

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de la Energía

Acoplamiento entre filtros fotónicos y módulos
fotovoltaicos

Autor: Aníbal Salvador Gutiérrez

Tutores: Jose María Delgado Sánchez

Isidoro Lillo Bravo

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Acoplamiento entre filtros fotónicos y módulos fotovoltaicos

Autor:

Aníbal Salvador Gutiérrez

Tutores:

Jose María Delgado Sánchez

Isidoro Lillo Bravo

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Acoplamiento entre filtros fotónicos y módulos fotovoltaicos

Autor: Aníbal Salvador Gutiérrez

Tutores: Jose María Delgado Sánchez
Isidoro Lillo Bravo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

Agradecimientos

Me gustaría, primero, dar las gracias a todas aquellas personas con las que he tenido la suerte de cruzarme durante la realización de este grado, compañeros y profesores de los que en mayor o menor medida he aprendido y compartido momentos y conocimientos.

Me gustaría también agradecer a mis tutores Jose María Delgado Sánchez e Isidoro Lillo Bravo la oportunidad que me han dado de poder realizar este proyecto, así como su implicación y orientación durante el mismo.

Por último, me gustaría dar las gracias a toda familia, en especial a mis padres. He tenido mucha suerte en la vida de estar rodeado de unos padres que en momentos difíciles siempre me han brindado su apoyo incondicional. Gracias.

Aníbal Salvador Gutiérrez

Sevilla, 2019

Resumen

Los módulos fotovoltaicos solo utilizan parte de la radiación electromagnética que les llega proveniente del Sol. Parte del espectro solar no utilizado provoca un calentamiento del sistema, con su consecuente reducción del rendimiento.

En este proyecto se introduce el concepto de cristal fotónico como medida para evitar que el módulo fotovoltaico absorba dicho calor residual. Se plantea, además, un método que permita cuantificar la influencia que supone el acoplamiento de un cristal fotónico a un módulo fotovoltaico, sobre la generación de energía eléctrica.

Por último, se realiza un análisis con dos tecnologías fotovoltaicas con respuesta espectral muy diferente, con el objetivo de determinar la posición en la que ha de trabajar el cristal fotónico para que la energía eléctrica generada sea la máxima posible.

Abstract

Photovoltaic modules only use some of the electromagnetic radiation that comes from the Sun. Some of the nonused photons are responsible to causes a system warm-up, with its consequent reduction in performance.

This project introduces the concept of photonic crystal as a measure to prevent the photovoltaic module from absorbing this residual heat. It also proposes a method that allows quantifying the influence of using a photonic crystal combined with a photovoltaic module, taking into account its performance over the electrical energy generation.

Finally, an analysis is carried out using two photovoltaic technologies, with significant different spectral response, with the aim of determining the position in which the photonic crystal must work so that the electrical energy generated was as high as possible.

Índice

Agradecimientos	viii
Resumen	x
Abstract	xii
Índice	xiii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xix
1 Introducción	23
2 Objeto del proyecto	25
3 Descripción del Cristal Fotónico	27
4 Comportamiento del Cristal fotónico en la tecnología fotovoltaica	33
4.1 <i>Metodología</i>	33
4.2 <i>Determinación de la posición óptima del filtro</i>	39
5 Conclusiones y líneas de trabajo futuro	58
6 ANEXO	¡Error! Marcador no definido.
6.1 <i>Influencia del ángulo de la irradiancia sobre el cristal fotónico</i>	¡Error! Marcador no definido.
Referencias	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los módulos de m-Si LongiSolar LR6-60DG-290M y a-Si Schott Solar. [13]	39
Tabla 2. Posición óptima y neutra (nm) del filtro de m-Si.	53
Tabla 3. Posición óptima y neutra (nm) del filtro de a-Si.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Respuesta espectral relativa de diferentes tecnologías fotovoltaicas. [14]	27
Figura 3.2. Rendimiento de una célula de m-Si en función de la temperatura de la célula.	28
Figura 3.3. Comportamiento de un cristal fotónico ideal. Enfriamiento espectral selectivo y enfriamiento radiante. [6]	29
Figura 3.4. Spectrum Splitter. [7]	29
Figura 3.5. Esquema de una planta híbrida fotovoltaica-solar térmica. [8]	30
Figura 3.6. SPIRE TECH. Funcionamiento de un módulo fotovoltaico con un filtro espectral selectivo incorporado. [8]	30
Figura 3.7. Micromorph Tandem a-Si/c-Si. [9]	31
Figura 4.1. Balance de energía del módulo sin filtro(izq) y con filtro (drch).	33
Figura 4.2. Respuesta espectral (SR) de la célula de Silicio monocristalino (m-Si). [12]	40
Figura 4.3. Respuesta espectral (SR) de la célula de Silicio amorfo (a-Si). [12]	40
Figura 4.4. Espectro de reflectancia genérico.	41
Figura 4.5. Espectro de reflectancia genérico como función escalón.	41
Figura 4.6. ASTM G173-03 Espectro Estándar AM1,5. [11]	42
Figura 4.7. Desplazamiento del Centro del Pico de Bragg de la función escalón.	43
Figura 4.8. Potencia reflejada por el filtro en función de la posición del centro del Pico de Bragg de un filtro diseñado para m-Si a 1000 W/m ² (línea azul) y 400 W/m ² (línea amarilla).	43
Figura 4.9. Potencia reflejada por el filtro en función de la posición del centro del Pico de Bragg de un filtro diseñado para a-Si a 1000 W/m ² (línea roja) y 400 W/m ² (línea gris).	44
Figura 4.10. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para m-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T _{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m ² .	44
Figura 4.11. Reducción de temperatura consegida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 1000 W/m ² .	45
Figura 4.12. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para m-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T _{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 400 W/m ² .	46
Figura 4.13. Reducción de temperatura consegida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 400 W/m ² .	46
Figura 4.14. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para a-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T _{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m ² .	47
Figura 4.15. Reducción de temperatura consegida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 1000 W/m ² .	47
Figura 4.16. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para a-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T _{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m ² .	48
Figura 4.17. Reducción de temperatura consegida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo	

sin filtro para 400 W/m ² .	48
Figura 4.18. Factor de Reducción de Transmitancia del filtro de m-Si para cada posición del centro del Pico de Bragg del filtro.	49
Figura 4.19. Comparativa del Factor de Reducción de transmitancia del filtro de m-Si (curva azul) y el filtro de a-Si (curva roja) para cada posición del centro del Pico de Bragg del filtro.	50
Figura 4.20. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 1000W/m ² 35°C y 1m/s.	51
Figura 4.21. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 1000W/m ² 10°C y 6m/s.	52
Figura 4.22. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 400W/m ² 35°C y 1m/s.	52
Figura 4.23. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 400W/m ² 10°C y 6m/s.	53
Figura 4.24. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 1000 W/m ² 35°C y 1 m/s.	54
Figura 4.25. ncremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 1000 W/m ² 10°C y 6 m/s.	54
Figura 4.26. ncremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 400 W/m ² 35°C y 1 m/s.	55
Figura 4.27. ncremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 400 W/m ² 10°C y 6 m/s.	55

$Q_{conv,sup}$	Transmisión de calor por convección de la cara superior del módulo
$Q_{conv,inf}$	Transmisión de calor por convección de la cara inferior del módulo
$Q_{rad,sup}$	Transmisión de calor por radiación de la cara superior del módulo
$Q_{rad,inf}$	Transmisión de calor por radiación de la cara inferior del módulo
P_{transm}	Potencia transmitida por el filtro
P_{ref}	Potencia reflejada por el filtro
$P_{eléc}$	Potencia eléctrica generada por el sistema
$P_{AM1,5}$	Potencia normalizada para cada longitud de onda del espectro AM1,5
G	Irradiancia
θ	Ángulo de incidencia de la irradiancia
$\Delta\eta$	Incremento del rendimiento
η_{STC}	Rendimiento en condiciones estándar
c	Capacidad calorífica
δ	Espesor de la célula fotovoltaica
ρ	Densidad
φ	Reflexión de la radiación incidente
λ	Longitud de onda
T_{CF}	Temperatura del módulo con filtro
T_{SF}	Temperatura del módulo sin filtro
T_a	Temperatura ambiente
T_{suelo}	Temperatura del suelo
T_{sky}	Temperatura del cielo

h_{conv}	Coficiente de película convectivo
v_{wind}	Velocidad del viento
σ	Constante de Stefan-Boltzman
R	Reflectancia del filtro
T	Transmitancia del filtro
I	Intensidad
V	Voltaje
K_I	Coficiente de variación de la intensidad con la temperatura
K_V	Coficiente de variación del voltaje con la temperatura
STC	Condiciones estándar
γ	Factor de Reducción de Transmitancia

1 INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética proveniente del Sol puede considerarse como la fuente de energía básica para la vida en la Tierra. A pesar de que sólo una parte de la energía liberada por los procesos de fusión en el interior de la estrella llega a la superficie de nuestro planeta, esta es más que suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la humanidad ampliamente. Por tanto, tratar de desarrollar tecnologías que aprovechen tal cantidad de energía, de forma sostenible, ha sido objeto de motivación durante ya muchos años.

En el panorama mundial, la tecnología fotovoltaica destaca como una de las más prometedoras. De hecho, gracias a la reducción del coste de estos sistemas en los últimos tiempos, se prevé que la energía fotovoltaica sea la tecnología que más crezca en los próximos años. Se destaca que, en su escenario más favorable, la potencia instalada para el año 2022 llegará a sobrepasar los 1200 GW, lo que supone casi triplicar la potencia instalada actual [1].

La tecnología fotovoltaica consigue transformar directamente en electricidad la energía proveniente del Sol mediante el efecto fotovoltaico. Los fotones inducen la creación de pares electrón-hueco en los semiconductores, y, cuando estos portadores tienen energía suficiente para superar la banda prohibida del semiconductor, generan la corriente continua en el dispositivo fotovoltaico. Sin embargo, no todos los fotones que inciden sobre la superficie de un módulo generan fotocorriente. En ocasiones, el fotón es absorbido, pero en lugar de generar portadores de carga, es convertido en un fonón (pérdidas térmicas); en otras, la energía del fotón no es compatible con el espectro de absorción del semiconductor, y, por tanto, no es absorbido; o, en otros casos, parte de los fotones incidentes son reflejados en las diferentes interfaces que componen el dispositivo fotovoltaico (Ley de Snell).

La eficiencia de una célula solar puede definirse como el cociente entre la energía eléctrica generada, y la energía contenida en el flujo de fotones que inciden sobre su superficie [2]. El rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos, como cualquier dispositivo electrónico, se ve afectado por la temperatura de operación: a medida que aumenta su temperatura se reduce el rendimiento, en consecuencia, la estrategia básica para aumentar la eficiencia sería minimizar las fuentes de pérdidas descritas anteriormente:

- 1- Minimizar la temperatura del dispositivo: evitar aquellos fotones con energía no adecuada para el bandgap del semiconductor pero que al ser absorbidos y convertidos en fonones, aumentan la temperatura del dispositivo.
- 2- Diseñar elementos ópticos que minimicen la fracción de fotones reflejados (capas antirreflectantes, texturización superficial, etc.)
- 3- Minimizar el espectro de energías donde los fotones no son absorbidos por el semiconductor del dispositivo fotovoltaico. (tecnologías fotovoltaicas tandem, materiales luminiscentes, etc.)

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado se centra en abordar el primero de las tres fuentes de pérdidas. Esto es, diseñar un dispositivo fotovoltaico que incorpore un filtro óptico que permita reflejar aquellas longitudes de onda no óptimas para el efecto fotovoltaico, y así se minimicen las pérdidas en el rendimiento por temperatura. Esto implicará por un lado identificar en la respuesta espectral de las diferentes tecnologías fotovoltaicas cuales son los rangos energéticos óptimos de la radiación solar, diseñar un filtro óptico que refleje aquellas longitudes de onda no deseadas, y plantear un balance energético del nuevo sistema fotovoltaico. Al mismo tiempo, se analizará si el hecho de incorporar este filtro óptico tiene efectos adversos en el rendimiento, consecuencia de filtrar parte de la radiación solar incidente en el dispositivo.

Los puntos (2) y (3) quedan fuera del alcance del presente trabajo.

2 OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es establecer un procedimiento que permita determinar la influencia que supone el acoplamiento de un filtro espectral selectivo en un módulo fotovoltaico. A partir de dicho método, se plantea un análisis para determinar la posición del filtro que maximice la potencia eléctrica generada por el módulo, así como la posición del filtro en la que el efecto térmico asociado a la reflexión de calor residual por el filtro se anule con el efecto asociado a la reflexión de fotones útiles.

3 DESCRIPCIÓN DEL CRISTAL FOTÓNICO

En los últimos años se ha puesto de manifiesto la importancia que tiene no solo tratar de cuantificar la energía que recibe el módulo, sino también de caracterizarla, esto es, conocer cómo es la distribución de energía incidente dentro del espectro de luz solar. La necesidad de ello reside en que cada tecnología presenta una respuesta espectral distinta, es decir, trabaja de forma más eficiente en distintas zonas o longitudes de onda comprendidas dentro del espectro de luz solar.

