

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Caracterización espectral del aumento de temperatura en células solares fotovoltaicas



Máster Universitario en
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Ion Urrea Fernández

Tutoras: Idoia San Martín Biurrun (UPNA)

Jaione Bengoechea Apezteguía (CENER)

Pamplona, 28 de junio de 2018



RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster ha sido desarrollado durante el curso 2017-2018 en el departamento de Energía Solar Fotovoltaica del Centro Nacional de Energías Renovables. En él se han desarrollado el montaje experimental así como los procedimientos de medida necesarios para la caracterización del aumento de temperatura de células solares fotovoltaicas en el punto de máxima potencia y en circuito abierto. Además, se han utilizado diferentes filtros ópticos con el objetivo de caracterizar espectralmente el aumento de temperatura, así como la contribución de la radiación infrarroja en ello. También se ha realizado un modelo térmico de la célula fotovoltaica a fin de validar las medidas experimentales efectuadas. Por último decir que el presente documento ha dado lugar a la presentación de un póster con el título: “*Spectral Characterization of Temperature Increase in Encapsulated Crystalline Silicon Solar Cells*” en la 35ª edición del congreso europeo de fotovoltaica EU PV SEC 2018 que tendrá lugar en Bruselas del 24 al 28 de septiembre de 2018.

LISTA DE PALABRAS CLAVE

3

Célula fotovoltaica

Caracterización

Espectral

Aumento de temperatura

Filtro espectral

Filtro infrarrojo

Modelo térmico

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
LISTA DE PALABRAS CLAVE.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
1.- OBJETIVO.....	9
2.- INTRODUCCIÓN.....	10
2.1.- La energía.....	10
2.2.- Demanda energética mundial.....	11
2.3.- Combustibles fósiles y cambio climático	12
2.4.- Energías renovables	14
2.4.1.- Ventajas e inconvenientes	14
2.4.2.- Tipos de tecnologías.....	15
2.5.- ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
2.5.1.- Estado del arte	18
3.- FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
3.1.- Los semiconductores.....	23
3.2.- El band gap y los portadores de carga	24
3.3.- Concentración intrínseca de portadores de carga	24
3.4.- Dopado.....	24
3.5.- Concentración de portadores de carga en equilibrio	25
3.6.- Generación.....	26
3.7.- Unión PN	27
3.8.- Estructura de la célula fotovoltaica	27
3.9.- Corriente generada por la luz	29
3.10.- Curva I/V	30
3.10.1.- Corriente de cortocircuito.....	30
3.10.2.- Voltaje de circuito abierto	31
3.10.3.- Fill factor	31

3.10.4.- Eficiencia	32
3.10.5.- Efecto de la intensidad de la luz	32
3.10.6.- Efecto de la temperatura	33
3.11.- Reducción de la temperatura de operación como solución a la baja eficiencia de conversión	34
4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	37
4.1.- Descripción del montaje experimental.....	37
4.2.- Factor de relación entre corriente de cortocircuito e irradiancia	39
4.3.- Resultados experimentales.....	41
4.3.1.- Aumento de temperatura en función de la irradiancia	41
4.3.2.- Aumento de temperatura con filtros paso banda	49
5.- MODELO TÉRMICO DE UNA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA	53
5.1.- Descripción del modelo	53
5.2.- Resultados de las simulaciones y validación de los resultados experimentales.....	57
6.- CONCLUSIONES	59
7.- LÍNEAS FUTURAS	61
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXO I: NOMENCLATURA	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Suministro total de energía primaria (TPES) a nivel mundial, por combustible, de 1971 a 2015 [1].	11
Fig. 2 Usos finales de la energía por sector. [1]	12
Fig. 3 Relación entre la concentración de CO ₂ y el cambio en la temperatura media terrestre [2].	14
Fig. 4 Representación de la evolución histórica de los precios de contratación en plantas fotovoltaicas y eólicas on-shore en diferentes países [4].	18
Fig. 5 Representación de la evolución histórica y previsión de la capacidad anual instalada de fotovoltaica [4].	19
Fig. 6 Representación de la evolución histórica y previsión de la capacidad total instalada [4].	20
Fig. 7 Representación de los niveles anuales de irradiancia en Europa y el ratio EPBT [5].	21
Fig. 8 Representación de la evolución histórica de las eficiencias en las diferentes tecnologías fotovoltaicas [7].	22
Fig. 9 Ilustración de la estructura atómica del silicio [2].	23
Fig. 10 Estructura atómica y dopado del silicio [2].	25
Fig. 11 Representación de la banda de valencia, de conducción y del band-gap [2].	26
Fig. 12 Estructura típica de una célula fotovoltaica tipo p.	28
Fig. 13 Representación esquemática del funcionamiento de una célula fotovoltaica [2].	29
Fig. 14 Representación de la curva característica de una célula fotovoltaica [2].	30
Fig. 15 Representación gráfica del fill factor [2].	32
Fig. 16 Ilustración del efecto de la irradiancia sobre la curva característica [2].	33
Fig. 17 Ilustración del efecto de la temperatura sobre la curva característica [2].	33
Fig. 18 Diagrama de Sankey de los diferentes procesos de pérdidas en células fotovoltaicas [11].	34
Fig. 19 Representación de la contribución de los diferentes mecanismos de pérdidas como fuente de calor [11].	35
Fig. 20 Distribución del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda en una célula solar fotovoltaica. [8].	36
Fig. 21 Esquema del montaje experimental.	37
Fig. 22 Fotografía de una célula fotovoltaica encapsulada utilizada en el presente trabajo.	39
Fig. 23 Comparación de la irradiancia espectral, con y sin filtro infrarrojo, medidos ambos a la misma distancia respecto de la lámpara.	40
Fig. 24 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la corriente de cortocircuito. Célula fotovoltaica en circuito abierto.	42
Fig. 25 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la irradiancia. Célula fotovoltaica en circuito abierto.	43
Fig. 26 Fotografía del montaje experimental para la medida de aumento de temperatura, con filtro infrarrojo, de la célula fotovoltaica sin encapsular.	44

Fig. 27 Representación de la evolución temporal de la temperatura de la célula fotovoltaica encapsulada y sin encapsular.....	45
Fig. 28 Representación del incremento de temperatura en la célula fotovoltaica, encapsulada, respecto al ambiente en función de la irradiancia y medidas realizadas sobre célula sin encapsular.....	46
Fig. 29 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la corriente de cortocircuito. Célula fotovoltaica operando en el punto de máxima potencia..	47
Fig. 30 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la irradiancia. Célula fotovoltaica en MPP.	48
Fig. 31 Representación de los aumentos de temperatura en función de la irradiancia para los casos de circuito abierto y de punto de máxima potencia.	48
Fig. 32 Representación de las medidas de transmitancia de los filtros paso banda utilizados. .	49
Fig. 33 Representación de la irradiancia espectral con cada uno de los filtros paso banda utilizados en las medidas de aumento de temperatura y el valor de irradiancia integrado.	50
Fig. 34 Fotografía de la célula iluminada con los diferentes filtros paso banda.....	50
Fig. 35 Representación del aumento de temperatura, respecto al ambiente, normalizado por irradiancia incidente para cada filtro paso banda en condición de circuito abierto.	51
Fig. 36 Representación del aumento de temperatura, respecto al ambiente, normalizado por la irradiancia incidente para cada filtro paso-banda en condición de punto de máxima potencia.	52
Fig. 37 Representación de los resultados obtenidos de aumento de temperatura experimentalmente y en las simulaciones.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contribución de los diferentes mecanismos de pérdidas como fuente de calor [11]. ..	35
Tabla 2 Irradiancia y corriente de cortocircuito para el cálculo del factor que los relaciona.....	40
Tabla 3 Parámetros utilizados en el modelo para el cálculo de la temperatura final de la célula y módulo fotovoltaicos.....	56
Tabla 4 Datos de condiciones ambientales para las simulaciones realizadas en el caso de la célula encapsulada	57

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1	53
Ec. 2	53
Ec. 3	53
Ec. 4	54
Ec. 5	55
Ec. 6	55
Ec. 7	55
Ec. 8	55
Ec. 9	55
Ec. 10	56

1.- OBJETIVO

El presente TFM ha sido motivado por el proyecto TEXTUMODU, financiado por el Gobierno de Navarra y desarrollado conjuntamente entre CENER y la Universidad Pública de Navarra, cuyo objetivo era el desarrollo de vidrios estructurados que reduzcan la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, a fin de incrementar tanto la eficiencia como la vida útil de los mismos. El objetivo de este trabajo es, por un lado, la cuantificación de la disminución de la temperatura de funcionamiento de células solares fotovoltaicas basadas en silicio cristalino tras filtrar la radiación infrarroja que no contribuye a la generación de electricidad. Por otro lado, se tiene como objetivo la caracterización espectral del aumento de temperatura de las células fotovoltaicas, a fin de cuantificar este efecto, y que puedan motivar el desarrollo de nuevas soluciones de refrigeración.

2.- INTRODUCCIÓN

El presente TFM ha sido realizado en el campo de las energías renovables, concretamente en el de fotovoltaica. En este apartado se va a introducir la demanda de energía primaria mundial y la fuerte dependencia actual de los combustibles fósiles, cuya quema contribuye al denominado efecto invernadero, y un breve repaso a las diferentes tecnologías basadas en fuentes renovables así como sus principales ventajas e inconvenientes.

2.1.- La energía

La evolución del ser humano ha ido siempre de la mano del uso de la energía. En un principio se utilizaba la energía calorífica del fuego para cocinar y calentarse. Posteriormente, se empezó a utilizar la energía eólica para transporte marítimo mediante las embarcaciones a vela y en otras funciones como los molinos, para los cuales también se empleaba la energía cinética del agua. Un gran avance se produjo al pasar a consumir combustibles fósiles, primero el carbón con la introducción de la máquina de vapor durante la revolución industrial del siglo XIX y posteriormente el petróleo y el gas natural en el siglo XX. Esto junto con el desarrollo de las centrales nucleares basadas en la fisión atómica nos hace llegar a la situación energética actual.

10

Antes de nada hay que hacer referencia a la distinción entre energía primaria y vectores energéticos. Se denomina energía primaria a las fuentes naturales de energía antes de sufrir cualquier transformación por parte del hombre. Ejemplos de esto serían el petróleo (crudo), el carbón, la luz solar, el viento, el agua en movimiento, la biomasa o el uranio. Los vectores energéticos, o energía secundaria, son formas de energía que son utilizables por el ser humano, como por ejemplo, la electricidad, los combustibles (gasolina, diésel, hidrógeno, etc.), o el aire comprimido.

Actualmente, el ser humano emplea la energía primaria de manera directa para calefacción (calefacción termosolar) o bien la transforma en vectores energéticos: la gasolina para el transporte, o la electricidad en iluminación, climatización, refrigeración, etc.

La energía primaria, tras pasar por unas transformaciones intermedias se convierte en energía final de consumo. Todas estas transformaciones cumplen las llamadas "Leyes de la Termodinámica" que de manera resumida dicen lo siguiente:

- La energía se transforma, pero se conserva.
- En las transformaciones energéticas, parte de la energía se degrada, por lo que será más difícil su transformación en trabajo.

La exergía es una propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía, se habla de calidad de la energía. Así un sistema de calefacción que parta de energía térmica tendrá un rendimiento de conversión del 80 % mientras que si parte de energía eléctrica el rendimiento de conversión es prácticamente del 100 %, del mismo modo, un motor de combustión interna alternativo de un coche tiene un rendimiento de conversión de energía térmica a trabajo del orden del 30 % mientras que un coche eléctrico tiene un rendimiento de conversión del 95 %.

2.2.- Demanda energética mundial

Como se observa en la Fig. 1, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el suministro total de energía primaria mundial pasó de los 6106 Mtoe (millones de toneladas equivalentes de petróleo) en 1973 a los 13647 Mtoe, más del doble, en 2015 [1].

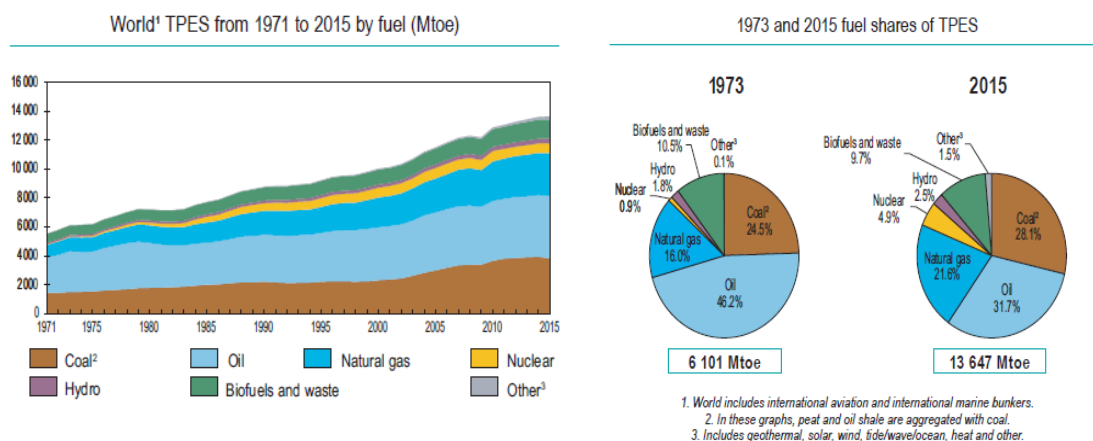


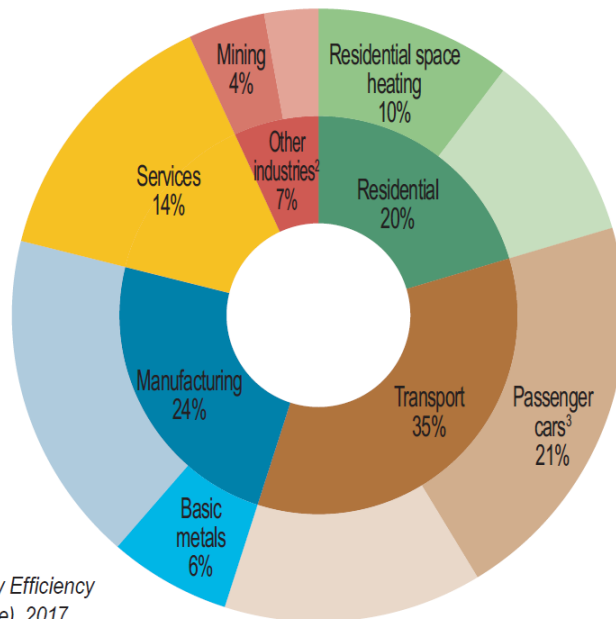
Fig. 1 Suministro total de energía primaria (TPES) a nivel mundial, por combustible, de 1971 a 2015 [1].

Tanto la cantidad de energía demandada como su reparto en las diversas fuentes de energía han ido evolucionando desde los años 70. Como se ha comentado anteriormente, la cantidad de energía primaria consumida en 2015 es más del doble de la energía consumida en 1973. En 1973, el 46,2 % de la demanda de energía primaria provenía del petróleo y ha ido perdiendo importancia hasta llegar al 31,7 % en 2015. Por el contrario, el gas natural ha ido ganando peso en el reparto de la demanda de energía primaria desde el 16 % en 1973 hasta alcanzar el 21,6 % en 2015.

Como se aprecia de Fig. 1, de toda la demanda energética mundial, más del 80 % proviene de la combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), un 9,7 % de la quema de biomasa y biocombustibles, un 4,9 % de la nuclear, un 2,5 % del agua y un 1,5 % de otras fuentes que engloban a la geotermia, la solar, la eólica, etc. Es decir, el sector energético

presenta una fuerte dependencia de los combustibles fósiles. Es por esto por lo que se le dedica un apartado específico en la presente memoria.

Como se puede apreciar en la Fig. 2, en la que se muestra la distribución del consumo final de la energía por sector, el 35 % de la energía es finalmente consumida en transporte (21 % en vehículos de pasajeros), el 24 % es consumido en procesos de manufactura (6 % en la producción de materias primas metálicas), un 20 % en usos residenciales, un 14 % en el sector de los servicios y el resto en otras industrias como la minería.



Source: IEA Energy Efficiency Indicators (database), 2017.

Fig. 2 Usos finales de la energía por sector. [1]

2.3.- Combustibles fósiles y cambio climático

Durante millones de años de evolución del planeta, los restos de los seres vivos que lo poblaron se fueron depositando en el fondo de mares, lagos y otras masas de agua. Allí fueron cubiertos por sucesivas capas de sedimento. Las reacciones químicas de descomposición y la presión ejercida por el peso de las capas de sedimento provocaron la formación de gas, petróleo y carbón, un proceso que necesitó de millones de años para que se diera.

No fue hasta 1850 cuando se empezó a comercializar el petróleo y fue entonces cuando comenzó el desarrollo de la industria petrolera que tomó una gran importancia situándose como la principal fuente de energía del planeta debido a su gestionabilidad y su rentabilidad económica.

Sin embargo, el petróleo no es un recurso renovable; fueron necesarios millones de años para su formación y se está quemando a un ritmo muy superior al necesario para su formación, llegando al punto de considerar el agotamiento de las reservas.

La teoría del pico del petróleo desarrollada por el geofísico M. King Hubbert es una teoría acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo que predice que la producción de petróleo crece hasta llegar a un pico a partir del cual la producción caerá al mismo ritmo al que creció describiendo una función con forma de campana, resaltando el hecho de que el factor limitante en la extracción no es el precio sino la energía necesaria para su producción, es decir la tasa de retorno energético. Esto quiere decir que en un primer momento la extracción del petróleo es sencilla y no se necesita emplear mucha energía en su extracción comparándola con la energía que se es capaz de extraer, pero conforme se van agotando las reservas, cada vez se hace más complicado extraerlo y la energía necesaria para la extracción de la misma cantidad de crudo es cada vez mayor, se llega a un pico de producción y a partir de éste la producción comienza a descender. El año en el que se da el pico del petróleo todavía no se ha definido con exactitud, pero la Agencia Internacional de la Energía publicó en noviembre de 2010, que la producción de petróleo crudo llegó a su máximo en 2006. La Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas considera que el pico del petróleo se alcanzó en 2010 mientras que el del gas se daría unos años más tarde.

Además de energía, la combustión de combustibles fósiles provoca la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

13

La temperatura superficial de la Tierra es resultado de un balance energético entre la radiación entrante del sol y la emitida desde la Tierra al espacio exterior. La radiación emitida está fuertemente afectada por la composición de la atmósfera. Si no existiese la atmósfera, la temperatura media de la superficie del planeta sería de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo, una cantidad de 270 ppm de CO_2 en la atmósfera absorbe la radiación emitida, manteniendo la temperatura media de la superficie terrestre en $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, haciéndola habitable para el ser humano. El dióxido de carbono absorbe en el rango de longitudes de onda entre 13 y $19\text{ }\mu\text{m}$. El vapor de agua, otro gas atmosférico, absorbe la radiación en el rango de 1 a $7\text{ }\mu\text{m}$. El 70 % de la radiación escapa en la ventana entre 7 y $13\text{ }\mu\text{m}$.

