



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

“Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

Autor: Alberto Alejandro Vivas Arangú

Director 1: Salvador Ponce Alcántara

Director 2: Ignacio Bosch Roig

Fecha de comienzo: 04/10/2013

Lugar de trabajo: Instituto Universitario de Tecnología Nanofónica, área de Fotovoltaica.

3 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

Objetivos — Mejora de la potencia en el módulo fotovoltaico mediante la elección de una lámina trasera que posea mejor comportamiento óptico. Análisis óptico de láminas traseras fotovoltaicas con el fin de mejorar la eficiencia del módulo.

Metodología — En primer lugar se pretende realizar un estudio de las propiedades ópticas (reflexión, absorción, transmisión), y del comportamiento angular de la luz reflejada en distintas láminas traseras fotovoltaicas industriales según el tipo de capas que lo forman, valorando cuales son las más adecuadas para mejorar la eficiencia del módulo fotovoltaico. Como segunda parte del estudio, se realizarán y caracterizarán módulos fotovoltaicos con las mejores láminas traseras.

Desarrollos teóricos realizados — Durante el diseño del sistema se han estudiado los siguientes aspectos: Análisis de la respuesta del espectro solar en interacción con la atmosfera terrestre, Cálculo de la reflectividad media ponderada, Propiedades de la luz y sus fenómenos ópticos.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — Se ha adaptado para nuestros propósitos un equipo de medida angular, el cual permite cuantificar la dependencia angular de la luz reflejada en la lámina trasera fotovoltaica ante distintos ángulos de incidencia de la luz.

Resultados — Se logró mejorar la potencia del módulo fotovoltaico, mediante el incremento de la corriente debido a la elección de una lámina trasera con mejor respuesta óptica.

Líneas futuras — Considerar el parámetro de transmisión de las láminas con una posible línea de investigación para mejorar la respuesta óptica de las láminas traseras fotovoltaicas. Mejora del equipo de medida angular, adaptar el equipo de medida para corregir posibles errores de alineamiento, aumentar el grado de libertad de las medidas, realización de medidas en 3D, crear un software que controle el sistema y capte automáticamente las medidas de la lámina a estudiar.

Publicaciones — Optical characterization of backsheets to improve the power of photovoltaic modules. Shangahi 2014

Abstract — On the photovoltaic module fabrication, the choice of one or other backsheet has a great importance in order to ensure its lifetime for 25 years or even for longer periods of time. It has the function of protect the solar cells, the encapsulant and the metallic contacts against ultraviolet radiation, water vapor and moistures. Besides, it has to provide a durable adhesion with the encapsulant, thermal and dimensional stability and electrical isolation. In the way to increase the efficiency of the photovoltaic solar modules and to reduce its price per Wp, the global reflectance of the backsheet takes importance. In this sense, a higher reflectance can allows to a better reuse of the incident sunlight. But that affirmation is not always true. An experimental analysis shows that there is another topic to take in account in order to choose the best backsheet: the angular dependence of the reflected light. Different backsheets with TEDLAR®, KYNAR® and PET layers from different suppliers have been analyzed. This study demonstrate than, for backsheets with similar global reflectance, the angular response of the backsheet is responsible for up to 0.7% of variation on the short circuit current of a photovoltaic (PV) module.

Autor: Alberto Vivas, email: alviar@postgrado.upv.es

Director 1: Salvador Ponce Alcántara, email: salponce@ntc.upv.es

Director 2: Ignacio Bosch Roig, email: igbosroi@dc.com.upv.es

Fecha de entrega: 08-09-2014

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	5
I.1	Impacto en la producción de la energía.....	6
II.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	7
II.1	Elementos del módulo fotovoltaico.....	7
II.2	Célula solar.....	8
II.3	Fabricación de módulos solares	8
II.4	Radiación solar.....	9
II.5	Espectro AM1.5G.....	10
II.6	Reflectividad media ponderada (RMP).....	10
II.7	Propiedades ópticas de la luz y Fenómenos ópticos:.....	11
II.8	Perdidas ópticas.....	14
II.9	Reflectividad de la lámina trasera	15
III.	MEDIDAS REALIZADAS.....	16
III.1	Reflectividad, absorción y transmisión media ponderada:.....	16
III.2	Medida de la componente global, directa y difusa de la luz reflejada utilizando la esfera integradora y un láser como fuente de luz:.....	19
III.3	Medida Angular:.....	22
III.4	Influencia de la lamina trasera en la densidad de corriente de los módulos.....	29
III.5	Efecto de la lámina trasera en la variación de la potencia esperada en un módulo fotovoltaico estándar	33
IV.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
V.	ANÁLISIS DE COSTES.....	36
VI.	CONCLUSIONES.....	37
VII.	AGRADECIMIENTOS.....	38
VIII.	ANEXOS.....	39
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	46

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables tienen una gran relevancia en la lucha frente al cambio climático y en la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, los cuales aparte de ser limitados, se agotan cada vez con mayor rapidez, debido un aumento del consumo energético. En este sentido, la Unión Europea recomienda que para el año 2020, el 20% del consumo de energía proceda de fuentes renovables.

En este escenario de reducir la dependencia con el petróleo, el carbón, la energía nuclear, entre otros, la energía solar fotovoltaica adquiere una posición determinante.

Así, durante la última década e incluso en estos años de crisis mundial, principalmente debido al crecimiento del mercado norte americano y asiático, el número de instalaciones de energía solar fotovoltaica (FV) ha continuado con su tendencia de crecimiento exponencial [1].

Atendiendo a la modularidad de esta fuente de energía, no es difícil encontrar instalaciones cuyas potencias varían desde pocos kilovatios a varios megavatios, instalaciones destinadas al autoconsumo o conectadas a la red eléctrica, ubicadas en campos abiertos o en edificios dentro de las ciudades.

En todas ellas se cumple que la potencia generada depende principalmente de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, de la calidad de la instalación, de la radiación solar recibida en el tiempo y de las posibles sombras que puedan aparecer en los mismos.

Para hacerla cada vez más atractiva, se hace necesaria la reducción del precio de producción de la electricidad por parte de la energía solar fotovoltaica. Por ello, se plantean distintas líneas de investigación con la finalidad de abaratar el coste de fabricación de los módulos y/o en la mejora de su eficiencia.

En este sentido, el presente proyecto tiene como objetivo mejorar el aprovechamiento de la luz incidente sobre el módulo FV, y con ello su eficiencia, mediante cambios en el módulo que no conlleven una alteración en el proceso de fabricación y sin coste añadido para el mismo.

1.1 Impacto en la producción de la energía

La siguiente figura (Fig 1) muestra un estudio de la distribución de luz que llega en un módulo fotovoltaico [2].

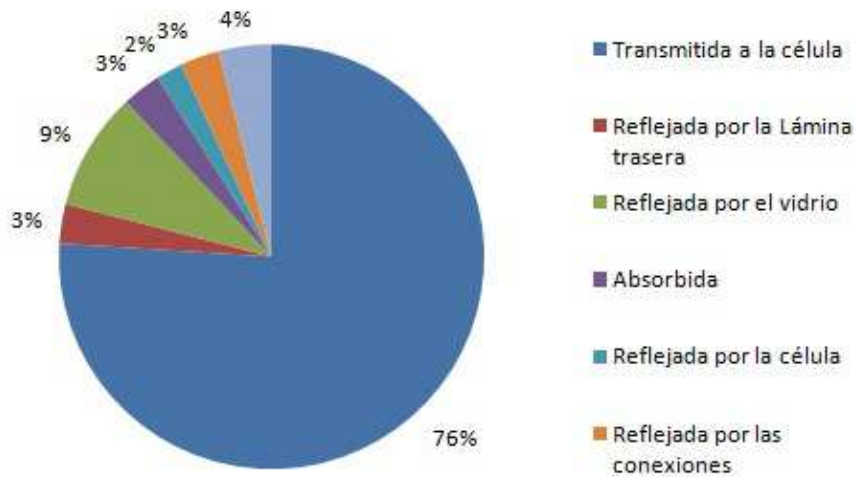


Fig 1. Distribucion de la luz incidente sobre el módulo [2]

Fácilmente puede apreciarse que se pierde en torno al 24% de la radiación solar que llega al módulo. No obstante solucionar todos estos problemas no es fácil y más importante aún, muchas soluciones son costosas. Por ello, el estudio que se llevará a cabo en el presente proyecto se basa en realizar cambios que mejoren el aprovechamiento de la luz incidente sobre el módulo, procurando que el impacto económico sea mínimo. De modo que la solución no solo proponga una mejora sino que pueda ser implementada fácilmente, aumentando la eficiencia del módulo y reduciendo el precio del watio pico (Wp).

Una vía para mejorar la eficiencia del módulo, pasa por la reducción de las pérdidas ópticas asociadas a la lámina trasera. Por otra parte, saber con exactitud qué lámina trasera es la que mejores prestaciones nos da, es actualmente un proceso costoso en el cual deben fabricarse varios módulos idénticos (para eliminar cualquier error en el proceso de fabricación), posteriormente analizarlos y de acuerdo con los resultados, elegir la lámina trasera.

Por ello se propuso un análisis detallado de la lámina trasera, el cual puede darnos información importante sin la necesidad de fabricar un módulo, guiándonos en la elección de la mejor lámina desde el punto de vista óptico.

El proyecto de investigación parte de una situación “no esperada” [3], en la que dos módulos cuyas láminas traseras tenían reflectividades similares poseían variaciones de corriente notables. De ahí se plantea el estudio óptico del comportamiento de la lámina.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

II.1 Elementos del módulo fotovoltaico

Los elementos que componen el módulo fotovoltaico pueden verse en la figura (Fig 2).

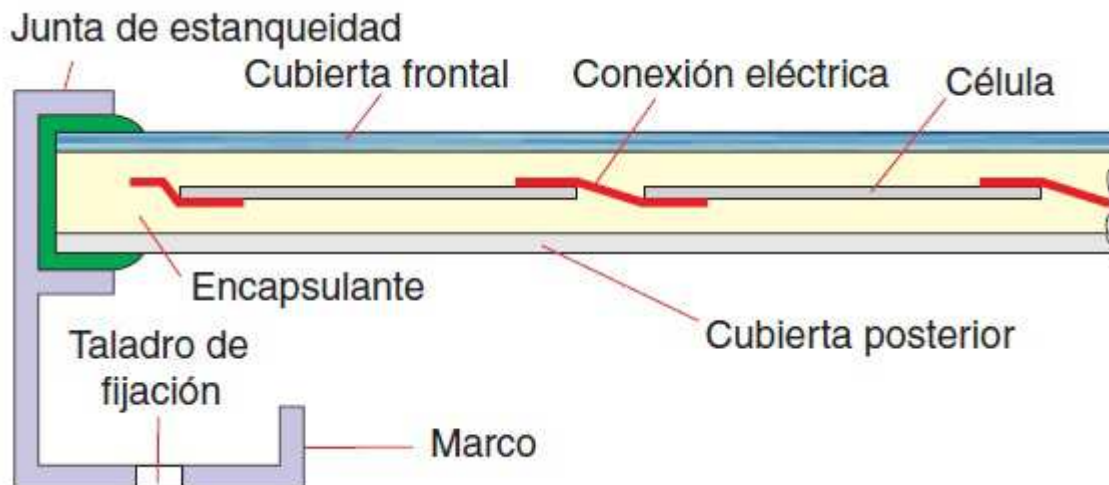


Fig 2. Elementos de un panel fotovoltaico [4]

1. Cubierta frontal: en general, es un vidrio templado y texturado de aproximadamente 3.2mm de espesor, el cual posee un bajo contenido en hierro para permitir una alta transmisión de la luz solar. Un texturado químico, se realiza con ácidos los cuales le dan cierta rugosidad reduciendo así hasta en un 4% la luz reflejada.
2. Encapsulante: el más utilizado a nivel mundial es el etil vinil acetato (EVA). Se trata una resina transparente sensible a la temperatura, absorbe los rayos UV, es foto-antioxidante, termo-antioxidante y un buen aislante eléctrico. Posee baja temperatura de fusión y de polimerización. Así mismo su coeficiente de absorción de agua es muy bajo y posee muy buenas propiedades ópticas.
3. Célula solar: Es el dispositivo capaz de realizar la conversión de la luz en electricidad. El sustrato más utilizado a nivel mundial es el silicio. Dependiendo del tipo de cristalización realizado, las células pueden ser monocristalinas o multicristalinas.
4. Conexión eléctrica: Son los conductores de la electricidad en el módulo fotovoltaico. Según sean las características eléctricas de las células solares que integran el módulo, éstas se asocian en paralelo y/o en serie hasta obtener unos valores de tensión y corriente determinados.
5. Marco: Es utilizado para proporcionar rigidez y resistencia mecánica al módulo.
6. Cubierta posterior: es una lámina plástica formada por un conjunto de capas con distintas funcionalidades y superpuestas una encima de la otra. Mejor conocida con el término en inglés de backsheet o lámina trasera. Después de un proceso de

prensado y unión de las capas, se obtiene como resultado una lámina de aproximadamente 300µm. Sus principales capas están formadas por:

- ✓ Mylar: mejor conocido como PET (politereftalato de etileno) es un film, fuerte y resistente. Su coeficiente de absorción de agua es muy bajo y es una buena barrera tanto química como de gases. También proporciona un alto aislamiento eléctrico.
- ✓ TEDLAR® [5]: Es una lámina de polivinilo fluorizado, el flúor permite una mejor unión química con otros polímeros, aumentando así considerablemente la resistencia y durabilidad.
- ✓ KYNAR® [6]: Las membranas de KYNAR ® (fluoruro de polivilideno) tienen una excelente estabilidad a altas temperaturas y a productos químicos agresivos como ácidos, oxidantes y muchos disolventes orgánicos. Estas membranas pueden secarse y revestirse sin degradar sus propiedades.
- ✓ Primer: es una capa de imprimación con alta reflectividad y posee alta adherencia con el encapsulante.
- ✓ EVA: Algunas láminas traseras fotovoltaicas emplean una capa de etil vinil acetato color blanco dispuesta hacia el interior del módulo. Con ella se consigue, si cabe, una mayor adherencia de la lámina trasera al encapsulante.

II.2 Célula solar

La célula solar es el dispositivo capaz de transformar la energía solar en electricidad. Tanto por su disponibilidad como por sus propiedades semiconductoras, la gran mayoría de las células solares que se comercializan en la actualidad están realizadas con un sustrato de silicio cristalino.

Atendiendo al modo de cristalización, se puede encontrar dos tipos de células solares: las realizadas con sustratos monocristalinos o con multicristalinos. La eficiencia de las mismas varía según el tipo de sustrato y del proceso de fabricación utilizados.

De forma orientativa, a nivel industrial se pueden encontrar en la actualidad células monocristalinas de entre el 17% y el 20%, y multicristalinas de entre el 16% y el 19% de eficiencia.