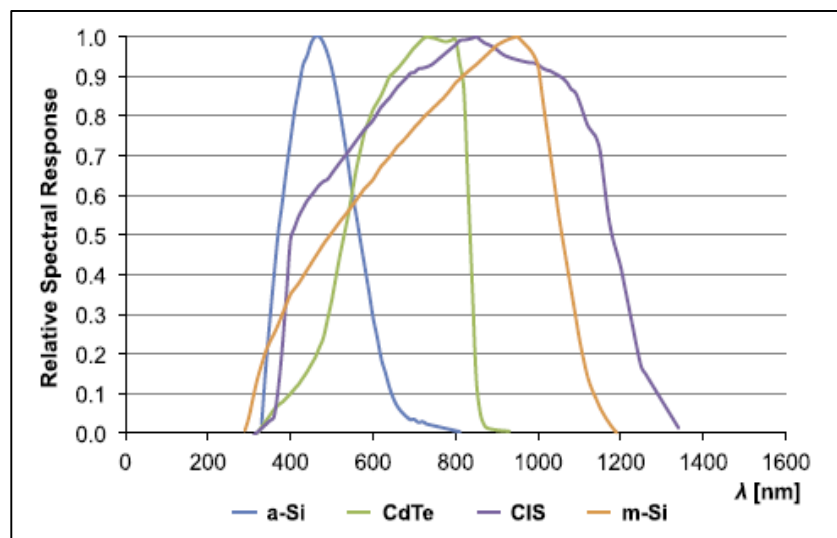


Figura 3.1. Respuesta espectral relativa de diferentes tecnologías fotovoltaicas. [14]

Como se ha comentado previamente, no todos los fotones incidentes son aprovechados. De hecho, un estudio llevado a cabo por Hirst y Ekins-Daukes [3], demostró que, para el caso de un módulo de silicio cristalino, entorno a un 67,6% de los fotones incidentes no contribuyen a la generación eléctrica, provocando en su lugar un indeseable incremento de la temperatura del sistema, y, por tanto, una reducción del rendimiento del mismo. Se destaca que, un 17,4% de estos fotones incidentes está formado por aquellos con una energía inferior a la del bandgap (1,12 eV para m-Si). Se trata de fotones situados en la parte infrarroja del espectro electromagnético, de longitudes de onda mayores a 1200nm (para el caso del m-Si) que no tienen energía suficiente para inducir la formación de pares electrón-hueco.

Estos fotones “no útiles” provocan un incremento de temperatura para nada despreciable. Se estima que el rendimiento de un módulo de m-Si podría caer hasta un 0,4% por cada grado que aumenta la temperatura de la célula [4]:

$$\Delta\eta = -0,4 \cdot (25 - T) \cdot \eta_{STC} \quad (3.1)$$

Esta ecuación relaciona la caída del rendimiento de una célula fotovoltaica respecto al incremento de temperatura de la propia célula.

Suponiendo un rendimiento en condiciones estándar del 18%, se obtiene la siguiente gráfica, en la que se observa cómo varía el rendimiento de una célula de m-Si frente a la temperatura de operación de la propia célula:

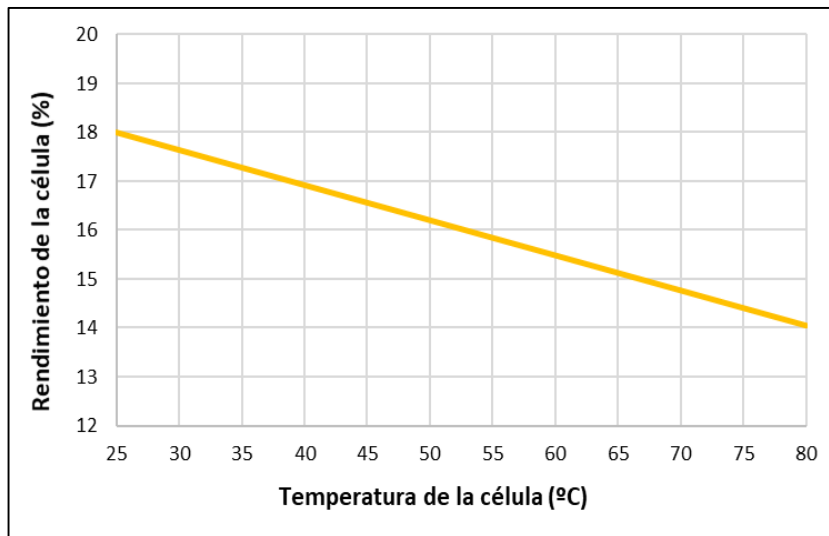


Figura 3.2. Rendimiento de una célula de m-Si en función de la temperatura de la célula.

En días calurosos la célula podría alcanzar temperaturas muy altas de entre 60-70 °C, y, como puede observarse en la figura anterior, el dispositivo fotovoltaico se vería muy perjudicado. Cabe entonces preguntarse, si este calor residual ocasionado por estos fotones “no útiles” pudieran no contribuir a incrementar la temperatura de operación de la célula. Una posible respuesta a esta pregunta puede encontrarse en la implementación de cristales fotónicos.

Un cristal fotónico es una estructura periódica de materiales dieléctricos, con distintos índices de refracción, que, debido a un fenómeno de interferencia de ondas electromagnéticas, consiguen que, para un determinado rango de longitudes de onda, la radiación solar incidente sea casi totalmente reflejada [5]. Es decir, un cristal fotónico actúa como un material reflector en solo cierto intervalo de energía (Pico de Bragg), mientras que en el resto presenta un comportamiento transparente. En definitiva, un cristal fotónico sería un elemento que permitiría controlar la propagación de la luz en el dispositivo fotovoltaico con vistas a mejorar su rendimiento.

Para el caso de un módulo de silicio amorfo, por ejemplo, cuya respuesta espectral está comprendida entre 350-750 nm el diseño de un cristal fotónico que actúe como filtro ideal permitiría el paso de todos los fotones con una longitud de onda comprendida dentro de estos límites, y reflejaría todas las longitudes de onda fuera de esta respuesta espectral. Esto evitaría, como se ha comentado, efectos como calentamientos de materiales indeseados que influyeran negativamente sobre el rendimiento de las células.

Por otra parte, el uso de cristales fotónicos también tiene un interesante efecto sobre el rendimiento en los sistemas fotovoltaicos cuando se aplican en técnicas de enfriamiento pasivo. Básicamente, existe un sector dentro de la zona infrarroja de la atmósfera (ventana atmosférica) en la cual la emisividad de la misma se aleja drásticamente del modelo de cuerpo negro definido por la ley de Plank, de forma que se vuelve semitransparente. Esta zona se encuentra entre $8\mu\text{m} - 13\mu\text{m}$, y permitiría, por tanto, intercambiar calor entre el sistema fotovoltaico con el espacio exterior, que actuaría como un reservorio de calor. Se consigue así, una reducción de la temperatura de las células, y por ello tanto el rendimiento como la generación eléctrica aumentarían.

En definitiva, una estructura fotónica deseada tendría una alta transmitancia dentro de la respuesta espectral del

módulo (idealmente 1), una alta reflectancia fuera de la misma (idealmente 1), y al mismo tiempo, aplicada también como un sistema de enfriamiento pasivo, presentaría una alta emisividad en la zona de la ventana atmosférica.

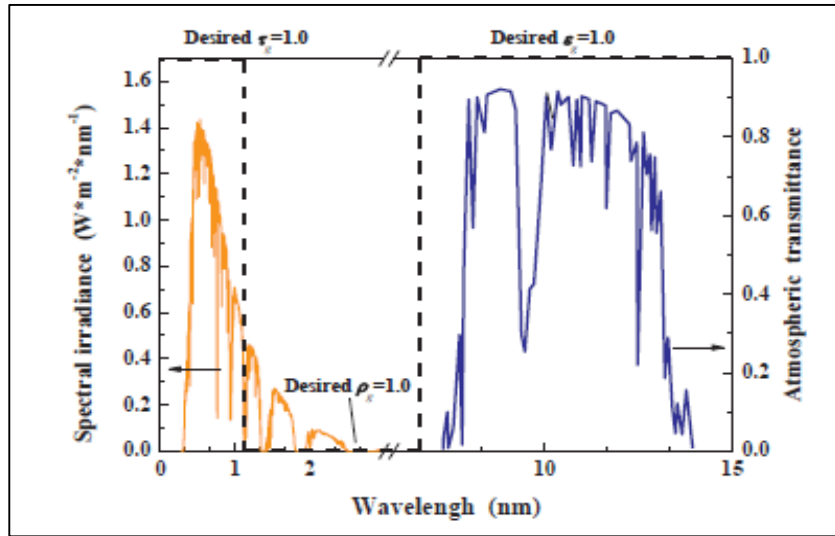


Figura 3.3. Comportamiento de un cristal fotónico ideal. Enfriamiento espectral selectivo y enfriamiento radiante. [6]

Las conclusiones de un estudio realizado por diversos miembros de la universidad de Tianjin (China) [6], reflejaron que el efecto combinado puede suponer una mejora del rendimiento de entre el 3,6% y el 4,9% sobre el sistema. Concretamente, se manifiesta que el efecto de colocar un filtro espectral para las condiciones de AM1,5; $v=2\text{m/s}$; $T_a=308,15\text{K}$ bajo las que se realizó este estudio, muestra una mejora del rendimiento del 0,98%, frente al 2,40% que se consigue con el sistema de enfriamiento pasivo, y un 4,55% combinando ambos efectos.

Debido al considerable aumento del rendimiento que puede suponer la implantación de estos sistemas, se han comenzado a retomar determinadas líneas de investigación. Entre ellas destacan los denominados **Spectrum Splitters** [7]. La idea principal es utilizar estos filtros espectrales selectivos para separar la radiación incidente que llega al módulo fotovoltaico, y direccionarla hacia otras células con diferentes respuestas espectrales, de forma que se aproveche al máximo posible el espectro.

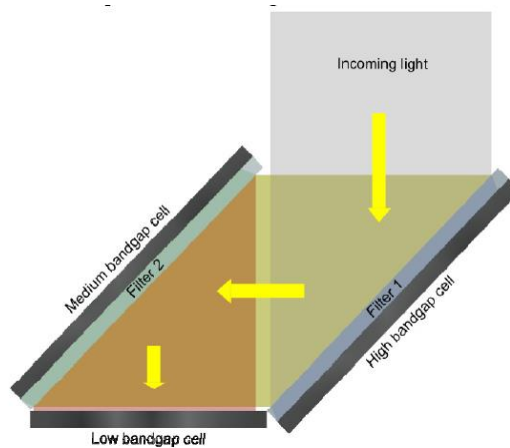


Figura 3.4. Spectrum Splitter. [7]

Precisamente en su aplicación como Spectrum Splitter, el cristal fotónico ha despertado gran interés en los últimos tiempos. Diversas empresas han desarrollado en colaboración una aplicación (**SPIRE**) que permite la hibridación de la tecnología fotovoltaica con la termosolar. Gracias a la incorporación de un filtro espectral selectivo óptico, la parte del espectro incidente en un módulo fotovoltaico que no es apta para generar corriente eléctrica (principalmente infrarrojo) se reflejaría hacia una torre, donde se almacenaría como energía térmica o se utilizaría para otros procesos. [8]

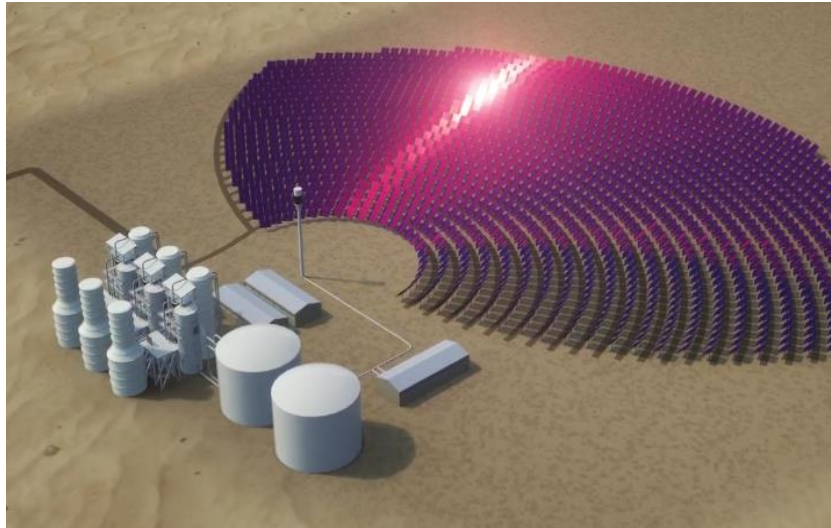


Figura 3.5. Esquema de una planta híbrida fotovoltaica-solar térmica. [8]

Esta nueva aplicación permitiría generar electricidad durante las horas de sol a partir de los módulos fotovoltaicos, y posteriormente turbinar la energía térmica acumulada durante el día para así poder continuar produciendo electricidad tras el ocaso. La principal diferencia con respecto a las plantas termosolares de torre tradicionales es que, en esta ocasión, la generación de energía principal es la asociada a los paneles fotovoltaicos, mientras que la debida a la generación térmica es considerada un suplemento adicional.

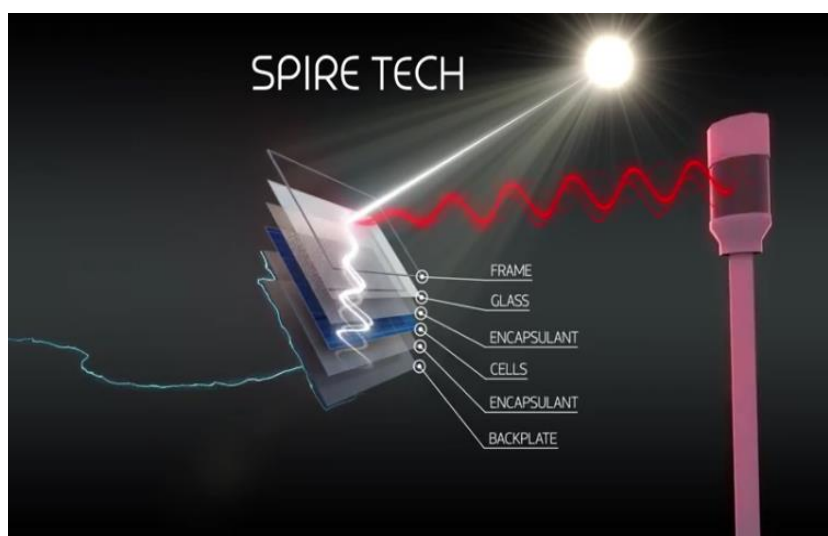


Figura 3.6. SPIRE TECH. Funcionamiento de un módulo fotovoltaico con un filtro espectral selectivo incorporado. [8]

Por otra parte, la combinación de una célula de a-Si y otra de c-Si apiladas una encima de la otra ha mostrado rendimientos más altos que los que las células serían capaces de alcanzar de forma independiente. Sin embargo, presentan el gran problema de que la célula de menor corriente limita la corriente de la otra. Es aquí donde entra el cristal fotónico, que situado como un **reflector intermedio** reenviaría los fotones que han atravesado la primera célula sin interactuar hacia la misma, y dejaría pasar el resto a la célula de m-Si.