La actividad humana ha llegado a una escala en la que impacta en el medioambiente, se emiten gases a la atmósfera como el dióxido de carbono, metano, ozono, óxidos de nitrógeno y CFC's (clorofluorocarbonos) que absorben radiación en el rango de longitudes de onda entre $7\text{ }\mu\text{m}$ y $13\text{ }\mu\text{m}$. Esto altera la disipación de energía a través de la atmósfera provocando el aumento de temperatura de la superficie terrestre, en la Fig. 3 se ve la relación existente entre la concentración de CO_2 en la atmósfera y el aumento de la temperatura media. Se estima que los niveles de CO_2 en la atmósfera se doblarán para el año 2030 provocando un aumento de temperatura de entre 1 y $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto provocará cambios en los patrones de viento y lluvia causando desertización y el aumento del nivel de los océanos. El sector energético es el que más emisiones de gases de efecto invernadero produce debido a la combustión de

combustibles fósiles, es por esto la necesidad creciente de emplear tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

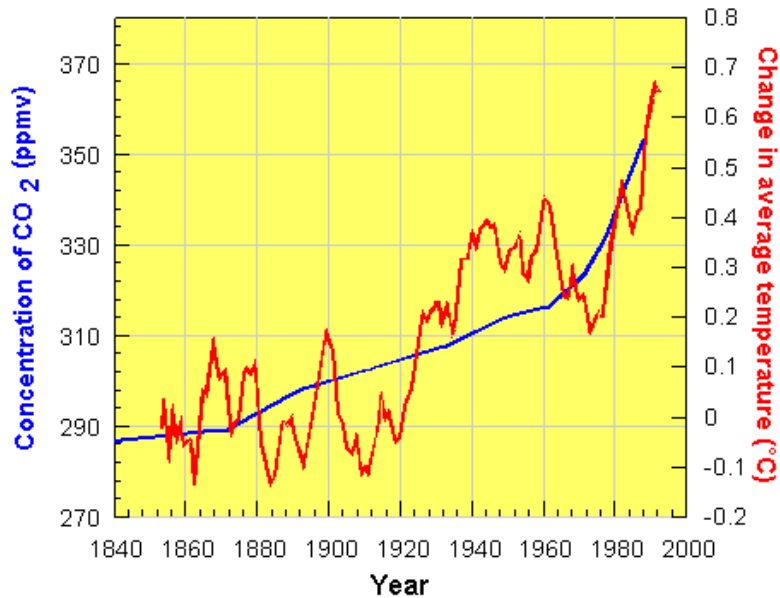


Fig. 3 Relación entre la concentración de CO₂ y el cambio en la temperatura media terrestre [2].

2.4.- Energías renovables

La solución a este problema de agotamiento de las materias primas energéticas, de las cuales dependemos fuertemente, y del cambio climático pasa por sustituir progresivamente el uso de combustibles fósiles por fuentes de energías renovables. Para ello será necesaria una transición hacia un mayor consumo eléctrico, el desarrollo de sistemas eficientes de almacenamiento, limitar el consumo de energía realizando un uso inteligente de ésta (evitando el despilfarro) y empleando equipos más eficientes, es decir, que realicen el mismo trabajo pero con un menor consumo de energía.

Se denomina energía renovable a aquella que se obtiene a partir de una fuente renovable, aquella que es inagotable o que es capaz de regenerarse de forma natural a un ritmo superior al que se consume. Son, por lo tanto, fuentes renovables el sol, el viento, la temperatura interna de la Tierra, el agua o la materia orgánica.

2.4.1.- Ventajas e inconvenientes

Aunque las energías renovables tienen sus pros y sus contras, el reciente informe *REthinking Energy* de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) hace referencia a un reciente estudio japonés según el cual los beneficios de las energías renovables son entre dos y tres veces mayores que los costes [3].

Ventajas:

- Durante su operación no emiten gases de efecto invernadero, reduciendo el riesgo del cambio climático.
- No generan ningún residuo durante su operación, aunque sus procesos de producción puedan ser contaminantes (fotovoltaica).
- Reducen la dependencia energética del exterior. En España en 2010 las energías renovables evitaron la importación de 2200 millones de euros en combustibles fósiles. [3]
- Generan puestos de trabajo. En la actualidad dan trabajo a 6,5 millones de personas entre empleo directo e indirecto. [3]
- Facilitan el acceso a la energía. En Bangladesh 13 millones de personas han accedido a la electricidad gracias a la energía fotovoltaica. [3]
- Sus fuentes de energía son inagotables.

Desventajas:

- Elevada inversión inicial.
- Disponibilidad variable. Son dependientes del recurso, siendo éste muy variable en función de las condiciones climáticas.
- Necesidad de grandes instalaciones, ocupando grandes extensiones de terreno, para obtener una cantidad importante de energía debido a la baja eficiencia, como es el caso de la fotovoltaica.

2.4.2.- Tipos de tecnologías

Se han desarrollado diversas tecnologías que son capaces de aprovechar la energía de las fuentes renovables, generalmente para su conversión directa a energía eléctrica. A continuación se va a realizar una breve descripción de las diferentes tecnologías más importantes desarrolladas.

- **Hidráulica**
Aprovecha la energía potencial y cinética del agua almacenada en embalses, o del agua que fluye por los ríos. Es una energía renovable y limpia que es gestionable, tiene un coste de mantenimiento relativamente bajo y no produce emisiones de CO₂. Sin embargo, tiene un gran impacto en el entorno por la necesidad de inundar grandes superficies de terreno, además del elevado coste de inversión que tiene la construcción de las presas. Estos inconvenientes son menores en la minihidráulica. La producción mundial va en aumento mientras que la producción en los países de la OCDE se ha estancado. China cuenta con el 23,2 % de la producción mundial y también es destacable el caso de Noruega, que es capaz de abastecer el 95,7 % de la demanda de energía eléctrica doméstica con energía hidráulica.

- Eólica

Aprovecha la energía cinética del viento para transformarla en electricidad. Se trata de una energía renovable y limpia, ya que no produce emisiones ni residuos. Además, genera puestos de trabajo en las plantas de montaje y de instalación. Sin embargo, no es gestionable ya que depende de la velocidad del viento y actualmente no dispone de almacenamiento.

- Solar
 - Fotovoltaica

Aprovecha la energía de la radiación solar para convertirla directamente en electricidad. Son instalaciones sencillas, con el desarrollo de proyecto más breve, baratas y con bajo mantenimiento, no necesitan agua y son modulares. Sin embargo, la disponibilidad del recurso es baja (menos de 12 horas diarias) y todavía se está desarrollando la tecnología de almacenamiento.
 - Termosolar

Aprovecha la energía térmica de la radiación solar para calefacción. Son instalaciones sencillas pero el aprovechamiento de la energía es bajo, solo en forma de calor y no cubre muy bien la demanda con el recurso, la demanda es grande en invierno cuando la radiación directa es relativamente baja y en verano que no hay demanda de calefacción el recurso es abundante.
 - Termoeléctrica

Está basada en la concentración de la radiación solar, mediante espejos, para incrementar la temperatura de un fluido calorportador y producir vapor, que será aprovechado por turbinas de vapor para producir electricidad al igual que se hace en las centrales eléctricas convencionales basadas en el ciclo Rankine. La ventaja que tienen es que existe almacenamiento de energía mediante depósitos de sales fundidas.

- Biomasa

Aprovecha la energía absorbida por las plantas para su crecimiento que es almacenada en forma de energía química. Pueden ser de origen vegetal, animal, además de la materia orgánica de las aguas residuales, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y otros residuos derivados de las industrias. También entran en esta categoría los biocombustibles como el biodiésel (a partir de aceites vegetales o grasas animales), el bioetanol (a partir de la fermentación de materia orgánica con altos contenidos de almidón) y el biogás (a partir de la degradación de materia orgánica en atmósfera pobre en oxígeno). Al quemar éstos se libera dióxido de carbono, como en cualquier proceso de combustión. Sin embargo, se considera que en total no emiten CO₂ debido a que las emisiones producidas en su combustión han sido almacenadas por la planta durante su vida en el proceso de la fotosíntesis.

- Marina
 - Mareomotriz. Aprovechamiento de la energía de la energía potencial y cinética de las mareas mediante presas de mareas o lagunas de mareas.
 - Energía de las corrientes marinas. Se aprovecha la energía cinética de masas de agua en movimiento continuo en los océanos mediante turbinas u onduladores.
 - Undimotriz. Aprovechamiento de la energía cinética de las olas. Hay diferentes tecnologías en desarrollo: OWC (columnas oscilantes de agua), de elemento flotante, de rebosamiento, AWS (Arquímedes Wave Swing) y dispositivos de impacto.
 - Energía térmica oceánica (OTEC). Aprovecha las diferencias de temperatura entre la superficie de los océanos y el agua a grandes profundidades para realizar un ciclo termodinámico en una máquina térmica y producir electricidad mediante una turbina conectada a un generador eléctrico.
 - Energía de gradiente salino oceánico (energía azul). Aprovecha el gradiente de concentración de sal entre el agua del mar y el agua de un río a través de una membrana que permite el paso del agua pero no de las sales provocando gradientes de presión aprovechables en una turbina.

17

- Geotérmica

Consiste en aprovechar la energía térmica existente bajo la superficie del terreno. Al aumentar la profundidad, aumenta también la temperatura, pudiéndose clasificar la geotermia en función de la temperatura del fluido de trabajo:

 - Muy baja temperatura ($T < 30\text{ °C}$). Climatización.
 - Baja temperatura ($30\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$), para uso térmico directo en procesos industriales y climatización.
 - Media temperatura ($T > 150\text{ °C}$) empleada en la generación eléctrica.

En definitiva, existen numerosas tecnologías de aprovechamiento de fuentes de energía renovables para la producción eléctrica y en cada zona geográfica, en función de la disponibilidad de sus recursos, será más rentable el aprovechamiento de unas u otras.

2.5.- ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar, de una forma u otra es la fuente de la mayoría de las energías disponibles en la Tierra. Los humanos, como cualquier animal dependemos del sol para calentarnos y alimentarnos. Sin embargo, el ser humano ha sido capaz de aprovechar la energía solar de muy diversas formas. Por ejemplo, los combustibles fósiles, que son materia vegetal de una era

pasada, son usados para el transporte, calefacción o generación de electricidad y es esencialmente energía solar almacenada durante millones de años. De forma similar, la biomasa convierte la energía solar en combustibles que pueden ser usados en calefacción, transporte o generación de electricidad. La energía eólica, usada durante cientos de años en el transporte, utiliza la energía cinética de las corrientes de aire, provocadas por la energía solar y el movimiento rotacional de la Tierra, para producir electricidad. También la energía hidroeléctrica deriva de la energía solar. La energía hidroeléctrica depende de la evaporación del agua por la energía del Sol y su posterior vuelta a la Tierra en forma de lluvia para abastecer los embalses.

La fotovoltaica es un método simple de aprovechamiento de la energía solar. Las células solares son los únicos dispositivos que aprovechan directamente la energía de radiación emitida por el Sol para transformarla en electricidad, sin ruidos, sin emisión de contaminantes y sin partes móviles, lo que hace que sean dispositivos muy robustos y duraderos. Sin embargo, en algunos casos, como en la tecnología CPV, son instalados sobre mecanismos de seguimiento de uno o dos ejes que permite la orientación de los módulos para optimizar su producción.

2.5.1.- Estado del arte

En cuanto a la energía solar fotovoltaica, ha llegado el momento en el que los precios contratados en la generación eléctrica (PPA) mediante tecnología fotovoltaica han alcanzado los niveles de la energía eólica. En algunos países, como India en la que los precios han descendido por debajo de los 4 céntimos de dólar por kWh, es incluso más rentable, en términos económicos, la instalación de plantas de generación solares que eólicas. También destacar que, como se puede apreciar de la Fig. 4, los precios quedan en el rango de las centrales térmicas.

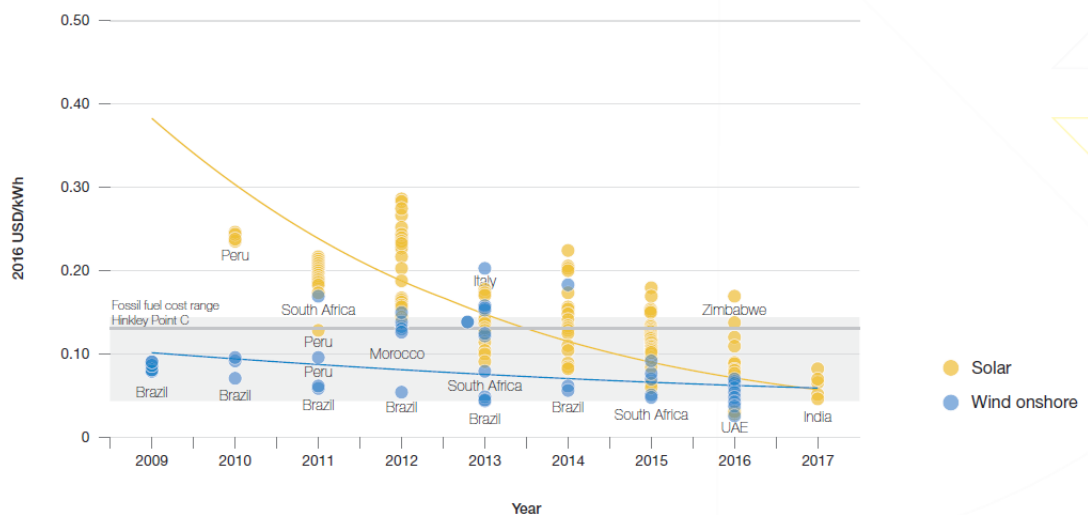


Fig. 4 Representación de la evolución histórica de los precios de contratación en plantas fotovoltaicas y eólicas on-shore en diferentes países [4].

Este marco de precios bajos ha propiciado el aumento, año tras año, de la capacidad anual instalada en fotovoltaica como puede verse en Fig. 5. Además, se prevé que la tendencia sea creciente cada año. El crecimiento en la capacidad instalada del año 2015 al 2016 ha sido del 50 %, superando en 2016 los 75 GW instalados [4]. Cabe destacar el papel de los países asiáticos China, India y Japón en el aumento de la capacidad instalada siendo en estos países donde mayor crecimiento está teniendo la potencia instalada en fotovoltaica, si bien es cierto que parten de valor bajo. Teniendo en cuenta la potencia instalada acumulada, en 2016 se alcanzó un valor de 306,5 GW y los países asiáticos copan más del 50 % [4]. Como puede verse en la Fig. 6, se prevé que la potencia acumulada de fotovoltaica va a seguir creciendo en los próximos años hasta alcanzar casi 1 TW en el año 2021.

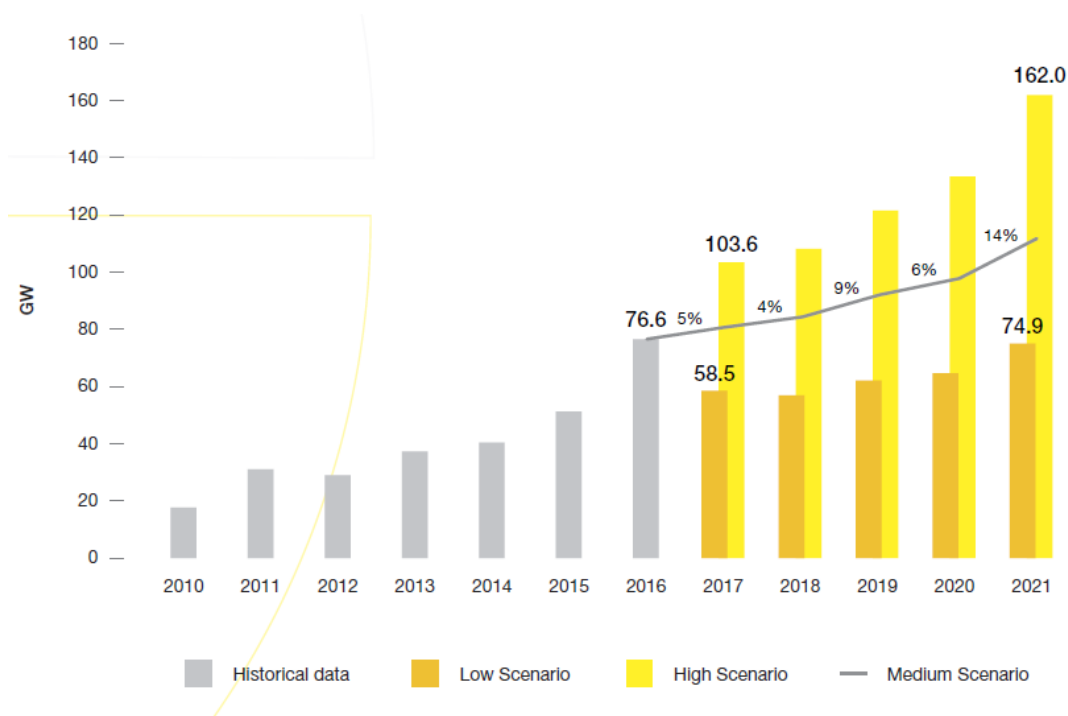


Fig. 5 Representación de la evolución histórica y previsión de la capacidad anual instalada de fotovoltaica [4].

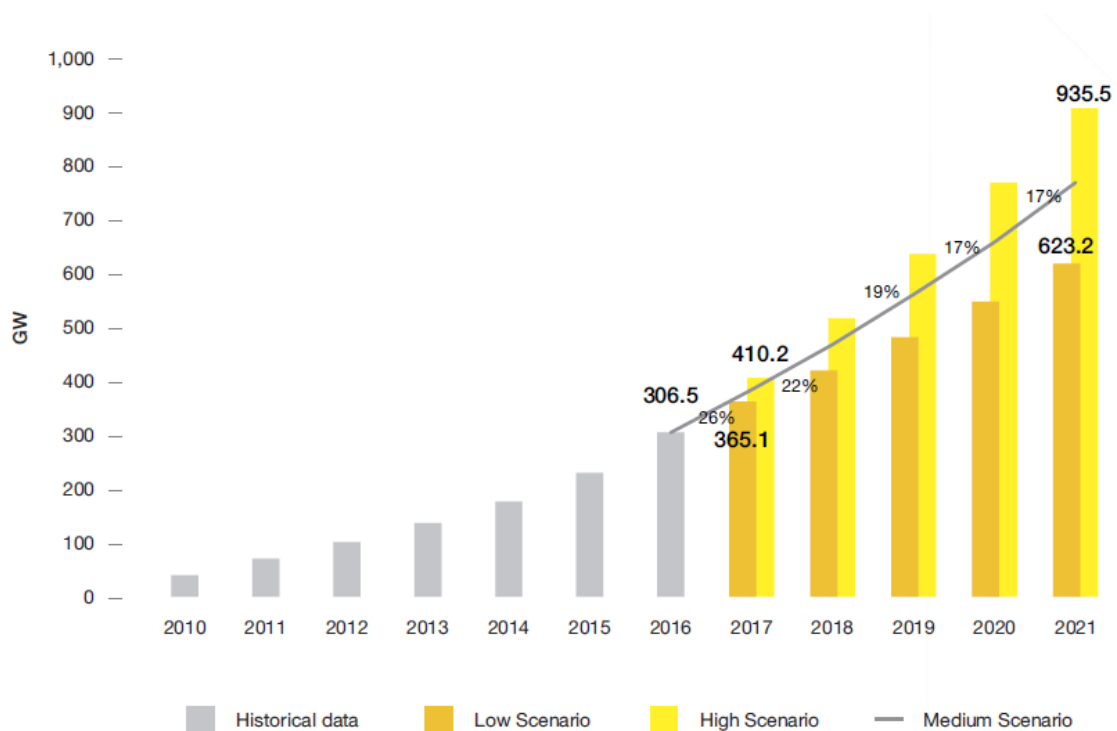


Fig. 6 Representación de la evolución histórica y previsión de la capacidad total instalada [4].

20

Como se ha comentado, producir electricidad mediante fotovoltaica tiene la ventaja de no emitir compuestos contaminantes, ni gases de efecto invernadero empleando un recurso renovable como es el sol. Sin embargo, para su producción y transporte se emplean otras fuentes que sí contaminan. Un ratio que se utiliza habitualmente es el EPBT (Energy Payback Time) y se define como el tiempo necesario de operación del sistema fotovoltaico para recuperar la energía necesaria en su producción. No en todas las zonas del mundo se tienen los mismos niveles de irradiación solar, siendo más rentable instalar fotovoltaica en las zonas donde haya mayor nivel medio de irradiación anual. En la Fig. 7 se aprecian estos niveles medios de irradiación anual y el ratio EPBT para Europa. Se puede ver que España es un país con un nivel de irradiación anual alto comparado con otros países europeos en donde el EPBT es actualmente de entre 0,7 y 2 años [5]. Es decir, un sistema fotovoltaico recupera la energía empleada en su montaje en prácticamente un año de operación. Teniendo en cuenta que un sistema fotovoltaico puede tener una vida útil de 30 años, aproximadamente el 95 % de la energía generada por el sistema está exenta de contaminantes, emisiones de gases de efecto invernadero o consumo de recursos no renovables [6].