II.3 Fabricación de módulos solares

La Fig 3 muestra la disposición de las células de silicio dentro del módulo, así como el diagrama de conexiones de cada célula. Los puntos A y C son el principio y final de la cadena de conexiones en serie, entre los puntos C y B, y B y A se colocan con posterioridad los diodos de paso (son unos

9 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

dispositivos que protegen las células solares ante posibles cambios de polarización debido por ejemplo a efectos de sombreado).

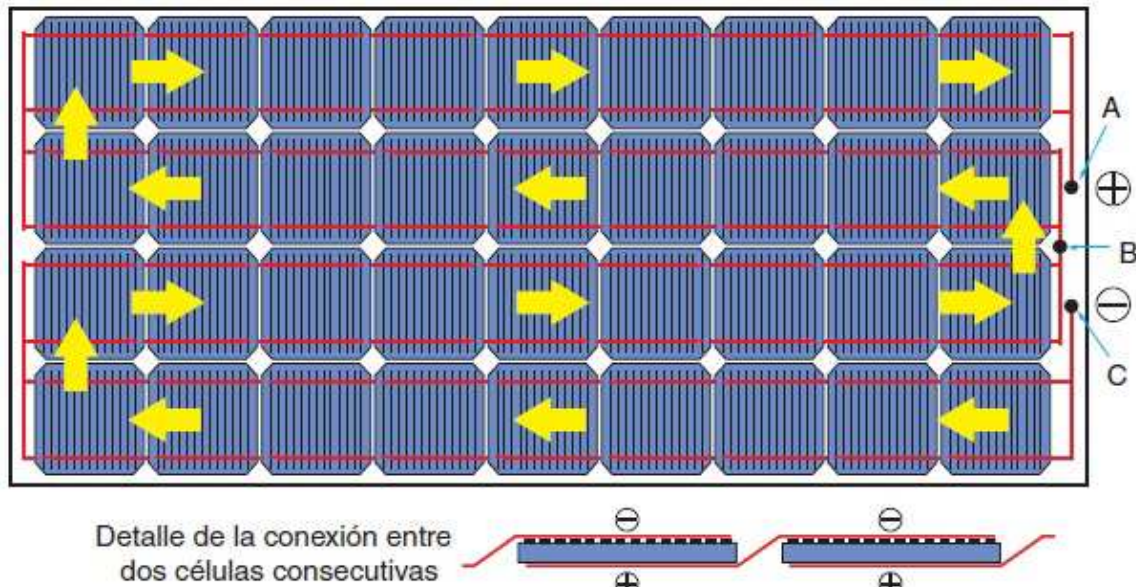


Fig 3. Disposición de las células en un módulo fotovoltaico [4]

Seguidamente es necesario disponer de un laminador el cual es el dispositivo encargado de que todo el conjunto de partes que forman el módulo, queden embebidas en una pieza sólida. El esquema del laminador está ilustrado en la Fig 4. El proceso de laminación se realiza con un alto vacío, a una temperatura de en torno a 150°C y durante 15 minutos aproximadamente según el tipo de encapsulante utilizado.

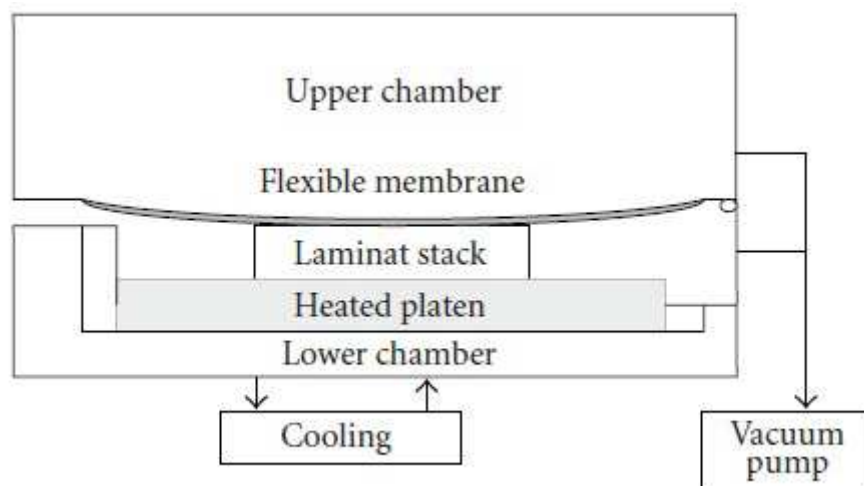


Fig 4. Esquema de un laminador [4]

II.4 Radiación solar

La radiación solar, al atravesar la atmósfera terrestre, sufre ciertas alteraciones las cuales dependen de la composición de la atmósfera y el ángulo de elevación solar.

Este efecto depende del espesor de la atmósfera que la radiación atraviesa. Para especificar esa distancia se utiliza el concepto de masa de aire o air mass (AM) la cual se define como el espesor

de la atmósfera terrestre que recorre la radiación solar directa, expresada como múltiplo del camino que recorrería en una dirección perpendicular a la superficie terrestre [7] (ver Fig 5).

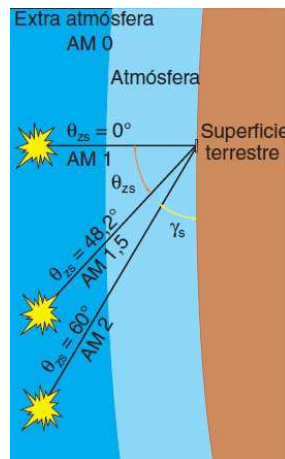


Fig 5. Masa de aire (AM)

Las hojas de características de los módulos fotovoltaicos indican su potencia máxima para una distribución espectral AM1.5, ya que representa un promedio del AM anual para latitudes medias.

II.5 Espectro AM1.5G

Es el espectro estándar de calibración terrestre de los paneles solares [8], definiendo una irradiancia solar de 1000W/m². Su distribución espectral aparece en la figura (Fig 6).

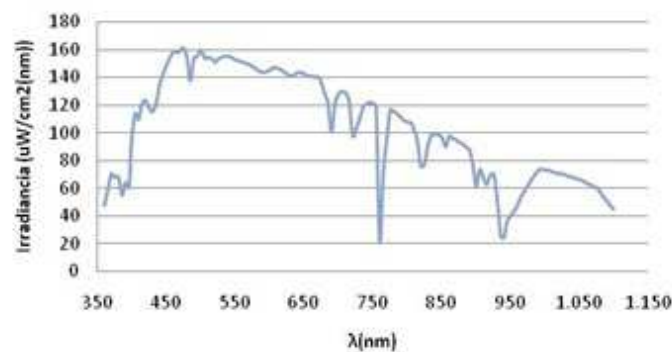


Fig 6. Espectro AM1.5G

II.6 Reflectividad media ponderada (RMP)

La reflectividad de las distintas láminas traseras fotovoltaicas se han medido utilizando un espectrofotómetro de la casa Instruments Systems, modelo SpecWin Light CAS 140CT, una fuente de luz blanca y una esfera integradora de 150 mm de diámetro.

Así, a partir de la medida de la reflectividad y mediante la ecuación (1), se calcula, la reflectividad media de cada lámina trasera ponderada con el espectro AM1.5G.

$$RMP = \frac{\int R(\lambda) \cdot AM1.5G \cdot d\lambda}{\int AM1.5G \cdot d\lambda} \quad (1)$$

II.7 Propiedades ópticas de la luz y Fenómenos ópticos:

Cuando la luz incide sobre una superficie, puede ser reflejada, absorbida, transmitida o una combinación de las anteriores. A continuación se enumeran y explican los distintos fenómenos ópticos.

a) Reflexión:

Existen tres tipos: especular, difusa debido a la incidencia de la luz sobre una superficie rugosa, y Lambertiana. Como puede apreciarse en la figura (Fig 7).

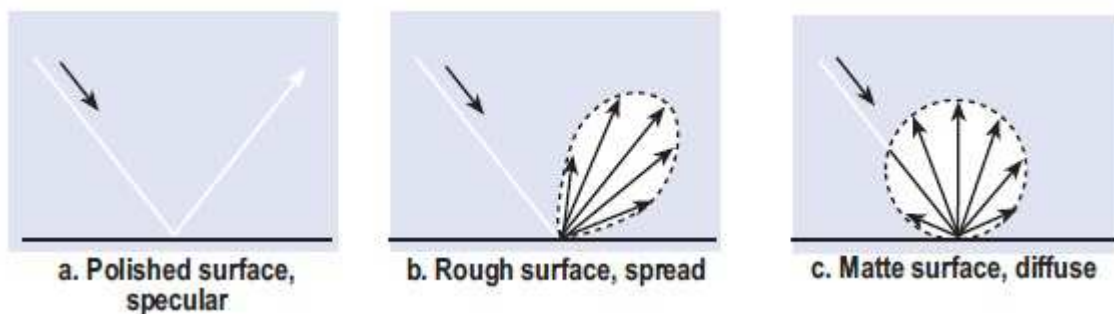


Fig 7. Tipos de reflexión [9]

- ✓ Especular (a) ocurre cuando la luz incide sobre una superficie pulida como la de un espejo, el haz de luz es reflejado con el mismo ángulo con el que incide en la superficie.
- ✓ Difusa (b) ocurre cuando la superficie refleja la luz en más de un ángulo, pero dichos ángulos son próximos al ángulo de incidencia.
- ✓ Lambertiana (c) trata de la reflexión difusa ideal. La luz es reflejada en todas las direcciones, cuya intensidad varía según la ley del coseno de Lambert.

b) Refracción (Ley de Snell):

La refracción de la luz tiene lugar cuando el rayo pasa de un medio a otro en el que su velocidad de propagación es distinta. En este caso, el rayo de luz se desvía con respecto a la normal a la superficie de contacto entre ambos medios. Dicha desviación depende de los índices de refracción de los dos medios, y se describe cuantitativamente por la ley de Snell. Así la ley de Snell viene dada por la siguiente ecuación (2):

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (2)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios 1 y 2, y los ángulos θ_1 y θ_2 el ángulo del rayo incidente respecto a la normal y el ángulo del rayo refractado respecto a la normal, como puede verse en la figura (Fig 8)

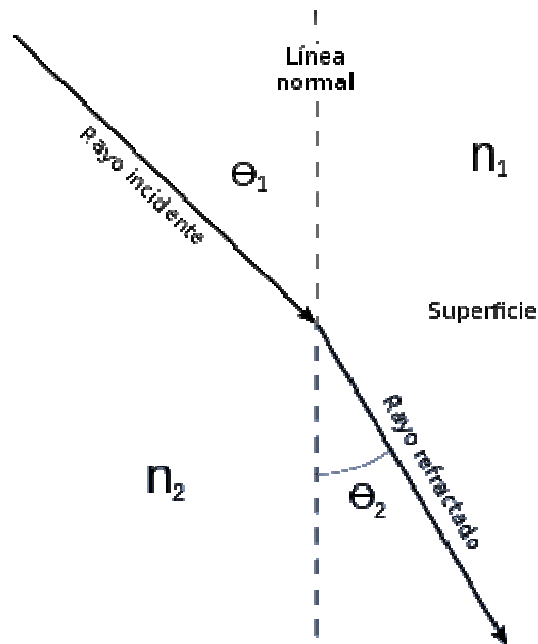


Fig 8. Ley de Snell

c) Reflexión Total Interna:

Si la luz se propaga de un medio de mayor a otro de menor índice de refracción, puede reflejarse totalmente hacia el interior del medio del que procede. Este fenómeno se conoce como reflexión total interna (RTI). Este fenómeno es usado en las fibras ópticas para la transmisión de luz con pérdidas despreciables a excepción de la absorción. El ángulo límite para el cual empieza a tenerse este fenómeno se le denomina ángulo crítico, y viene por la ecuación (3).

$$(3)$$

En el caso de que la luz se refleja nuevamente al medio del que procedía, con índice n_1 , por lo que se da el fenómeno de reflexión total interna (RTI). Este efecto puede observarse en la figura (Fig 9).

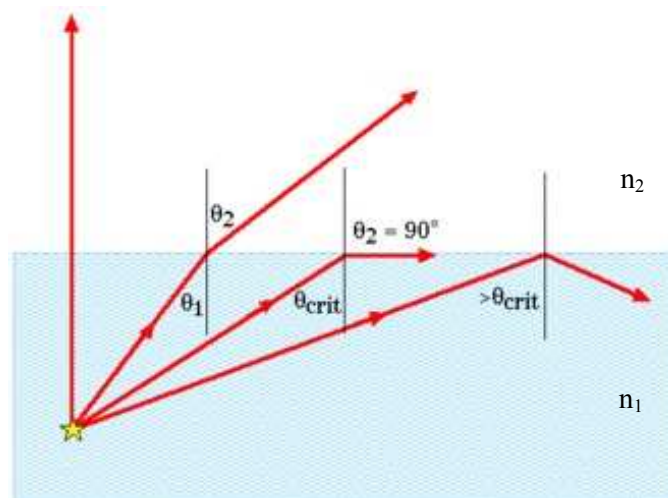


Fig 9. Fenómeno de Reflexión total interna (RTI) [9]

En nuestro caso considerando los rayos de luz que se reflejan en la lámina trasera del módulo fotovoltaico, la ecuación (3) queda como la ecuación (4). Donde el índice de refracción del vidrio y el encapsulante ($n_{\text{vidrio-EVA}}$) puede aproximarse a 1.5 y n_{aire} es 1. Sustituyendo se obtiene que $\theta_c = 42^\circ$. Por lo tanto, se tendrá reflexión total interna para todo rayo incidente sobre la interfase vidrio – aire con un ángulo $\theta > 42^\circ$ con respecto a la normal.

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{vidrio-EVA}}}\right) \quad (4)$$

Para ángulos menores la luz se escapa y no contribuye con la mejora en potencia del módulo.

d) Ley del coseno de Lambert

Esta ley establece que la luminosidad producida sobre una superficie por una fuente de luz puntual es proporcional al coseno del ángulo de incidencia, θ . Dicho ángulo es medido respecto a la normal a la superficie, según se muestra en la figura (Fig 10). La ecuación (5) presenta la expresión matemática asociada a esta ley.