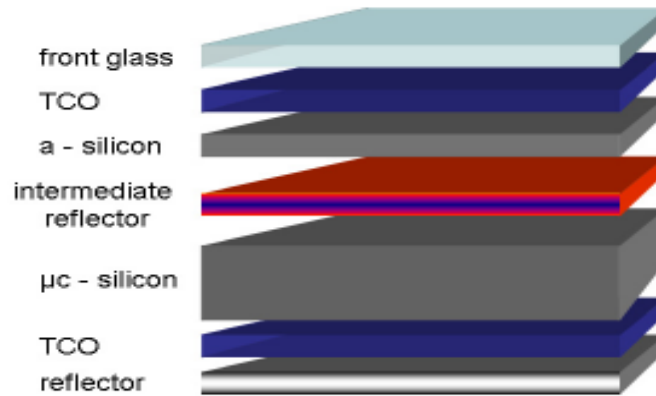


Figura 3.7. Micromorph Tandem a-Si/c-Si. [9]

En definitiva, queda reflejado que los filtros espectrales selectivos pronostican no sólo una mejora en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos estándar, sino también, permiten hacer factibles el desarrollo de nuevas aplicaciones encaminadas a alcanzar rendimientos superiores a los actuales.

4 COMPORTAMIENTO DEL CRISTAL FOTÓNICO EN LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

En el apartado anterior se ha realizado una breve introducción a la tecnología de los filtros espectrales selectivos. En concreto, se ha visto la potencialidad de mejora de los mismos sobre la tecnología fotovoltaica, así como sus posibles aplicaciones en otros sistemas.

Antes de profundizar en este apartado, es importante destacar que el paso previo e imprescindible del diseño de un filtro espectral selectivo es conocer la tecnología fotovoltaica sobre el que se pretende implementar: CdTe, CIS, c-Si, a-Si, ... Un filtro se diseña atendiendo fundamentalmente a cómo es la respuesta espectral de la célula fotovoltaica, en conjunto con las condiciones climatológicas del emplazamiento, por lo que es evidente que, usar el mismo filtro sobre diferentes tecnologías o el mismo filtro para condiciones radicalmente diferentes tendrá consecuencias nada deseables. El correcto análisis y estudio de dichos factores será fundamental para aprovechar la potencialidad de estos elementos sobre la tecnología fotovoltaica, permitiendo así maximizar la energía generada. Por otra parte, estructuralmente, los filtros están formados por capas periódicas e intercaladas de materiales dieléctricos de distintos índices de refracción y espesores. En función de qué tecnología se trate, los espesores, índices de refracción y materiales se modificarán con el objetivo de ajustarse de la forma más precisa posible a las condiciones de funcionamiento deseadas. Puesto que el diseño y fabricación del cristal fotónico que actúa como filtro queda fuera del alcance de este trabajo, se partirá ya de un filtro diseñado previamente de acuerdo dichas condiciones.

Partiendo de estas premisas, en este apartado se propone una metodología que permita cuantificar la generación eléctrica de un módulo fotovoltaico con filtro. El objetivo de ello es tener una base que permita analizar cómo se comporta el sistema (módulo + filtro) para diferentes condiciones.

4.1 Metodología

El procedimiento, a continuación, planteado, está basado en la aplicación conjunta de dos artículos de referencia [6], [10], y la estrategia a seguir será comparar la producción de energía del módulo sin filtro, con respecto al mismo módulo, pero esta vez con un filtro espectral selectivo incorporado. Esto se llevará a cabo mediante el planteamiento de respectivos balances de energía del conjunto del módulo fotovoltaico:

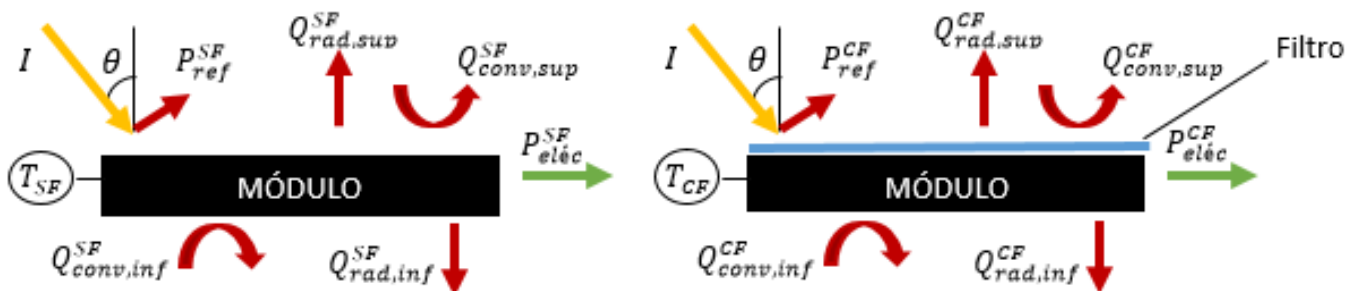


Figura 4.1. Balance de energía del módulo sin filtro(izq) y con filtro (drch).

En función de si el módulo lleva o no un filtro espectral selectivo incorporado, se utilizarán los subíndices SF (sin filtro) y CF (con filtro) para tratar los términos y referenciarlos al balance de energía. Dicho esto, en las figuras se observan una serie de términos:

- $Q_{conv,sup}$ y $Q_{conv,inf}$, asociados a procesos de transferencia de calor convectivos en la cara superior e inferior del módulo, respectivamente.
- $Q_{rad,sup}$ y $Q_{rad,inf}$, asociados a procesos de transferencia de calor radiantes de las caras superior (intercambio con el cielo) e inferior (intercambio con el suelo) del módulo, respectivamente.
- P_{transm} y P_{ref} , asociados a la potencia incidente transmitida y reflejada por el módulo fotovoltaico, o en su defecto, por el filtro, para cada caso.
- $P_{eléc}$, asociado a la potencia eléctrica generada por el módulo.
- I, θ , asociados a la irradiancia y al ángulo de incidencia de la irradiancia, respectivamente.

Es necesario destacar que, a la hora de plantear los balances de energía, se supondrán que los diferentes materiales que conforman el dispositivo fotovoltaico (vidrio – filtro óptico EVA– célula solar) están en equilibrio térmico y, por tanto, todas las capas están a la misma temperatura. Esta hipótesis parte de los resultados mostrados en uno de los artículos citados [6], donde se observan diferencias de temperatura muy pequeñas entre las distintas capas mencionadas.

El balance de energía para el módulo con y sin filtro sería:

- Módulo fotovoltaico (sin filtro):

$$c \delta \rho \frac{dT_{SF}}{d\tau} = P_{transm}^{SF} - P_{ref}^{SF} - Q_{conv,sup}^{SF} - Q_{conv,inf}^{SF} - Q_{rad,sup}^{SF} - Q_{rad,inf}^{SF} - P_{eléc}^{SF} \quad (4.1)$$

- Módulo fotovoltaico + filtro:

$$c \delta \rho \frac{dT_{CF}}{d\tau} = P_{transm}^{CF} - P_{ref}^{CF} - Q_{conv,sup}^{CF} - Q_{conv,inf}^{CF} - Q_{rad,sup}^{CF} - Q_{rad,inf}^{CF} - P_{eléc}^{CF} \quad (4.2)$$

Ahora se irá desarrollando cada uno de los términos presentados para determinar cómo se calculan.

En un módulo sin filtro no toda la radiación incidente se transmite hasta la célula. Se estipula que un módulo fotovoltaico ordinario refleja entre un 5-10% de la radiación incidente por defecto.

Para calcular qué parte se refleja, P_{ref}^{SF} se utilizará la siguiente ecuación (4.3):

$$P_{ref}^{SF} = \int_{280}^{2200} \varphi \cdot P_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

Donde φ es, precisamente, el término que tiene en cuenta este comportamiento reflector. En este proyecto se supondrá un valor de $\varphi = 0.05$. Por su parte, P_{transm}^{SF} puede calcularse según la expresión (4.1.4):

$$P_{transm}^{SF} = \int_{280}^{2200} (1 - \varphi) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (4.4)$$

Hay que destacar que en las ecuaciones anteriores se observa un límite de integración superior fijado en 2200 nm. Esto se debe a que para longitudes de onda mayores la radiación es muy débil y prácticamente no afecta a la actuación del módulo, por lo que podría despreciarse. Se observa también, que para obtener el valor de P_{ref}^{SF} serán necesarios los valores de $P_{AM1,5}$ normalizados para cada longitud de onda [11], lo que, a su vez, define el otro límite de integración en 280 nm, puesto que es el primer valor del que se dispone como dato para el espectro.

Para calcular la potencia transmitida y reflejada por el filtro, P_{transm}^{CF} y P_{ref}^{CF} se recurre a las ecuaciones (4.5) y (4.6):

$$P_{transm}^{CF} = \int_{280}^{\lambda} T(\lambda, \theta) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (4.5)$$

$$P_{ref}^{CF} = \int_{\lambda}^{2200} R(\lambda, \theta) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (4.6)$$

El límite de integración denotado como λ depende de donde se sitúe el filtro a lo largo del espectro electromagnético.

Por otra parte, en las ecuaciones (4.5) y (4.6) se observan los términos de reflectancia $R(\lambda, \theta)$ y transmitancia $T(\lambda, \theta)$ que dependen de la longitud de onda y del ángulo de incidencia de la irradiancia. La transmitancia se define como el cociente entre la radiación electromagnética que atraviesa el filtro y la que incide sobre él, mientras que la reflectancia se define por la ecuación (4.7), cuando la el filtro no absorbe radiación [5]:

$$T(\lambda, \theta) = 1 - R(\lambda, \theta) \quad (4.7)$$

Para calcular los términos asociados a procesos de transferencia de calor convectivos superior e inferior se usará las siguientes expresiones:

$$Q_{conv,sup}^{SF} = h_{conv,sup}^{SF} \cdot (T_{SF} - T_a) \quad (4.8)$$

$$Q_{conv,inf}^{SF} = h_{conv,inf}^{SF} \cdot (T_{SF} - T_a) \quad (4.9)$$

En las ecuaciones anteriores el término $h_{conv,sup}^{SF}$ hace referencia al coeficiente de película convectivo de la cara superior del módulo, mientras que $h_{conv,inf}^{SF}$ lo hace al coeficiente de película convectivo inferior del módulo. Además se observa la presencia de la temperatura ambiente en las ecuaciones, T_a .

Del mismo modo, para el balance de energía sobre el módulo con filtro, se obtienen las ecuaciones (4.10) y (4.11):

$$Q_{conv,sup}^{CF} = h_{conv,sup}^{CF} \cdot (T_{CF} - T_a) \quad (4.10)$$

$$Q_{conv,inf}^{CF} = h_{conv,inf}^{CF} \cdot (T_{CF} - T_a) \quad (4.11)$$

Para calcular los coeficientes de película se utilizará la expresión (4.12):

$$h_{conv} = \sqrt{h_n^2 + (2,38v_{wind})^2} \quad (4.12)$$

Esta ecuación incluye la presencia de la velocidad del viento v_{wind} , y se particularizará mediante las expresiones (4.13) y (4.14) en función de si se trate de la cara superior o inferior del módulo fotovoltaico:

$$h_{n,sup} = 9,482 \frac{\sqrt[3]{|T-T_a|}}{7,328-|\cos\theta|} \quad (4.13)$$

$$h_{n,inf} = 1,810 \frac{\sqrt[3]{|T-T_a|}}{1,382+|\cos\theta|} \quad (4.14)$$

En estas ecuaciones el término T se asociará a T_{CF} o T_{SF} según el balance sea para el caso con o sin filtro. Además, ha de incluirse el valor del ángulo de incidencia de la irradiancia, θ .

Por otra parte, para obtener los términos del balance asociados a procesos de transferencia de calor radiantes, se seguirán las siguientes fórmulas:

$$Q_{rad,sup}^{CF} = \sigma(T_{CF}^2 + T_{sky}^2)(T_{CF} - T_{sky}) \quad (4.15)$$

$$Q_{rad,sup}^{SF} = \sigma(T_{SF}^2 + T_{sky}^2)(T_{SF} - T_{sky}) \quad (4.16)$$

$$Q_{rad,inf}^{SF} = \sigma(T_{SF}^2 + T_{suelo}^2)(T_{SF} - T_{suelo}) \quad (4.17)$$

$$Q_{rad,inf}^{CF} = \sigma(T_{CF}^2 + T_{suelo}^2)(T_{CF} - T_{suelo}) \quad (4.18)$$

Se destaca que, la cara superior intercambia calor por radiación mayoritariamente con el cielo, mientras que la cara inferior lo hace con el suelo. El término σ hace referencia a la constante de Stefan-Boltzmann, T_{sky} a la temperatura del cielo, y T_{suelo} a la temperatura del suelo. Para calcular T_{sky} se usará la ecuación (4.19):

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (4.19)$$

Además, en los balances de energía se observan los términos $P_{eléc}^{CF}$ y $P_{eléc}^{SF}$, que representan la energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico (W/m^2). Este parámetro puede calcularse multiplicando la corriente y el voltaje de la célula (4.20):

$$P_{eléc} = I \cdot V \quad (4.20)$$

$$I = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot I_{m,ref} (1 + K_I \cdot (T - T_{ref})) \quad (4.21)$$

$$V = V_{m,ref} \left(1 + K_V \cdot (T - T_{ref}) \right) \quad (4.22)$$

Las ecuaciones anteriores se particularizarán para cada caso (SF y CF) y se completarán con los valores del DataSheet del módulo fotovoltaico, donde K_I y K_V corresponden a los términos de variación de intensidad y voltaje con la temperatura, respectivamente.

Además, para resolver los balances será necesario determinar, por una parte, el valor de espesor, δ (mm), densidad, ρ (kg/m^3) y la capacidad calorífica c , ($J/Kg \cdot K$) del módulo fotovoltaico, así como unas condiciones climatológicas, esto es, una Irradiancia, G (W/m^2), temperatura ambiente, T_a (K), ángulo de incidencia de la irradiancia θ , una velocidad del viento, v_w (m/s), y una curva característica correspondiente del Espectro Electromagnético.