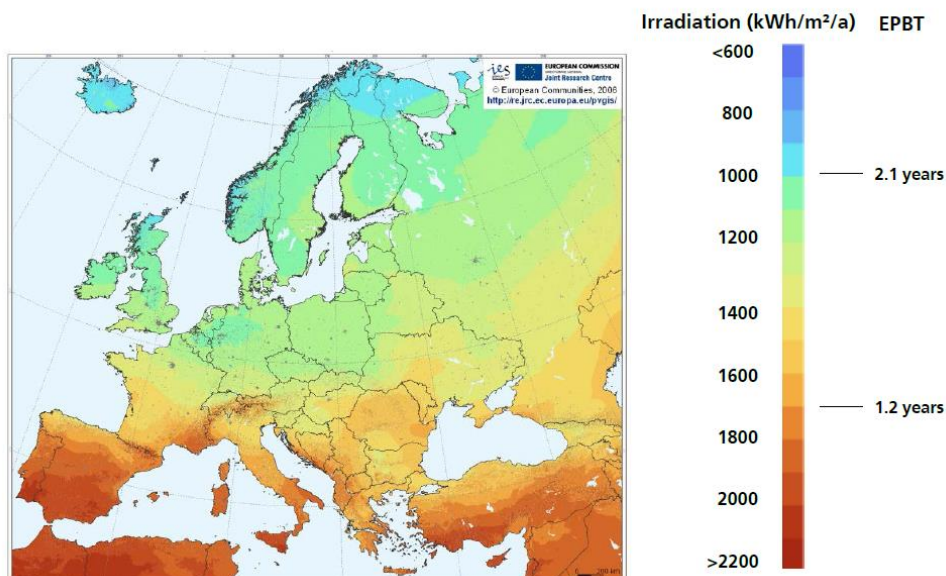


Fig. 7 Representación de los niveles anuales de irradiancia en Europa y el ratio EPBT [5].

Antes de comenzar con el capítulo referido a los fundamentos de la fotovoltaica, se va a realizar un breve resumen de las diferentes tecnologías existentes y las eficiencias récord conseguidas con cada tipo a día de hoy, que se pueden ver en la Fig. 8.

21

La tecnología más madura es la basada en el silicio, el segundo material más abundante en la corteza terrestre. Se pueden distinguir tres tipos, la monocristalina (sc-Si) con una eficiencia máxima en célula del 27,6 % en el caso de concentración y de 26,1 % en el caso de funcionamiento sin concentración; la multicristalina con una eficiencia récord de 22,3 %. Y por último, unas basadas en estructuras más complejas denominadas HITs (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) con un 26,6 % de eficiencia máxima. Otra tecnología también madura es la de lámina delgada como la de silicio amorfo, con una eficiencia máxima de 14,0 %, la de telururo de cadmio con 22,1 % y las CIGS con un 22,6 % o un 23,3 % en el caso de concentración.

Por otro lado, existen tecnologías avanzadas basadas en células multiunión utilizadas para optimizar la absorción de la luz que se emplean con sistemas de lentes o espejos que concentran la luz entre 100 y 1000 veces sobre la célula. Se han conseguido eficiencias récord del 46,0 % utilizando 4 uniones o más.

Por último las tecnologías emergentes están basadas en células orgánicas que tienen la ventaja de ser baratas de producir pudiendo fabricarse en cualquier tipo de sustrato usando tecnologías de impresión. Sin embargo, su tiempo de vida es muy limitado, del orden de 5 años. Destacan las perovskitas, con una eficiencia de 22,7 %, las de tinta sintética con un 11,9 % y otros tipos de células orgánicas con una eficiencia de 11,5 %.

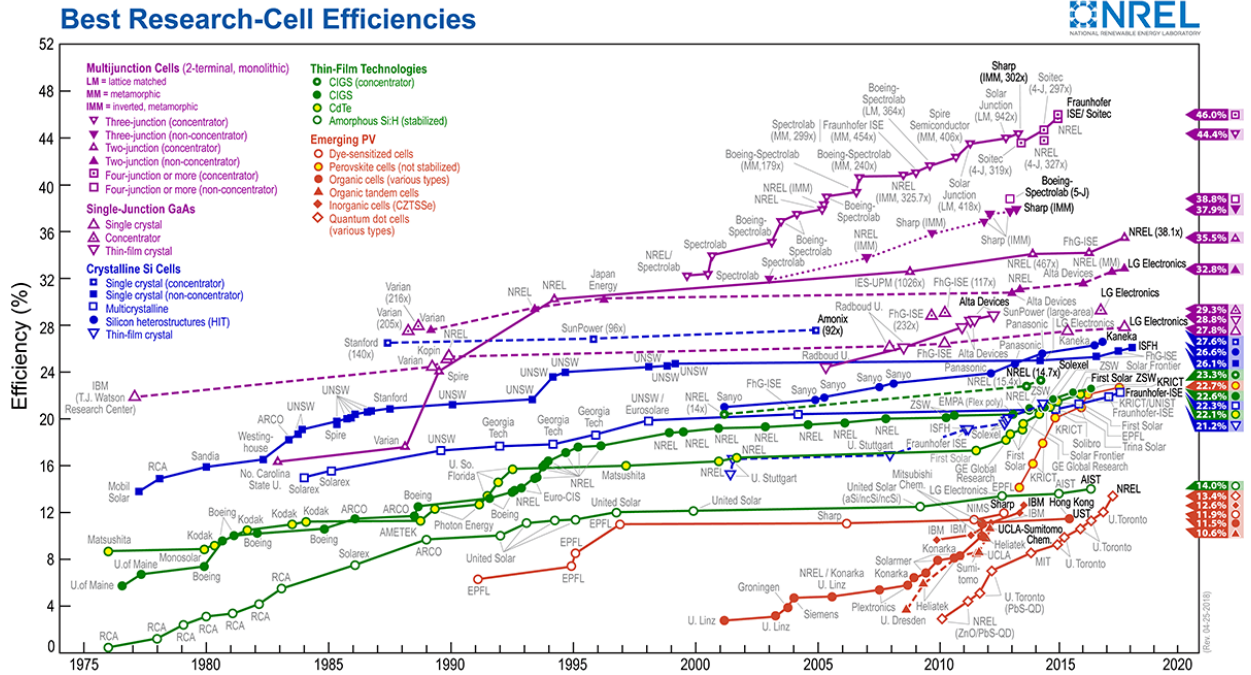


Fig. 8 Representación de la evolución histórica de las eficiencias en las diferentes tecnologías fotovoltaicas [7].

3.- FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

A continuación se pretende dar una breve explicación de los fundamentos de funcionamiento de las células fotovoltaicas, sus parámetros importantes de funcionamiento y cómo se ven éstos afectados por las condiciones ambientales.

3.1.- Los semiconductores

Las células solares basan su funcionamiento en el de los semiconductores. En el caso del silicio, el material está constituido por átomos individuales unidos entre sí en una estructura regular y periódica, formando enlaces covalentes, en la cual cada átomo está rodeado por 8 electrones. Los electrones ocupan distintos niveles de energía en función del número de electrones que tenga el átomo, que es diferente para cada elemento de la tabla periódica.

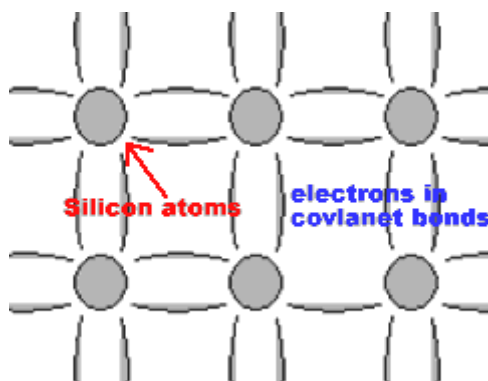


Fig. 9 Ilustración de la estructura atómica del silicio [2].

Los átomos de los semiconductores pueden ser del grupo IV (Si) de la tabla periódica, o una combinación de los del grupo III y V (GaAs) o del grupo II y VI (CdTe). El material semiconductor más utilizado es el silicio, que es la base de los circuitos integrados y de las células solares de tecnología más madura.

Un enlace covalente consiste en dos átomos que comparten un electrón, de forma que cada átomo está rodeado de 8 electrones. Los electrones que forman un enlace covalente están fijos en una posición debido al enlace. A temperaturas de cero absoluto, los electrones no se consideran libres al no poder moverse ni intercambiar energía, por lo que no pueden participar en un flujo de corriente, absorción u otros procesos físicos que son de interés en células solares. A temperaturas más altas, el electrón es capaz de ganar energía suficiente para escapar del enlace y moverse libremente a través de la estructura cristalina participando en la conducción.

3.2.- El band gap y los portadores de carga

La presencia de enlaces introduce en el electrón dos estados distintos de energía. El estado de menor energía para el electrón es cuando está enlazado. Sin embargo, si el electrón tiene suficiente energía térmica como para liberarse de su enlace, se convierte en un electrón libre. La energía mínima necesaria para liberar al electrón del enlace, haciéndolo pasar de la banda de valencia a la de conducción, se denomina *band gap* (E_G). Conforme el electrón se mueve a la banda de conducción, deja atrás un espacio libre para otro electrón, un electrón vecino puede moverse a este espacio vacío, cuando lo hace, deja atrás otro espacio vacío. El movimiento continuo del espacio para un electrón, conocido como hueco, se puede ilustrar como una carga positiva que se mueve a través de la estructura del cristal. Ambos, el electrón y el hueco pueden participar en la conducción y se denominan portadores de carga.

3.3.- Concentración intrínseca de portadores de carga

La excitación térmica de un portador de carga de la banda de valencia a la banda de conducción crea portadores de carga libres en ambas bandas. La concentración de estos portadores de carga se denomina concentración intrínseca de portadores de carga y es igual al número de electrones en la banda de conducción (o número de huecos en la banda de valencia). Depende tanto del band gap del material como de su temperatura. Un band gap grande hará que sea más difícil que un electrón sea excitado hasta la banda de conducción. Por el contrario, aumentar la temperatura tiene el efecto contrario, hará más fácil que el electrón sea excitado hasta la banda de conducción, aumentando así la concentración intrínseca de portadores de carga.

3.4.- Dopado

Se puede alterar el balance entre electrones y huecos en la estructura cristalina del silicio dopándolo con otros átomos. Los átomos con un electrón más en la capa de valencia que el silicio, son usados para producir semiconductores de tipo n (fósforo, en el caso del Si), que añade electrones a la banda de conducción y por lo tanto incrementa el número de electrones. Los átomos con un electrón menos en la banda de valencia que el silicio, se usan para producir semiconductores de tipo p (boro en el caso del silicio), que tendrán mayor número de huecos. En materiales que han sido dopados siempre se tiene un número mayor de portadores de carga de un tipo que de otro. El tipo con una mayor concentración se le conoce como portador de carga mayoritario mientras que menor concentración tiene se le denomina portador de carga minoritario.

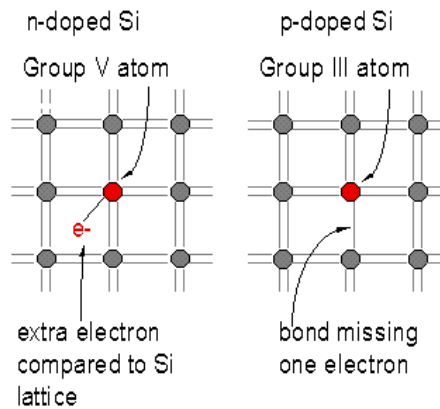


Fig. 10 Estructura atómica y dopado del silicio [2].

3.5.- Concentración de portadores de carga en equilibrio

Se denomina concentración de portadores de carga en equilibrio al número de portadores en la banda de conducción y de valencia cuando no se está aplicando un voltaje externo. Para los portadores mayoritarios, la concentración de equilibrio sería igual a la concentración intrínseca más el número de portadores libres añadidos en el dopado del semiconductor. La mayoría de las veces, el dopado del semiconductor es varios ordenes de magnitud mayor que la concentración intrínseca del material, de forma que el número de portadores mayoritarios es prácticamente igual al dopado.

En el equilibrio, el producto de la concentración de portadores mayoritarios y la concentración de portadores minoritarios es una constante, que se expresa matemáticamente por la Ley de Masas:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

Donde:

- n_i es la concentración intrínseca de portadores de carga.
- n_0 es la concentración de electrones en equilibrio
- p_0 es la concentración de huecos en equilibrio

En un material tipo n, usando la Ley de Masas, la concentración de portadores mayoritarios y minoritarios puede expresarse de la siguiente forma:

$$n_0 = N_D$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Estas ecuaciones muestran cómo el nivel de portadores minoritarios decrece conforme aumenta el nivel de dopado.

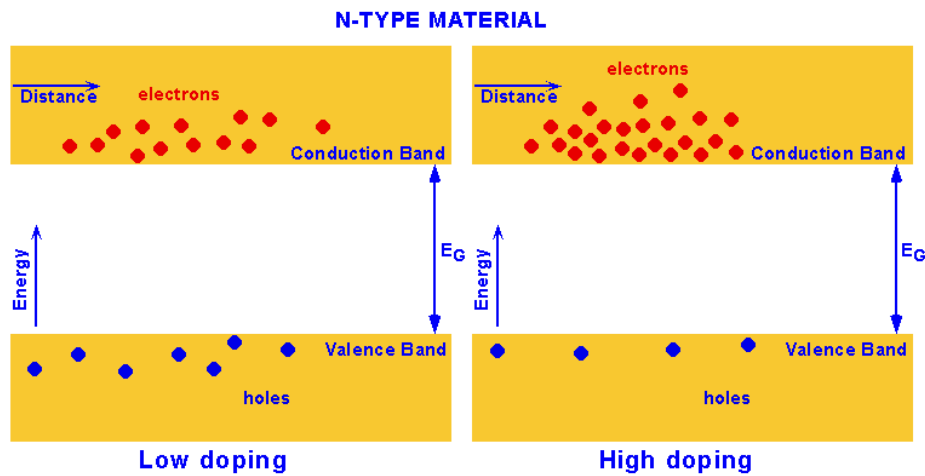


Fig. 11 Representación de la banda de valencia, de conducción y del band-gap [2].

3.6.- Generación

Los fotones que inciden en la superficie del semiconductor pueden ser reflejados por la superficie, absorbidos por el material, o transmitidos a través de éste.

En los dispositivos fotovoltaicos, los mecanismos de reflexión y transmisión son considerados mecanismos de pérdidas ya que si los fotones no son absorbidos no hay generación eléctrica. Si el fotón es absorbido, elevará a un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción. Un factor clave en el proceso de absorción es la energía del fotón. Éstos pueden dividirse, según la energía que tienen comparada con la del band gap, en tres categorías:

1. $E_{ph} < E_G$: Los fotones, E_{ph} , con menos energía que la energía del band gap, E_G , interacciona débilmente con el semiconductor. La mayor parte de los fotones serán absorbidos por los portadores de carga libres y por el aluminio del contacto trasero [8].
2. $E_{ph} = E_G$: El fotón tiene la suficiente energía como para crear un par electrón-hueco y es eficientemente absorbido.
3. $E_{ph} > E_G$: El fotón con más energía que la del band gap es fuertemente absorbido. El exceso de energía se transforma en calor provocando un aumento de temperatura sobre la célula fotovoltaica.

3.7.- Unión PN

La unión PN se forma al unir dos semiconductores, uno de tipo N y otro de tipo P. El semiconductor tipo N tiene una concentración alta de electrones mientras que el tipo P tiene una alta concentración de huecos y al ponerlos en contacto hay difusión de electrones desde el semiconductor tipo N al P y de huecos desde el tipo P al N. Al moverse los electrones hacia la zona P dejan en la zona N iones positivos de dopante, que está fijo en la red cristalina. Mientras tanto, al moverse los huecos de la zona P a la zona N dejan, en esta última, iones negativos de dopante, también fijos en la red cristalina. Esto provoca la formación de un campo eléctrico, y por lo tanto de un potencial interno, entre los iones positivos de la zona N a los iones negativos de la zona P. Esta zona se conoce como región de vaciamiento debido a que no hay portadores de carga libres ya que se han desplazado por difusión.

Una unión PN sin una excitación externa representa un equilibrio entre generación de portadores, recombinación, difusión y arrastre por la presencia del campo eléctrico. A pesar de la presencia del campo eléctrico, que hace que la mayoría de los portadores de carga sean impulsados desde la zona de vaciamiento hasta la zona de la que han partido, hay portadores que tienen la suficiente velocidad como para atravesar la unión. Una vez un portador cruza la unión se convierte en un portador minoritario que difundirá una longitud media igual a la longitud de difusión hasta que se recombine. La corriente debida a la difusión de portadores a través de la región de vaciamiento se denomina corriente de difusión.

27

Los portadores minoritarios que alcanzan la región de vaciamiento son impulsados, a través de ella, por el campo eléctrico. Esta corriente es conocida como corriente de arrastre.

En el equilibrio, la corriente neta del dispositivo es nula. La corriente de arrastre de electrones es igual a la corriente de difusión de electrones, ya que si no habría una acumulación de electrones en uno de los dos lados. De igual manera las corrientes de arrastre y de difusión de huecos son iguales.

3.8.- Estructura de la célula fotovoltaica

Se va a explicar la estructura típica de una célula de silicio cristalino con sustrato tipo p, que son las más habituales (ver Fig. 12), aunque en la Fig. 12 se observa una estructura piramidal regular, lo habitual es que estas estructuras sean pirámides aleatorias obtenidas mediante ataque químico.

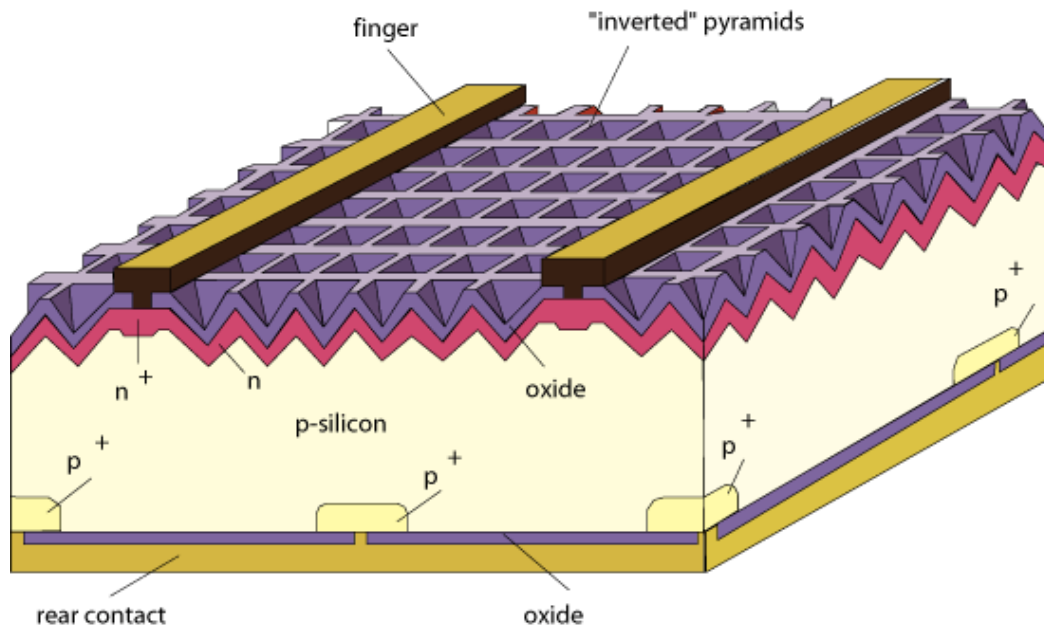


Fig. 12 Estructura típica de una célula fotovoltaica tipo p.

Se tiene el sustrato de silicio tipo p (dopado con boro) denominado base, encima se tiene el silicio tipo n (dopado con fósforo) denominado emisor, cuyo espesor suele ser de 0,3 μm . Este conjunto suele tener un espesor de entre 100 y 300 μm . Actualmente, las obleas utilizadas en la industria tienen un grosor de 180 μm .

28

Con objeto de reducir el número de recombinaciones en la superficie del emisor, se realiza un proceso de pasivación consiguiendo de esta forma un menor número de defectos en la superficie del material.

Los contactos metálicos de la cara frontal consisten en una parrilla de fingers muy finos, para minimizar el sombreado de la célula, que deben estar cerca unos de otros para minimizar las pérdidas resistivas del emisor. Los electrones son posteriormente recolectados en los dos buses, que tienen una mayor sección para reducir la resistencia serie de la célula, permitiendo alcanzar un mayor *fill factor*. Para minimizar las recombinaciones por defectos en el contacto metálico, se dopa aún más la zona de contacto del finger, n^{++} [9].

