. D.3 se muestra el aspecto de uno de estos dispositivos.



Fig. D.3 Inversor para solar fotovoltaica.

D.3 BATERÍA O ACUMULADOR.

Los sistemas aislados necesitan almacenamiento para periodos en los cuales la irradiación solar no puede satisfacer la demanda, fundamentalmente durante la noche o en días muy nublados. La opción más utilizada son las baterías electroquímicas, especialmente las de plomo ácido, como la de Fig. D.4. El tamaño de estas baterías será aquel que asegure el suministro durante un determinado periodo de tiempo, habitualmente cuatro o cinco días, aunque en sistemas que requieran una fiabilidad muy alta será mayor.

Una ventaja de las baterías es que funcionan con corriente continua y permiten una conexión directa con los paneles. Por desgracia, la batería es un punto débil en estos sistemas, ya que su vida útil es menor al del resto de componentes, y supone aproximadamente un tercio del coste total de la instalación durante su vida útil. La vida de la batería estará determinada por sus ciclos de carga y descarga, por lo que se deberá prestar especial atención a cuidarla lo mejor posible. Algunos consejos serían evitar que se descargue profundamente, evitar que sufra altas temperaturas o asegurar cargas completas cada cierto tiempo



Fig. D.4 Batería para una instalación solar fotovoltaica

D.4 ELEMENTOS DE CONEXIÓN A RED

En Fig. D.5 se muestran los componentes principales en una fotovoltaica conectada a red, algunos de los cuales ya han sido explicados. Además de ellos, en cumplimiento del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, la instalación completa deberá incluir una serie de elementos adicionales, que se explican a continuación.

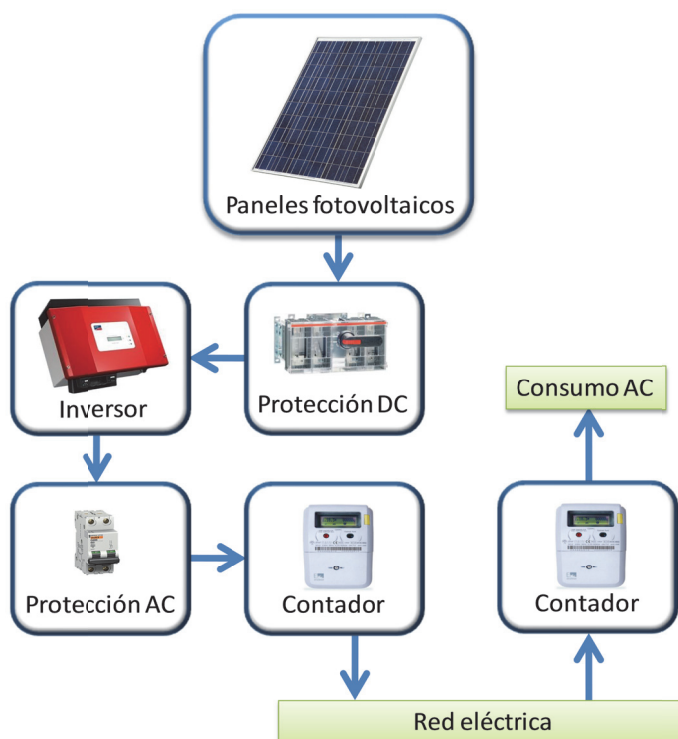


Fig. D.5 Esquema de una instalación solar fotovoltaica conectada a red

D.4.1 CAJA GENERAL DE PROTECCIÓN O CAJA DE PROTECCIÓN Y MEDIDA

La caja general de protección marca el límite de propiedad entre la red eléctrica, perteneciente a la compañía, y el abonado. Contiene elementos que protegen la instalación eléctrica de posibles cortocircuitos o picos de intensidad. Estas protecciones suelen ser térmicas, normalmente fusibles en los conductores de fase con poder de corte igual o superior a la corriente de cortocircuito previsto en el punto de instalación. En el caso de instalaciones para un solo propietario, se instala en un único conjunto la caja general de protección y los contadores, en lo que se conoce como caja de protección y medida.