Evitar la absorción de calor residual, mediante la reflectancia de fotones con energía insuficiente para generar pares electrón-hueco, es la misión principal de un filtro espectral seletivo cuando se acopla en un módulo fotovoltaico. Sin embargo, si el filtro está mal diseñado y trabaja en otras zonas del espectro, podría darse el caso de que este comenzase a reflejar ahora fotones que sí tuviesen energía suficiente para contribuir a la generación eléctrica, es decir, fotones con energía por encima del bandgap. Este efecto es muy importante, y podría provocar una disminución brusca de la potencia generada, llegando incluso a empeorar la producción respecto a un módulo sin filtro.

Para tener en cuenta la reflectancia de fotones, se define el Factor de Reducción de Transmitancia del filtro γ :

$$\gamma = \frac{\int_{280}^{2200} T(\lambda) \cdot SR(\lambda) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280}^{2200} SR(\lambda) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4.23)$$

Donde $SR(\lambda)$ (A/m^2) es la respuesta espectral de la célula fotovoltaica para cada longitud de onda.

Una vez determinada la forma de calcular todos los términos de sendos balances, se trata de particularizarlos y resolverlos para ciertas condiciones, esto es: T_a , G , v_w , curva del Espectro Electromagnético, ... Al resolver dichos balances, se obtendrá la temperatura del sistema, T_{CF} o T_{SF} según el balance, y a partir de estas temperaturas se determinará la potencia eléctrica generada para cada caso según las expresiones (4.20), (4.21) y (4.22).

Para conocer el efecto del filtro sobre el módulo simplemente se realizaría una comparación de la potencia eléctrica generada por el módulo con filtro respecto al módulo sin filtro.

$$\Delta P_{eléc} (\%) = \frac{P_{eléc}^{CF} - P_{eléc}^{SF}}{P_{eléc}^{SF}} \cdot 100 \quad (4.24)$$

4.2 Determinación de la posición óptima del filtro

En el apartado anterior se ha propuesto un procedimiento que permite calcular la potencia eléctrica generada por un módulo fotovoltaico con filtro espectral selectivo acoplado. Dicho método puede particularizarse para cualquier condición o tipología fotovoltaica, y permite analizar mediante la potencia eléctrica generada, el efecto que ejerce un filtro sobre un módulo fotovoltaico.

En esta sección se plantea, en base a esta metodología, determinar cuál es la posición del filtro que maximiza la energía eléctrica generada por el sistema, esto es, determinar cuál es la posición óptima del filtro para minimizar absorción de fotones en la región NIR que aportan pérdidas térmicas sin perjudicar la absorción de fotones en la región VIS-NIR que pueden ser convertidos en electrones dada la respuesta espectral específica de la célula solar. Se establece que la posición del filtro es aquella longitud de onda en la que se encuentra el centro de su Pico de Bragg (zona de reflectancia máxima). Debido a que el procedimiento establecido puede particularizarse para cualquier tecnología fotovoltaica, en este apartado se usarán además dos módulos de distintas tecnologías fotovoltaicas con una respuesta espectral muy diferente. En concreto, se utilizará un módulo de silicio amorfo (a-Si) y otro de silicio monocristalino (m-Si) con el objetivo de ilustrar y clarificar cómo afecta la integración del filtro según que tecnología se trate.

Antes de comenzar a analizar el aspecto propuesto, será necesario escoger módulos de m-Si y a-Si sobre los que fundamentar los cálculos. En este proyecto se utilizará el módulo de m-Si **LR6-60DG-290M** de **LongiSolar** y el módulo de a-Si **Schott Solar** [12] [13]:

Tabla 1. Características de los módulos de m-Si LongiSolar LR6-60DG-290M y a-Si Schott Solar. [13]

	(m-Si) LongiSolar	(a-Si) Schott Solar
Condiciones de ensayo	STC	STC
P_{máx} [W]	300	94.96
V_{oc} [V]	39.9	23.96
I_{sc} [A]	9.5	5.75
V_{mp} [V]	33.4	19.24
I_{mp} [A]	8.98	4.94
K_i [%/°C]	0.06	0.08
K_v [%/°C]	-0.33	-0.33
Área [m²]	1.64	1.43
Eficiencia [%]	18.3	6.64

Las respuestas espectrales (SR) de ambos módulos son las siguientes:

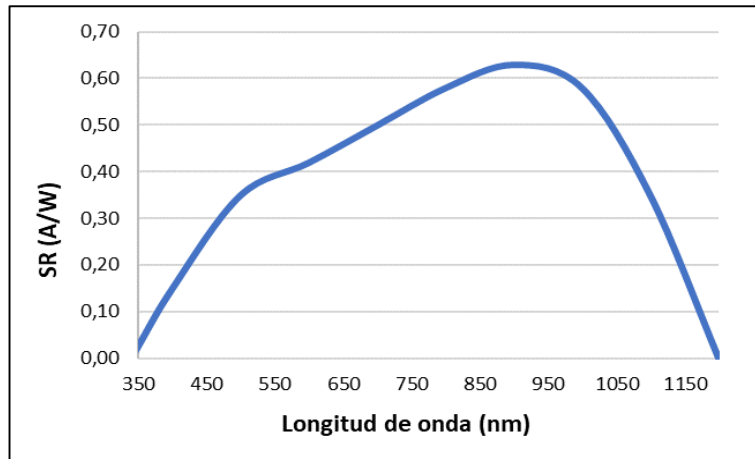


Figura 4.2. Respuesta espectral (SR) de la célula de Silicio monocristalino (m-Si). [12]

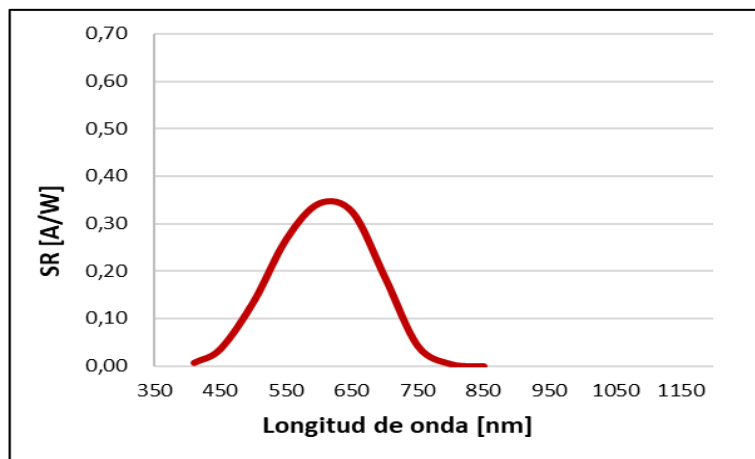


Figura 4.3. Respuesta espectral (SR) de la célula de Silicio amorfo (a-Si). [12]

Será necesario, también, disponer del modelo del Espectro de Reflectancia de un filtro. En este caso, se parte de un filtro fotónico genérico compuesto de 8 capas intercaladas de SiO_2 y TiO_2 , con diferentes espesores, cuyo Espectro de Reflectancia se muestra en la siguiente figura; el cristal fotónico queda caracterizado por su Pico de Bragg, que para el caso que se describe, se sitúa en 1250nm con una anchura de +/- 250nm:

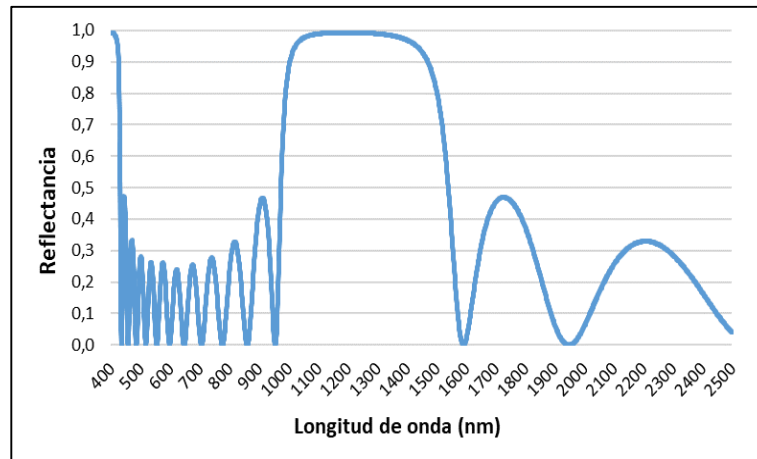


Figura 4.4. Espectro de reflectancia genérico.

Se puede comprobar en la figura que dicho filtro no es ideal, ya que presenta reflexiones secundarias fuera de su Pico de Bragg, lo que reducen su rendimiento, esto es, para longitudes de onda menores de 960 nm y para longitudes de onda mayores de 1500nm. En la realidad, estas pérdidas se podrían reducir con una mejor optimización de los espesores seleccionados en la estructura periódica del filtro. Como medida para simplificar los cálculos se considerará, de ahora en adelante, que el filtro proporcionado se puede tratar como una función escalón:

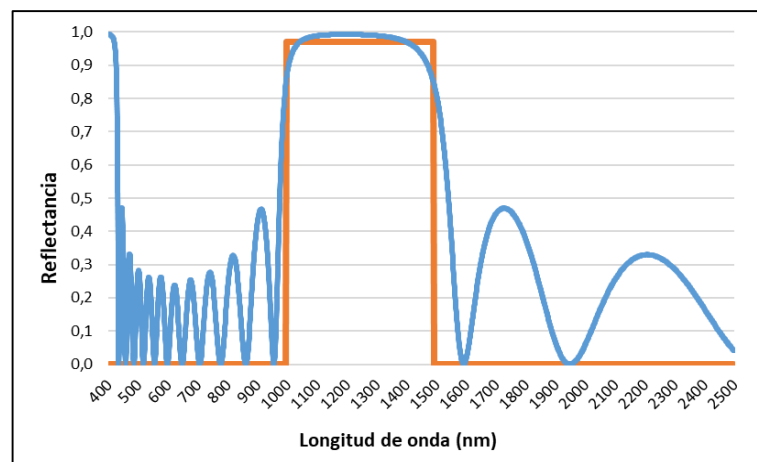


Figura 4.5. Espectro de reflectancia genérico como función escalón.

Esta función escalón está definida por un ancho y un valor de reflectancia determinados. Para establecer el ancho se han considerado solo las longitudes de onda que presentan un valor de reflectancia mayor o igual a 0.85 en el filtro genérico original, dando un total de 494 nm. Por otra parte, el valor de reflectancia que alcanza el filtro se ha obtenido a partir de una media de todos los valores que se encuentran en esos 494 nm del ancho, de forma que la reflectancia que presenta dicha función escalón resulta de exactamente 0,9717.

La posición óptima de filtro será aquella que maximice la energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico. Es decir, será aquella longitud de onda que ocupe el centro del Pico de Bragg del filtro donde el calor residual reflejado sea el máximo posible, al mismo tiempo que la reflexión de fotones útiles sea mínima.

Para determinar dicha posición es necesario calcular primero la potencia del módulo sin filtro, de esta forma se

podrá comparar luego el efecto que ejerce el filtro sobre el módulo, y obtener así la posición que maximiza la potencia generada. En este apartado se supondrá que la irradiancia incide de forma perpendicular sobre el sistema, es decir, se presenta un seguimiento total al Sol. Además, los cálculos se realizarán para varias condiciones:

1. Irradiancia de 1000 W/m^2 ; velocidad del viento de 1 m/s ; Temperatura ambiente de $308,15 \text{ K}$ (35°C); Espectro estándar AM1,5.
2. Irradiancia de 1000 W/m^2 ; velocidad del viento de 6 m/s ; Temperatura ambiente de $308,15 \text{ K}$ (10°C); Espectro estándar AM1,5

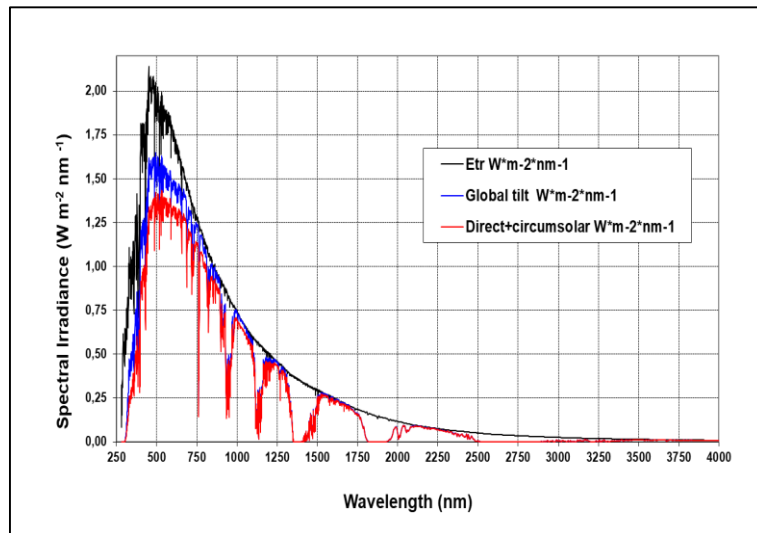


Figura 4.6. ASTM G173-03 Espectro Estándar AM1,5. [11]

Puesto que sería interesante conocer cuál es la posición óptima también para otra irradiancia, se realizarán los cálculos, además, para 400 W/m^2 . Sin embargo, puesto que no se dispone de la curva espectral para 400 W/m^2 , se supondrá que la forma del espectro electromagnético será la del espectro estándar AM1,5, y respecto a sus valores, estos se ponderarán proporcionalmente en función de la irradiancia. Por lo tanto, para 400 W/m^2 el comportamiento del espectro sería el siguiente:

$$P(\lambda) = \frac{400}{1000} P_{AM1,5}(\lambda) \quad (4.25)$$

3. Irradiancia de 400 W/m^2 ; velocidad del viento de 1 m/s ; Temperatura ambiente de $308,15 \text{ K}$ (35°C); Espectro estándar AM1,5.
4. Irradiancia de 400 W/m^2 ; velocidad del viento de 6 m/s ; Temperatura ambiente de $308,15 \text{ K}$ (10°C); Espectro estándar AM1,5

Para resolver los balances de energía planteados en el apartado “Metodología”, se utilizará el software matemático Matlab. Además, como se ha visto previamente, uno de los datos que es necesario introducir antes de resolver el balance es la potencia reflejada por el filtro. Esta se encuentra fuertemente relacionada con la posición del filtro, de hecho, se calcula en función de su posición:

$$P_{ref}^{CF} = \int_{\lambda - Z/2}^{\lambda + Z/2} R(\lambda) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (4.26)$$

λ , denota la posición del centro del Pico de Bragg del filtro en el espectro electromagnético, mientras que Z denota el ancho del Pico de Bragg. Por tanto, los límites de integración superior e inferior estarán definidos como $\lambda + Z/2$ y $\lambda - Z/2$, respectivamente.