En los contactos de la cara posterior se consideran aspectos parecidos a los de la cara frontal, sin embargo, al no incidir sobre ella luz no se tiene el problema del sombreado. Mientras que los electrones se recolectan en la cara frontal de la capa tipo n, los huecos deben recolectarse en el contacto trasero, en las células tipo p que estamos describiendo. Si la longitud de difusión de los electrones minoritarios es mayor que la distancia desde la unión PN hasta el contacto trasero, pueden perderse por recombinación SRH en la interfaz de contacto trasero. Para evitarlo se utilizan puntos de contacto mientras que el resto de la superficie queda pasivada, como en la cara frontal. Se puede disminuir todavía más las pérdidas de recombinación de electrones introduciendo lo que se conoce como *back surface field*. Sobre

los puntos de contacto se localiza una zona p muy dopada, p+. La interfaz entre la zona p y la p+ actúa de la misma forma que una unión NP, evitando la difusión de los electrones minoritarios hacia el contacto trasero. Cabe comentar que la tecnología que se ha utilizado hasta ahora es la de BSF por aluminio.

Para reducir las pérdidas ópticas por reflexión, en la cara frontal se coloca una capa antirreflectante conocida como ARC. Pueden emplearse además técnicas para provocar interferencia destructiva de una determinada longitud de onda minimizando su reflexión. También se suele realizar un proceso de texturizado de la oblea con el objetivo de minimizar las pérdidas por reflexión y mediante dispersión de la luz obtener una mejor absorción en el material.

3.9.- Corriente generada por la luz

La generación de corriente involucra dos procesos clave. El primero es la absorción de los fotones para excitar un par electrón-hueco. Los pares electrón-hueco serán generados siempre que la energía del fotón incidente tenga una energía superior a la del band gap. Sin embargo, los electrones (en la zona p) y los huecos (en la zona n) se encuentran en un estado metaestable y existirán únicamente un tiempo medio igual al tiempo de vida del portador minoritario antes de recombinarse. Si el portador se recombina, el par electrón-hueco generado por la luz se pierde y no se extrae potencia de la célula.

29

El segundo proceso clave es la acumulación de los portadores mediante la unión PN. Ésta evita la recombinación mediante la separación espacial del electrón y del hueco. Los portadores de carga son separados por la selectividad en la conductividad [10]. Si se conectan la base y el emisor, es decir, si la célula es cortocircuitada, los portadores generados fluyen a través del circuito externo como se observa en la Fig. 13.

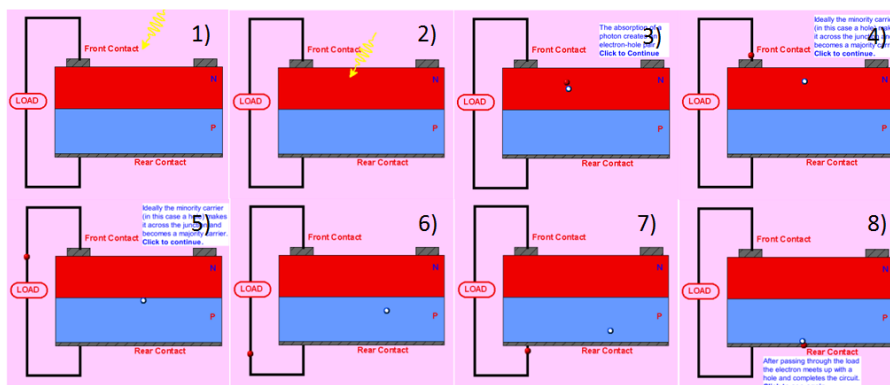


Fig. 13 Representación esquemática del funcionamiento de una célula fotovoltaica [2].

3.10.- Curva I/V

La curva I/V que puede verse en la Fig. 14, también conocida como curva característica, es la superposición de la curva IV del diodo en oscuridad con la corriente fotogenerada. La luz tiene el efecto de descender la curva I/V hasta el cuarto cuadrante, donde se puede extraer potencia del diodo.

La ecuación característica de la célula modelada como un diodo ideal es la siguiente:

$$I(V) = I_{recombinaciones}(V) - I_{arrastre}(V) - I_{fotogenerada} \\ = I_0[\exp(qV/kT) - 1] - I_{fotogenerada}$$

A fin de comparar diferentes módulos y tecnologías, las medidas se realizan bajo unas condiciones estándar de medida (STC, por sus siglas en inglés). Esto quiere decir que la irradiancia total sobre la célula es de 1000 W/m^2 , el espectro solar debe parecerse al espectro AM1.5 y la temperatura de la célula debe mantenerse fija a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

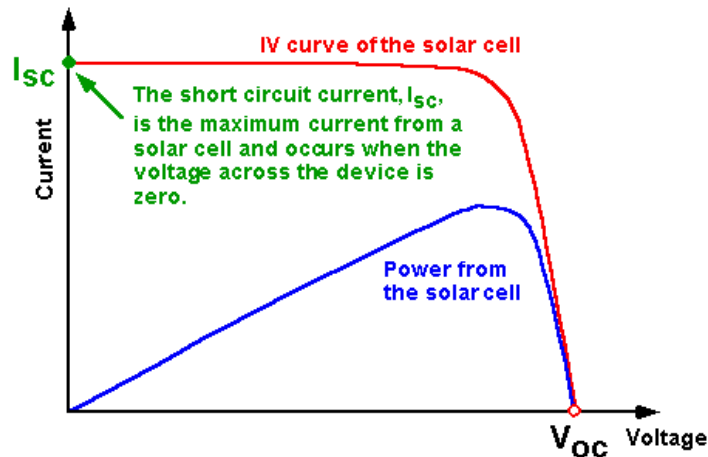


Fig. 14 Representación de la curva característica de una célula fotovoltaica [2].

A continuación se va a realizar una breve explicación de los principales parámetros de las células solares fotovoltaicas, así como la influencia de las condiciones ambientales sobre ellos.

3.10.1.- Corriente de cortocircuito

La corriente de cortocircuito es la corriente que circula a través de la célula fotovoltaica cuando el voltaje aplicado en los terminales de ésta es cero, es decir, cuando está cortocircuitada. Para una célula ideal, con las mínimas pérdidas resistivas, la corriente fotogenerada y la corriente de cortocircuito son idénticas. La corriente de cortocircuito es la máxima corriente que puede extraerse de la célula fotovoltaica. Se representa como I_{sc} .

La I_{sc} depende de:

- El área de la célula fotovoltaica. Para eliminar la dependencia del área se suele utilizar la densidad de corriente de cortocircuito, J_{sc} en mA/cm^2 .
- El número de fotones. Es decir, la potencia de la luz incidente. La corriente de cortocircuito depende directamente de la intensidad de la luz.
- El espectro de la luz incidente. Para la caracterización de células fotovoltaicas se utiliza el espectro estandarizado como AM1.5 que es el espectro de la luz solar a través de 1,5 veces el espesor de la atmósfera, es equivalente a la luz solar entrando a la atmósfera con cierto ángulo.
- Propiedades ópticas de la célula fotovoltaica. Es decir, depende de la absorción y de la reflexión de los materiales que forman la célula fotovoltaica.
- La probabilidad de recolección. Que depende principalmente de la pasivación de la superficie y del tiempo de vida de los portadores minoritarios.

La corriente de cortocircuito tiene una fuerte dependencia del ratio de generación y de las longitudes de difusión de los portadores de carga.

Las células fotovoltaicas de silicio bajo una irradiancia de AM1.5 tienen una corriente de cortocircuito máxima de $46 \text{ mA}/\text{cm}^2$. En laboratorio se han conseguido corrientes de cortocircuito de $42 \text{ mA}/\text{cm}^2$, mientras que las células comerciales tienen corrientes de cortocircuito de entre $28 \text{ mA}/\text{cm}^2$ y $35 \text{ mA}/\text{cm}^2$ [2].

3.10.2.- Voltaje de circuito abierto

El voltaje de circuito abierto es el máximo voltaje disponible de la célula fotovoltaica, se da cuando la corriente extraída es nula, es decir, cuando la célula se encuentra en circuito abierto. Este voltaje se corresponde al voltaje de polarización directa, al cual la densidad de corriente en oscuridad compensa la densidad de corriente fotogenerada. La V_{oc} depende de la densidad de corriente fotogenerada y de la corriente de saturación. La densidad de corriente de saturación depende de las recombinaciones en el material. Por lo tanto, la V_{oc} es una medida de la cantidad de recombinaciones en la célula fotovoltaica, cuantas más recombinaciones haya menor corriente de circuito abierto tendrá la célula. En células de silicio cristalino de laboratorio han conseguido tensiones de circuito abierto de hasta 720 mV bajo condiciones estándar de medida, mientras que las células comerciales tienen una tensión típica de circuito abierto de 600 mV.

3.10.3.- Fill factor

El *fill factor* es un parámetro que junto con la V_{oc} y la I_{sc} determina la máxima potencia que puede ser extraída de la célula fotovoltaica. El FF se define como el ratio entre la máxima potencia que puede extraerse de la célula y el producto entre la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto.

$$FF = \frac{I_{MPP}V_{MPP}}{I_{sc}V_{oc}}$$

Donde el subíndice MPP se refiere al punto de máxima potencia de la curva característica, que es el punto en el que se hace trabajar a las células fotovoltaicas mediante los seguidores del punto de máxima potencia, para tener la máxima eficiencia.

El factor de forma es una medida de la cuadratura de la curva IV, o del máximo rectángulo que cabe en la curva característica, como se muestra en la Fig. 15.

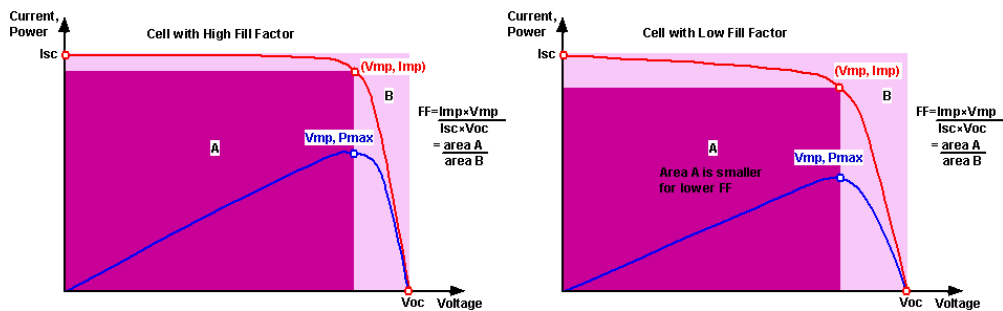


Fig. 15 Representación gráfica del fill factor [2].

3.10.4.- Eficiencia

La eficiencia es el parámetro más utilizado para comparar el funcionamiento de las células fotovoltaicas. Se define como el ratio entre la máxima potencia generada y la potencia incidente en la célula solar. La eficiencia depende de la intensidad de la luz incidente, de su espectro, así como de la temperatura de la célula. Es por esto por lo que las condiciones a las que se mide la eficiencia deben estar bien controladas para poder comparar el desempeño de células diferentes. Se deben medir, por lo tanto, bajo las condiciones estándar de medida antes comentadas.

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{in}} = \frac{J_{MPP} V_{MPP}}{I_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{I_{in}}$$

Típicamente, las células fotovoltaicas de silicio cristalino tienen una $J_{sc} \approx 35 \text{ mA/cm}^2$, V_{oc} de hasta 0,65 V y FF en el rango desde 0,75 hasta 0,80. Lo que da lugar a eficiencias en el rango del 17 % a 18 % [2].

3.10.5.- Efecto de la intensidad de la luz

El cambio en la intensidad de la luz incidente en una célula fotovoltaica cambia todos los parámetros, incluyendo la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, el FF, la eficiencia y las resistencias serie y paralelo. En la Fig. 16 se puede ver el efecto que tiene el aumento de irradiancia sobre la curva característica.

La corriente de cortocircuito de una célula fotovoltaica depende linealmente de la intensidad de la luz, de forma que una célula fotovoltaica trabajando bajo 10 soles tendrá 10 veces la corriente de cortocircuito de la misma célula trabajando bajo un sol.

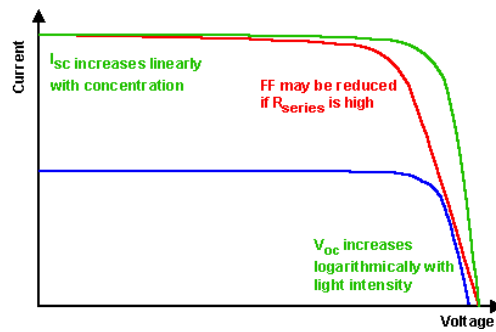


Fig. 16 Ilustración del efecto de la irradiancia sobre la curva característica [2].

3.10.6.- Efecto de la temperatura

Los aumentos de la temperatura provocan una reducción del band gap del semiconductor, afectando de esta forma a la mayoría de los parámetros materiales de la célula fotovoltaica. La reducción del band gap del semiconductor con el aumento de la temperatura puede verse como un incremento de la energía de los electrones. De esta forma, menos energía es necesaria para romper el enlace.

En una célula fotovoltaica, el parámetro que más se ve afectado con el aumento de la temperatura es la tensión de circuito abierto (ver Fig. 17).

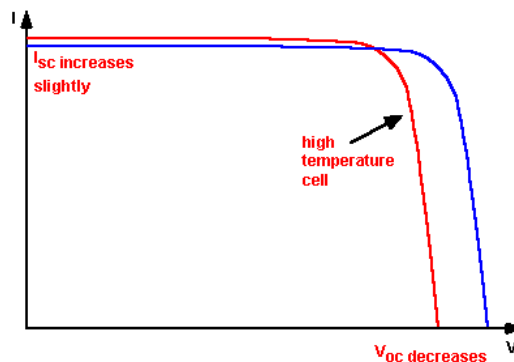


Fig. 17 Ilustración del efecto de la temperatura sobre la curva característica [2].

La corriente de cortocircuito tiene un pequeño aumento conforme aumenta la temperatura debido a la disminución del band gap, lo que hace que más fotones tengan la energía suficiente para excitar un par electrón-hueco. Sin embargo este efecto es pequeño, para una célula fotovoltaica de silicio la corriente de cortocircuito aumenta 0,06 % por cada °C que aumenta la temperatura.

El FF tiene una reducción de un 0,15 % por cada °C que aumenta la temperatura de la célula fotovoltaica de silicio.

En cuanto a la máxima potencia extraíble de la célula fotovoltaica, disminuye entre un 0,4 % y un 0,5 % por cada °C que aumenta la temperatura, en el caso de células fotovoltaicas de silicio.

3.11.- Reducción de la temperatura de operación como solución a la baja eficiencia de conversión

Es importante tener claro que toda la energía solar absorbida que no se transforma en energía eléctrica se convierte en calor en la célula solar, como podemos observar en el diagrama de Sankey que se muestra en la Fig. 18, que es el caso particular de una célula de silicio cristalino a una temperatura de 25 °C y a la que incide una irradiancia en un rango entre 0,3 y 1,2 μm de longitud de onda.

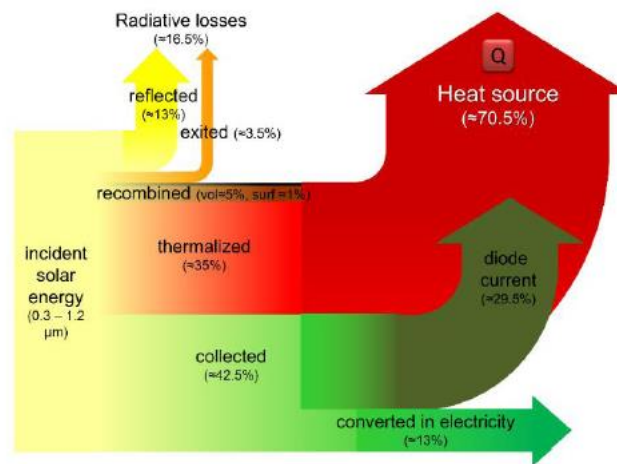


Fig. 18 Diagrama de Sankey de los diferentes procesos de pérdidas en células fotovoltaicas [11].

Además la eficiencia de la célula fotovoltaica decrece conforme aumenta su temperatura de operación. Las células de silicio cristalino son las más sensibles al aumento de temperatura y su eficiencia cae una media de 0,45 % por cada grado centígrado que la temperatura aumenta por encima de 25 °C. Es decir, si la célula está operando a 50 °C su eficiencia habrá caído más de un 10 % y si, bajo condiciones estándar de medida, la célula tiene una eficiencia del 20 %, en operación su eficiencia sería del 18 %.

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 1, aparecen los diferentes mecanismos de pérdidas existentes en las células fotovoltaicas y su contribución como fuente de calor [11]. Se puede ver gráficamente en la Fig. 19.

Tabla 1 Contribución de los diferentes mecanismos de pérdidas como fuente de calor [11].

			Densidad de potencia [W·m ⁻²]	% de la densidad de potencia incidente	% de la densidad de potencia no reflejada	
Densidad de potencia incidente			1000	100,0		
Densidad de potencia no reflejada			852		100,0	
Densidad de potencia absorbida	No absorbida	Reflexión	148	14,8		
	Absorbida	Generación de calor	Energía menor que el bandgap	141,6	14,2	16,6
			Termalización	282	28,2	33,1
			Emisión	0	0,0	0,0
			Carnot	22,4	2,2	2,6
			Desajuste de ángulos sólidos	91,1	9,1	10,7
			NRR_V	96,5	9,7	11,3
			NRR_J	22,5	2,3	2,6
			Transporte	12,6	1,3	1,5
			Derivaciones	25,2	2,5	3,0
			Potencia eléctrica	158,2	15,8	18,6

35

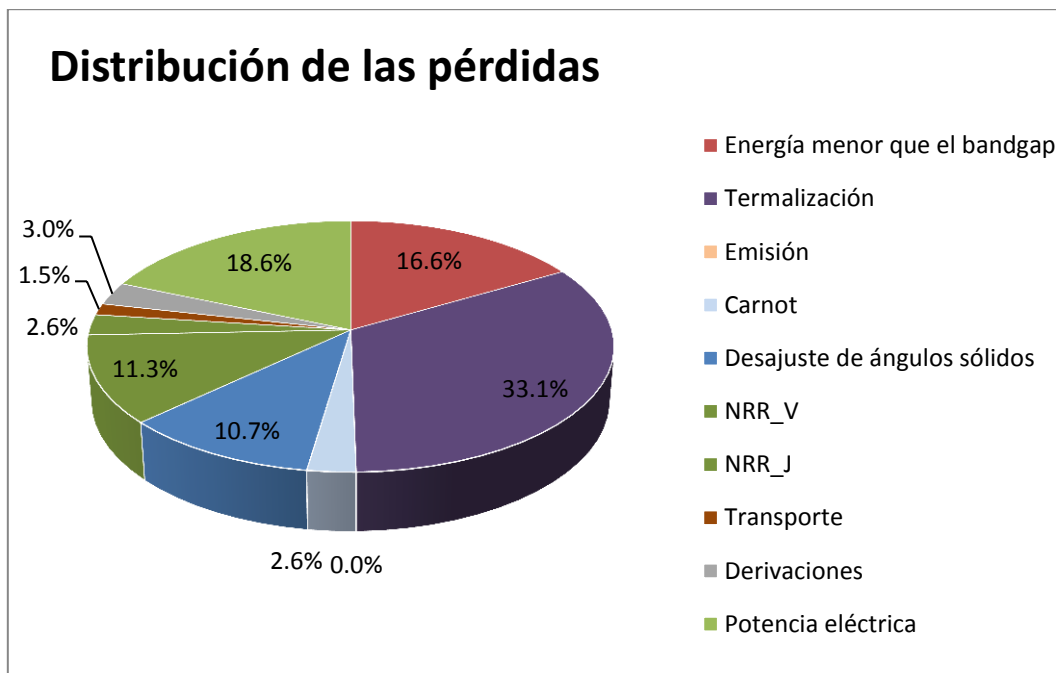


Fig. 19 Representación de la contribución de los diferentes mecanismos de pérdidas como fuente de calor [11].

Las pérdidas por termalización son debidas a que los fotones excitan al electrón con una energía superior a la del band gap y éste posteriormente cede el exceso de energía a los fonones hasta alcanzar el límite de la banda de conducción.