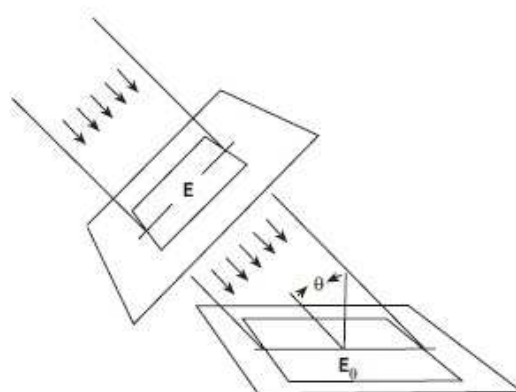


Fig 10. Ley de coseno de Lambert [9]

$$E(\theta) = E \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

e) Emisión y reflexión Lambertiana

Una superficie Lambertiana (o isotrópica) refleja o emite la misma luminosidad en cualquier dirección. Por ejemplo, una superficie plana difusa uniformemente iluminada, como una hoja de papel, es aproximadamente Lambertiana, porque la luz reflejada es la misma en todas las direcciones desde donde se puede ver la superficie del papel. Sin embargo, no tiene la intensidad isotrópica, porque la intensidad varía de acuerdo a la ley del coseno.

La figura (Fig 11) muestra un ejemplo de reflexión de una superficie Lambertiana. Nótese que la reflexión sigue la ley del coseno. Recordemos que la luminosidad es intensidad por unidad de área. Debido a que intensidad y área aparente siguen la ley del coseno, estas permanecen en proporción una de la otra a medida que cambian los ángulos. Así, la luminosidad permanece constante mientras que la intensidad no.

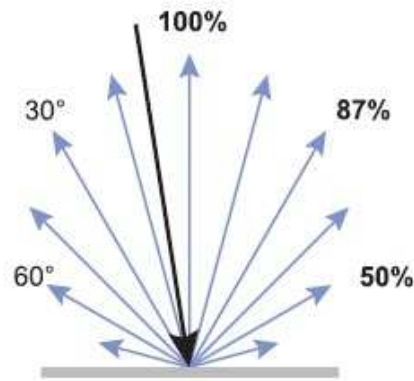


Fig 11. Superficie Lambertiana [9]

II.8 Perdidas ópticas

Cuando la luz incide en el panel fotovoltaico, esta puede ser transmitida, reflejada o absorbida. De acuerdo con McIntosh [10] se tienen las posibilidades ilustradas en la figura (Fig 12). Así, la luz puede ser:

- 1) reflejada en la interfaz aire-vidrio fotovoltaico
- 2) absorbida por el vidrio
- 3) reflejada de vuelta por la interfaz vidrio fotovoltaico-encapsulante
- 4) absorbida por el encapsulante
- 5) absorbida por la célula solar
- 6) reflejada en la superficie de la célula solar
- 7) absorbida por la lamina trasera
- 8) reflejada en la interfaz encapsulante-lamina trasera

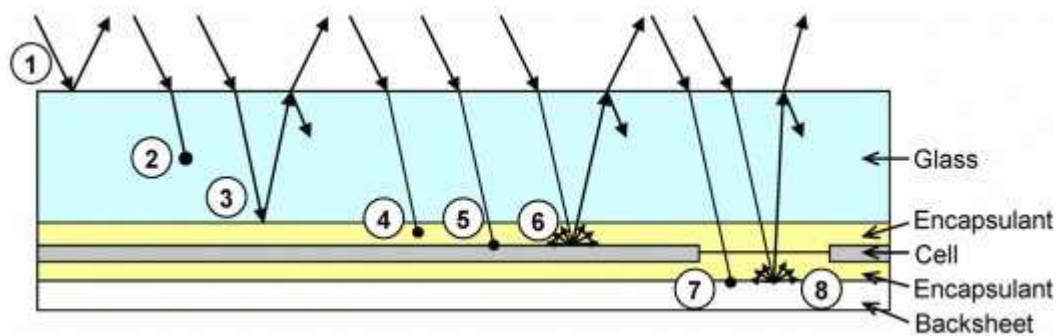


Fig 12. Tipos de pérdidas ópticas en el panel fotovoltaico [10]

Considerando la lámina trasera FV y de acuerdo con los apartados anteriores, la RTI se produce para aquellos haces de luz reflejada que inciden en la interfaz vidrio-aire con un ángulo mayor de 42° con respecto a su normal. Por ello, una mayor reflectividad difusa de la lámina trasera, permite un mayor reaprovechamiento de luz incidente sobre la misma.

Así, parte de los fotones incidentes en dicha lámina podrán ser redirigidos hacia las células solares, y por ello, aprovechados para mejorar la corriente del módulo.

II.9 Reflectividad de la lámina trasera

Ponce [3] destaca que la luz que se refleja en una lámina trasera posee dos componentes: una directa y una difusa, en donde la difusa tiene un papel fundamental en el reaprovechamiento de la luz que incide sobre la lámina trasera. A partir de la respuesta angular de la luz reflejada en la lámina trasera fotovoltaica se podrá realizar una estimación del porcentaje de la luz incidente sobre la misma que puede ser reaprovechada.

Atendiendo a la figura (Fig 13), si d es el espesor del vidrio y el encapsulante, la longitud L que viajará un rayo de luz difusa que sufre RTI en la interfaz vidrio-aire viene dada por la ecuación (6).

(6)

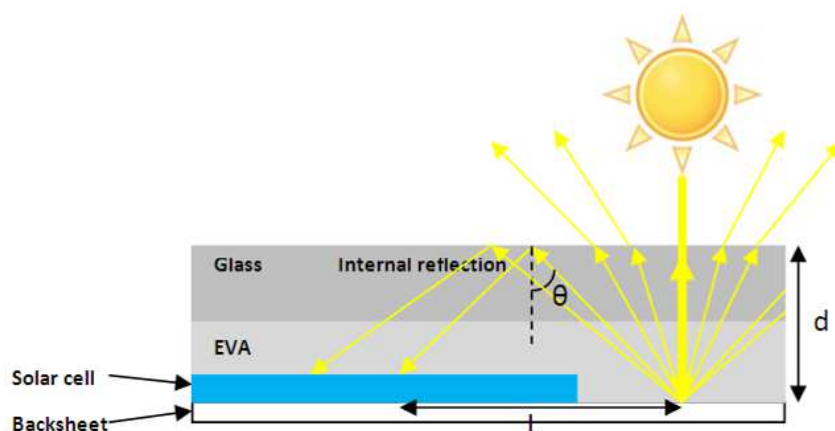


Fig 13. Diagrama de la sección transversal de un módulo fotovoltaico convencional [3]

Tomando como origen el punto donde la luz incide sobre la lámina trasera blanca de un módulo fotovoltaico, la luz reflejada tiene el siguiente comportamiento:

- ✓ De acuerdo con la ecuación (4 y 6) y como se presenta en la figura (Fig 13), hay un primer círculo de luz asociada a los fotones incidentes que se reflejan en la lámina trasera y escapan del módulo fotovoltaico por incidir en la interfase vidrio-aire con un ángulo inferior a 42° , definiéndose un círculo de radio $L / 2$. Su intensidad es más alta en el centro (componente especular), decreciendo a medida que se aleja de dicho punto.
- ✓ Además, debido a la reflexión interna total de un rayo de luz que incide en la interfaz entre el vidrio y el aire con un ángulo superior a 42° , la luz reflejada se dirigirá de nuevo a la parte posterior del módulo FV (la célula solar o la lámina posterior). De acuerdo con la ecuación 6 se definirá un nuevo círculo de radio L . La intensidad de la luz disminuye con el aumento de la distancia desde el centro del círculo.
- ✓ No se espera ninguna luz entre ambos círculos.

Lo explicado anteriormente puede verse en la figura (Fig 14). Un láser verde fue utilizado como fuente puntual de luz.

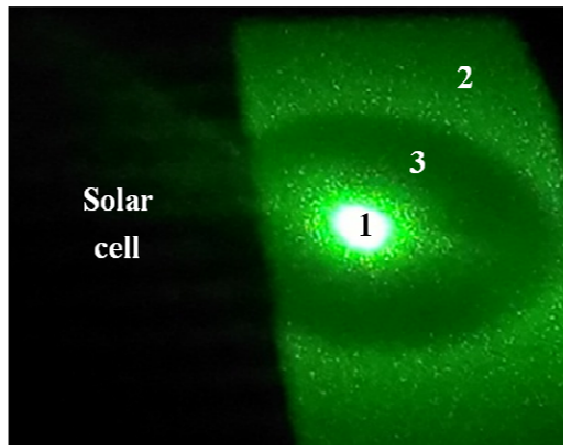


Fig 14. Fotografía de la respuesta a la luz en un módulo fotovoltaico [3]

De acuerdo con la figura (Fig 14), con el fin de tener un mayor aprovechamiento de los fotones incidentes sobre la lámina trasera FV, y junto con una alta reflectividad global, interesa que la componente especular (1) tenga una baja intensidad en beneficio de la componente difusa (2).

III. MEDIDAS REALIZADAS

III.1 Reflectividad, absorción y transmisión media ponderada:

Se ha estudiado el comportamiento óptico en 33 láminas traseras fotovoltaicas industriales. Para ello, en primer lugar se ha realizado la medida de la reflectividad global utilizando el espectrofotómetro, la esfera integradora y una fuente de luz blanca. Ésta, posee un espectro que va desde 380nm hasta 1100nm. Tras realizar la medida, utilizando la ecuación (1), se ha calculado la RMP con el espectro AM1.5G, la cual nos permite realizar una primera comparación de las distintas láminas traseras. Así se tiene la tabla (Tabla 1).

Finalmente se calculó la absorción mediante la ecuación (7). Las siguientes figuras Fig 15, Fig 16 y Fig 17, muestran el comportamiento medido de tres tipos de láminas traseras realizadas con distintas capas.

(7)

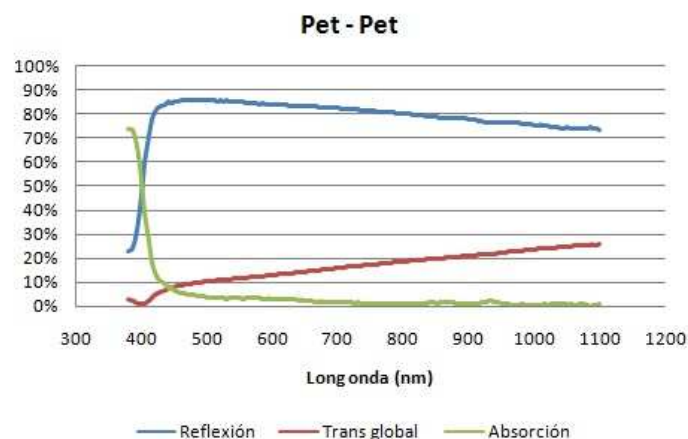


Fig 15. Lámina trasera con capas de PET-PET

17 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

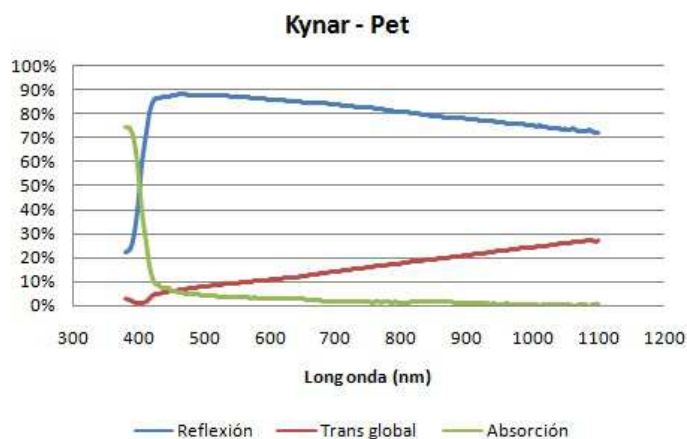


Fig 16. Lámina trasera con capas de KYNAR® - PET

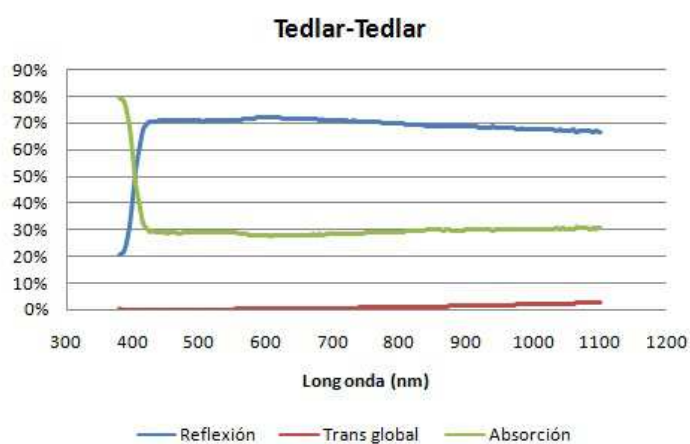


Fig 17. Lámina trasera con capas de TEDLAR®-TEDLAR®.

Recopilando los datos de fabricante, y los datos medidos de reflexión, transmisión y absorción se completa la Tabla 1

Lámina trasera	Capas	Espesor (µm)	Reflexión media	Transmisión media	Absorción media
A	FEVE/PET/EVA	330	89,90%	5,10%	5,01%
B	ETFE/PET/EVA	255	89,29%	6,08%	4,63%
C	PTFE/PET/PTFE	280	88,68%	4,13%	7,19%
D	PVDF/PET/EVA	275	88,49%	6,35%	5,16%
E	FEVE/PET/EVA	300	87,79%	7,35%	4,86%
F	PET/EVA	300	87,04%	7,04%	5,91%
G	PET/PET/EVA	340	87,03%	10,41%	2,57%
H	PVDF/PET/PVDF	275	86,94%	6,35%	6,71%
I	PET/PET/PRIMER	300	85,67%	11,42%	2,91%
K	ECTFE/PET/EVA	309	83,38%	12,83%	3,79%
L	PET/PET/PRIMER	295	82,61%	11,95%	5,45%
M	PET/PET/PRIMER	365	82,56%	13,30%	4,13%
N	PET/EVA	200	81,96%	12,96%	5,08%
O	PVDF/PET/PVDF	325	81,58%	13,70%	4,72%

Lámina trasera	Capas	Espesor (μm)	Reflexión media	Transmisión media	Absorción media
P	PTFE/PET/PTFE	300	81,24%	11,00%	7,76%
Q	PTFE/PET/PTFE	250	81,17%	15,53%	3,31%
R	PVDF/PET/EVA	340	80,32%	14,91%	4,77%
R	PET/PET/PRIMER	295	79,85%	16,46%	3,69%
T	PTFE/PET/PTFE	280	79,60%	16,01%	4,39%
U	PVDF/PET / PRIMER	325	79,19%	15,73%	5,08%
V	PET/PET	280	79,00%	13,90%	7,10%
W	PET/EVA	200	78,03%	15,66%	6,30%
Y	PET/PET/EVA	285	76,73%	20,39%	2,88%
Z	PET/Al/PET/PRIMER	370	74,89%	0,00%	25,11%
AA	VPET/PET/FPE	380	74,05%	23,33%	2,62%
AB	PET/PET/EVA	285	74,00%	23,00%	3,00%
AC	PVDF/PET/FPE	350	73,81%	12,25%	13,94%
AD	PVF/PET/mod PA treated	350	73,22%	6,74%	20,04%
AE	PVDF/PET/PET	300	72,65%	13,48%	13,87%
AH	PVDF/PET/PVDF	310	70,18%	3,11%	26,71%
AI	PVDF/PET/EVA	350	69,84%	7,00%	23,16%
AK	mod PA/PET/mod PA	250	69,67%	24,90%	5,35%
AL	PVF/PET/PVF	340	69,12%	0,72%	30,16%

Tabla 1. Láminas traseras estudiadas. Atendiendo a la estructura, las capas que aparecen a la izquierda y a la derecha están situadas respectivamente hacia el aire y hacia el interior del módulo FV. FEVE (fluoretileno vinil éter), PTFE (polietileno), PVDF (fluoruro de polivinilideno), ETFE (Etileno-TetraFluoroEtileno), PA (poliamida), PET (politereftalato de etileno), PVF (fluoruro de polivinilo) y EVA (etil vinil acetato).