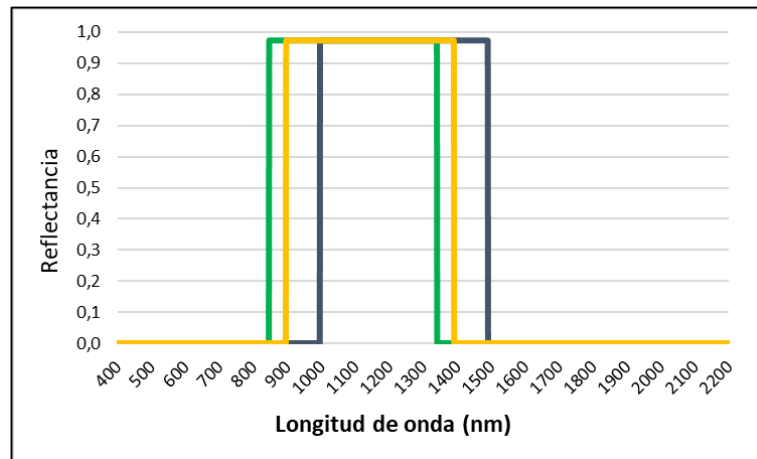


Figura 4.7. Desplazamiento del Centro del Pico de Bragg de la función escalón.

Un desplazamiento del Pico de Bragg del filtro ocasiona que los límites de integración de la ecuación (4.27) cambien. Por tanto, la potencia reflejada será, en consecuencia, diferente. Las figuras (4.8) y (4.9) representan la potencia reflejada por el filtro en función de la posición que ocupa este en el espectro electromagnético.

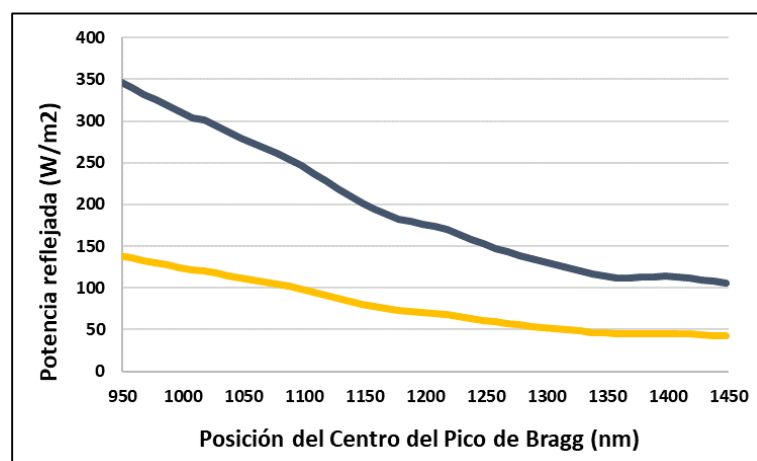


Figura 4.8. Potencia reflejada por el filtro en función de la posición del centro del Pico de Bragg de un filtro diseñado para m-Si a 1000 W/m² (línea azul) y 400 W/m² (línea amarilla).

Se observa que a medida que la posición del filtro ocupa longitudes de onda menores, se refleja más potencia. Esto se debe a que, cada vez se desplaza a una parte más energética del espectro electromagnética.

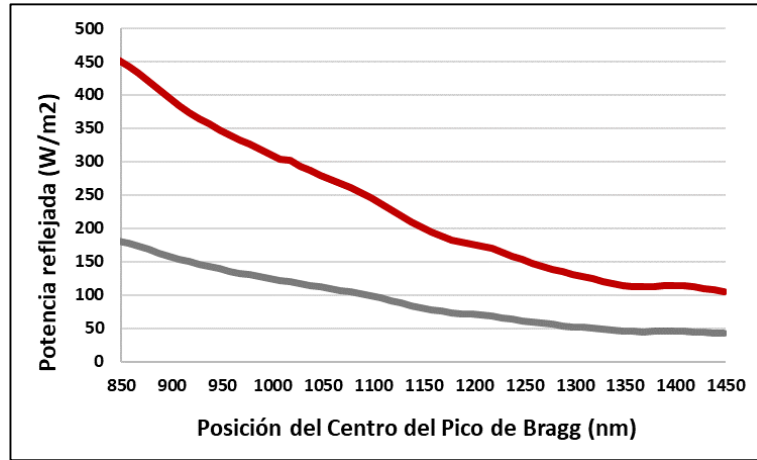


Figura 4.9. Potencia reflejada por el filtro en función de la posición del centro del Pico de Bragg de un filtro diseñado para a-Si a 1000 W/m^2 (línea roja) y 400 W/m^2 (línea gris).

Conocer esta potencia reflejada será fundamental en estos casos para la resolución del balance de energía, debido a que como se ha mencionado, está fuertemente relacionada con la reducción térmica.

Una vez resueltos los balances de energía, se obtendrán las temperaturas de trabajo módulo, que, a su vez, permitirán determinar la potencia eléctrica generada por el módulo fotovoltaico. A continuación, se muestran una serie de figuras en las que se observa la relación entre la potencia reflejada y la reducción térmica conseguida bajo las condiciones de simulación ya comentadas.

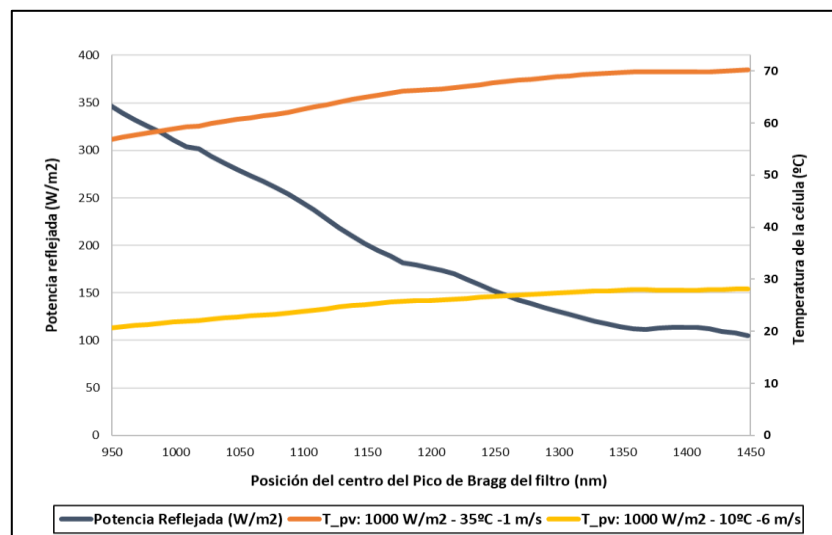


Figura 4.10. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para m-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T_{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m^2 .

En la figura anterior se observa que la temperatura del módulo desciende a medida que la posición del centro

del Pico de Bragg ocupa menores longitudes de onda, lo cual se debe a que el filtro refleja mayor cantidad de energía, puesto que cada vez las longitudes de onda son más energéticas (Figura 4.6).

En la anterior figura se representa la relación entre temperatura y posición del centro del Pico de Bragg para 2 condiciones: 1000 W/m^2 , 35°C de temperatura ambiente y 1 m/s de velocidad del viento; y 1000 W/m^2 , 10°C de temperatura ambiente y 6 m/s de velocidad del viento. La idea es representar para una misma irradiancia, y perfil de espectro (AM1,5) casos extremos, de esta forma para cualquier otra condición de temperatura ambiente entre 10°C - 35°C , y velocidad del viento entre 1m/s - 6m/s la temperatura de trabajo del sistema se encontrará comprendida entre ambas curvas. Esto permite en cierto modo, tener definidos unos límites acerca de cómo se debería de comportar el módulo con un filtro espectral acoplado, para los rangos considerados.

Para comparar el efecto que ejerce el filtro sobre el sistema, se han realizado simulaciones para determinar en las mismas condiciones, la temperatura del módulo, pero esta vez, sin filtro. En unas condiciones de 1000 W/m^2 , 35°C , 1 m/s y AM1,5 el módulo sin filtro alcanza una temperatura de $74,73^\circ\text{C}$, mientras que para 1000 W/m^2 , 10°C , 6 m/s y AM1,5 su temperatura es de $30,39^\circ\text{C}$. Se podría ahora, por tanto, comparar cuanto reduce la temperatura el módulo por el hecho de tener filtro en función de la posición del cristal fotónico en el espectro electromagnético:

$$\Delta T = T_{SF} - T_{CF} \quad (4.27)$$

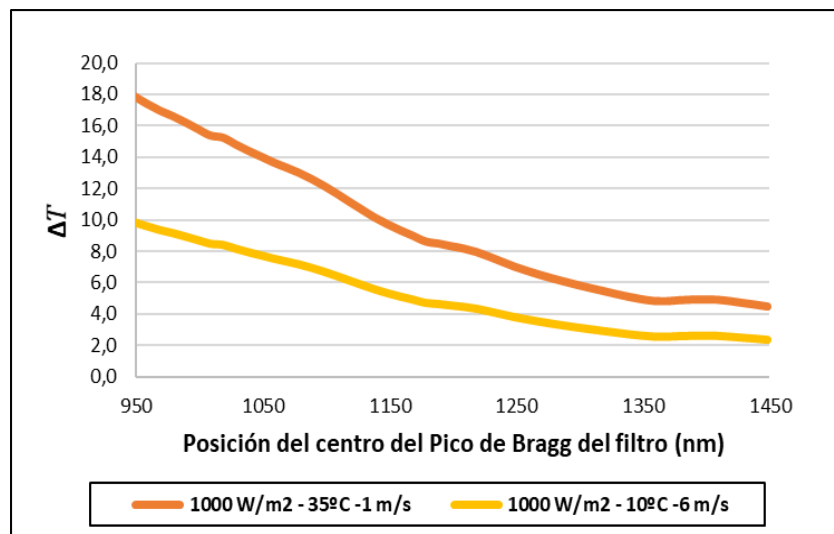


Figura 4.11. Reducción de temperatura conseguida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 1000 W/m^2 .

Al igual que el caso anterior, para cualquier otra condición de temperatura ambiente entre 10°C - 35°C ; y velocidad del viento 1m/s - 6m/s las diferencias de temperatura entre el módulo con y sin filtro estarían comprendidas entre ambas curvas. Se comprueba que a medida que la posición del filtro ocupa menores longitudes de onda se consigue una mayor reducción de temperatura respecto al sistema sin filtro. Por otra parte, se observa que la diferencia de temperatura entre el sistema con y sin filtro es menor para ambientes más fríos y con velocidades de viento más altas. Puesto que el objetivo principal del filtro es evitar la absorción de calor residual, en ambientes donde se disipe mucho calor por causas naturales (baja temperatura ambiente, alta velocidad del viento) el efecto que ejerce el filtro sobre el módulo será, lógicamente, menos importante. Esto explica que la diferencia de temperatura entre el módulo con y sin filtro (curva amarilla) no sea tan notoria como la que se produce en ambientes más cálidos (curva naranja).

Si se supone ahora, una irradiancia de 400 W/m^2 , un espectro AM1,5 y se realizan simulaciones bajo las mismas condiciones anteriores se obtiene la siguiente figura para el caso de un filtro diseñado para m-Si:

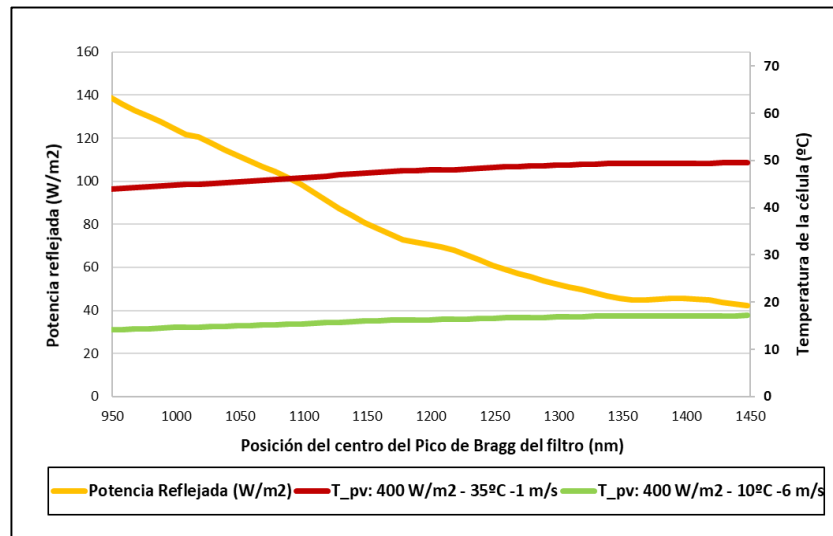


Figura 4.12. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para m-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T_{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 400 W/m^2 .

En este caso, se observa, por una parte, que la potencia reflejada por el filtro es menor, y por otra, que las temperaturas del sistema también son menores, respecto al caso anterior, ambos efectos se deben a la reducción de la irradiancia de 1000 W/m^2 a 400 W/m^2 .