Las pérdidas por energía menor que el band gap son causadas por fotones que no tienen suficiente energía para excitar al electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. Estos fotones pueden o bien salir de la célula sin ser absorbidos, o bien son absorbidos en la red cristalina de átomos, por portadores de carga ya excitados, o por la metalización de la parte trasera (ver Fig. 20). En el caso de que los fotones son absorbidos, su energía se transfiere a los fonones ya sea directamente por los átomos de la red o por un proceso de termalización en el caso de que sean los portadores de carga los que absorben la energía. En definitiva, contribuyen a la fuente de calor.

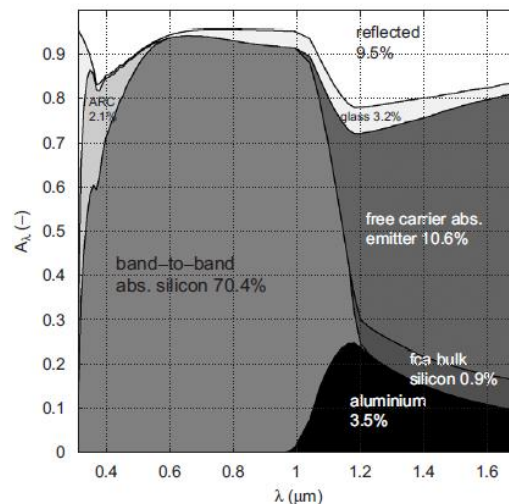


Fig. 20 Distribución del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda en una célula solar fotovoltaica. [8]

Como se puede observar, los procesos de pérdidas que más contribución tienen en el aumento de temperatura son el de energía menor que el band gap (16,6 %) y el de termalización (33,1 %). Por lo tanto, sería interesante intentar reducir la contribución de estos procesos al aumento de temperatura de la célula y así limitar su temperatura de operación a un valor más bajo, para mejorar la eficiencia y por tanto la producción de electricidad. Si bien modificar el efecto de la radiación de longitud de onda corta puede ser complicado, aunque existen técnicas como el *down shifting* que consiste en transformar un fotón de elevada energía en dos fotones de menor energía, modificar el comportamiento ante radiación de longitud de onda larga es más sencillo y con ello puede ser posible encontrar soluciones baratas para reducir el aumento de temperatura sobre células fotovoltaicas.

4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el siguiente capítulo se va a explicar el montaje experimental desarrollado para la realización de las mediciones y se van a presentar y analizar los resultados obtenidos en ellas.

4.1.- Descripción del montaje experimental

A continuación se va a explicar el montaje experimental diseñado y construido para la realización de los diferentes experimentos para la caracterización térmica de células solares fotovoltaicas.

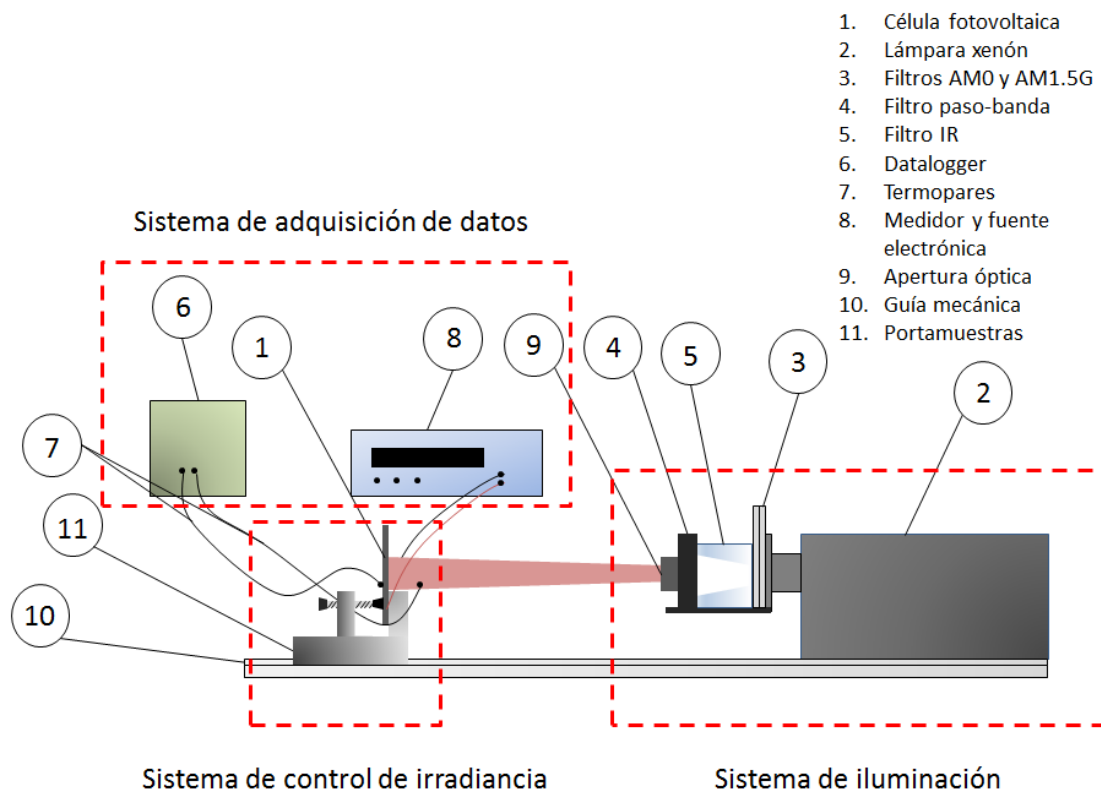


Fig. 21 Esquema del montaje experimental.

El montaje experimental diseñado consta de tres sistemas diferenciados, como puede verse en la Fig. 21. Por un lado se tiene el sistema de iluminación, que está formado por la lámpara de xenón (2), los filtros de adecuación de la irradiancia espectral de la lámpara a la del sol (3), el filtro de radiación infrarroja (5), los diferentes filtros paso banda (4) y la apertura óptica (9). Por otro lado se tiene el sistema de control de irradiancia, formado por una guía mecánica (10) sobre la que desliza el portamuestras (11), permitiendo de este modo variar la irradiancia

incidente sobre la célula solar. El portamuestras cuenta con un tornillo micrométrico para su posicionamiento transversal a la guía, mientras que el posicionamiento en altura se realiza de forma manual. La célula solar queda fijada mediante un tornillo que hace la función de mordaza. Por último se tiene el sistema de adquisición de datos que consiste en un *datalogger* (6) que recopila los datos de temperatura medidos por dos termopares, uno de referencia y el otro que mide la temperatura de la muestra (7) y el medidor y fuente electrónica (8) encargado de medir la curva I/V (corriente frente a voltaje) característica del funcionamiento de una célula fotovoltaica y de imponer, además, la tensión de trabajo a la célula fotovoltaica.

El control de la irradiancia sobre la célula fotovoltaica se realiza modificando la distancia entre la célula fotovoltaica (1) y la fuente de luz (2), que como se ha explicado en el Complemento al Trabajo de Fin de Máster, se trata de una lámpara de xenón con una serie de filtros (3) que adecúan la irradiancia espectral a la del sol. El haz de luz procedente de la lámpara de xenón tiene un semiángulo de divergencia de 14° . Mediante una apertura (9) la zona iluminada es adaptada al área de la célula fotovoltaica en función de su distancia a la lámpara. De este modo, se consigue que sea únicamente la célula fotovoltaica la que absorbe la radiación y evitándose, por lo tanto, la absorción de radiación en el encapsulado que daría lugar a mayores incrementos de temperatura medidos, desvirtuando los resultados.

Para caracterizar el efecto del filtrado de la radiación infrarroja en el aumento de temperatura de la célula fotovoltaica se han empleado cubetas de vidrio óptico (5), de 4 cm y 5 cm de longitud llenas de agua desionizada colocadas entre los filtros de adecuación de la irradiancia espectral (3) y el soporte de los filtros paso banda (4).

La medida de temperatura se realiza mediante dos termopares tipo T (7), uno colocado en la parte posterior del encapsulado y fijado a éste mediante cinta adhesiva, y el de referencia colocado “al aire” y fijando su posición mediante cinta adhesiva al portamuestras. Los datos medidos son recogidos por el *datalogger* (6).

La medida de la curva característica de la célula fotovoltaica se realiza mediante un equipo que sirve tanto de medidor como fuente electrónica, (8) conectado a los terminales de la célula y gobernado por un software diseñado específicamente para la realización de estas medidas.

Las células laminadas utilizadas en el presente trabajo, son de silicio monocristalino, tienen unas dimensiones de 15 mm x 15 mm x 180 μ m, con aproximadamente 9 fingers y un bus, en un encapsulado estándar vidrio-EVA-célula-EVA- Tedlar®, con unas dimensiones totales de 24 mm x 36 mm (ver Fig. 22).

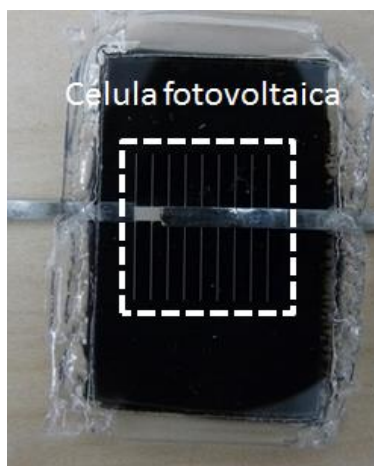


Fig. 22 Fotografía de una célula fotovoltaica encapsulada utilizada en el presente trabajo.

Para una información más detallada de los equipos y células utilizados se recomienda consultar el Complemento al presente Trabajo de Fin de Máster.

4.2.- Factor de relación entre corriente de cortocircuito e irradiancia

Aunque se dispone de un espectrorradiómetro, con el que medir la irradiancia que incide sobre la célula, se ha decidido utilizar la medida de corriente de cortocircuito como medida indirecta de la irradiancia. De esta forma, las mediciones se simplifican considerablemente y se incurre, además, posiblemente, en un menor error de medida.

Como bien se sabe, la corriente de cortocircuito de una célula solar fotovoltaica, también conocida como I_{sc} , es directamente proporcional a la irradiancia. Por lo tanto, midiendo la corriente de cortocircuito de la célula y la irradiancia espectral mediante un espectrorradiómetro calibrado, es posible obtener un factor que permita relacionar ambos parámetros. De esta manera, una vez obtenido este factor, midiendo la I_{sc} , se puede calcular la irradiancia incidente sobre la célula fotovoltaica. Esto facilita las medidas, ya que en este montaje experimental es muy sencillo obtener la I_{sc} , no así la irradiancia espectral.

Para el cálculo del factor de conversión se ha medido la irradiancia espectral mediante el espectrorradiómetro a una determinada distancia respecto de la lámpara y a continuación se ha realizado una medida de la curva característica de la célula fotovoltaica en esa misma posición para conocer la corriente de cortocircuito. El factor de conversión es la relación entre la corriente de cortocircuito y la integral de la irradiancia espectral, de 300 nm a 1600 nm. Se ha realizado un factor de conversión para el caso del montaje experimental con filtro de infrarrojo y otro para el caso sin filtro de infrarrojo. Los resultados obtenidos pueden verse en la Tabla 2.

Tabla 2 Irradiancia y corriente de cortocircuito para el cálculo del factor que los relaciona.

	CON FILTRO IR	SIN FILTRO IR
G (W/m ²)	1289,0	1553,6
I _{sc} (mA)	123,2	127,3
FACTOR (W·m ⁻² /mA)	10,460	12,203

Debido a que las condiciones de iluminación sobre la célula fotovoltaica no son las mismas al filtrar el infrarrojo, como puede verse en la Fig. 23, es necesario el cálculo de dos factores diferentes, uno para las medidas realizadas con filtro de radiación infrarroja y otro para las medidas sin filtrado del infrarrojo. Al introducir la cubeta de agua (filtro IR) se observa cómo filtra la radiación a partir de los 875 nm, alcanzando un valor mínimo a partir de los 1130 nm. También puede observarse como en la zona del visible la irradiancia es superior al introducir la cubeta de agua, esto puede ser debido a la diferencia entre los índices de refracción del agua y el aire, lo que provoca una reducción de la divergencia del haz. Sin embargo, la irradiancia entre 300 nm y 1130 nm es prácticamente la misma en las dos medidas debido a que el filtrado de la radiación infrarroja es compensado por el efecto colimador de la cubeta en el rango del visible.

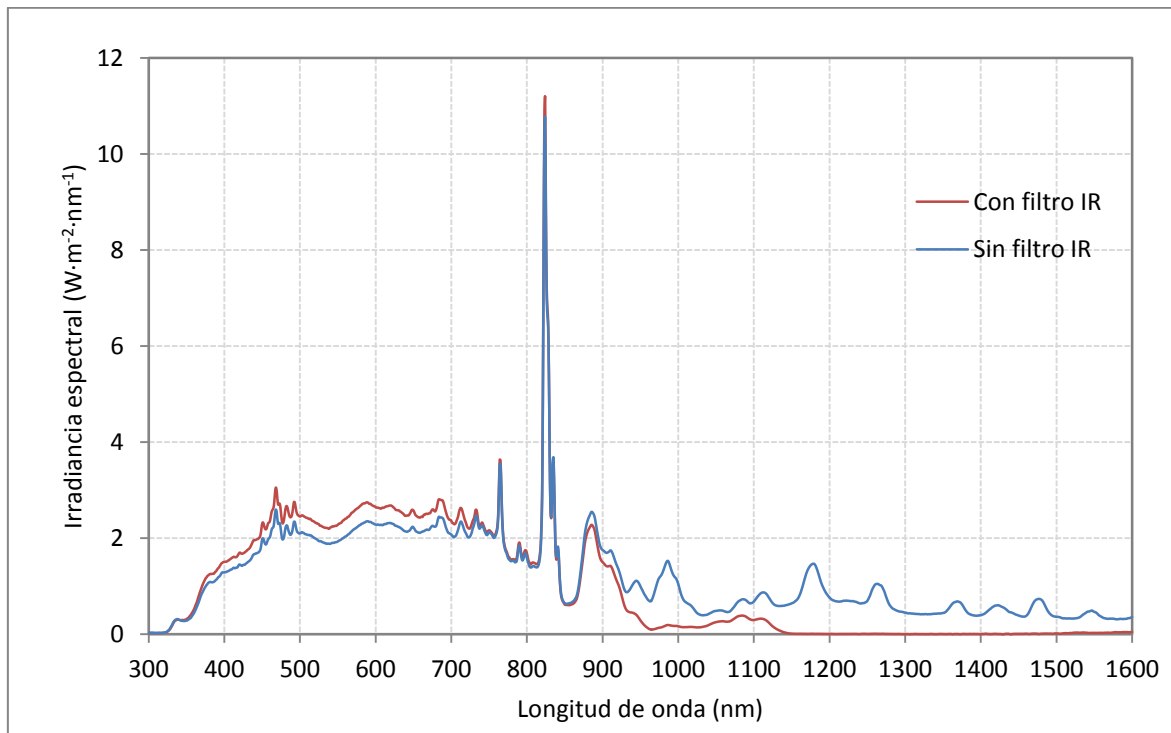


Fig. 23 Comparación de la irradiancia espectral, con y sin filtro infrarrojo, medidos ambos a la misma distancia respecto de la lámpara.

Para la caracterización espectral del aumento de temperatura de células fotovoltaicas no es necesaria la medida indirecta de la irradiancia debido a que la irradiancia que se tiene tras el filtro paso-banda es muy baja y no queda margen para realizar un análisis de aumento de temperatura en función de la irradiancia. En este caso basta con medir la irradiancia que se tiene a una distancia de 153 mm de la lámpara y multiplicarlo por la medida de transmitancia del filtro utilizado, Fig. 32, para conocer la irradiancia sobre la célula en esa posición.

4.3.- Resultados experimentales

Como se ha comentado con anterioridad, no todas las longitudes de onda de la luz solar contribuyen de igual manera al aumento de temperatura de las células fotovoltaicas basadas en silicio cristalino. La radiación ultravioleta, cuyas longitudes de onda tienen una energía muy superior al *bandgap* del silicio cristalino, provocan un aumento de temperatura superior en él. Aun así, estas longitudes de onda contribuyen a la generación en células fotovoltaicas. No es el caso de la radiación infrarroja cuyas longitudes de onda no tienen suficiente energía para excitar un par electrón-hueco hasta la banda de conducción y, por lo tanto, no contribuyen a la generación eléctrica. Sin embargo, sí que contribuyen al aumento de temperatura de la célula fotovoltaica afectando negativamente a su eficiencia.

A continuación se presentan y discuten las medidas experimentales llevadas a cabo. Se han realizado medidas de aumento de temperatura, con la célula fotovoltaica tanto en circuito abierto como operando en su punto de máxima potencia, en función de la irradiancia. Estas medidas se han tomado tanto con filtro de infrarrojo como sin él. Asimismo, se ha medido el aumento de temperatura discretizando espectralmente la luz, tanto en circuito abierto como en el punto de máxima potencia. Como se ha comentado en el documento dedicado al Complemento al Trabajo de Fin de Máster, el error de medida del aumento de temperatura, obtenido mediante repetición, es del 0,5 %. A continuación se van a explicar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos.

4.3.1.- Aumento de temperatura en función de la irradiancia

Como se ha comentado, la variación en la irradiancia incidente sobre la célula solar se consigue modificando la distancia existente entre ésta y la fuente de luz. En cada una de las posiciones se ha realizado, antes de comenzar con las medidas de temperatura, una medida de la curva I/V de la célula para conocer los parámetros eléctricos relevantes (I_{sc} , V_{oc} , FF, $IMPP$, $VMPP$). Como bien se ha explicado en el Complemento al Trabajo Fin de Máster en el capítulo destinado al procedimiento de medida, una vez realizado esto y teniendo la célula fotovoltaica a temperatura ambiente se irradia y se registra la evolución en el aumento de temperatura tomando medidas cada medio segundo, tanto de la célula fotovoltaica como del ambiente, durante un periodo total de 10 minutos, tras el cual la temperatura de la célula solar se estabiliza. Posteriormente, se calcula el incremento de temperatura como la diferencia entre la temperatura final de la célula fotovoltaica y el promedio de las medidas de la temperatura

ambiente. Este proceso se realiza para distintas irradiancias, obteniendo de esta forma una relación entre el aumento de temperatura y la irradiancia. El procedimiento es el mismo para las medidas con filtro de infrarrojo.

4.3.1.1.- En circuito abierto

En circuito abierto, toda la radiación incidente en la célula se transforma en energía térmica ya que la extracción en forma de energía eléctrica de ésta es nula. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las medidas de aumento de temperatura respecto de la corriente de cortocircuito y respecto a la irradiancia así como los obtenidos de la célula sin encapsulado.

La Fig. 24 muestra el aumento de temperatura de la célula solar, respecto de la temperatura ambiente para distintas corrientes de cortocircuito, obtenidas variando la irradiancia incidente, con filtro de infrarrojo y sin filtro de infrarrojo. Tal y como puede apreciarse de esta figura, la célula solar investigada, disminuye su temperatura aproximadamente entre 0,8 °C (con $I_{sc} = 20$ mA) y 2,7 °C (con $I_{sc} = 130$ mA) al eliminar las longitudes de onda del infrarrojo cercano. Mediante este análisis se está comparando el caso de tener dos células fotovoltaicas idénticas, una con tecnología de rechazo de infrarrojo y la otra no, ante la misma condición de irradiancia (misma corriente de cortocircuito). El efecto de rechazar la radiación infrarroja supondría una reducción media en el aumento de temperatura de la célula del 23,5 % con respecto al caso de no filtrarlo. Cabe destacar que el espectro solar no es exactamente igual al de la lámpara. En las medidas realizadas con la lámpara de xenón la radiación infrarroja supone un 16,7 % de la total, mientras que en el sol la componente infrarroja es el 14 % de la radiación total. Por este motivo, la reducción de temperatura, por el filtrado de la radiación infrarroja en exterior sería ligeramente inferior que la obtenida en las mediciones en interior.