Debido a la presencia de muchos tipos de capas y a la comparación de láminas traseras de muchos fabricantes distintos, no existe una tendencia exacta entre el tipo de capas y las propiedades ópticas de las mismas. Pero puede verse en general que las laminas que presentan:

- Mayor absorción: son las que poseen dos capas de PVDF y PVF.
- Mayor transmisión: son las que poseen capas de PET.
- Mayor Reflexión: son las que poseen una lámina de EVA blanco en su cara interna, situada en el módulo FV hacia las células solares.

También es importante destacar que para futuras investigaciones, en las láminas con una alta transmisión y una baja absorción podrían agregarse capas y/o aumentar el espesor de las que ya posee para reducir sus efectos, de forma que introduzcan una mejora en la reflectividad y por ende una mayor corriente en el módulo.

En la Fig 18, se representa los tres parámetros de cada una de las láminas, con barras de error del 3% asociado al error de medida proporcionado por el fabricante del equipo. Puede verse que a la derecha se encuentran las láminas de Tedlar ® (PVF), poseen una menor reflectividad y una alta absorción.

En el centro de la gráfica tenemos láminas donde el comportamiento es distinto, ya que poseen más transmisión que absorción de luz. En su mayoría, estas láminas traseras FV están formadas por capas de KYNAR® (PVDF) y otras por una doble capa de PET.

Ya por ultimo a la izquierda se agrupan las que poseen la capa externa fluoropolimérica y la capa interna de EVA, salvo ciertas excepciones. Las variaciones en las propiedades ópticas entre láminas con capas similares se deben principalmente al proceso de fabricación de las mismas.

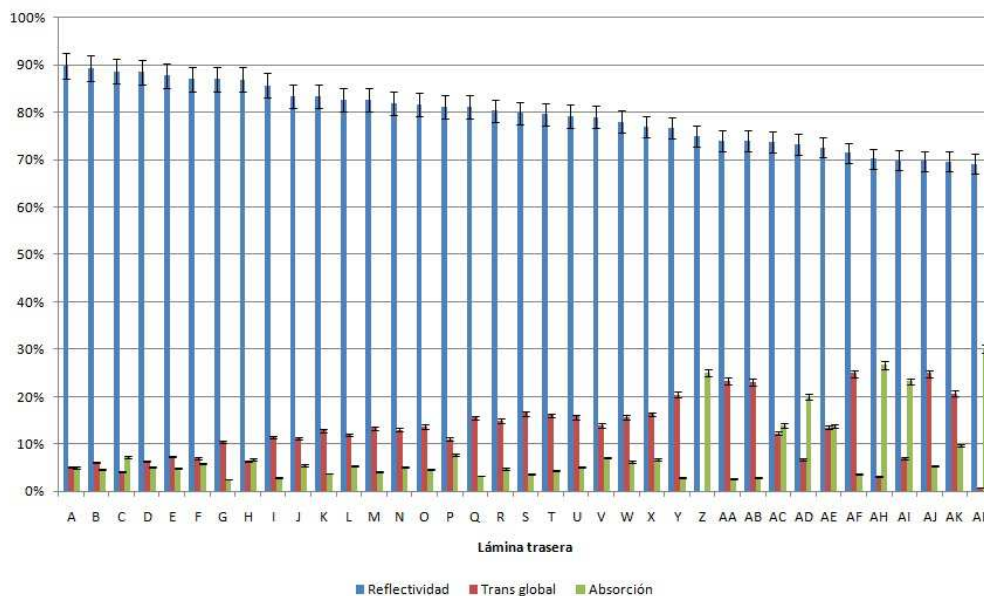


Fig 18. Reflexión, Transmisión y Absorción de las láminas traseras analizadas

Así, con los datos de los fabricantes junto con el cálculo de la reflectividad medida, la transmisión y la absorción, se han seleccionado una serie de láminas traseras para continuar con el análisis. Entre los criterios de selección se han tenido en cuenta tanto el tipo de capas que lo componen, como la RMP (considerando un cierto grado de diversidad). Las láminas traseras FV seleccionadas son la A, B, D, G, I, M, O, Q, S, R, y T.

III.2 Medida de la componente global, directa y difusa de la luz reflejada utilizando la esfera integradora y un láser como fuente de luz:

Esta es una medida de caracterización rápida, la cual nos permite separar la componente directa y la difusa de la luz reflejada en la lámina trasera fotovoltaica. Con ella se pretenderá relacionar el porcentaje de luz que es reflejada de forma difusa y la variación en la corriente del módulo fotovoltaico debida a los fotones que inciden en la interfaz vidrio-aire con un ángulo mayor que el límite.

Para llevar a cabo esta medida se ha utilizado una esfera integradora, ajustándola al esquema de la figura (Fig 19). La esfera dispone de dos puertos situados a +/- 8° respecto a la normal al puerto en el que se sitúa la muestra a caracterizar. Dejando abierta la apertura permite prescindir de la componente directa de la reflejada en la muestra a caracterizar. Tendremos de este modo una medida de la componente difusa de la luz reflejada. De igual manera la reflectividad global se

caracteriza cerrando la apertura, obteniendo así una medida de todas las componentes reflejadas por la lámina trasera.

Ya posteriormente la componente directa se calcula matemáticamente por la ecuación (8), siendo R la reflectividad dada por el espectrofotómetro.

$$R_{global} = R_{directa} + R_{difusa} \quad (8)$$

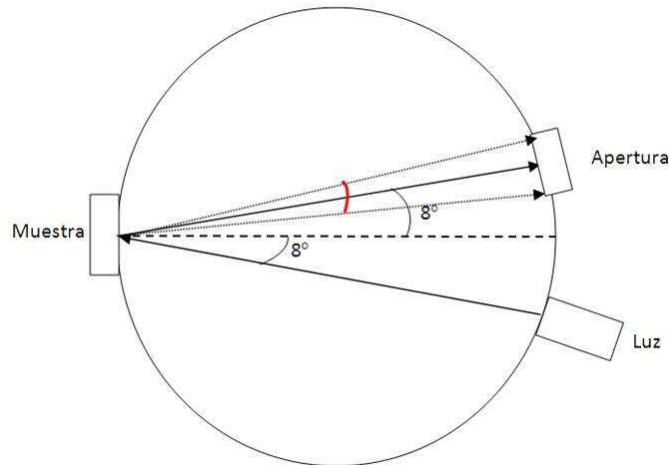


Fig 19. Esquema interno esfera integradora

La longitud de la circunferencia (siendo su diámetro de 150 mm) es de 471,24 mm. La longitud de la apertura es de 25 mm. Así, esos 25 mm equivalen a 19,1°. Por lo tanto, la pérdida angular es de aproximadamente 9,55° a cada lado de la componente especular de la luz reflejada. En un módulo FV, para una incidencia normal de la luz y de acuerdo con los cálculos anteriores, la componente difusa que interesa es aquella que se refleja con un ángulo mayor de 42° (RTI) con respecto a la componente especular. Por ello, la diferencia entre los ángulos medidos con la esfera integradora y aquellos para los que se tiene RTI hace que esta medida proporcione tan solo una estimación del porcentaje de luz que puede ser reaprovechada. Por otro lado, esta medida ha sido utilizada en este estudio pues se es sencilla y rápida de realizar.

Usando el esquema de la figura (Fig 19) y como fuente de luz un Laser He-Ne con una longitud de onda de 633nm de la casa Uniphase modelo 1126 con una estabilidad de <0.02 mrad y una variación máxima de potencia de +/- 3% [11], se realizaron medidas de las componentes global y difusa de las láminas traseras. Analizando los datos se obtuvo una grafica como la figura (Fig 20), en donde se aprecia la reflectividad global y difusa relativas de las láminas traseras analizadas.

21 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

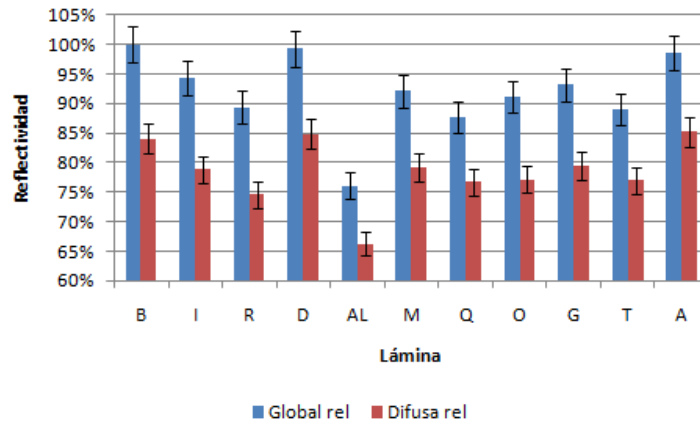


Fig 20. Diagrama comparativo de la reflectividad global y difusa relativa

En la Fig 21, puede verse la linealidad que hay entre la reflectividad global relativa y la difusa relativa. Puede apreciarse que hay láminas que tienen una menor reflectividad global y mayor componente difusa. Esto nos indica que la reflectividad global nos da una posible idea del comportamiento de la lámina, pero tampoco es un parámetro exacto para definir si una lámina se comporta mejor ópticamente que otra.

En este sentido y como ya se ha adelantado, la componente difusa tiene un mayor peso en el reaprovechamiento de la luz, y solo teniendo en cuenta la medida de la reflectividad global (que es la suma de las componentes especular y difusa), es posible seleccionar una lámina que posea una alta componente especular [3].

Así mismo, también hay láminas con una reflectividad global inferior a otras, pero con una alta componente difusa, lo que garantiza un mejor comportamiento óptico para nuestros propósitos.

En resumen, en general una alta reflectividad global va acompañada de una alta reflectividad difusa. Aunque hay láminas traseras donde esta relación se aleja de lo esperado.

En todas las graficas se han incluidos barras de error asociadas a la desviación estándar de las medidas realizadas.

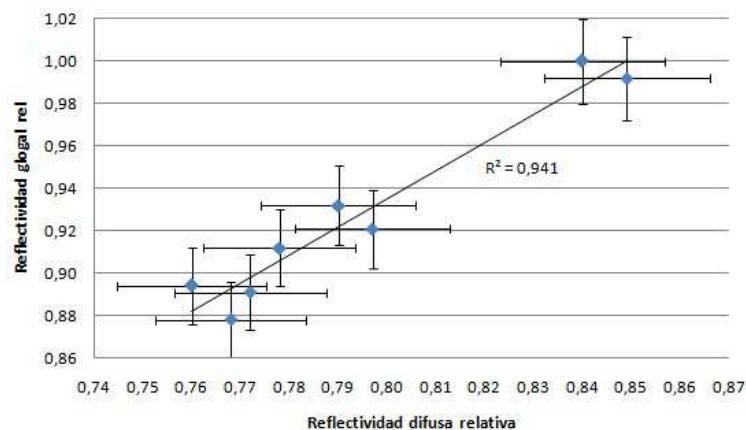


Fig 21. Relación entre láminas reflectividad global relativa y la difusa relativa

Un primer análisis nos muestra que, en general, una mayor componente global de la luz reflejada viene también acompañada por una mayor componente difusa. Por otro lado, hay láminas traseras con reflectividades globales similares, pero con distinta componente difusa.

De acuerdo con lo comentado en apartados anteriores, una mayor componente difusa de la luz reflejada permitirá un mayor reaprovechamiento de la luz incidente sobre la lámina trasera fotovoltaica. Así, de este primer análisis se obtiene que las mejores láminas traseras, desde el punto de vista óptico, son las A y D.

Así mismo, para comprobar la fiabilidad de la medida realizada con una fuente de luz puntual con respecto a la obtenida empleando la fuente de luz blanca, en la Fig 22 puede verse que existe una relación lineal.

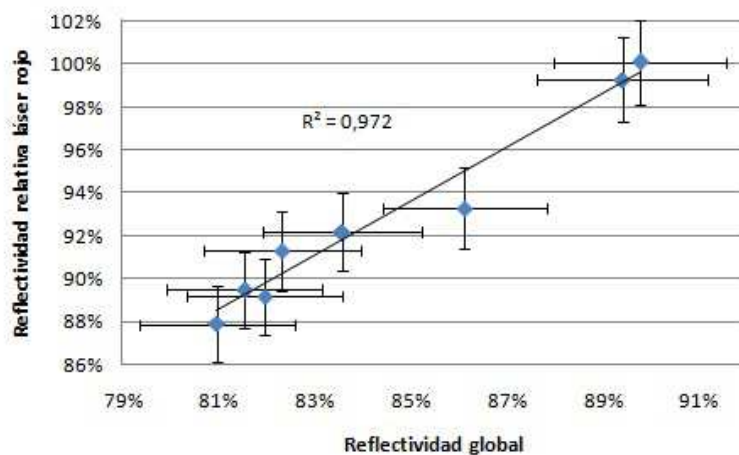


Fig 22. Relación entre la reflectividad global medida con luz blanca y con el láser rojo.

III.3 Medida Angular:

Se ha comentado que con la medida anterior se consigue separar la componente directa de la difusa de la luz reflejada, pero no se conoce cuál es el porcentaje de luz reflejada en función del ángulo de reflexión. En este sentido, para ir un paso más allá, se ha procedido a realizar un estudio de la componente difusa de la luz reflejada por cada lámina trasera FV.

Para llevar a cabo esta medida angular se ha realizado el montaje en el laboratorio, que aparece en las figuras (Fig 23) y (Fig 24). Con él se puede controlar el ángulo de incidencia del láser en la lámina trasera FV, y la posición del receptor unido a una fibra óptica que dirige la luz al espectrofotómetro, el cual la analiza y cuantifica.

El variador angular es fiable y preciso, gracias a un sistema de rotación controlado por ordenador de la casa Thorlabs, cuya una precisión es de 0,01°. Así mismo se incluyó una lente convergente acoplada con la fibra óptica. Con ella se reducen los errores de medida debidos a posibles fallos de alineamiento.