Ahora el resultado de la simulación del módulo sin filtro para unas condiciones de 400 W/m^2 , AM1,5, 1 m/s , 35°C da una temperatura de $52,58^{\circ}\text{C}$; y para 400 W/m^2 , AM1,5, 6 m/s , 10°C se tienen $18,12^{\circ}\text{C}$. En la siguiente figura se representa de nuevo la diferencia entre temperaturas de trabajo para los casos del módulo con y sin filtro:

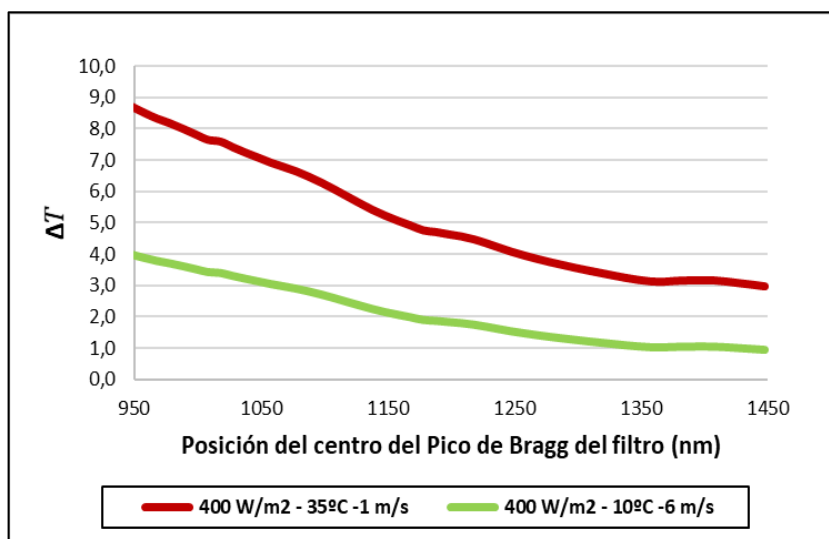


Figura 4.13. Reducción de temperatura conseguida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 400 W/m^2 .

Se observa que la diferencia de temperatura entre el sistema con y sin filtro es mucho menor que bajo las condiciones relativas a 1000 W/m^2 . Esto se debe a que el ambiente en el que trabaja el filtro es más “frío”, por lo tanto, su efecto no es, en términos relativos, tan notable como en el caso anterior.

Los casos ya vistos hacen referencia a un filtro diseñado para un módulo de m-Si. En cuanto al módulo de silicio amorfo, se obtienen de la misma forma las siguientes figuras:

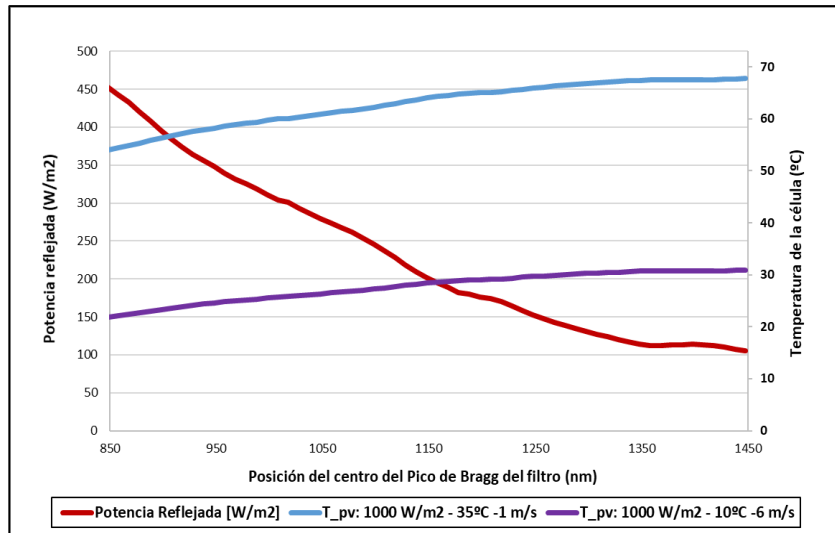


Figura 4.14. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para a-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T_{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m^2 .

En esta ocasión, para el módulo de a-Si, se obtiene una temperatura sin filtro de $71,83 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para unas condiciones de 1000 W/m^2 , 35°C , 1 m/s y AM1,5 y de $33,71^{\circ}\text{C}$ para 1000 W/m^2 , 10°C , 6 m/s y AM1,5. A su vez, se representa de nuevo la diferencia entre temperaturas de trabajo para los casos del módulo con y sin filtro:

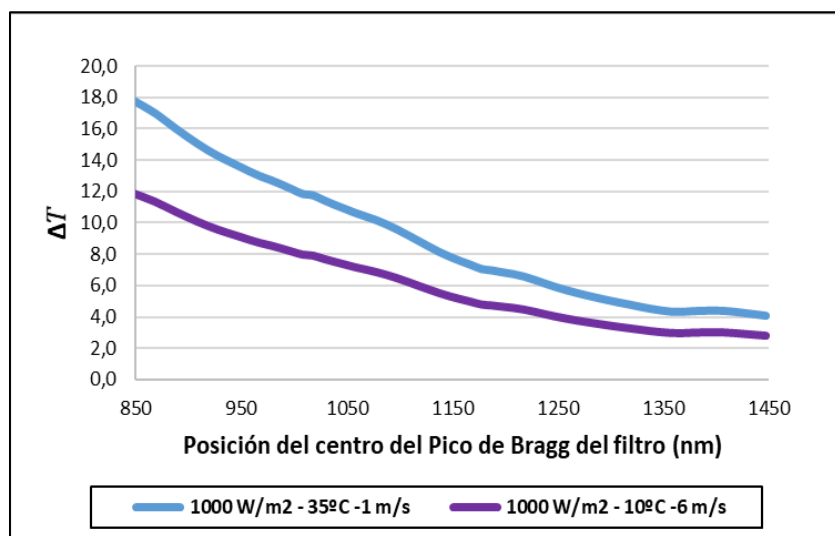


Figura 4.15. Reducción de temperatura conseguida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 1000 W/m^2 .

Se destaca que las diferencias de temperatura son mayores en este caso. Esto se debe a que, debido a la propia

respuesta espectral de la célula de silicio amorfo, el filtro puede situarse en menores posiciones del espectro electromagnético, que un filtro de m-Si. Por lo tanto, en consecuencia, la temperatura del sistema es menor.

Del mismo modo, se podría ahora comparar cuanto se podría reducir la temperatura del módulo si se incorporase un filtro, según la posición que ocupase en el espectro electromagnético:

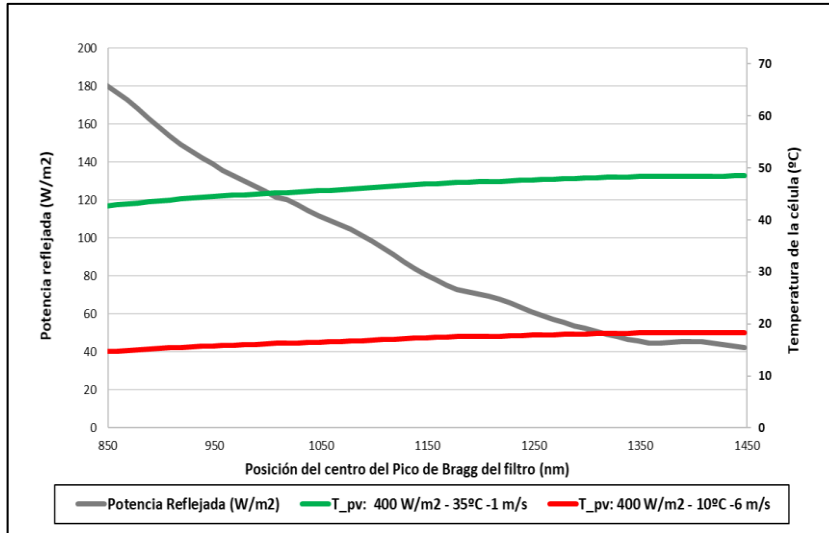


Figura 4.16. Relación entre la potencia reflejada por el filtro diseñado para a-Si, y la evolución de la temperatura del módulo (T_{pv}) en función de la posición del centro del Pico de Bragg para 1000 W/m².

Para unas condiciones de 400 W/m², 35°C, 1 m/s y AM1,5 el módulo sin filtro alcanza una temperatura de 51,22 °C, mientras que para 400 W/m², 10°C, 6 m/s y AM1,5 su temperatura es de 19,50 °C. La siguiente figura muestra la reducción de temperatura alcanzada entre el módulo con y sin filtro:

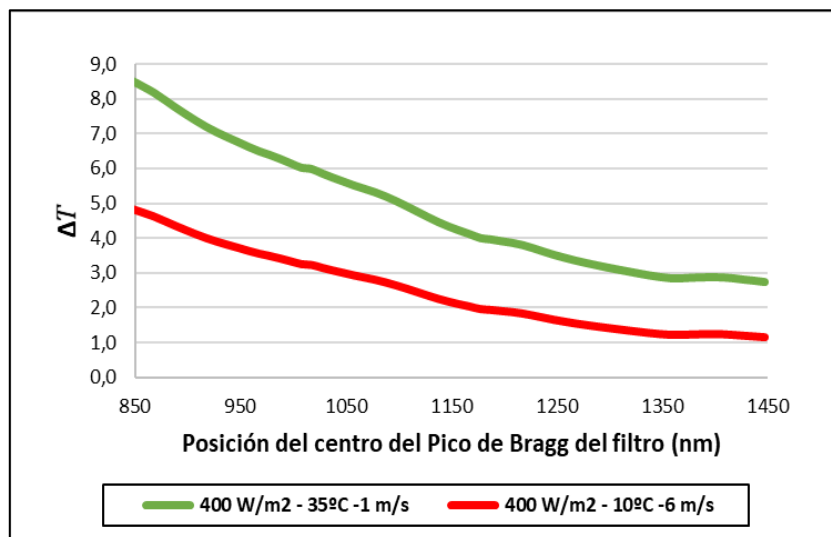


Figura 4.17. Reducción de temperatura conseguida por el efecto de un filtro respecto a la temperatura del módulo sin filtro para 400 W/m².

Al igual que el caso anterior se observa que el filtro resulta también menos beneficioso, esto es, la diferencia de temperatura con respecto al módulo sin filtro es menor que respecto a la conseguida para las mismas condiciones, pero con 1000 W/m^2 de irradiancia.

Ahora bien, todas las gráficas anteriores han mostrado la reducción térmica que se consigue integrando un filtro en un módulo fotovoltaico. Se ha visto que, al ir desplazando la posición del filtro hacia longitudes de onda menores, la reducción térmica es mayor, debido a que la potencia reflejada por el filtro también es mayor. Sin embargo, aunque al ir desplazando el filtro hacia longitudes de onda menores la reducción térmica sea mayor, también es fundamental destacar que mayor será la cantidad de fotones reflejados. Puesto que dichos efectos se contraponen, será crucial determinar para qué longitud de onda se anulan entre ellos. Es decir, se trata de encontrar qué posición del filtro hace que la ganancia sobre la potencia generada a causa de la reducción térmica es igual a la pérdida sobre la potencia debida a la reflexión de fotones útiles (Posición Neutra).

Para cuantificar el efecto de la reflexión de fotones útiles se utilizará el factor γ , denominado Factor de reducción de transmitancia del filtro:

$$\gamma = \frac{\int_{280}^{2220} T(\lambda) \cdot SR(\lambda) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{280}^{2220} SR(\lambda) \cdot P_{AM1,5}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4.28)$$

En la siguiente ilustración se muestra cómo se modifica dicho factor ante una variación de la posición del filtro:

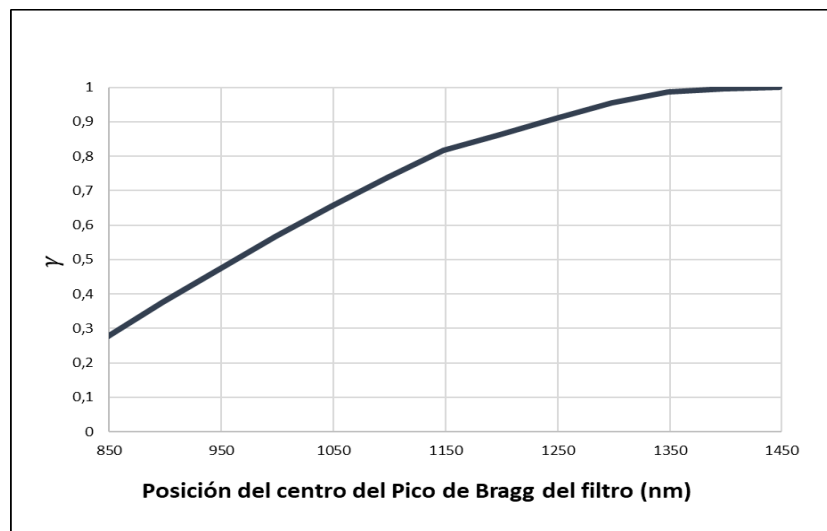


Figura 4.18. Factor de Reducción de Transmitancia del filtro de m-Si para cada posición del centro del Pico de Bragg del filtro.

Un factor γ próximo a 1 indicará que la posición que ocupa el filtro apenas tiene influencia sobre el módulo, en términos de reflexión de fotones útiles, puesto que el peso de estos sobre el global es despreciable. Por ejemplo, para una posición del centro del Pico de Bragg de 1450 nm este valor es 0,995, lo que indica que, a pesar de que se reflejen fotones, estos se encuentran en una zona donde apenas afectan al módulo, ya sea porque se sitúen en una parte del espectro poco energética, o donde la respuesta espectral de la célula sea muy baja, o ambas. Por el contrario, cuanto más cercano a 0 sea, más sensible será el módulo a la reflexión de fotones. Si la posición del filtro cambia y su límite se sitúa en 1050 nm, el factor γ toma un valor de 0,75, lo que indica que se han perdido casi un 25% de los fotones útiles que podrían contribuir a la generación eléctrica. En un caso más extremo, como

situar el límite del filtro en 850 nm, γ toma un valor de 0,28 lo que sería catastrófico, pues supondría que casi un 75% de los fotones útiles han sido reflejados por el filtro.

En la Figura 4.18 ,se comprueba que, a medida que la posición del centro del Pico de Bragg sea menor, γ va disminuyendo, lo que indica que el número de fotones reflejados por el filtro es mayor. Entre 1450-1350 nm no se observa una gran variación, esto se debe a que en dichas longitudes de onda tanto la respuesta espectral de la célula como la potencia del espectro solar no son demasiado grandes, por lo que reflejar fotones en esta zona no tiene gran relevancia en el cómputo global. Es por ello por lo que γ apenas se aleja de 1.