Existen dos posibilidades en cuanto a la tarificación: doble contador y net metering. En la primera opción un contador suma toda la energía producida por los paneles, que se vende en muchas ocasiones a precio subvencionado. El otro contador suma la energía consumida, que se paga a precio estándar. En la segunda opción sólo hay un contador bidireccional que calcula la transferencia de energía desde la vivienda a la red, por lo que sólo se vende la energía sobrante.

D.4.2 PUESTA A TIERRA

Las masas de los componentes de la instalación fotovoltaica, incluyendo la estructura de los paneles, deben estar conectadas a una tierra independiente del neutro de la empresa distribuidora. Esta puesta a tierra limita la tensión que puede presentarse en estos elementos y permite la actuación de las protecciones.

D.4.3 CABLEADOS DE INTERCONEXIÓN

Conecta los paneles solares con las cajas de interconexión y con otra instrumentación. Este cableado de paneles se realizará con materiales de alta calidad para que se asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie, cumpliendo con el REBT. En instalaciones con paneles en serie y tensión igual o mayor a 24V son necesarios diodos de derivación.

D.4.4 CUADRO GENERAL DE MANDO Y PROTECCIÓN.

Los dispositivos generales de mando y protección, así como el interruptor de control de potencia, normalmente se instalan juntos en un mismo cuadro. Estos dispositivos son, como mínimo:

- Un interruptor general automático, omnipolar, que permite su accionamiento manual y dotado de elementos de protección contra sobrecarga y cortocircuitos.
- Un relé diferencial general asociado al interruptor general, destinado a la protección contra contactos indirectos de todos los circuitos.
- Dispositivos de corte omnipolar destinados a la protección contra sobrecargas y corto circuitos de cada uno de los circuitos interiores.
- Dispositivo de protección contra sobretensiones, si es necesario.

Todas las masas de los equipos eléctricos protegidos por un mismo dispositivo de protección han de estar interconectados y unidos por un conductor de protección a una misma toma a tierra.

Anexo E MANUAL DE USO DE LA APLICACIÓN

En Fig. E.1 se muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica de la aplicación diseñada en MATLAB. En ella pueden diferenciarse cuatro bloques bien diferenciados: “Características paneles”, “Curvas de los paneles”, “Algoritmo MPPT” y “Array con sombra parcial”

The screenshot shows the 'fotovoltaico' application window. It is divided into four main sections:

- CARACTERÍSTICAS PANELES:** Contains input fields for panel characteristics such as Voc en STC (21.06), Isc en STC (3.8), Kv (mV/°C) (-80), Ns (Número de células en serie por panel) (36), Factor diodo 1 (1), Factor diodo 2 (1.2), Rs (ohmios) (0.001), and Rp (ohmios) (10000). It also includes checkboxes for 'Estimar Rs y Rp' and 'Estimar Rs y Rp automáticamente'.
- CURVAS DE LOS PANELES:** Includes fields for 'Número de curvas' (5), 'Irradiancia inicial (W/m²)' (200), 'Incremento de irradiancia (W/m²)' (200), 'Temperatura inicial (°C)' (25), and 'Incremento de temperatura (°C)' (0). There are buttons for 'Dibujar gráficas' and a checkbox for 'No borrar gráficas'.
- ALGORITMO MPPT:** Features fields for 'Tensión inicial' (15), 'Incremento V alto (V)' (0.4), 'Incremento V pequeño (V)' (0.05), and 'Umbral G' (200). It also has a section for 'Entrada de datos' with 'Condiciones', 'Irradiancia', 'Temperatura', and 'Ciclos' for three steps. A 'Perturbación y observac...' dropdown is present. At the bottom, there are fields for 'G [...] W/m²', 'T [...] °C', and 'Rendimiento' (0).
- ARRAY CON SOMBRA PARCIAL:** Includes a table for 'Condiciones iniciales' and 'Condiciones finales' across five panels. It has checkboxes for 'Dibujar gráficas', 'No borrar gráficas', 'Dibujar sólo curva total', and 'Dibujar condiciones en MPPT'. There are also fields for 'Ciclos transición' (100), 'Ciclos antes transición' (20), 'Ciclos después transición' (20), and 'Rendimiento' (0).

Fig. E.1 Pantalla principal de la aplicación

El bloque “Características paneles” permite introducir los datos característicos del panel fotovoltaico, de modo que las curvas características del modelo informático coincidan con las del datasheet. La mayoría de datos pueden encontrarse en los documentos proporcionados por el fabricante, excepto los factores de calidad de los diodos y las resistencias del circuito equivalente.