Los valores medidos para cada ángulo permitirán caracterizar la dependencia angular de la luz reflejada en las laminas traseras FV, permitiéndonos cuantificar el porcentaje de luz puede ser reaprovechada por el módulo.

23 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”



Fig 23. Fotografía del sistema de medida angular

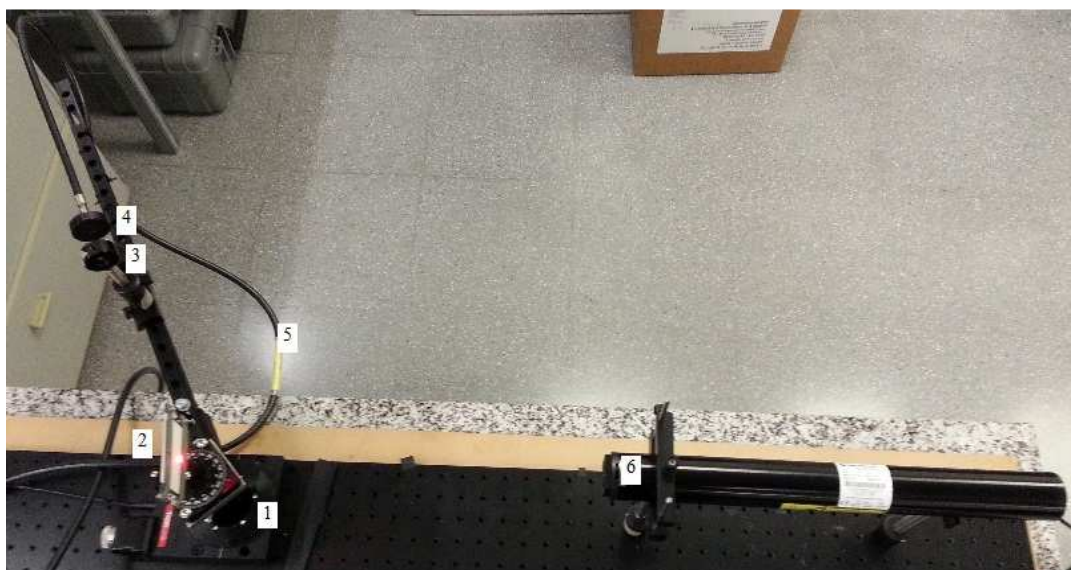


Fig 24. Vista superior del sistema de medida angular. 1- Sistema de rotación, 2- Lámina trasera, 3- Lente convergente, 4- Inicio de la fibra óptica, 5- Fibra óptica hacia el espectrofotómetro y 6- Láser.

Nuevamente se vuelven a seleccionar una serie de láminas traseras fotovoltaicas (T, O, B, G, D, R, M y Q) teniendo en cuenta que posean capas con distintas estructuras así como reflectividades globales variadas.

Con el fin de estudiar la dependencia angular de la lámina trasera en función del ángulo de incidencia de la luz, y teniendo en cuenta limitaciones presentes en el equipo de medida, se establecen los siguientes ángulos de incidencia del laser: 5° (próximo a la incidencia normal) -40° - 60° - 70° (próximo a la incidencia en paralelo con respecto a la lámina trasera FV).

Como se describió anteriormente en la teoría, en el apartado II.7 se describen las propiedades ópticas de la luz, la componente especular se refleja con el mismo ángulo de incidencia. Por lo que para: 5° - 40° - 60° - 70° tendremos la componente especular de la luz reflejada en 10° - 80° - 120° - 140° .

Así mismo dependiendo de las características de la lámina y su reflectividad, la medida angular tendrá una respuesta difusa o Lambertiana como pudo verse en la Fig 7.

Entonces se realizó el estudio de medida angular en las láminas seleccionadas para distintos ángulos de incidencia del láser. De las láminas hay tres que destacan particularmente por su comportamiento angular: la D, O y T. Con los datos captados por el espectrofotómetro se obtiene

una respuesta como las de las figuras: Fig 25, Fig 26 y Fig 27. Todas las gráficas se han normalizado con respecto a la máxima intensidad medida en un espejo de aluminio.

Estas láminas traseras tienen 3 comportamientos diferentes. En el caso de la lámina D, puede verse que la componente especular va ganando importancia a medida que aumentamos el ángulo de incidencia. Así mismo, puede verse la componente difusa acompañada de la especular para cada caso.

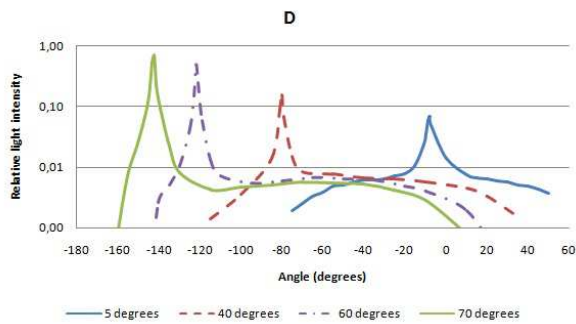


Fig 25. Respuesta angular lámina D

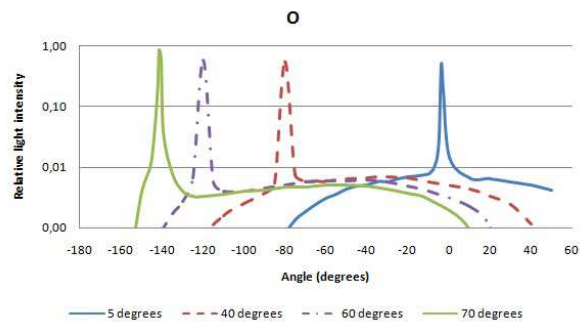


Fig 26. Respuesta angular lámina O

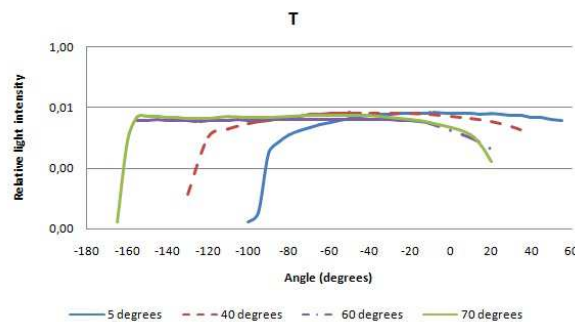


Fig 27. Respuesta angular lámina T

Por otra parte, la lámina O posee una componente especular muy importante para todos los ángulos, superior a la de la lámina D, pero de igual modo esta va aumentando a medida que el ángulo de incidencia del láser aumenta. Puede verse que su componente difusa es menor que en el caso de la lámina D.

Y por último se tiene la lámina T, en la cual se aprecia que su componente especular no tiene más peso que la difusa. También puede verse que para cada ángulo de incidencia, la componente difusa es mucho más importante que para las otras láminas. Indicando así que su reflexión es del tipo Lambertiana.

Representando la respuesta angular de las láminas D, O y T en coordenadas polares se obtienen las figuras: Fig 28, Fig 29 y Fig 30.

25 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

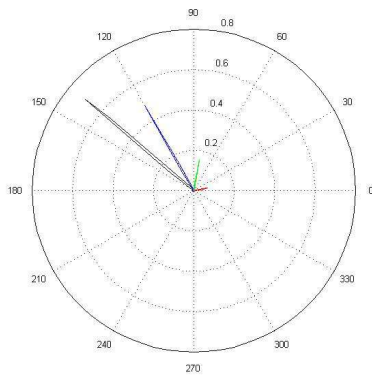


Fig 28. Respuesta angular de la lámina D en coordenadas polares

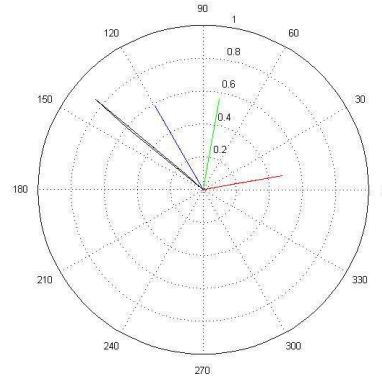


Fig 29. Respuesta angular de la lámina O en coordenadas polares

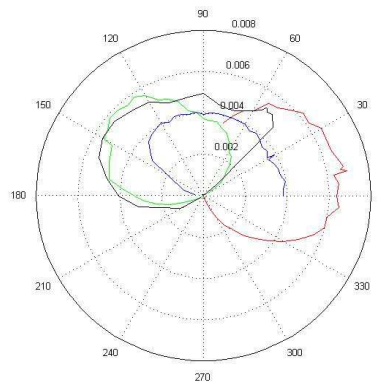


Fig 30. Respuesta angular de la lámina T en coordenadas polares

Particularmente los casos más extremos encontrados en la medida de la respuesta angular son los encontrados en las láminas O y T. Es por ello que se incluyen las siguientes fotografías (Fig 31 y Fig 32), donde se muestra de forma visual cómo varía la reflexión de las láminas traseras en función del ángulo de incidencia del haz láser. Todas se han fotografiado a la misma distancia y sobre la misma superficie de modo que la única variación presente en la luz reflejada sea por el efecto de la lámina.

En primer lugar se aprecia que para la lámina O (Fig 31), la reflectividad es difusa pero no Lambertiana. Puede apreciarse una zona, correspondiente a la componente especular de la luz reflejada, donde la reflectividad es máxima. La cual a medida que aumentamos el ángulo de incidencia aumenta en intensidad.

También puede verse, que alrededor de la zona de la componente especular, se encuentra la componente difusa de la lámina, pasa de un rojo claro hasta uno oscuro. Si se compara esto con las figuras Fig 26 y Fig 29, se aprecia que la componente difusa va perdiendo importancia a medida que la especular la va ganando.

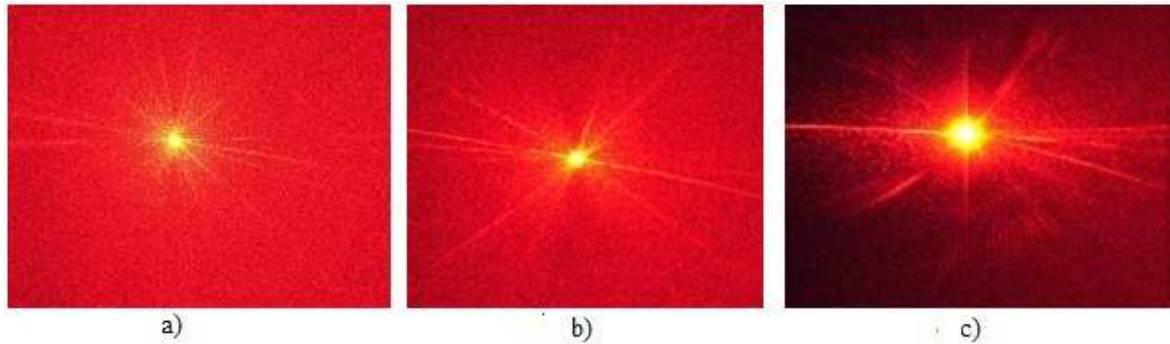


Fig 31. Fotografía reflexión lámina O a distintos ángulos de incidencia, a) es 5°, b) es 40° y c) es 70°

Por otra parte para la lámina T (Fig 32) no presenta un comportamiento como la anterior. En este caso, su reflectividad es Lambertiana, no apreciándose la componente especular en ninguno de los ángulos analizados.

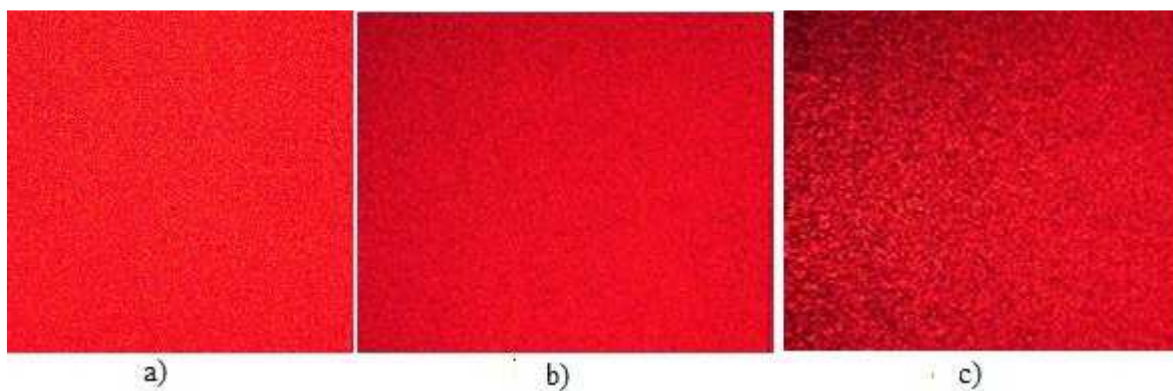


Fig 32. Fotografía reflexión lámina T a distintos ángulos de incidencia, a) es 5°, b) es 40° y c) es 70°

En las figuras (Fig 33 y Fig 34) se ha realizado un análisis de la rugosidad de la superficie de estas láminas traseras fotovoltaicas con un perfilómetro. Tanto la iluminación como el aumento de la cámara son idénticos para ambas figuras. Primero tenemos la lámina O (Fig 33) la cual posee una gran componente especular, en la que puede verse la punta de medida a la izquierda de la figura y su reflejo a la derecha de la figura. Dicha reflexión es casi especular.

Así mismo en la figura (Fig 34) tenemos la imagen obtenida por el perfilómetro de la lámina T, la cual posee una reflectividad muy Lambertiana. Puede observarse que debido a que su reflectividad es menor, también lo es la intensidad de la luz reflejada. De igual manera, el reflejo de la punta de medida se ve muy difuminado. Por otra parte puede verse la rugosidad de la lámina. Dicha rugosidad es la responsable de la alta componente difusa que posee la lámina, y de ahí que su reflectividad sea la más Lambertiana de las láminas estudiadas.

Representando el perfil medio de las láminas, podemos ver en la figura (Fig 35) notablemente la rugosidad presente en la superficie en la lámina trasera T. En cambio, la superficie de la lámina trasera O es casi pulida, excepto a una irregularidad presente entre las posiciones 180 y 200 μm de la distancia lateral, debida a que la punta de medida pasó por encima de una fibra durante su recorrido. Esto nos indica que la rugosidad de la lámina trasera influye sobre la reflectividad,

27 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

definiendo así tanto su reflectividad global como la difusa. Esta rugosidad se obtiene debido a un tratamiento que se le realiza a la lámina durante el proceso de fabricación.