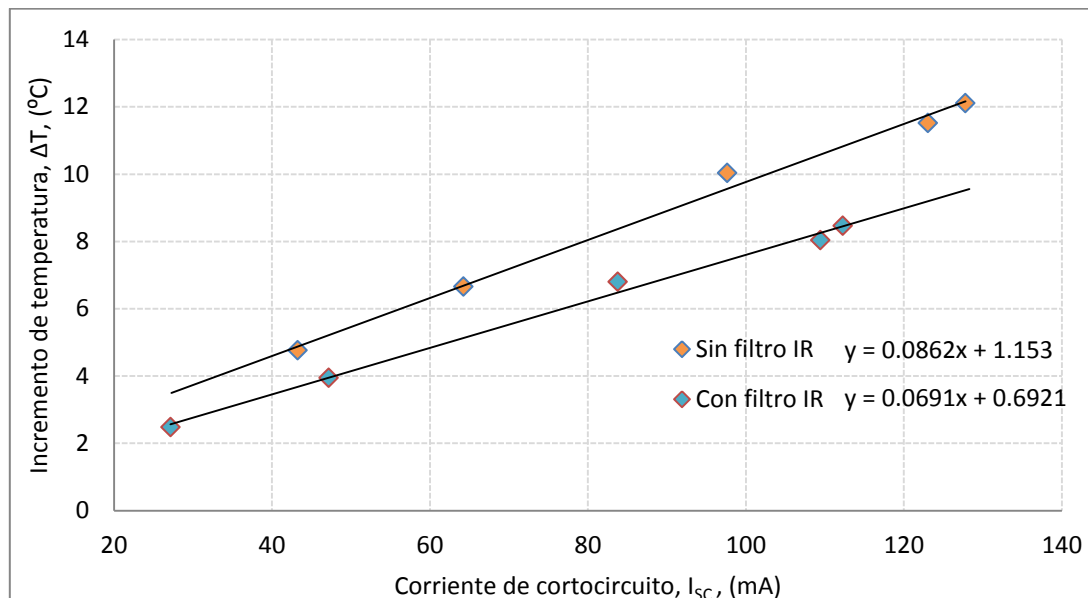


Fig. 24 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la corriente de cortocircuito. Célula fotovoltaica en circuito abierto.

Utilizando los factores que relacionan la corriente de cortocircuito con la irradiancia total, se pueden representar los datos de la Fig. 24 en función de la irradiancia total, y este análisis se muestra en la Fig. 25. Tal y como se esperaba, el aumento de temperatura tiene una relación lineal con la irradiancia total incidente.

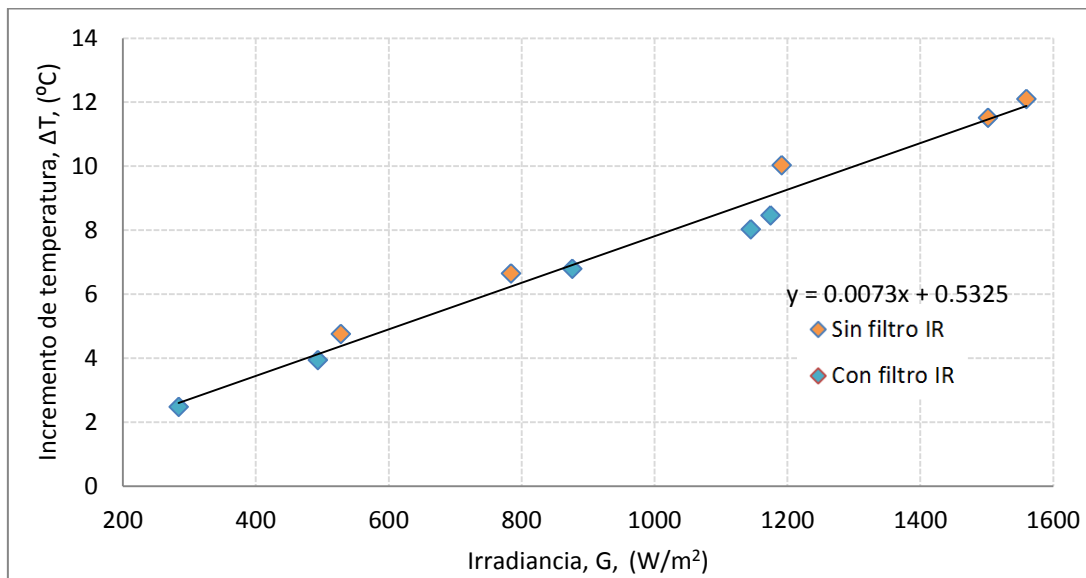


Fig. 25 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la irradiancia. Célula fotovoltaica en circuito abierto.

Se puede apreciar en la Fig. 25 una relación lineal entre el incremento de temperatura y la irradiancia. Al filtrar la radiación infrarroja la irradiancia disminuye y, por lo tanto, también lo hace el incremento de temperatura. Al fin y al cabo, la energía de todas las longitudes de onda de la luz contribuyen al aumento de temperatura. En función de la longitud de onda, la radiación será absorbida más o menos superficialmente, pero esta energía es transmitida por conducción por todo el material contribuyendo al aumento de temperatura medido. Sin embargo, estos aumentos son menores que los obtenidos en la bibliografía [12]. La medida del aumento de temperatura para una irradiancia de 1000 W/m² es de alrededor de 30 °C mientras que, como se puede ver en la Fig. 25, el incremento medido en el laboratorio es de 8 °C. Una posible hipótesis para explicar este efecto es que este incremento de temperatura medido es menor debido al efecto que tiene el encapsulado en la refrigeración ya que, como se ve en la Fig. 22, el área del encapsulante es aproximadamente cuatro veces mayor que el de la célula. Para comprobar esto se ha realizado una medida del aumento de temperatura sobre una célula fotovoltaica sin encapsulado.

Esta medida se ha realizado fijando la célula sin encapsular a una apertura óptica bien centrada en el haz de luz y apoyada únicamente sobre la apertura óptica en sus esquinas,

minimizando de esta forma la refrigeración de la célula fotovoltaica por conducción en el contacto metálico con el soporte óptico, y manteniendo, en la medida de lo posible, las condiciones de refrigeración que se tiene en el resto de medidas realizadas. En la Fig. 26 se puede ver el montaje experimental para la medida del aumento de temperatura de la célula sin encapsular, en el caso de filtrar la radiación infrarroja. Para conocer la irradiancia que ve la célula en esa posición se ha colocado la célula fotovoltaica de referencia en la misma posición y se ha realizado una medida de su curva característica para conocer su corriente de cortocircuito y mediante el factor de conversión obtener la irradiancia sobre la célula.

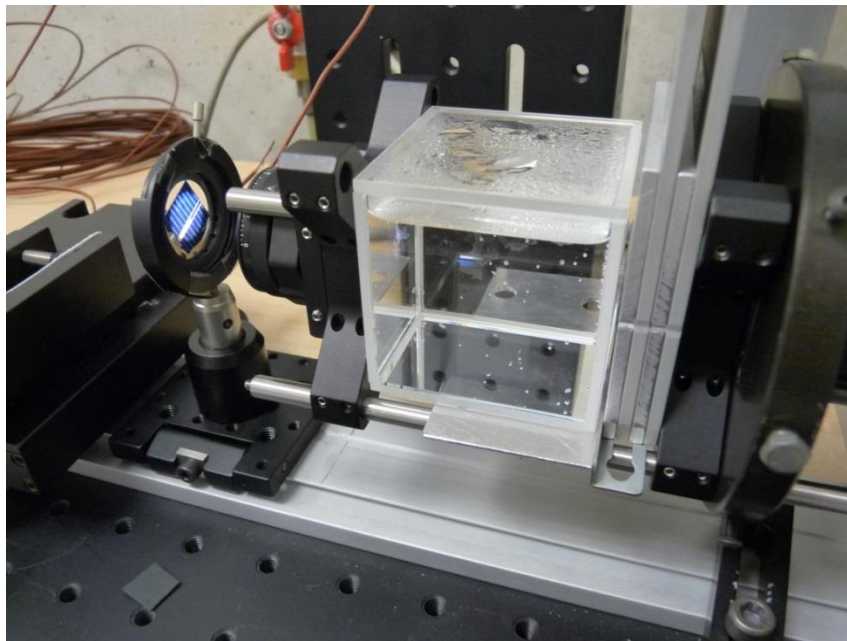


Fig. 26 Fotografía del montaje experimental para la medida de aumento de temperatura, con filtro infrarrojo, de la célula fotovoltaica sin encapsular.

En la Fig. 27 se compara la evolución temporal de la temperatura de la célula fotovoltaica, tanto encapsulada como sin encapsular. Ambas gráficas son típicas de un estado transitorio de calentamiento consecuencia de un balance energético entre la energía entrante, la saliente y la destinada a aumentar la temperatura del sistema. Bajo las mismas condiciones de irradiancia, se puede ver el efecto, ya comentado, del encapsulante en la refrigeración de la célula, aumentando el área convectiva y obteniéndose de esta forma una temperatura final menor.

También se puede ver como la célula encapsulada tiene una mayor inercia térmica que la que no está encapsulada. Es decir, la célula encapsulada necesita un mayor aporte energético para elevar su temperatura. Se puede observar cómo la célula sin encapsular llega a su temperatura

final aproximadamente a los tres minutos y presenta mayor variación en su temperatura debido a su menor inercia térmica, es por esto por lo que es más sensible a las oscilaciones en la temperatura ambiente. Por el contrario, la célula encapsulada necesita unos seis minutos, el doble que la no encapsulada, para alcanzar su temperatura final, o de equilibrio y se ve como la temperatura es mucho más estable. Ambas medidas se han realizado bajo las mismas condiciones de irradiancia y temperatura ambiente.

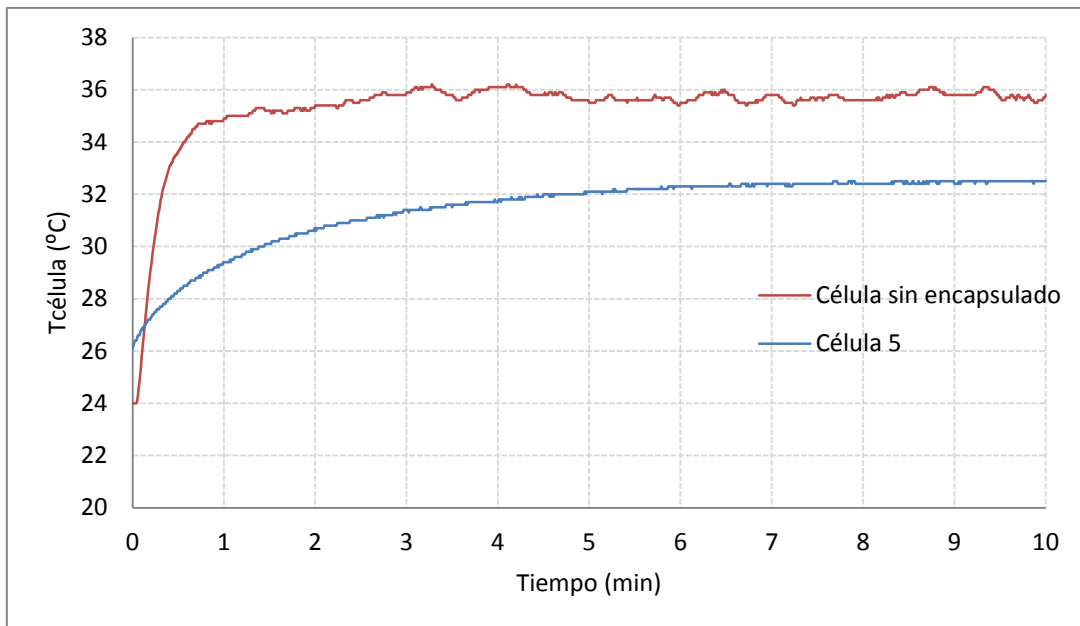


Fig. 27 Representación de la evolución temporal de la temperatura de la célula fotovoltaica encapsulada y sin encapsular.

En la Fig. 28, en la que se muestran los resultados obtenidos en estas medidas, se puede ver el efecto que tiene el encapsulante en la refrigeración de la célula fotovoltaica. Para una irradiancia de $932,5 \text{ W/m}^2$ y filtrando la radiación infrarroja la célula encapsulada incrementa su temperatura respecto de la ambiente en $7,2 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente, mientras que la célula sin encapsular tiene un incremento de $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$, es decir, la célula encapsulada tiene un incremento de temperatura respecto del ambiente un 42 % inferior a la célula sin encapsular en el caso de filtrar la radiación infrarroja. En el caso de no filtrar el infrarrojo, la célula encapsulada experimenta un incremento de temperatura de $8,2 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras que la célula sin encapsular, para la misma condición de irradiancia, presenta un incremento de su temperatura de $16,3 \text{ }^\circ\text{C}$, un 50 % superior.

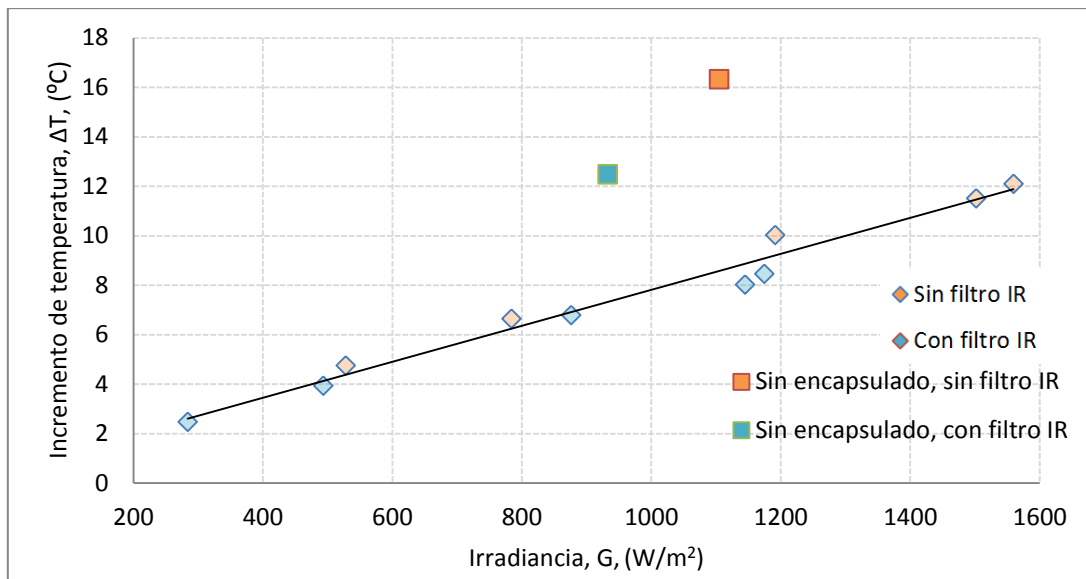


Fig. 28 Representación del incremento de temperatura en la célula fotovoltaica, encapsulada, respecto al ambiente en función de la irradiancia y medidas realizadas sobre célula sin encapsular.

Sin embargo, los resultados obtenidos son menores que los obtenidos en la bibliografía. Puede ser que esto sea debido al efecto del empaquetamiento en módulos sumado a la baja conductividad del encapsulante, lo que reduce el flujo de calor a través de éste. Según [13], la conductividad térmica del silicio es de $148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, mientras que la del EVA es de $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ y la del Tedlar® es $0,36 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.3.1.2.- En punto de máxima potencia

Cuando la célula solar se encuentra operando en el punto de máxima potencia (MPP, Maximum Power Point), parte de la radiación absorbida por ésta es convertida en energía eléctrica y el resto se transforma en calor resultando en un incremento en la temperatura de la célula. En las células solares utilizadas en el presente Trabajo Fin de Máster, en torno al 18 % de la potencia incidente es convertida en electricidad y el resto se transforma en calor.

Al igual que en las medidas en circuito abierto, el control de la irradiancia se realiza modificando la distancia existente entre la célula fotovoltaica y la lámpara. Antes de cada medida de aumento de temperatura, se realiza una medida de la curva característica de la célula fotovoltaica en esa posición de forma que se conoce la corriente de cortocircuito, que se utiliza para obtener la irradiancia en esa posición, y la tensión del punto de máxima potencia para, antes de comenzar con la medida de temperatura, imponer la tensión de trabajo a la del punto óptimo de operación de la célula. El procedimiento de medida es el mismo que para el caso de la célula en circuito abierto salvo que en este caso se extrae potencia eléctrica de la célula.

Como se puede observar en la Fig. 29, la tendencia es la misma que la de la célula fotovoltaica circuito abierto que puede verse en la Fig. 24. Sin embargo, el aumento de temperatura respecto del ambiente es menor que en el caso de circuito abierto, para la misma corriente, por lo explicado en el párrafo anterior. En este caso, únicamente el 82 % de la potencia incidente se convierte en calor frente al 100 % en el caso de la célula en circuito abierto.

Al igual que en el caso anterior, con la misma corriente de cortocircuito, la reducción media en el aumento temperatura al filtrar la radiación infrarroja era de 23,5 %, en el caso de operar la célula en el punto de máxima potencia la reducción en el aumento de temperatura filtrando el infrarrojo es del 30,9 % respecto del caso sin filtro, manteniendo igual la irradiancia en el rango de generación de la célula.

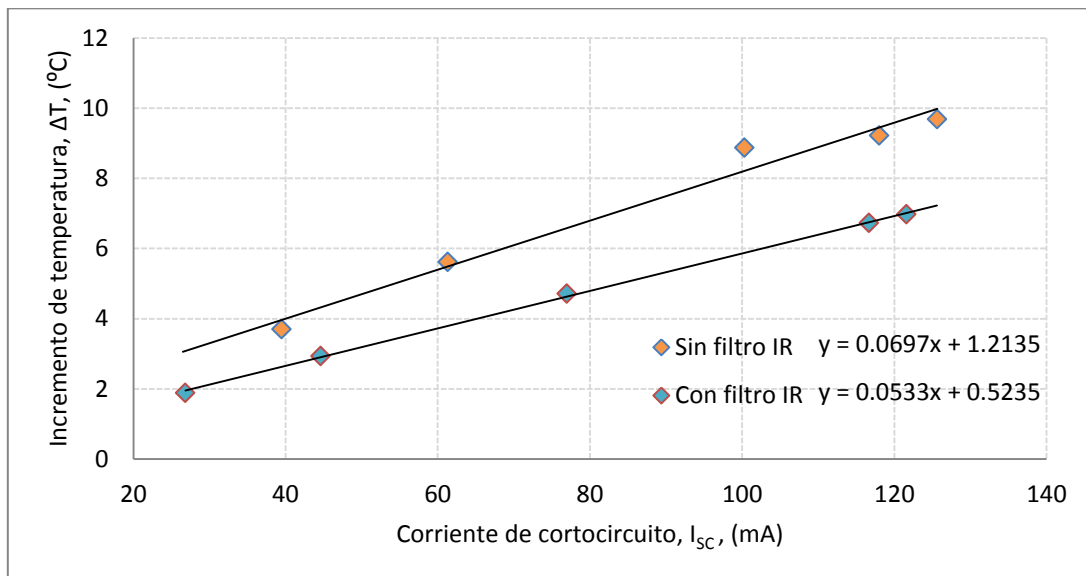


Fig. 29 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la corriente de cortocircuito. Célula fotovoltaica operando en el punto de máxima potencia.

En la Fig. 30 se puede ver el aumento de temperatura de la célula fotovoltaica en función de la irradiancia, operando en el punto de máxima potencia. La tendencia es la misma que en el caso de circuito abierto creciendo el aumento de temperatura linealmente conforme aumenta la irradiancia.