A continuación, se presenta la misma figura, pero ahora incluyendo, además, el caso para un filtro diseñado para a-Si:

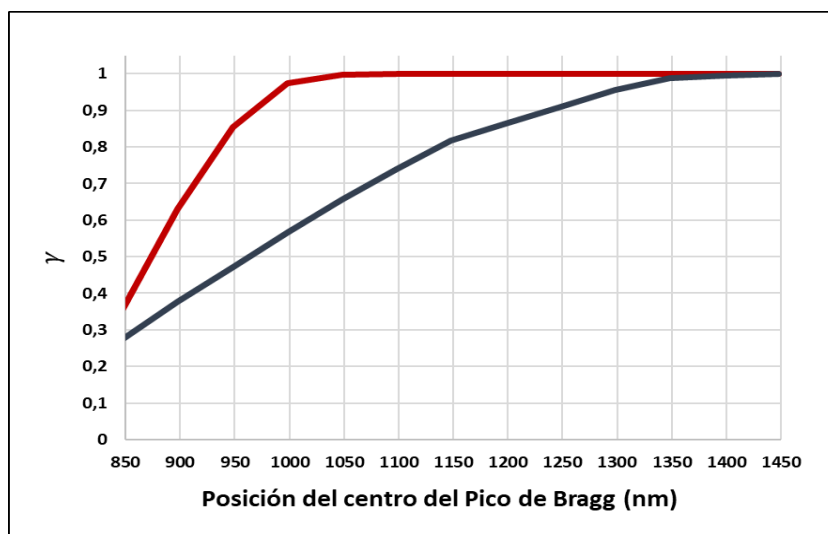


Figura 4.19. Comparativa del Factor de Reducción de transmitancia del filtro de m-Si (curva azul) y el filtro de a-Si (curva roja) para cada posición del centro del Pico de Bragg del filtro.

En esta figura se observa, además de las pérdidas por fotones reflejados del filtro de m-Si (curva azul), la correspondiente al filtro de a-Si (curva roja). En este caso se pone de manifiesto que el peso de los fotones reflejados por el filtro de a-Si prácticamente no afecta a la generación eléctrica de la célula de a-Si desde 1450 hasta 1050 nm aproximadamente. Sin embargo, se observa que a partir de 1000 nm si el filtro se sigue desplazando hacia longitudes de onda menores, las pérdidas se vuelven muy notables. La pendiente de la curva es incluso mayor que para el filtro de m-Si. Esto se debe a que el rango de respuesta espectral de la célula de a-Si está concentrado en una parte del espectro menos amplia que el de la célula de m-Si.

Una vez se han visto ambos efectos: la reducción térmica, y la reflexión fotónica, se pondrán en conjunto. Para determinar cómo afecta la posición del filtro a la generación eléctrica (4.26) simplemente se han superpuesto ambos efectos.

$$\Delta P_{eléc} (\%) = \frac{P_{eléc}^{CF} - P_{eléc}^{SF}}{P_{eléc}^{SF}} \cdot 100 \quad (4.26)$$

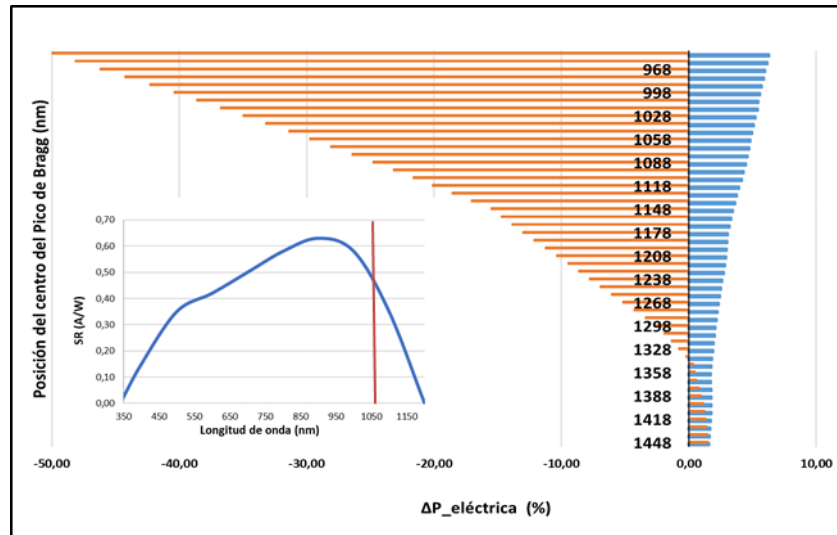


Figura 4.20. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 1000W/m^2 35°C y 1m/s .

Representación de la SR del módulo de m-Si, y del límite inferior del filtro (línea roja).

En la figura anterior, se observan barras azules y barras naranjas. Las barras azules representan la ganancia de potencia (%) respecto al módulo sin filtro sólo considerando el efecto térmico, esto es, sin tener en cuenta las pérdidas asociadas a la reflexión de fotones. Como se comprueba, aumenta al desplazarse la posición del módulo hacia longitudes de onda menores por lo comentado anteriormente. Las barras naranjas representan el efecto conjunto, es decir, la superposición del efecto térmico y el efecto de la reflexión de fotones sobre la generación eléctrica. Además, en la figura se representa la respuesta espectral del m-Si, y se observa que existe una línea que indica la posición en la que el límite inferior del filtro se sitúa ($\lambda - Z/2$) cuando $\Delta P_{eléc} = 0$.

Para estas condiciones la posición óptima que ha de ocupar el filtro sería 1450 nm ($\pm 247\text{ nm}$), pues es la que maximiza la potencia eléctrica generada, en concreto, se genera un $1,56\%$ más respecto al módulo sin filtro. Por otra parte, la posición en la que se podría situar el centro del Pico de Bragg en la que no se obtendría ningún beneficio ni tampoco perjuicio, por el hecho de colocar un filtro, es decir, la posición neutra, serían 1347 nm ($\pm 247\text{ m}$).

Las figuras correspondientes al resto de simulaciones son:

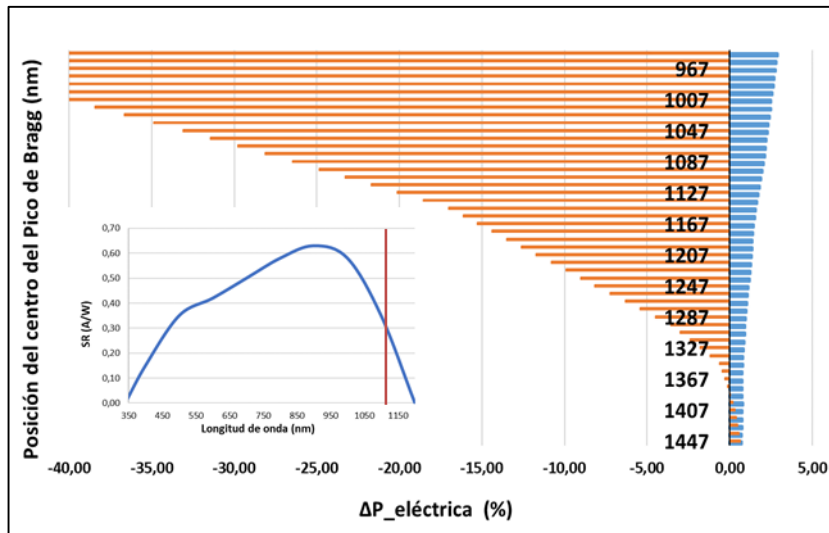


Figura 4.21. Incremento de potencia $\Delta P_{el\acute{e}c}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a $1000\text{W}/\text{m}^2$ 10°C y $6\text{m}/\text{s}$.

Representación de la SR del módulo de m-Si, y del límite inferior del filtro (línea roja).

En estas condiciones la posición óptima que ha de ocupar el filtro serían también de 1450nm , pues es la que maximiza la potencia eléctrica generada, se mejora un 0.65% más respecto al módulo sin filtro. Por otra parte, la posición neutra del filtro serían 1390nm .

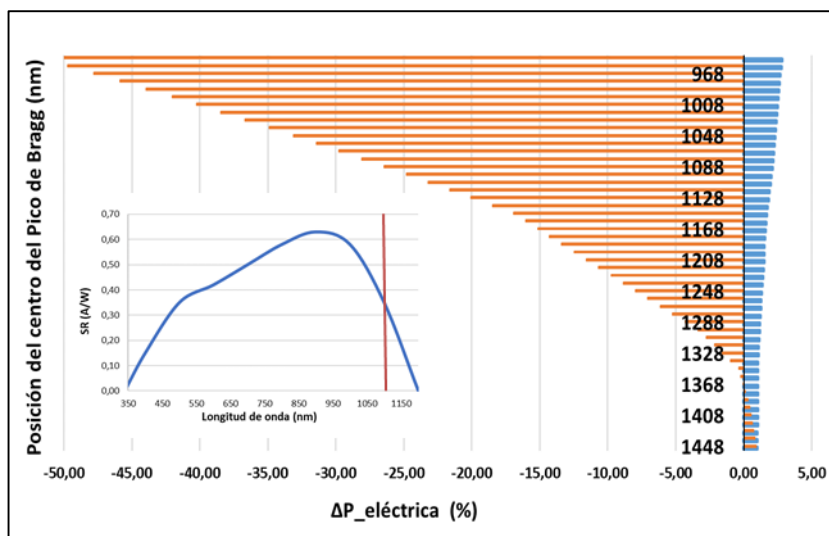


Figura 4.22. Incremento de potencia $\Delta P_{el\acute{e}c}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a $400\text{W}/\text{m}^2$ 35°C y $1\text{m}/\text{s}$.

Representación de la SR del módulo de m-Si, y del límite inferior del filtro (línea roja).

En este caso, la posición óptima es también 1450nm . Para estas condiciones la generación eléctrica se mejoraría un $0,9\%$ más respecto al módulo sin filtro. Además, la posición neutra se encuentra en 1380nm .

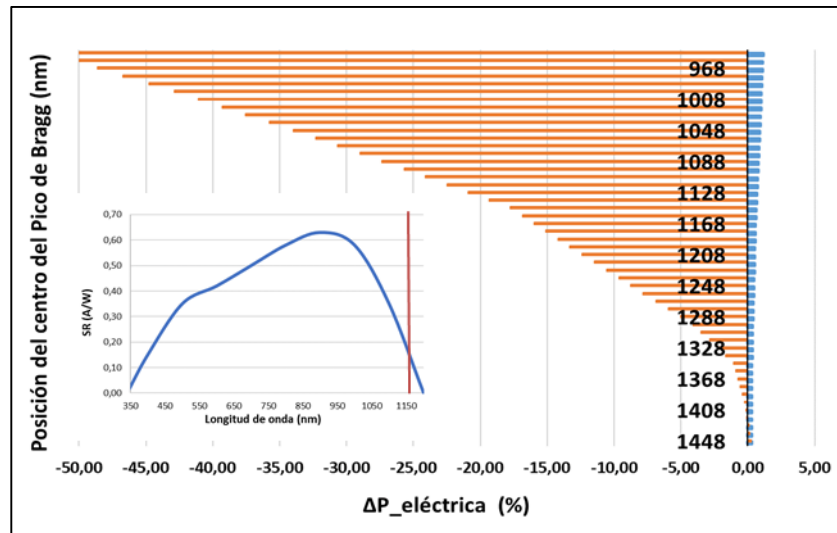


Figura 4.23. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para m-Si a 400W/m^2 10°C y 6m/s .

Representación de la SR del módulo de m-Si, y del límite inferior del filtro (línea roja).

Para el último caso de m-Si, se obtiene también que la posición óptima es 1450nm , consiguiendo un aumento de la potencia generada del 0.25% . En cuanto a la posición neutra, esta se encuentra en 1420nm .

Tabla 2. Posición óptima y neutra (nm) del filtro de m-Si.

Condiciones de Simulación	Posición Óptima			Posición Neutra		
	λ Inf.	λ Centro P. Bragg	λ Sup	λ Inf.	λ Centro P. Bragg	λ Sup
$1000\text{ W/m}^2 / 35^\circ\text{C} / 1\text{m/s}$	1200	1450	1695	1100	1350	1595
$1000\text{ W/m}^2 / 10^\circ\text{C} / 6\text{m/s}$	1200	1450	1695	1140	1390	1535
$400\text{ W/m}^2 / 35^\circ\text{C} / 1\text{m/s}$	1200	1450	1695	1130	1380	1545
$400\text{ W/m}^2 / 10^\circ\text{C} / 6\text{m/s}$	1200	1450	1695	1170	1420	1665

Para todas las simulaciones del filtro diseñado para un módulo de m-Si, se observa que la posición óptima siempre es la misma, 1450nm . Esto se debe a que, a pesar de no estar en una zona muy energética del espectro electromagnético, la respuesta espectral del módulo de m-Si (Figura 4.2) toma mucha importancia entorno a $1000\text{-}1200\text{nm}$ (posición donde se sitúa el comienzo del Pico de Bragg, λ Inf.). Entonces, el efecto de reflejar fotones útiles comienza a tomar mayor relevancia que el beneficio debido a una reducción térmica.

Por otra parte, se distinguen distintas posiciones neutras. Se destaca que para las condiciones de simulación $400\text{ W/m}^2 / 10^\circ\text{C} / 6\text{m/s}$ esta posición se sitúa en 1420nm , mientras que para $1000\text{ W/m}^2 / 35^\circ\text{C} / 1\text{m/s}$ lo hace en 1350nm . El motivo de ello reside en que, bajo condiciones más calurosas (alta irradiancia, alta temperatura ambiente y baja velocidad del viento) el efecto que el filtro ejerce sobre el sistema resulta más importante, es decir, el incremento de potencia eléctrica generada es mayor, y esto provoca que el sistema tenga cierto “margen” que le permita soportar pérdidas por fotones reflejados. De ahí que la posición neutra esté situada en menores

longitudes de onda.