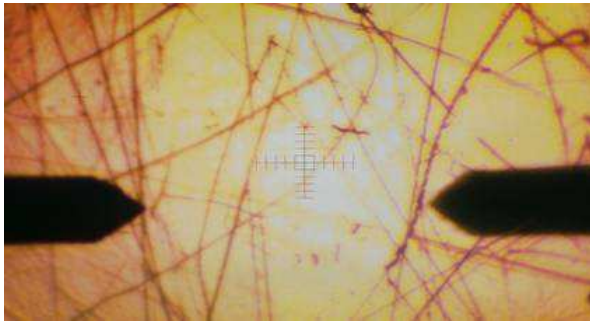


Fig 33. Imagen del perfilómetro lámina O

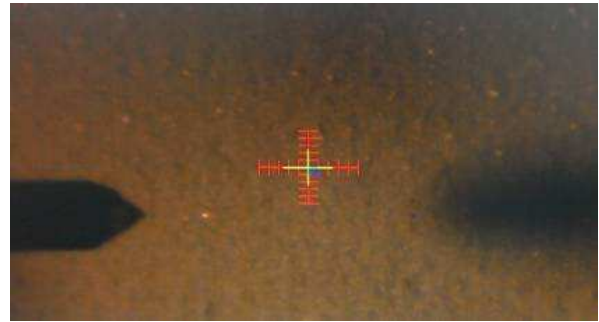


Fig 34. Imagen del perfilómetro lámina T

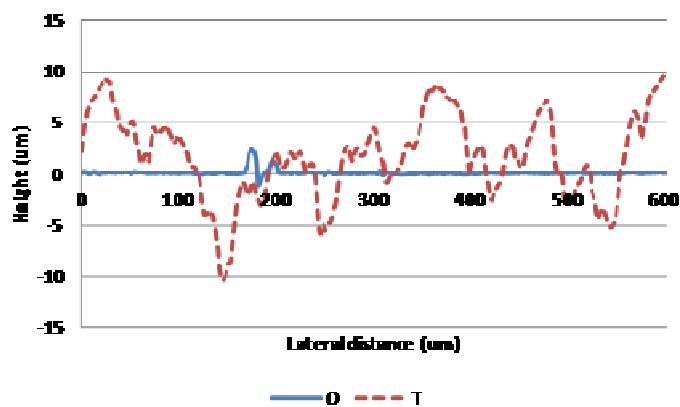


Fig 35. Perfil medio de láminas O y T

Con los datos de la respuesta angular de las láminas (T, O, B, G, D, R, M y Q), se calculó la reflectividad acumulada. Los resultados obtenidos para un ángulo de incidencia de la luz de 5° (incidencia casi normal) se muestran en la figura (Fig 36).

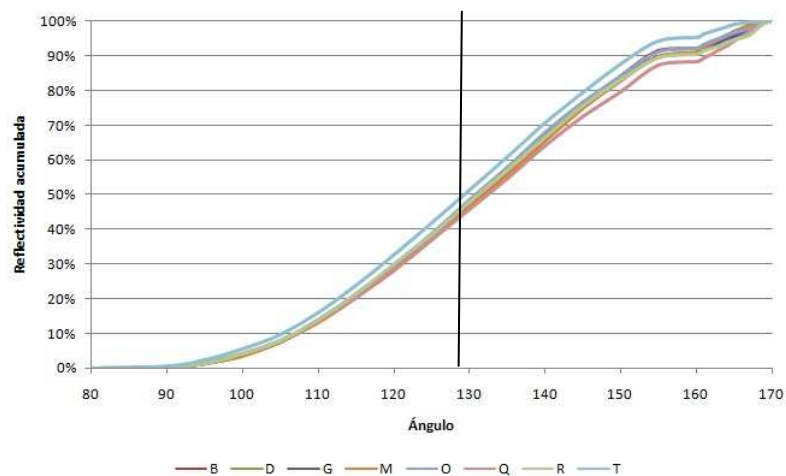


Fig 36 . Reflectividad acumulada para un ángulo de incidencia de la luz de 5°

Para tener RTI se ha de cumplir que el ángulo asociado al haz reflejado ha de ser mayor de 42° con respecto a la normal de la lámina trasera, el cual se ha destacado en la Fig 36 con la línea negra. Así, la Tabla 2 muestra el porcentaje de luz reflejada que es aprovechado para cada lámina trasera seleccionada.

Lámina Trasera	T	O	B	G	D	R	M	Q
Aprovechamiento luz reflejada	49,07%	47,12%	46,87%	46,55%	46,45%	46,37%	46,37%	45,50%

Tabla 2. Porcentaje relativo de luz que puede ser reaprovechada en las láminas traseras seleccionadas ante una incidencia casi normal.

En la Fig 21 se comparó la linealidad de la reflectividad global relativa con la difusa relativa, ahora en la Fig 37 se compara la difusa relativa con el porcentaje de luz aprovechada obtenida con la medida angular. Se aprecia cierta linealidad pero menor que en el caso anterior.

Junto con errores asociados a las medidas, la falta de linealidad se debe a que en la medida realizada con la esfera integradora, se consideraba la componente difusa a partir de 10° con respecto a la componente especular. Dando un valor para toda la luz reflejada a partir de dicho ángulo.

En cambio, con el sistema de medida angular podemos analizar de una forma más precisa el comportamiento de la luz reflejada grado a grado, obteniendo así la respuesta angular exacta del comportamiento de cada lámina según el ángulo de incidencia del láser. En este caso, la falta en la linealidad indica que una mayor reflectividad global no tiene por qué ir siempre acompañada de una mayor reflectividad difusa.

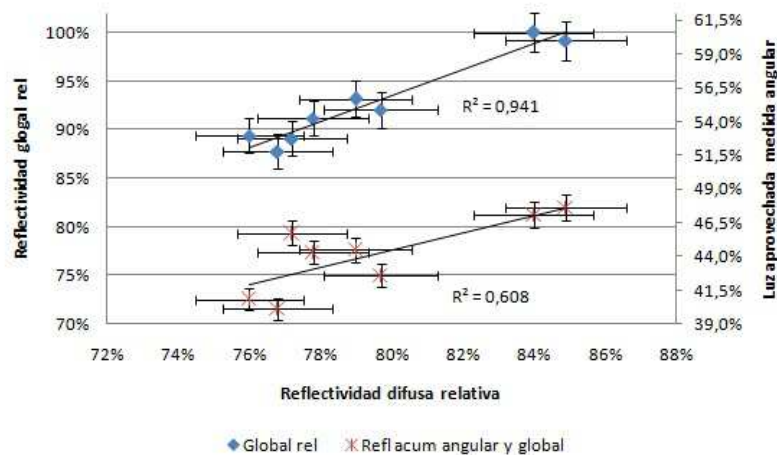


Fig 37. Reflectividad global relativa y Luz aprovechada de acuerdo con la medida angular, comparadas con la reflectividad difusa relativa

Analizando los resultados podemos afirmar que las mejores láminas (que poseen una alta reflectividad y una buena respuesta angular) son la que poseen una capa de EVA blanco dirigida hacia el interior del módulo FV, seguidos por el PTFE, el PVDF y el PRIMER. También hay que

29 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

destacar que las propiedades ópticas de cada lámina trasera FV depende del fabricante, es decir no solo depende del tipo de capas utilizadas sino también del proceso de fabricación.

III.4 Influencia de la lamina trasera en la densidad de corriente de los módulos

Para la medida de este efecto se han considerado las láminas traseras previamente seleccionadas. Para ello se ha tomado en cuenta la los resultados de las medidas de reflexión, transmisión y absorción, así como el estudio de la composición de las láminas y los resultados de la medida angular. Finalmente se han realizado módulos fotovoltaicos con las láminas seleccionadas.

La Tabla 3, muestra los módulos realizados y su lámina trasera en cada caso.

Lámina	M	Q	D	M	B	D	R	G	T	O	R
Módulo	1T	2T	3T	4D	4I	5D	5I	6D	6I	7D	7I

Tabla 3. Módulos fotovoltaicos fabricados

Tal y como se comentó con anterioridad, una mayor reflectividad global en general y difusa en particular dará lugar a que un mayor porcentaje de la luz incidente sobre la lámina trasera pueda ser reaprovechada.

Para esto se realizó la medida de la curva característica del módulo (curva tensión – corriente), utilizando un simulador solar Clase A de la casa Abet Technologies.

Cada módulo fotovoltaico (ilustrado en la Fig 38 y fotografiado en Fig 39) contiene una única célula solar de silicio multicristalino de 156mm de lado, la cual ha sido previamente caracterizada. Para realizar los módulos se seleccionaron células solares con características eléctricas similares.

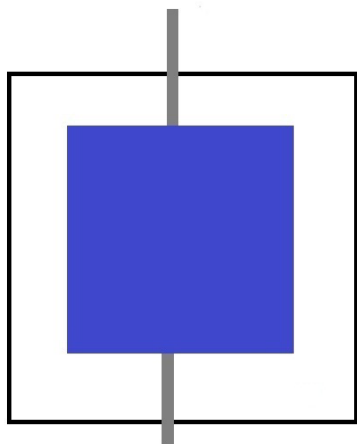


Fig 38. Esquema del Módulo Fotovoltaico

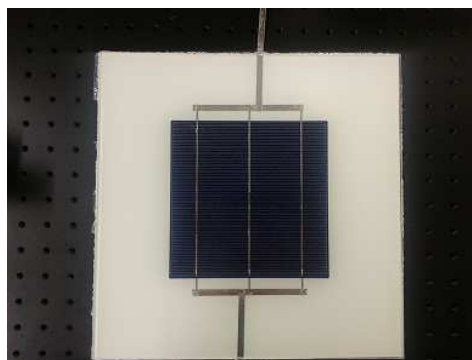


Fig 39. Fotografía del módulo FV

Con las medidas que se realizaron, se conocerá el efecto de la lámina trasera en la densidad de corriente del módulo. Para ello se utilizaron dos máscaras. La máscara 0 (ver figura (Fig 40)) que tiene un cuadrado definido en su centro con un área igual al de la célula solar. Al situarla sobre la misma no dejará ninguna separación entre la célula y la lámina trasera, por lo que la corriente de cortocircuito del módulo será debida a los fotones que llegan de forma directa a célula solar.

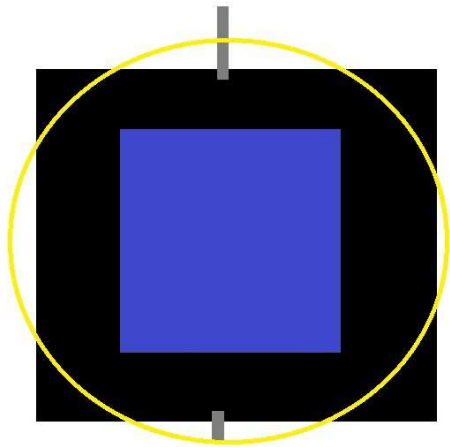


Fig 40. Módulo FV con Máscara 0

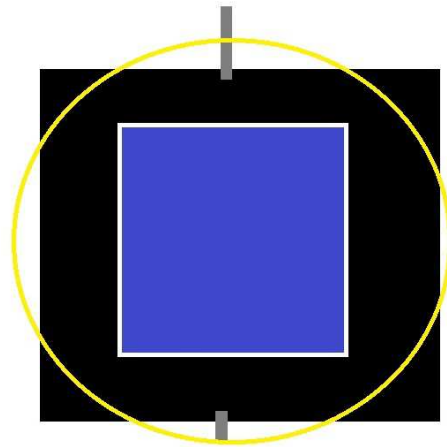


Fig 41. Módulo FV con máscara A

Para conocer el efecto de la lámina trasera sobre la corriente del módulo se procedió a sustituir la máscara 0 por la máscara A (ver figura (Fig 41)), en la cual definió en su centro un cuadrado con un área mayor que la de la célula solar, dejando expuesto 5mm de lámina trasera a cada lado de la misma. Así, la diferencia en la corriente de cortocircuito del módulo medida con la máscara 0 y la A se deberá solo al efecto de la lámina trasera.

En las figuras (Fig 40 y Fig 41) el círculo amarillo representa la zona donde el simulador solar ilumina el módulo.

Utilizando el procedimiento explicado anteriormente, se realizaron al menos tres medidas para cada módulo y en cada caso, se calculó la media y con ella el incremento porcentual en la corriente del módulo por el uso de la máscara A.

En el caso ideal, se admite que toda la luz que llegase a la lámina trasera pudiese reutilizarse para mejorar la corriente de la célula. La superficie de la lámina trasera expuesta a la luz se calcula como el área de la máscara menos el área de la célula, y se denominará $\text{Área}_{\text{masc}_A}$. A partir de esta superficie y de la densidad de corriente de la célula, se calculó la corriente máxima asociada a la lámina trasera utilizando la ecuación (9).

$$I_{\text{max}}(\text{Lámina}) = J_{\text{sc}}(\text{mA/cm}^2) \cdot \text{Área}_{\text{masc}_A} \quad (9)$$

La ecuación (10) muestra cuál es el incremento en la corriente de la célula solar, en tanto por ciento.

$$\delta(\%) = \frac{I_{\text{max}}(\text{Lámina})}{I_{\text{célula}}(\text{mA})} \cdot 100 \quad (10)$$

En condiciones ideales y con independencia de la corriente de la célula solar, el máximo incremento de corriente al utilizar la máscara A es del 6,52%.

En el caso práctico, dicho valor no se alcanza debido a que la reflectividad media de las láminas utilizadas se sitúa por debajo del 90% y a que, como ya se ha adelantado en el estudio de la medida

31 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

angular, no sufren RTI todos fotones incidentes sobre las mismas. La siguiente gráfica (Fig 42), muestra un compendio de los resultados ordenados según su reflectividad global relativa.