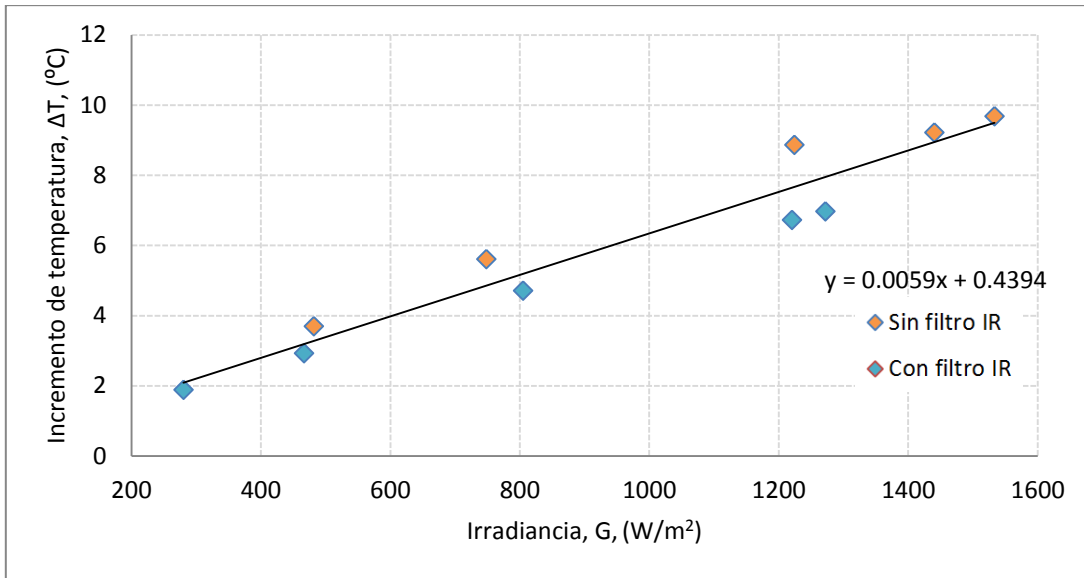


Fig. 30 Representación del incremento de temperatura respecto de la ambiente en función de la irradiancia. Célula fotovoltaica en MPP.

Sin embargo, como se observa en la Fig. 31, la pendiente de la recta es menor en el caso de operar en el punto de máxima potencia que en circuito abierto. Teniendo una reducción en el aumento de temperatura respecto del ambiente del 19 % en el caso de operar en el punto de máxima potencia con respecto a la situación en circuito abierto.

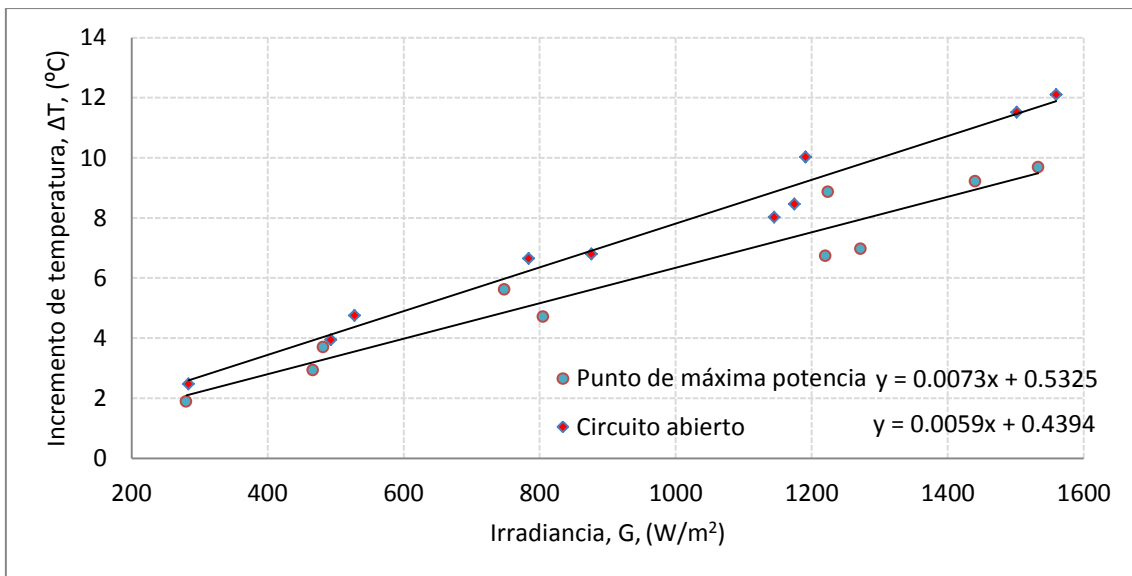


Fig. 31 Representación de los aumentos de temperatura en función de la irradiancia para los casos de circuito abierto y de punto de máxima potencia.

4.3.2.- Aumento de temperatura con filtros paso banda

En esta sección se presenta la caracterización espectral del aumento de temperatura, utilizando para ello filtros paso banda que filtran la luz incidente, por bandas espectrales, desde 400 nm hasta 750 nm, tal y como se aprecia en la Fig. 33. Debido a que estos filtros transmiten parcialmente a partir de 1300 nm (ver Fig. 32), se ha utilizado una cubeta de agua de 4 cm, a fin de filtrar estas longitudes de onda. El cambio de tamaño del filtro de infrarrojo realizado para estas medidas se justifica por la necesidad de tener un montaje más compacto y, de esta forma, poder irradiar a la célula con una potencia que permita medir un incremento de temperatura significativo en la célula fotovoltaica. El procedimiento de medida es muy similar al descrito anteriormente, a excepción de que la medida se realiza en el punto de máxima irradiancia, esto es, más cercano a la fuente de luz. Para irradiancias menores, los aumentos de temperatura eran demasiado pequeños para medirse con precisión.

Los datos de irradiancia se obtienen a partir del producto de la irradiancia de la lámpara, con el filtro de infrarrojo mencionado, por la transmitancia medida de cada filtro que puede verse en la Fig. 32. Estos datos se representan en la Fig. 33.

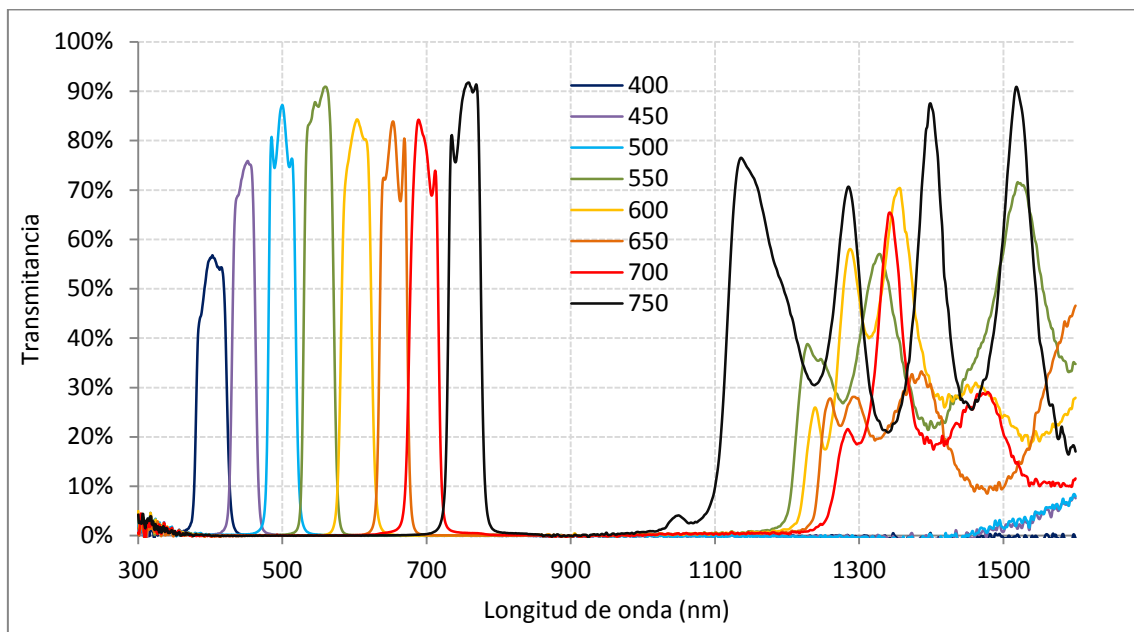


Fig. 32 Representación de las medidas de transmitancia de los filtros paso banda utilizados.

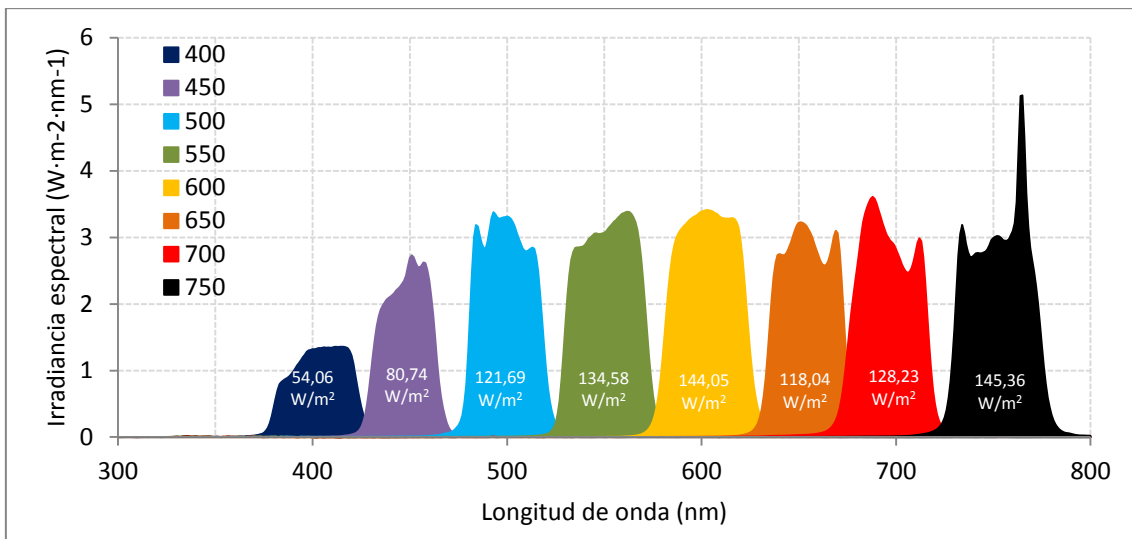


Fig. 33 Representación de la irradiancia espectral con cada uno de los filtros paso banda utilizados en las medidas de aumento de temperatura y el valor de irradiancia integrado.

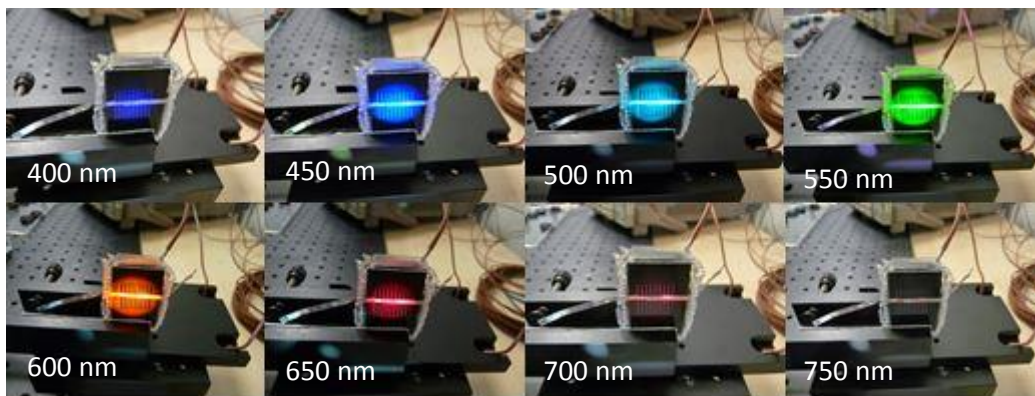


Fig. 34 Fotografía de la célula iluminada con los diferentes filtros paso banda.

Para cada uno de los filtros se realizan varias medidas de aumento de temperatura respecto del ambiente, para calcular un aumento de temperatura medio (ver Fig. 34). A partir de los datos de irradiancia espectral, que se ven en la Fig. 33, se calcula la irradiancia con cada filtro integrando desde 50 nm antes del pico de transmitancia, hasta 50 nm después del pico. Con estos valores se calcula el aumento de temperatura respecto al ambiente normalizado por la irradiancia en cada rango espectral.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

4.3.2.1.- En circuito abierto

En la Fig. 35 se puede ver el incremento de temperatura respecto de la temperatura ambiente experimentado por la célula, normalizado por la irradiancia incidente sobre ella. Si se considera una absorptividad espectral constante, el incremento de temperatura por vatio incidente debería ser el mismo para todos los rangos espectrales a estudio debido a que, en circuito abierto, toda la potencia incidente se transforma en calor.

Sin embargo, como se observa en la Fig. 35, hay mucha diferencia entre los rangos espectrales intermedios y los extremos. Una posible explicación a este fenómeno puede ser que la absorptividad espectral de la célula encapsulada no sea constante, absorbiendo mayor porcentaje de la radiación de baja longitud de onda y menos entre 500 nm y 600 nm.

Otra posible explicación a esto es debido a errores en la medida debido a que los incrementos medidos son muy pequeños, entre 0,5 y 1,2 °C. Entonces un error de una décima da lugar a errores considerables, del orden del 20 %.

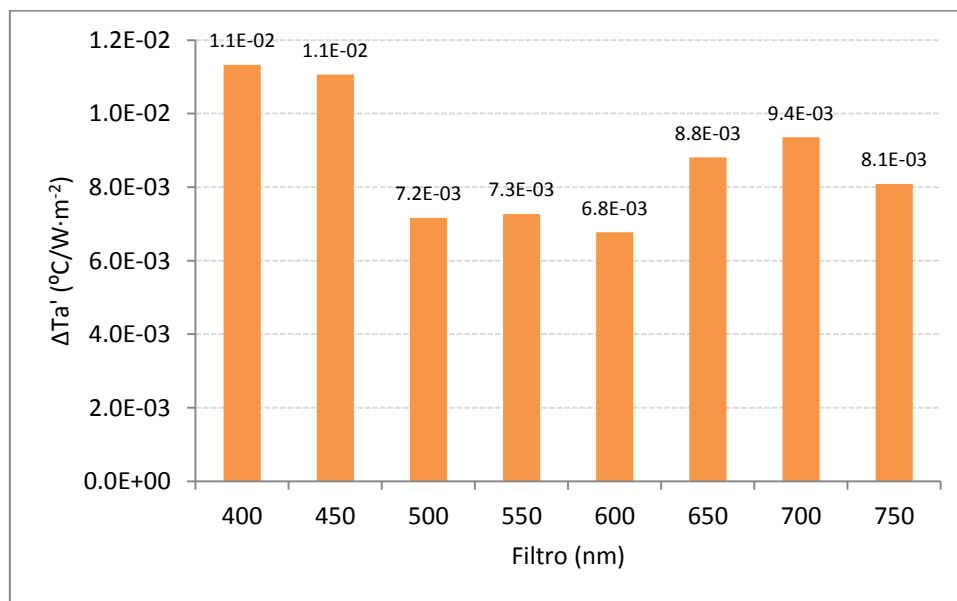


Fig. 35 Representación del aumento de temperatura, respecto al ambiente, normalizado por irradiancia incidente para cada filtro paso banda en condición de circuito abierto.

Como se aprecia de Fig. 35, se han obtenido incrementos de temperatura que van desde 1,1E-02 °C/W·m⁻² hasta 6.8E-03 °C/W·m⁻² para las bandas espectrales entre 400 nm y 750 nm.

4.3.2.2- En el punto de máxima potencia

En la Fig. 36 se pueden ver los resultados obtenidos para el mismo experimento pero fijando, en cada caso, el punto de operación de la célula al punto de máxima potencia. Se observa claramente que conforme aumenta la longitud de onda el incremento de temperatura normalizado por la irradiancia disminuye. Esto es consecuencia de la relación inversa existente entre longitud de onda y energía ya que cuanto menor longitud de onda más energía tiene el fotón. Si el fotón supera la energía del band gap, todo ese exceso de energía se emplea en calentar la célula fotovoltaica traduciéndose en un incremento de su temperatura. Esto explica por qué el mayor aumento de temperatura respecto al ambiente, normalizado por irradiancia, se da con el filtro de 400 nm y este aumento va reduciéndose conforme aumenta la longitud de onda. También se ha representado la eficiencia como el cociente entre la potencia extraída de la célula fotovoltaica y la potencia incidente sobre ella. En la Fig. 36 se ve como aumenta la eficiencia conforme aumenta la longitud de onda con la que se irradia a la célula. Esto se explica del mismo modo que el aumento de temperatura. Conforme aumenta la longitud de onda, la energía de los fotones se acerca más a la del band gap y mayor es el ratio de irradiancia empleado en generación.

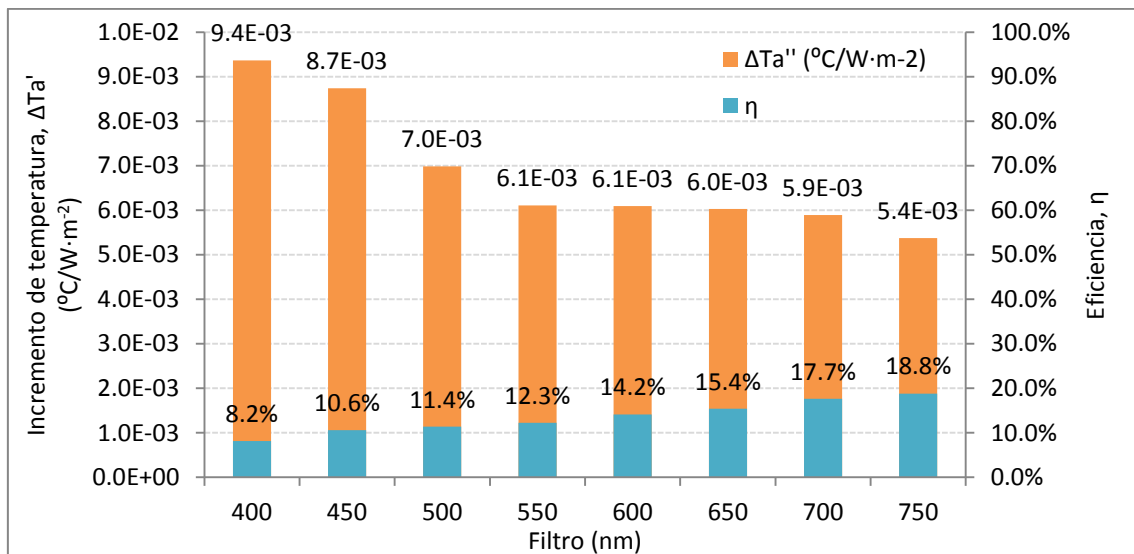


Fig. 36 Representación del aumento de temperatura, respecto al ambiente, normalizado por la irradiancia incidente para cada filtro paso-banda en condición de punto de máxima potencia.

Como puede observarse en la Fig. 36, las medidas de aumento de temperatura van desde 9,4E-03 $^{\circ}C/W \cdot m^{-2}$ hasta 5,4E-03 $^{\circ}C/W \cdot m^{-2}$ y las medidas de eficiencia entre el 8,2 % y 18,8 % para las bandas espectrales entre 400 nm y 750 nm.

5.- MODELO TÉRMICO DE UNA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

A fin de poder validar el montaje experimental y los resultados obtenidos ya que, como se ha comentado, los aumentos de temperatura medidos son inferiores a los de la bibliografía [12], se ha modelado el comportamiento térmico de la célula fotovoltaica en el laboratorio mediante el software *Matlab* así como de un módulo fotovoltaico en exterior. En el caso de las medidas en interior se van a estudiar dos casos, el de la célula encapsulada y el de la célula sin encapsulado. A continuación se va a explicar el modelo y las suposiciones adoptadas, así como los resultados obtenidos.

5.1.- Descripción del modelo

El modelo térmico utilizado permite estudiar el comportamiento térmico de una célula solar fotovoltaica bajo una determinada irradiancia incidente en el laboratorio así como un módulo instalado en el exterior en disposición horizontal. Esta situación se puede describir como un sistema transitorio en el que se tiene una energía entrante, definida por la irradiancia incidente sobre la célula, y una refrigeración al ambiente, que viene dada por la convección natural y por la radiación a las paredes del laboratorio, en el caso de la célula, y al cielo y al suelo en el caso del módulo fotovoltaico en exterior. Este balance energético se traduce en un incremento de la temperatura del sistema y puede explicarse mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{neto} = m \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}$$

Ec. 1

El flujo de calor neto es la diferencia entre el flujo de calor entrante, aportado por la lámpara de xenón, y el saliente debido a la refrigeración convectiva y radiativa. A continuación se definen ambos. Cabe comentar que todos los parámetros de las ecuaciones dadas en este capítulo están definidos en el ANEXO I: NOMENCLATURA.

$$\dot{Q}_{Entrante} = G \cdot A_{Abs} \cdot \alpha$$

Ec. 2

$$\dot{Q}_{Saliente} = h \cdot A_{Ref} \cdot (T_m - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{Top} \cdot A_{Ref} \cdot (T_m^4 - T_p^4) + \sigma \varepsilon_{Bottom} \cdot A_{Ref} (T_m^4 - T_p^4)$$

Ec. 3

Una vez definidas las ecuaciones que rigen el comportamiento térmico de la célula fotovoltaica, a continuación, se van a justificar los supuestos adoptados en el modelo.