Los factores de calidad de los diodos dependen de la naturaleza de cada panel, por ejemplo para los de silicio policristalino son habituales valores de 1 ó 1,2. Las resistencias equivalentes también son muy variables, la resistencia en paralelo suele ser de cientos de ohmios, mientras que la resistencia en serie puede ser menor de un ohmio. Se ha añadido un botón “Estimar R_s y R_p ” que estima estos valores a partir del resto de datos del panel, aunque no siempre proporciona un resultado preciso. También está la pestaña “Estimar R_s y R_p automáticamente” que si está marcada realiza esta estimación antes de dibujar curvas o calcular un seguimiento del MPP.

El bloque “Curvas de los paneles” permite dibujar las curvas I-V y P-V de los paneles cuyos datos se han introducido en el bloque anteriormente explicado. Es posible seleccionar el número de curvas, así como la diferencia de irradiancia y temperatura entre cada una de ellas, mediante valores iniciales e incrementos. Por ejemplo, para dibujar tres curvas a 400 W/m^2 , 600 W/m^2 y 800 W/m^2 , puede seleccionarse número de curvas 3, irradiancia inicial 400 W/m^2 , e incremento de irradiancia 200 W/m^2 . De igual modo se procedería para la temperatura, por ejemplo si se desean todas a 25°C se seleccionaría temperatura inicial 25°C e incremento de temperatura 0°C . Para trazar las curvas se debe pulsar “Dibujar gráficas”. La *checkbox* “No borrar gráficas” permite que cuando se pulse de nuevo el botón de dibujar MATLAB no borre las figuras previamente dibujadas.

El bloque “Algoritmo MPPT” permite realizar simulaciones de seguimiento del punto de máxima potencia con el panel fotovoltaico configurado. Se puede configurar el método de seguimiento, así como sus parámetros de tensión inicial, incrementos de tensión, umbral de irradiancia, etc. Los métodos incluidos son perturbación y observación, conductancia incremental, tensión proporcional a la tensión de circuito abierto y el método diseñado en este trabajo. Para utilizar el método de tensión constante basta con seleccionar perturbación y observación e introducir 0 en los incrementos de tensión. Las casillas de AP/AV y el umbral de irradiancia sólo se utilizan en el método diseñado, en la memoria principal se explica en qué consisten estas variables.

La entrada de datos de irradiancia y temperatura puede realizarse de tres formas, seleccionables mediante un menú desplegable. La primera es mediante incrementos regulares, indicando los valores iniciales, los valores finales y el número de ciclos que dura la transición. Pueden encadenarse hasta tres transiciones. El segundo modo es introducir manualmente los datos de irradiancia y temperatura en forma de vector en la casilla habilitada a tal efecto. La última posibilidad consiste en cargar los datos de un archivo Excel, seleccionando los rangos de cada una de las variables así como el nombre del fichero, que debe estar en la carpeta seleccionada en MATLAB.

El botón “MPPT” lanza la simulación. Si está seleccionado “dibujar curvas de los paneles” se añadirán estas curvas, según la configuración del bloque correspondiente, a las gráficas que muestran el seguimiento del MPPT. Cuando acaba la simulación aparece el rendimiento en el visor habilitado a tal efecto, así como en la ventana principal de MATLAB. También se guarda un archivo Excel con los valores de las principales variables durante la simulación, llamado “Resultados.xlsx”

Por último, el bloque “Array con sombra parcial” permite calcular las curvas que se forman y realizar simulaciones con varios paneles en serie no uniformemente iluminados. Es posible definir transiciones, definiendo las irradiancias y temperaturas iniciales y finales sobre cada panel, así como el tiempo que dura esta transición. Incluye un botón para dibujar las gráficas y otro para calcular seguimientos del punto de máxima potencia.

Las características de los paneles así como del algoritmo MPPT se configuran en los bloques correspondientes. Si está seleccionado “Buscar MPP sombra parcial” se activa el algoritmo explicado en la memoria principal que localiza el MPP verdadero en estas situaciones. También incluye un cuadro en el que aparece el rendimiento obtenido cuando finaliza una simulación.