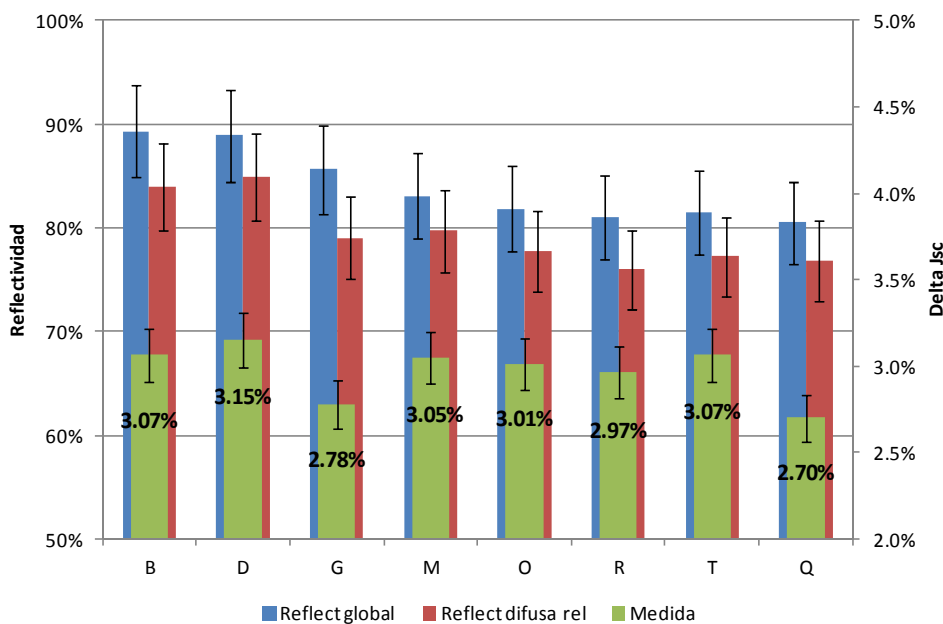


Fig 42. Relación entre la componente global y difusa de las láminas, medidas con la esfera integradora, con el incremento de la corriente en el módulo

Comparando láminas traseras con similares reflectividad global, se puede decir que:

1. B y D: El D posee una reflectividad global ligeramente inferior pero a su vez posee una mayor reflectividad difusa. Por ello, la mejora en la corriente del módulo es mayor.
2. R y T: Es un caso similar al anterior.
3. M y O: El M posee mayor reflectividad tanto global como difusa dando lugar a un mayor incremento en la corriente.

La gráfica anterior resume las medidas y los resultados más importantes. De ella se puede concluir que, solo la reflectividad global no es el único parámetro a considerar para la elección de una lámina trasera, ya que láminas con similares reflectividades globales pero con diferencias en la reflectividad difusa dan como resultado variaciones en la corriente del módulo.

La siguiente figura (Fig 43) muestra la relación encontrada entre la reflectividad global, la reflectividad difusa (ambas medidas utilizando un láser como fuente de luz y el montaje explicado en el apartado III.2), y el porcentaje de luz reutilizada obtenido con el sistema de medida angular (presentado en el apartado III.3), con la variación en la corriente de cortocircuito medida en los mini módulos FV realizados.

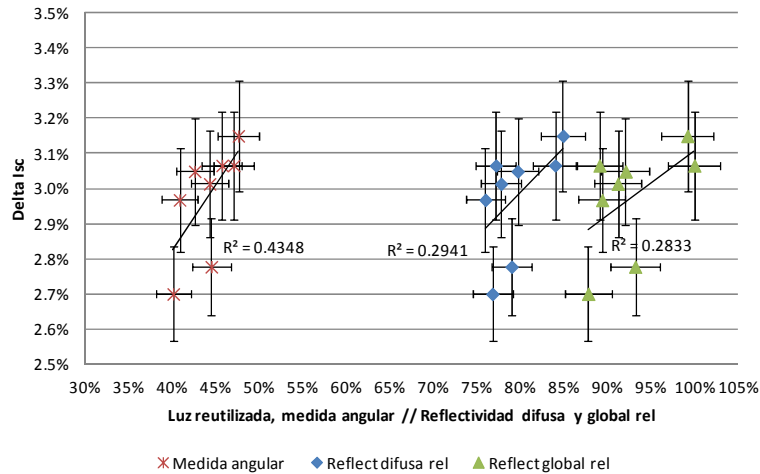


Fig 43. Relación entre la variación de la corriente de corto circuito del módulo y el porcentaje de luz reaprovechada dada por la medida angular, reflectividad difusa y global relativa de las láminas.

Si bien es baja, la linealidad entre la variación de la corriente del módulo y la reflectividad medida con la esfera integradora, o el porcentaje de luz reutilizada obtenido con la medida angular, mejora a medida que utilizamos un método de caracterización más preciso.

Sin considerar los dos módulos con la respuesta más alejada de la esperada, las tendencias quedan del siguiente modo (Fig 44):

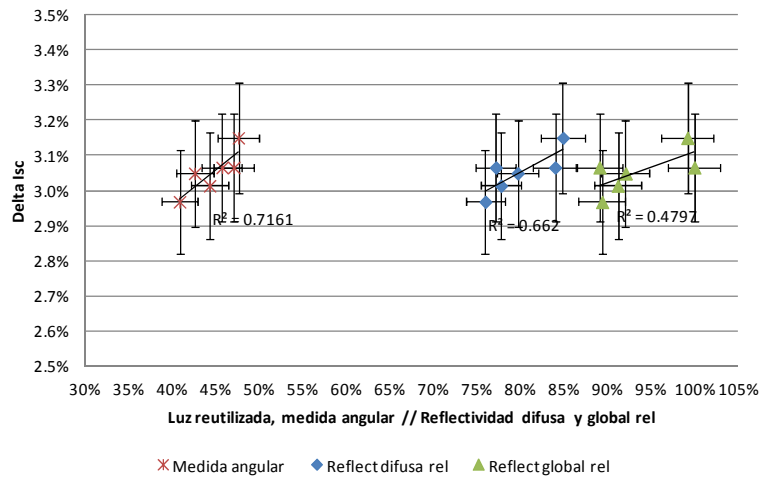


Fig 44. Relación con la variación de la corriente de corto circuito eliminando láminas con respuesta muy distinta a la tendencia global

En este caso, sí que se aprecia una mayor linealidad en las distintas comparaciones realizadas, siendo más notable entre el porcentaje de luz reutilizada obtenido con la medida angular y la variación en la corriente de los mini módulos.

Por otra parte, la (Fig 45) ilustra la relación entre la variación en la corriente medida en los módulos y la esperada desde el punto de vista teórico ecuación(11). Donde se incluyen barras de error del 5% para cada punto medido, asociadas a la desviación estándar de la medida. Salvo excepciones, ambas gráficas poseen una evolución similar.

33 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

$$\Delta I_{sc} = J_{sc} \cdot Reflectividad_{global} \cdot Area_{blanca} \cdot Aprov(\%) \quad (11)$$

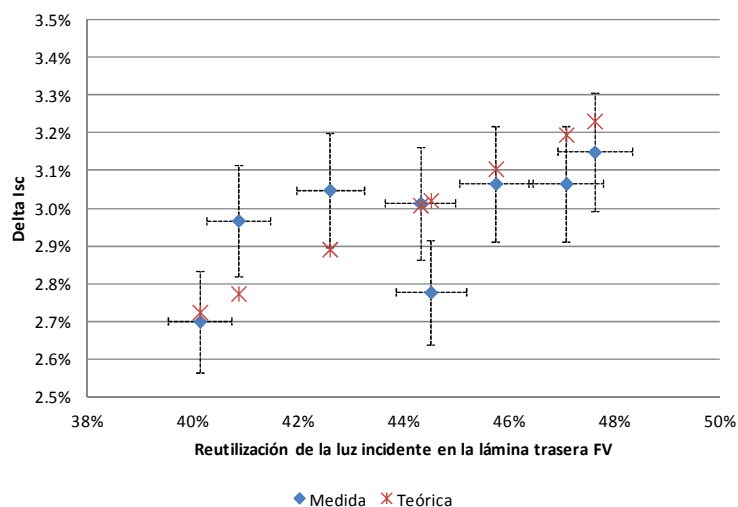


Fig 45. Relación entre la variación en la corriente medida en los módulos y la calculada teóricamente

III.5 Efecto de la lámina trasera en la variación de la potencia esperada en un módulo fotovoltaico estándar

Un módulo fotovoltaico convencional, constituido por 60 células solares de 156mm de lado conectadas en serie, posee en general las características enunciadas en la Tabla 4. Comparando los valores calculados de la variación en corriente debido al cambio de la lámina trasera, el máximo incremento de corriente medido - comparando la lámina con mayor aprovechamiento (Lámina D) con la de menor (LáminaQ)- es de un 0,45%.

Parámetro	Voc (V)	FF (%)	Isc (mA)	P (W)
Valor genérico	38,00	76,0	8830	255,0

Tabla 4. Parámetros genéricos para un módulo fotovoltaico convencional, Voc es la tensión de circuito abierto, FF es el factor de forma, Isc la corriente de cortocircuito y P la potencia

Considerando dicho incremento de corriente en un módulo fotovoltaico convencional, el incremento teórico de potencia será de 1,15W realizando solo el cambio de la lámina trasera fotovoltaica. Este incremento en potencia será tanto mayor a medida que aumente la separación entre las células solares dentro del módulo.

IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A lo largo del presente proyecto se ha realizado un estudio inicial consistente en la caracterización de la reflexión, transmisión y absorción de 33 láminas traseras empleadas a nivel industrial, utilizando un espectrofotómetro y ponderando con el espectro solar AM1.5G. Así mismo se ha llevado a cabo una revisión de las capas que forman cada una de las láminas disponibles.

Entre las láminas seleccionadas se tienen tres grandes grupos según el tipo de capas que poseen: PET, TEDLAR® y KYNAR®. Las de TEDLAR® desde el punto de vista óptico, poseen una menor reflectividad y una mayor absorción. Las de KYNAR® poseen una reflectividad mayor que las de TEDLAR®, una baja absorción pero una alta transmisión. Las de PET de igual modo tienen mayor reflexión que las de TEDLAR®, pero la pérdida de luz por transmisión es aún mayor que las de KYNAR®.

La reducción de la transmisión óptica de las láminas, es propuesta como una futura línea de investigación, permitiendo de este modo mejorar la reflectividad global de la lámina fotovoltaica. También se han estudiado láminas traseras FV que poseen una capa de EVA blanco cara a la célula de silicio. Éstas poseen las reflectividades más altas.

Seguidamente, se seleccionaron un menor conjunto de láminas, teniendo en cuenta los resultados de la caracterización de las láminas y las capas que las forman. Así se seleccionaron diez láminas para realizar un estudio más en profundidad de la componente directa, difusa y global de la luz reflejada laminasen las mismas.

En el estudio de la componente directa, difusa y global, se utilizó la esfera integradora que dispone de un puerto que nos permite separar la componente directa de la global de la reflectividad medida. Se obtuvo como resultado que la componente difusa no es del todo lineal respecto a la componente global, es decir que una lámina con mayor componente global no posee necesariamente una mayor componente difusa.

También se obtuvo que existen láminas con reflectividades globales similares y cuya componente difusa posee diferencias muy significativas, por lo cual se destaca la importancia de incluir la medida de la componente difusa en la caracterización de las láminas traseras fotovoltaicas.

Con estos resultados del estudio de la componente directa, difusa y global nuevamente se volvieron a seleccionar un menor número de láminas (siete) para realizar el siguiente paso de caracterización.

Para la realización de un estudio de medida angular se realizó con un equipo de caracterización el cual permite medir grado a grado la respuesta angular de la luz reflejada por la lámina y así mismo variar el ángulo de incidencia del láser sobre la lámina trasera.

Con esta medida, se apreció que en su mayoría, la reflexión de las láminas traseras es difusa pero no necesariamente Lambertiana. También se hace constar, en las gráficas de medidas

35 “Estudio del efecto de las propiedades ópticas de distintas láminas traseras con el fin de mejorar las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos”

angulares y en fotografías, la presencia de una intensidad máxima asociada a la componente especular, y el resto de la luz reflejada se encuentra en ángulos cercanos a dicho máximo.

En el apartado teórico se ha descrito que existen tres tipos de reflexión: especular, difusa y Lambertiana, las cuales corresponden a superficies como a la de un espejo, una superficie rugosa y una superficie donde su reflexión se rige por la ley del coseno de Lambert.

La medida angular también ha dado información sobre el comportamiento de las láminas a medida que cambia el ángulo de incidencia de la luz sobre la misma. La cual destaca, que su comportamiento varía con el ángulo de incidencia, varía tanto la amplitud del máximo como la componente difusa de la luz reflejada en la lámina.

A medida que aumentamos el ángulo de incidencia sobre la lámina disminuye la componente difusa. De igual modo, a medida que aumenta el ángulo de incidencia de la luz sobre la lámina, aumenta la componente especular respecto a la difusa.

Con toda la información recopilada con la medida angular, se realizó una tabla de valores de aprovechamiento angular de la luz reflejada por la lámina, con la cual se calculo el porcentaje de aprovechamiento de luz. De modo que una lámina con una alta reflectividad global y un mejor aprovechamiento angular, es la candidata óptima a tener una mejor corriente en el módulo.

Se han contrastado las medidas con datos reales en módulos FV. Para ello se fabricaron una serie de módulos formados por una única célula solar. Su comportamiento es similar al de un panel fotovoltaico industrial, solo que sus dimensiones son mucho más reducidas.

A continuación se realizó un estudio de la influencia de la lámina trasera en la corriente del módulo. Las medidas han sido realizadas con un simulador solar y dos máscaras la 0 y la A. La máscara 0, deja expuesto exactamente el área de la célula y la máscara A deja expuesta la célula y también una superficie determinada de la lámina trasera FV.

Para calcular el incremento de corriente por el efecto de las máscaras se contrastaron las medidas realizadas con dos máscaras. Una de las cuales posee una apertura con un área igual al de la célula solar, mientras que la otra posee una apertura con un área mayor que la misma. De modo que el incremento en la corriente del módulo al usar una máscara u otra, se deberá únicamente a la interacción de la lámina con la célula.

En la práctica se ha obtenido que, en general, que una mayor reflectividad global implica también una mayor reflectividad difusa. Pero no hay una linealidad, lo cual indica que solo caracterizar una lámina por su reflectividad global no es suficiente.

Considerando la medida de reflectividad global, como orientativa para la elección de una lámina trasera, es necesario incluir la componente difusa. Ya que, al no dar una medida de la componente difusa, una alta reflectividad puede deberse más a la componente especular que a la difusa, siendo esta última la más importante en el reaprovechamiento de la luz.

Por otra parte con los resultados obtenidos, queda claro que una mayor componente difusa, repercute en una mayor corriente del módulo FV.

Los resultados nos indican que láminas con reflectividad global similar pero con diferencias en la componente difusa, el módulo FV cuya lámina tiene una mayor componente difusa posee una mayor corriente.

Hay que destacar que en la elección de la lámina trasera no solo es importante considerar su reflectividad, y el tipo de capas que la forman. También es muy importante el proceso de fabricación, por lo que la elección del fabricante es un aspecto crítico. En este sentido, se han analizado láminas con la misma estructura de capas, pero con diferencias en su reflectividad global de hasta un 8.81%.

V. ANALISIS DE COSTES

Es importante realizar un análisis de costes asociado al uso de una u otra lámina trasera FV, ya que es una de las principales limitaciones por las que se ve afectado el sector de las energías renovables. En la siguiente tabla (Tabla 5) se realiza un análisis de coste de un módulo considerando dos láminas traseras distintas.

	Superficie (m ²) [12]	Precio (€/Wp) [13]	Potencia del módulo (W)	Precio del módulo (€)	Precio m ² (€/m ²)	Precio de la lámina (€/m ²) ¹	Mejora debido a la lámina (%)
Lámina 1	1,62	0,70	255,00	178,50	110,18	3,50	0,0
Lámina 2	1,62	0,70	256,14	179,31	110,68	4,00	0,45

Tabla 5. Análisis de costes.