Del mismo modo que para el filtro diseñado para un módulo de m-Si, se obtienen las siguientes figuras para el caso de un filtro diseñado para un módulo de a-Si:

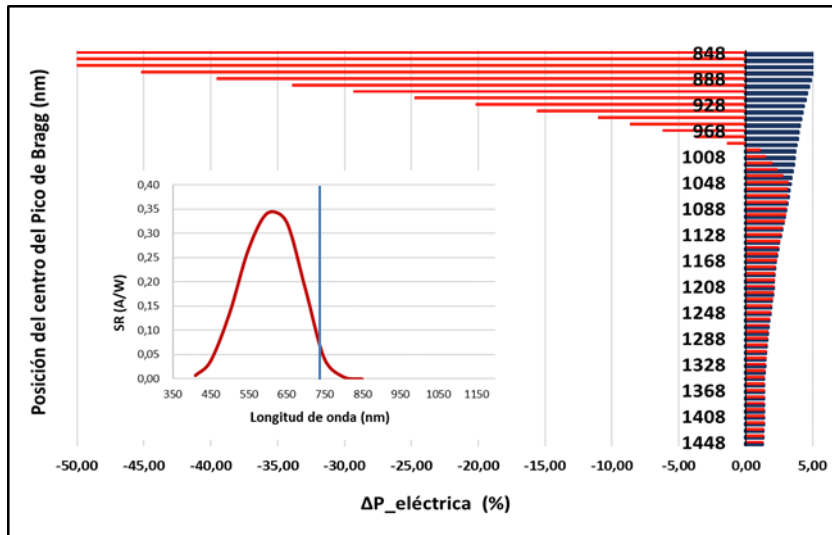


Figura 4.24. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 1000 W/m^2 35°C y 1 m/s .

Representación de la SR del módulo de a-Si, y del límite inferior del filtro (línea azul).

Para un filtro diseñado en estas condiciones, la posición óptima de su centro del Pico de Bragg que maximiza la energía generada sería de 1048 nm , donde se produce un incremento de la potencia eléctrica generada de un 3.17% respecto al módulo sin filtro. La posición neutra está localizada en este caso en 993 nm .

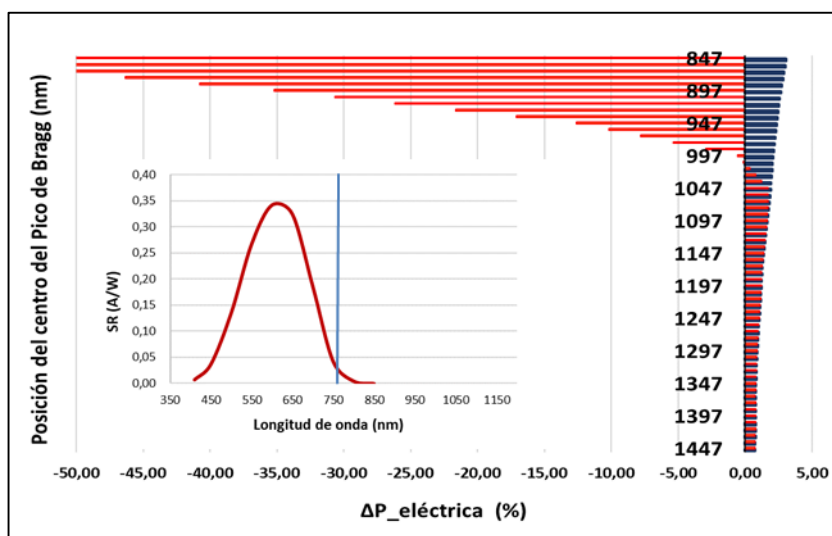


Figura 4.25. Incremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 1000 W/m^2 10°C y 6 m/s .

Representación de la SR del módulo de a-Si, y del límite inferior del filtro (línea azul).

En la figura anterior, la posición óptima se sitúa en 1067nm, donde se consigue un 1.70% más de energía eléctrica. La posición neutra es 1007nm.

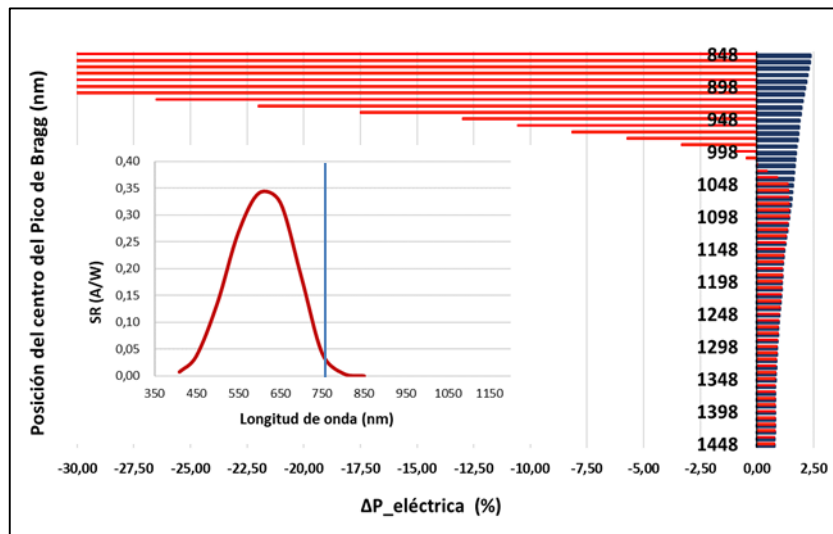


Figura 4.26. ncremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 400 W/m² 35°C y 1 m/s.

Representación de la SR del módulo de a-Si, y del límite inferior del filtro (línea azul).

En este caso se obtiene una posición óptima de 1088 nm, que da lugar a la generación de un 1.42% más que respecto al módulo sin filtro. La posición neutra es 1018nm.

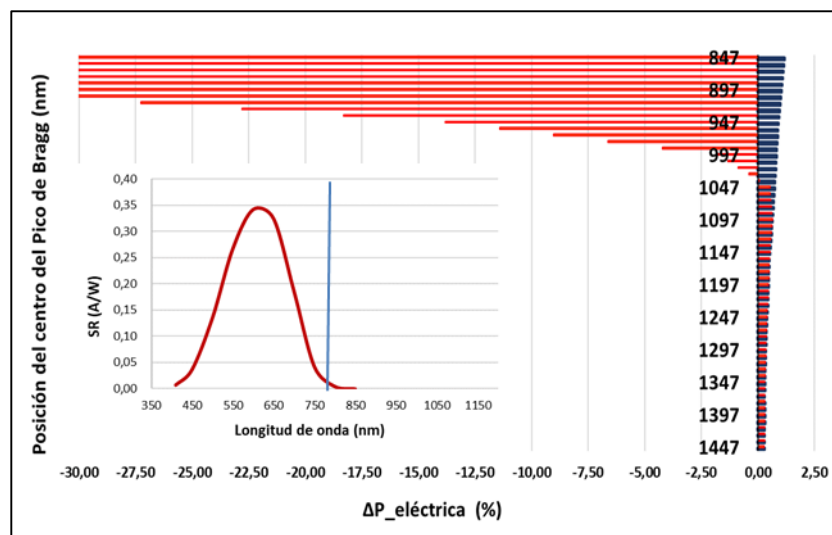


Figura 4.27. ncremento de potencia $\Delta P_{eléc}$ (%) en función de la posición del centro del Pico de Bragg del filtro para a-Si a 400 W/m² 10°C y 6 m/s.

Representación de la SR del módulo de a-Si, y del límite inferior del filtro (línea azul).

Por último, se obtiene una posición del centro del Pico de Bragg óptima de 1097 nm, que suponen un aumento del 0.64% de la producción eléctrica, y una posición neutra en 1037nm.

Tabla 3. Posición óptima y neutra (nm) del filtro de a-Si.

Condiciones de Simulación	Posición Óptima			Posición Neutra		
	λ Inf.	λ Centro P. Bragg	λ Sup	λ Inf.	λ Centro P. Bragg	λ Sup
1000 W/m ² / 35°C / 1m/s	800	1050	1295	740	990	1235
1000 W/m ² / 10°C / 6m/s	815	1065	1310	755	1005	1250
400 W/m ² / 35°C / 1m/s	840	1090	1335	770	1020	1265
400 W/m ² / 10°C / 6m/s	850	1100	1345	790	1040	1285

A diferencia del filtro diseñado para un módulo de m-Si (Tabla 2), la posición óptima es ahora distinta para cada simulación realizada. Una célula de silicio amorfo trabaja en una zona del espectro electromagnético AM1,5 muy energética. Por otra parte, la respuesta espectral del silicio amorfo se localiza entre 400 nm y 850 nm, y presenta su máxima densidad de corriente en el centro de este rango, esto es, alrededor de 600 nm (Figura 4.3). Debido, precisamente a ambos factores, la curva característica de su respuesta espectral, y la curva del espectro AM1,5 las posiciones óptimas son diferentes.

Para 1000 W/m² / 35°C / 1m/s la posición que maximiza la energía eléctrica generada ($\Delta P_{m\acute{a}x}$) está por encima del bandgap del silicio amorfo. Esto quiere decir, que pese a reflejar fotones útiles, con energía suficiente para generar un par electrón-hueco, el beneficio térmico asociado a la reflexión de calor sigue siendo superior, por lo tanto, se produce un incremento de la potencia eléctrica generada. Del mismo modo, la posición del centro del Pico de Bragg que ocasiona que $\Delta P_{el\acute{e}c} = 0$, es de 990nm. En este caso, el filtro comienza a reflejar fotones desde 740 nm, longitud de onda que se encuentra en una zona donde la respuesta espectral es muy importante.

El caso contrario se presenta para 400 W/m² / 10°C / 6m/s. La posición óptima del centro del Pico de Bragg es de 1100 nm, lo que indica que apenas se empieza a reflejar fotones útiles estos afectan a la generación eléctrica del sistema.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

En este proyecto se ha visto la potencialidad que podría suponer el acoplamiento de un filtro espectral selectivo en un módulo fotovoltaico sobre la potencia eléctrica generada. En concreto, un filtro diseñado para módulo de m-Si ha mostrado incrementos de la potencia eléctrica generada de entre un del 1,56%-0,25% para distintas condiciones climatológicas. Por su parte, un filtro diseñado para un módulo de a-Si ha mostrado también un incremento de la producción de entre un 3,17% - 0,64%.

Estos incrementos de potencia dependen, en gran medida, de cuales sean las condiciones climatológicas del emplazamiento, esto es, irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento o curva del espectro, entre otras. En función de las mismas se obtendrán diferentes posiciones óptimas y posiciones neutras del filtro.

En este sentido ha quedado demostrado, además, que, puesto que el objetivo de un filtro espectral selectivo es evitar la absorción de calor residual, este presenta mayor potencialidad ante ambientes calurosos con alta irradiancia, temperatura ambiente y baja velocidad del viento. Es bajo estas condiciones donde mayor es la potencia eléctrica generada.

Sin embargo, la realización de este proyecto se ha llevado a cabo asumiendo determinadas hipótesis, como por ejemplo la simplificación del espectro de Reflectancia del filtro como una función escalón; la suposición de que existe equilibrio térmico entre las capas del módulo; o la consideración de un ángulo de incidencia de la irradiancia de 0°.

Surgen, por tanto, numerosas líneas para desarrollar este estudio. Así mismo, sería interesante desarrollar un análisis sobre la viabilidad económica que supone la integración de estos filtros sobre un módulo fotovoltaico, o, por otra parte, poner en conjunto con el enfriamiento espectral selectivo visto a lo largo de este proyecto, el enfriamiento radiante, asociado al intercambio de calor con el espacio en la “ventana atmosférica”.

REFERENCIAS

- [1] Antonio Barrero F, «La fotovoltaica crecerá en Europa un 45% en 2018 y un 58% en 2019,» *Renewable Energy Magazine*, 2018.
- [2] R. B. Wehrspohn, U. Rau y A. Gombert, «“Photon Management in Solar Cells”,» *John Wiley & Sons, Incorporated*, 2015-06-08.
- [3] L. Hirst y E.-D. N.J., «“Fundamental losses in solar cells”,» *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 19 (3), p. 286–293, 2011.
- [4] I. L. Bravo, R. Haselhuhn y C. Hemmerle, *Instalaciones Fovovoltaicas. Manual para uso de Instaladores, Fabricantes, Poryectistas, Ingenieros y Arquitectos, Instituviones de Enseñanza y de Investigación, SODEAN,S.A.*.
- [5] J. A. E. Román, J. R. Rico y J. M. D. Sánchez, *TFG: Efecto angular sobre cristáles fotónicos*.
- [6] H. Li, J. Zhao, M. Li, S. Deng, Q. An y F. Wang, «“Performance analysis of passive cooling for photovoltaic modules and estimation of energy-saving potential”,» *Solar Energy*, vol. 181, pp. 70-82, 2019.
- [7] W. Ian, M. Peters y R. Prof Dr Eicke, “Photonic Concepts for Solar Cells”, Faculty of Mathematics and Physics Albert-Ludwigs-University Freiburg im Breisgau, 2009.
- [8] Ghenova, «Proyecto Solar Blue,» [En línea]. Available: <http://www ghenova.com/es/proyectos/242-solar-blue>.
- [9] M. Peters, J. C. Goldschmidt y e. al., «“Spectrally-selective photonic structures for pv applications”,» *Energies*, vol. vol. 3, p. pp. 171–193, 2010..
- [10] I. M. Slauch, M. G. Deceglie y T. J Silv, «Spectrally Selective Mirrors with Combined Optical and Thermal Benefit for Photovoltaic Module Thermal Management,» *FerryACS Photonics*, vol. DOI: 10.1021, nº 2018, pp. 1528-1538.
- [11] «NREL, The National Renewable Energy Laboratory,» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/>.
- [12] J. BALENZATEGUI MANZANARES, *Fundamentos de la conversión fovovoltaica: La célula solar. EOI, Máster en Energías Renovables y Mercado Energético,, 2007/2008*.
- [13] «SolarDesingTool,» [En línea]. Available: <http://www.solar desingtool.com/components/module-panel-solar/LONGi-Solar/4244/LR6-60-290M/specification-data-sheet.html>.
- [14] G. Nofuentes, B. García-Domingo, J. Muñoz y F. Chenlo, «Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution,» *Applied Energy*, pp. 302-309, 2014.
- [15] F. Tayeboun, K. A. Meradi, H. M. Tayeboun y R. Naoum, «THE THERMAL–OPTICAL EFFECT DUE TO VARYING THE ANGLE OF INCIDENCE USED FOR DESIGNING A TUNABLE FILTER IN

PHOTONIC CRYSTALS,» *Journal of Russian Laser Research*, vol. Volume 33, nº Number 3, May, 2012.

- [16] S. Gina Mayonado, M. Mian, V. Robbiano y F. Cacialli, «Investigation Of The Bragg-Snell Law In Photonic Crystals,» *Department of Physics and Astronomy, and London Centre for Nanotechnology, University College London*.