Se supone, en el caso de la célula encapsulada, que el área de refrigeración es igual al área del encapsulado mientras que en la célula sin encapsular, el área convectiva es igual al área de la célula fotovoltaica. En cuanto al área de absorción, ésta se supone igual al área de la célula fotovoltaica para los dos casos de estudio. Para el módulo en el exterior se ha supuesto que las áreas, tanto de absorción como convectiva, son iguales a las dimensiones del módulo (2 m x 1 m).

La inercia térmica determina la cantidad de energía que es necesario aportar a una unidad de masa para que su temperatura varíe un grado. Se ha considerado constante con la temperatura debido a la ausencia de valores de densidad y capacidad calorífica en función de la temperatura en la bibliografía. En el caso de la célula encapsulada y del módulo, se ha definido igual a 11000 veces el valor del área de refrigeración, en unidades del Sistema Internacional, [14]. En el caso de la célula sin encapsular, se ha medido la masa del sistema célula-termopar y se ha multiplicado por la capacidad calorífica del silicio a temperatura ambiente [15].

En cuanto a las emisividades de la cara delantera y trasera, se consideran constantes con la temperatura. Los valores han sido obtenidos de la bibliografía, [9].

54

Se entiende que, tanto la célula encapsulada como el módulo, se comportan como un sistema concentrado, es decir, se supone que no existen gradientes térmicos en ésta. Aunque esto no sea del todo cierto, se considera aceptable debido a los pequeños espesores (del orden de micras) de los materiales encapsulantes así como de la célula.

También se considera que el coeficiente de convección es constante con la temperatura ya que, con este supuesto, se está incurriendo en un menor error que el introducido al utilizar la ecuación experimental para el cálculo del número de Nusselt. En el modelo sólo va a ser considerada la convección natural. Para el cálculo de este coeficiente se considera que la temperatura de la película de aire en contacto con la célula fotovoltaica se encuentra a la máxima temperatura registrada en las mediciones (32,8 °C, en el caso de la célula encapsulada; 35,9 °C, en el caso de la célula sin encapsular y 50 °C en el caso del módulo) obteniéndose las propiedades del aire, a esta temperatura, mediante interpolación. Asimismo, se considera al aire como gas ideal, de esta forma el coeficiente de expansión volumétrica, β , queda como la inversa de la temperatura del aire, en grados Kelvin. El coeficiente de convección se calcula de la siguiente manera:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Ec. 4

Para el cálculo del número de Nusselt se ha empleado la ecuación de Churchill y Chu definida para la convección sobre placas verticales sumergidas en fluidos en reposo y en régimen laminar (Ec. 5) [16]. En el caso de la célula encapsulada, la longitud característica sería la del encapsulado en dirección vertical. Mientras que en el caso de la célula sin encapsulado, la longitud característica es la de la célula en la dirección vertical. En el caso del módulo en el exterior se ha supuesto que la velocidad del viento es nula y para el cálculo del número de Nusselt se ha utilizado la obtenida de la bibliografía [9] para placas horizontales en régimen laminar (Ec. 6). La longitud característica en este caso se calcula como la fracción entre el área del módulo y su perímetro.

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

Ec. 5

$$Nu = 0,23 \cdot Ra^{0,32}$$

Ec. 6

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Ec. 7

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2}$$

Ec. 8

En el caso de la célula sin encapsulado, se ha introducido un término más en la Ec. 3 referido a la evacuación de calor por conducción a través del soporte óptico sobre el que se apoya la célula fotovoltaica (ver Fig. 26) quedando de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{Saliente} = & h \cdot A_{Ref} \cdot (T_m - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{Top} \cdot A_{Ref} \cdot (T_m^4 - T_P^4) + \sigma \varepsilon_{Bottom} \cdot A_{Ref} (T_m^4 - T_P^4) \\ & + \frac{k_{Al} \cdot A_{Cond}}{e} \cdot (T_m - T_{Opt}) \end{aligned}$$

Ec. 9

En el modelo de la célula sin encapsulado, el área de absorción y el área de refrigeración son iguales que el área de la célula. En cuanto al área conductiva, se ha supuesto que la célula apoya en cada esquina sobre 0,1 mm².

Se ha realizado una medida de la temperatura de las paredes del laboratorio durante varias horas con el objetivo de determinar la relación existente entre la temperatura ambiente y la de las paredes. Los datos obtenidos de temperatura de la pared han sido, de media, 2 °C inferiores a los de la temperatura ambiente. El mismo procedimiento ha sido aplicado para conocer la temperatura del soporte óptico sobre la que apoya la célula sin encapsulado y ésta se encuentra a una media de 10 °C por encima de la temperatura ambiente. En cuanto a la refrigeración radiativa del módulo, la temperatura a la que se encuentra el cielo puede calcularse con la Ec. 10 obtenida de [9], mientras que la temperatura del suelo se considera 2 °C inferior a la ambiente.

$$T_{Cielo} = 0,0552 \cdot T_a^{3/2}$$

Ec. 10

A continuación, en la Tabla 3, se muestran los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la temperatura final de la célula fotovoltaica así como del módulo fotovoltaico.

Tabla 3 Parámetros utilizados en el modelo para el cálculo de la temperatura final de la célula y módulo fotovoltaicos.

Parámetro	Célula encapsulada	Célula sin encapsular	Módulo
Base de la célula [m]	0,015	0,015	1
Altura de la célula [m]	0,015	0,015	2
Base del encapsulado [m]	0,023		1
Altura del encapsulado [m]	0,036		2
Longitud característica [m]	0,036	0,015	0,33
Emisividad cara superior	0,84	0,84	0,84
Emisividad cara posterior	0,89	0,89	0,89
Coefficiente de absorción	0,9	1	0,9
Temperatura de la película de aire [°C]	32,8	39,3	50
Inercia térmica [J·Kg-1·K-1]	9,108		22000
Masa [Kg]		1,10E-03	
Capacidad calorífica [J·Kg-1·K-1]		713	
Área de contacto con la apertura óptica [m2]		4,00E-07	
Conductividad de la apertura óptica [J·s-1·m-1·K-1]		180	
Espesor de la apertura óptica [m]		3,00E-04	

5.2.- Resultados de las simulaciones y validación de los resultados experimentales

Para validar las medidas experimentales de aumento de temperatura se ha realizado la simulación bajo las mismas condiciones, tanto de irradiancia como de temperatura ambiente y de temperatura inicial de la célula, así como de tiempo de integración. Los resultados de temperatura final obtenidos en las simulaciones tienen un error relativo máximo, con respecto a los obtenidos experimentalmente, del 4,9 %. En la Tabla 4 se pueden ver los datos de irradiancia y temperatura ambiente con los que se han realizado las simulaciones.

Tabla 4 Datos de condiciones ambientales para las simulaciones realizadas en el caso de la célula encapsulada

Simulación	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura inicial de la célula fotovoltaica (°C)	Irradiancia (W·m ⁻²)
1	25,5	26,1	283,7
2	25,4	26	493,1
3	25,7	26,1	875,8
4	26,1	26,5	1144,3
5	26,1	26,9	1174,0

En la Fig. 37 se muestran gráficamente tanto los resultados obtenidos de la simulación como experimentalmente. El error relativo máximo en la temperatura final obtenido en la simulación, con respecto de la medida, es del 4,9 %.

57

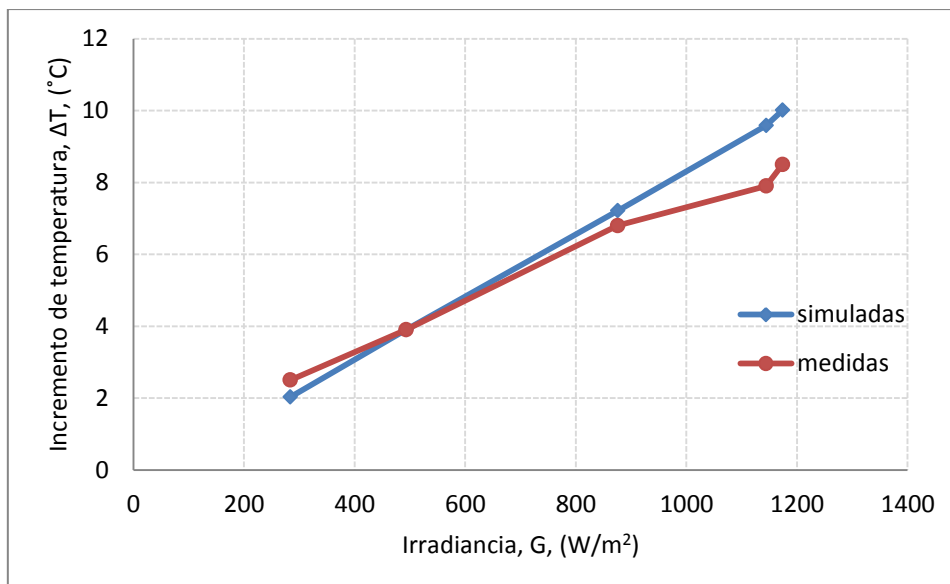


Fig. 37 Representación de los resultados obtenidos de aumento de temperatura experimentalmente y en las simulaciones.

En cuanto a la célula sin encapsular, se ha simulado ésta bajo las mismas condiciones a las que se ha realizado la medida experimental. Estas son: una irradiancia de $932,1 \text{ W/m}^2$, una temperatura ambiente de $23,6 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura inicial de la célula fotovoltaica de $23,9 \text{ }^\circ\text{C}$. En la simulación se ha obtenido una temperatura final de $34,5 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras que en la medida experimental se ha registrado una temperatura final de $34,9$ se tiene un error relativo en la temperatura final, con respecto a la medida experimental, del $3,9 \%$.

Por último, se ha simulado el módulo fotovoltaico bajo una irradiancia de 1000 W/m^2 , una temperatura ambiente de $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura inicial de $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ obteniéndose una temperatura final en el módulo de $52 \text{ }^\circ\text{C}$. Un valor que se ajusta a los resultados habituales de la temperatura de los módulos fotovoltaicos en funcionamiento, [14]. Los parámetros utilizados en el modelo pueden verse en la Tabla 4.

La temperatura final obtenida en la simulación térmica del módulo se ajusta a los valores habituales de la temperatura de los módulos fotovoltaicos en funcionamiento, lo cual nos permite validar el modelo. Por último, la semejanza entre los resultados obtenidos en las simulaciones y en las medidas experimentales nos permite ganar confianza en los resultados experimentales obtenidos.

6.- CONCLUSIONES

En este apartado se va a realizar, a modo de resumen, un análisis de las principales conclusiones a las que se ha llegado en el presente TFM.

- Para el caso de una célula solar de silicio cristalino de un tamaño de 15 mm x 15 mm, con un encapsulado estándar de tamaño 24 mm x 36 mm, en la situación de circuito abierto, el filtrado de la componente infrarroja (de longitud de onda superior a 1100 nm) de la radiación incidente supone una reducción media en el aumento de temperatura del 23,5 % con respecto al caso de no filtrarla. Se han medido reducciones de entre 0,8 °C y 2,7 °C para corrientes de cortocircuito entre 20 mA y 130 mA.
- En el punto de máxima potencia, se ha obtenido una reducción media en la temperatura de la célula solar en funcionamiento del 30,9 % al filtrar la radiación infrarroja, con respecto al caso de no filtrarla.
- Con una eficiencia de conversión de la célula solar fotovoltaica del 18,0 %, la reducción de la temperatura en el caso de operar en el punto de máxima potencia (MPP) con respecto al caso en circuito abierto es del 19,0 %. Se trata de un resultado evidente ya que en el punto óptimo de operación el 82,0 % de la radiación absorbida se transforma en energía térmica mientras que en circuito abierto el 100 % de la radiación absorbida se emplea en calentar la célula fotovoltaica. Este análisis apoya los resultados obtenidos.
- Se espera que la misma célula fotovoltaica en el exterior experimente una reducción ligeramente inferior en su temperatura de funcionamiento debido al filtrado de la radiación infrarroja ya que el porcentaje de radiación infrarroja solar es un poco inferior a la de la lámpara utilizada en el montaje experimental (16,7 % en la lámpara de xenón frente al 14,0 % del sol).
- Al medir el aumento de temperatura sobre la célula encapsulada, en circuito abierto, filtrando la irradiancia por rangos espectrales se ha visto como en las bandas más energéticas el aumento de temperatura es superior al resto. También, que en las bandas espectrales entre 500 nm y 600 nm se han registrado los menores incrementos de temperatura. Se han obtenido incrementos de temperatura que van desde 1,1E-02 °C/W·m⁻² hasta 6.8E-03 °C/W·m⁻² para las bandas espectrales entre 400 nm y 750 nm.
- En el caso de trabajar la célula en el punto de máxima potencia se ha visto como el incremento de temperatura medido es mayor conforme más energéticas sean las bandas espectrales con las que se irradia las medidas de aumento de temperatura van desde 9,4E-03 °C/W·m⁻² hasta 5,4E-03 °C/W·m⁻² para las bandas espectrales entre 400 nm y 750 nm. Lo contrario ocurre en el análisis de la eficiencia de conversión. Este

efecto era esperado ya que el exceso de la energía de los fotones más energéticos se traduce en un aumento mayor de temperatura.

- La adecuación entre los resultados de la simulación térmica del módulo y los valores reales de temperatura de los módulos fotovoltaicos en funcionamiento han permitido la validación del modelo térmico desarrollado. Una vez se tiene seguridad en el modelo y dado que el error relativo entre los valores calculados y los obtenidos mediante experimentación es inferior al 5 % pueden validarse tanto el montaje experimental como los resultados de las mediciones. Estas simulaciones realizadas apoyan los resultados experimentales obtenidos.
- Se ha visto que el área del encapsulado tiene un gran efecto en la refrigeración de la célula fotovoltaica. En el caso de filtrar la componente infrarroja de la radiación sobre la célula sin encapsular se han medido incrementos de temperatura de 12,5 °C mientras que la célula encapsulada, bajo las mismas condiciones de irradiancia, su temperatura ha aumentado 7,2 °C, un 42 % inferior que la célula sin encapsular. En el caso de no filtrar el infrarrojo este efecto es todavía superior, en la célula sin encapsular se han medido aumentos de temperatura de 16,3 °C mientras que en la encapsulada de 8,2 °C, un 50 % inferior que la célula sin encapsular.

7.- LÍNEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster pueden dar lugar a diferentes líneas de investigación, a continuación se describen algunas de ellas.

- Medidas de módulos en exterior con filtros de radiación infrarroja para comprobar el efecto de reducción de la temperatura de operación por el filtrado de esta componente espectral en una situación real de funcionamiento.
- Valoración del desarrollo de soluciones de filtrado de la radiación infrarroja.
- Tras el análisis del aumento de temperatura por bandas espectrales se ha visto que las componentes de la radiación con menor longitud de onda son las que más contribuyen al aumento de la temperatura. Es por esto por lo que puede ser interesante investigar en procesos como el *down shifting* para minimizar este efecto.
- Por último, como se ha comprobado en los resultados experimentales, el encapsulado tiene un gran impacto en la temperatura de operación de la célula. Es por esto por lo que puede ser interesante abrir una línea de investigación en soluciones sobre el encapsulado que disminuyan la temperatura en funcionamiento de los módulos fotovoltaicos mediante técnicas de refrigeración pasiva como puede ser la refrigeración radiativa pasiva, que consiste en el aprovechamiento de las bandas espectrales en las que la atmósfera transmite la radiación infrarroja (8 μm – 13 μm) y en lugar de emitir a la atmósfera emitir directamente al espacio exterior cuya temperatura es inferior. Otra línea interesante a investigar puede ser aumentar el área convectiva estructurando el Tedlar® o mejorar la conductividad térmica del encapsulante. Cabe destacar que además del impacto en la eficiencia, estas medidas tendrían un impacto en el tiempo de vida útil de los módulos fotovoltaicos.

8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency, "Key World Energy Statistics," IEA, París, 2017.
- [2] C. Honsberg and S. Bowden, "PVCDROM," Photovoltaic Special Research Center, University of New South Wales.
- [3] J. A. Roca, "El periódico de la energía," 2018. [Online]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-costes-de-la-fotovoltaica-caen-un-80-en-los-ultimos-cinco-anos/> . [Accessed 1 Junio 2018].
- [4] M. Schmela, "Global Market Outlook," SolarPower Europe, Bruselas, 2017-2021.
- [5] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, "Photovoltaics Report," Freiburg, 2018.
- [6] NREL, National Renewable Energy Laboratory, "PV FAQs," Enero 2004. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>. [Accessed 18 Junio 2018].
- [7] NREL, National Renewable Energy Laboratory, "NREL.gov," 25 Abril 2018. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>. [Accessed 18 Junio 2018].
- [8] R. Santbergen and R. van Zolingen, "The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2007.
- [9] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. Van Swaaij and M. Zeman, Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems, Cambridge: UIT Cambridge, 2016.
- [10] U. Würfel, A. Cuevas and P. Würfel, "Charge Carrier Separation in Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 461-469, 2015.
- [11] O. Dupré, "Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices," INSA, Lyon, 2015.
- [12] M. Muller, "Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)," NREL, National Renewable Energy Laboratory, Albuquerque, 2010.
- [13] B. Lee, J. Z. Liu, B. Sun, C. Y. Shen and G. C. Dai, "Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulants for solar photovoltaic (PV) cell," *Express Polymer Letters*, vol. 2, no. 5, pp. 357-363, 2008.

- [14] M. K. Fuentes, "A simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays," Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1987.
- [15] R. Hull, *Properties of Crystalline Silicon*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2006.
- [16] J. Holman, "Sistemas de convección natural," in *Transferencia de calor*, Mexico DF., Compañía Editorial Continental, S.A., 1999, pp. 299-340.
- [17] D. Warrilow, "A bumpy road to the top: Statistically defining a peak in oil production," *Energy Policy*, vol. 82, pp. 81-84, 2015.
- [18] J. Solé, A. García-Olivares, A. Turiel and J. Ballabrera-Poy, "Renewable transitions and the net energy from oil liquids: A scenarios study," *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 258-271, 2018.
- [19] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, "World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables," 2017.
- [20] International Energy Agency, "World Energy Outlook," IEA, París, 2017.

ANEXO I: NOMENCLATURA

α : Coeficiente de absorción

A_{Abs} : Área de absorción [m^2]

A_{Ref} : Área de refrigeración [m^2]

A_{Cond} : Área conductiva [m^2]

β : Coeficiente de expansión volumétrica [K^{-1}]

C : Capacidad calorífica [$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

ε_{Bottom} : Emisividad de la cara trasera

ε_{Top} : Emisividad de la cara frontal

e : Espesor de la apertura óptica [m]

g : Constante de la gravedad [$m \cdot s^{-2}$]

G : Irradiancia [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$]

Gr : Número de Grashof

h : Coeficiente de convección [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

k : Conductividad del aire [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

k_{Al} : Conductividad térmica del aluminio [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

L : Longitud característica, en este caso la longitud en dirección vertical [m]

m : Masa del sistema [Kg]

Nu : Número de Nusselt

Pr : Número de Prandtl

$\dot{Q}_{Entrante}$: Flujo de calor entrante al sistema [$J \cdot s^{-1}$]

\dot{Q}_{neto} : Flujo de calor neto sobre el sistema [$J \cdot s^{-1}$]

$\dot{Q}_{Saliente}$: Flujo de calor saliente del sistema [$J \cdot s^{-1}$]

Ra : Número de Rayleigh

σ : Constante de Stefan-Boltzmann [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

t : Tiempo [s]

T : Temperatura de la célula [K]

T_m : Temperatura de la célula [K]

T_{Opt} : Temperatura de la apertura óptica [K]

T_p : Temperatura de la pared [K]

T_s : Temperatura de la película de aire en contacto con la célula fotovoltaica [K]

T_{∞} : Temperatura ambiente en un punto alejado de la célula fotovoltaica [K]

ν : Viscosidad cinemática del aire [$Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]