¹ Valor estándar suministrado por uno de los proveedores de láminas traseras analizadas

Inmediatamente puede apreciarse, que incluso aumentando en un 14% el precio de la lámina trasera, el incremento en potencia del módulo hace que el precio del vatio pico sea igual. Además, utilizando una lámina con una mejor respuesta óptica el incremento comentado en la potencia equivale a un aumento del 0,45% en la eficiencia relativa del módulo (0,1% absoluto).

VI. CONCLUSIONES

El presente proyecto muestra la importancia de la lámina trasera FV con el fin de incrementar la potencia del módulo fotovoltaico. El origen de este estudio se tiene en la diferencia de potencia encontrada en dos módulos realizados con láminas traseras con reflectividades globales similares. Este resultado ha sido presentado en el Congreso SNEC 2014 (8th International Photovoltaic Power Generation Conference & Exhibition, Shanghai).

Tratando de relacionar la reflectividad global de la lámina trasera fotovoltaica con el incremento en la corriente presente en el módulo FV debido a la misma, surge la necesidad de dar un paso más en su caracterización.

Por ello se propuso en este proyecto incluir la medida de la dependencia angular de la luz reflejada por la lámina trasera, con la elaboración de un sistema para la medición del patrón de reflexión de la lámina, con el cual se calculó la componente especular y difusa.

Ha quedado demostrado que, junto con la reflectividad global, existe otro término del cual depende de forma directa la variación en la corriente del módulo debido a la lámina trasera fotovoltaica: la reflectividad difusa. Una mayor reflectividad difusa implica un mayor reaprovechamiento de los fotones incidentes sobre la lámina trasera FV.

Teniendo en cuenta que en la actualidad se alcanzan potencias de 255W en módulos fotovoltaicos estándares realizados con células solares de silicio multicristalino, y atendiendo a las láminas traseras analizadas, la elección de láminas traseras con reflectividades globales similares pero con distinta componente difusa de la luz reflejada, puede llevar a una diferencia en la potencia de un 0,45%. Esto equivale a un incremento en la potencia de 1,15W y una mejora de eficiencia absoluta del 0,1%, sin afectar o incluso con la posibilidad de reducir el precio del vatio pico del módulo fotovoltaico. Un aspecto muy importante que se ha de destacar, es que esta mejora en la potencia del módulo por el cambio de la lámina trasera, no representa ninguna variación en su proceso de fabricación.

VII. AGRADECIMIENTOS

Primero que nada agradezco al personal del Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia, por permitirme realizar mi tesis de máster en su establecimiento. También he de agradecer a mi tutor Salvador Ponce Alcántara, quien me ha enseñado una pequeña pincelada de la vida de un investigador y ha dedicado innumerables horas para ayudarme a realizar este proyecto.

Segundo y no menos importantes a mi amor Montse y a mi Madre, solo puedo decir que no habría podido llegar a donde he llegado, no sería quien soy y no tendría las metas a las que quiero llegar de no ser por ellas.

Tercero a mi familia. En la que algunos aun estando a miles de kilómetros, solo pudiendo comunicarnos por internet y otros que solo los veo los fines de semana. Se ocupan y preocupan por mi bienestar.

Cuarto y último, a mis amigos y conocidos. Cada uno aporta su grano de arena, más o menos pero es necesario agradecerlo.

VIII. ANEXOS

Optical characterization of backsheets to improve the power of photovoltaic modules

S. Ponce-Alcántara^{1,a}, A. Vivas^{2,b} and G. Sánchez^{3,c}

¹Senior PV Researcher, Valencia Nanophotonics Technology Center, Camino de Vera s/n, Building 8F, Valencia – Spain

²Master’s Degree Student, Valencia Nanophotonics Technology Center, Camino de Vera s/n, Building 8F, Valencia - Spain

³Technology Director, Valencia Nanophotonics Technology Center, Camino de Vera s/n, Building 8F, Valencia - Spain

^asalponce@ntc.upv.es, ^balviar@postgrado.upv.es, ^cgsanchez@ntc.upv.es

Abstract: On the photovoltaic module fabrication, the choice of one or other backsheet has a great importance in order to ensure its lifetime for 25 years or even for longer periods of time. It has the function of protect the solar cells, the encapsulant and the metallic contacts against ultraviolet radiation, water vapor and moistures. Besides, it has to provide a durable adhesion with the encapsulant, thermal and dimensional stability and electrical isolation. In the way to increase the efficiency of the photovoltaic solar modules and to reduce its price per Wp, the global reflectance of the backsheet takes importance. In this sense, a higher reflectance can allows to a better reuse of the incident sunlight. But that affirmation is not always true. An experimental analysis shows that there is another topic to take in account in order to choose the best backsheet: the angular dependence of reflected light. Different backsheets with TEDLAR[®], KYNAR[®] and PET layers from different suppliers have been analyzed. This study demonstrate than, for backsheets with similar global reflectance, the angular response of the backsheet is responsible for up to 0.7% of variation on the short circuit current of a photovoltaic (PV) module.

Keywords: Backsheet, PV module, reflectivity, angular dependence, light trapping.

Topic: Quality Assurance and Characterization.

Bibliography: Dr. S. Ponce-Alcántara: Electronic Engineer and Doctor in Photovoltaic Solar Energy. Expert on the optimization of fabrication processes steps of high efficiency crystalline silicon solar cells and photovoltaic modules in laboratories and at industrial level. Mr. A. Vivas: Electronic Engineer. Experience in assembling and programming solar cell’s characterization tools. Mr. G. Sánchez: Physics. Technology Director at Valencia Nanophotonics Technology Center. High experience in optical analysis and characterization of photonics and photovoltaic devices.

Explanatory pages

1 Introduction

Nowadays, the vast majority of crystalline silicon PV modules are formed by a transparent front side cover, which receives the sun light; some interconnected solar cells, which produces the electricity when the light shines on them; a backsheet, to protect the solar module and the encapsulating materials, and to provide electrical isolation. Solar cells are embedded in an encapsulant, mainly ethylene-vinil acetate (EVA) or silicone, which provides a high optical transparency over the solar spectrum, good adhesion, and excellent moisture and mechanical protection. Finally, the PV module has a connection box on its back side, and a frame, which confer stability and torsional stiffness.

When a ray of light falls to a PV module, it can be reflected, absorbed or transmitted in any of its components. McIntosh et al. and Jaus et al. exposed that, according to Fig. 1, incident ray of lights can be absorbed in the glass (2), the encapsulant (4), the solar cell (5),

and the backsheet (7). Besides, incident rays reflect from the air-glass (1), glass-encapsulant (3), encapsulant-solar cell (6), encapsulant-backsheet (8) interfaces and from the front side metallization of the solar cell. Mainly in the case of the backsheet, the reflection is often diffuse, leading to a reuse of some of the reflected light due to a total internal reflection at the glass-air interface [14,15]. Finally, depending on the thickness of the backsheet, some light can be transmitted and escape from the PV module.

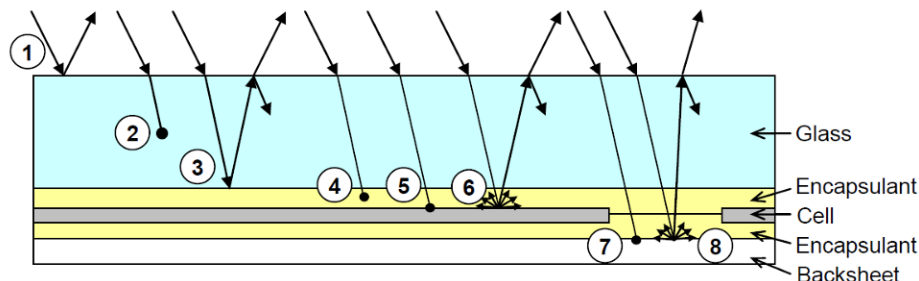


Fig. 1: Cross sectional diagram of a conventional PV module (to scale), and optical loss mechanisms [14].

Related to the backsheet, different colors can be chosen depending on the place where the PV module is going to be installed. In general, in order to make a better use of the light falling on them and due to its higher reflectance, the PV backsheet have a white color.

According to the layers that form the backsheet, the market offers three different possibilities:

- Double fluoropolymer: It has mainly the outer layers of TEDLAR[®] or KYNAR[®], and a core layer of PET. The molecular structure of fluoropolymers is based on a chain of carbon atoms completely surrounded by fluorine atoms. Those ones are responsible of a better protection of the atoms chains presented on the layer [16]. Related to the price, those kinds of backsheets are the most expensive ones.
- Single fluoropolymer: A way to reduce the cost of the backsheet keeping a good behavior and durability is to reduce the number of fluoropolymer layers from two to one. In this case, the layer structure is formed mainly for TEDLAR[®] or KYNAR[®] on the air side, and PET and Primer or EVA layers on the inner one.
- Non fluoropolymer: It is made mainly by two PET and one Primer or EVA layers. It is the cheapest option. In the past it was not consider due to a possible degradation under UV exposure or hydrolysis over long time spans [17]. On the other hand, significant advances in polyester chemistry and production engineering have allowed the development of highly UV durable polyester films.

Attending to those possibilities, a study of the optical performance of different white backsheets from each type and its influence on the short circuit current of a PV module is going to be presented.

2 Reflectance components of a backsheet

The majority of the incident light on a white backsheet is globally reflected. That global reflectance has two components: specular and diffused. In order to reuse a large amount of the light which falls on the backsheet, the diffuse component takes relevance. In this sense, the angular dependence of the backsheet has a great importance on the percentage of the reflected light that can be reused for the solar cell.

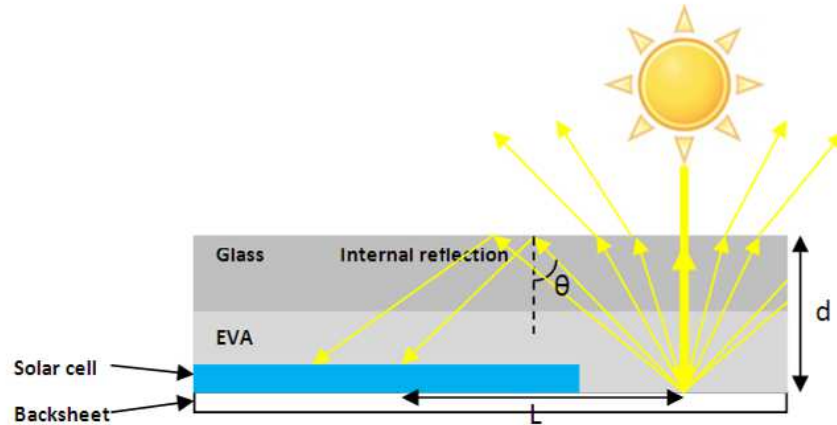


Fig. 2: Cross section diagram of a conventional PV module.

According to Fig. 2, for a ray of light which falls perpendicular to the PV module and taking in account the refractive index of the encapsulant, the glass and the air, the Snell's law shows that the critical angle to achieve the total internal reflection is giving by:

$$\theta = \arcsin [n_{\text{air}} / n_{\text{glass-EVA}}]. \quad (1)$$

For a glass with a refractive index of 1.5, the internal reflectance angle θ at the glass-environment interface must be higher than 42° to redirect a ray of light to a solar cell. For lower angles, the light will escape from the PV module and does not contribute to increase the current of the solar cells.

If d is the glass + encapsulant thicknesses, the length L traveled by the diffused light inside the module is:

$$L = 2 \times d \times \text{tg} (\theta). \quad (2)$$

Taking as origin the point where the light falls on the white backsheet of a PV module, the reflected light has the following behavior:

1. According to Eq. 2 and as it is presented in Fig. 2, there is a first circle of light associated to the incident photons. Those ones will be reflected and escape from the PV module until a circle of radius $L/2$. Its intensity is the highest at the center (specular component), decreasing as it moves away.
2. Besides, due to the total internal reflection of a ray of light which strikes the interface between the glass and the air with an angle higher than 42° , the reflected light will fall again to the back side of the PV module (the solar cell or the backsheet), defining a new circle of radius L . The intensity of light decreases with increasing the distance from the center of the circle.
3. No light is expected between both circles.

Fig. 3 exposes this behavior on a PV module. A green laser has been used as a punctual source of light.

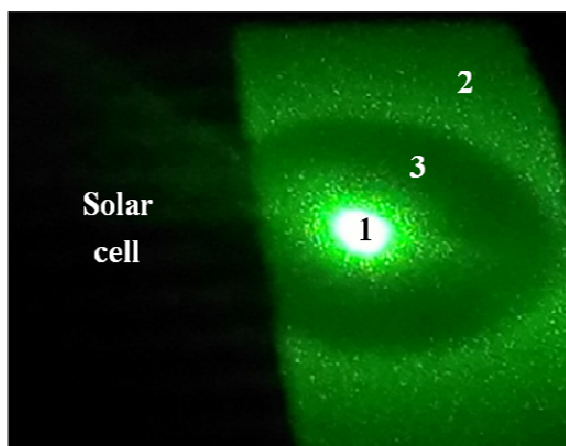


Fig. 3: Photography of the light reflectance response on a PV module.

The highest or lower intensity of the reflected light in each region depends on both the global reflectance and the angular dependence of the backsheets. Because of that, it has a great importance on the percentage of the reflected light that can be reused for the solar cell.

3 Experimental results

The optical performance of seven different TEDLAR[®], KYNAR[®] and PET photovoltaic white backsheets from different suppliers is going to be studied. Their main features are shown in Table 1.

Reference	Structure	Total Thickness (μm)	Characteristics
A	PET/Al/PET/Primer	370	Al extra moisture barrier
B	PET/PET/Primer-1	365	Extra PET thickness
C	PET/PET/Primer-2	300	PET films
D	PET/PET/Primer-3	275	PET films
E	PVDF/PET/Primer	310	KYNAR/Primer
F	PVDF/PET/PVDF	315	KYNAR films
G	PVF/PET/PVF	325	TEDLAR films

Table 1: Main characteristics of the backsheets studied.

The objective is to check and compare the optical characteristics of double fluoropolymer, single fluoropolymer and non fluoropolymer backsheets, taking in account its influence in the photocurrent of a PV solar module.

Optical measurements have been carried out using a spectrophotometer SpecWin Light CAS 140CT and a 150 mm integrating sphere from Instruments Systems. The characterization of the PV solar mini modules made with those backsheets has been done with a class A solar simulator from Abet Technologies.

High efficiency monocrystalline silicon solar cells with similar electrical parameters have been used to study the impact of the backsheet reflectance on the short circuit current. PV mini modules have been made up with one solar cell. The same low iron PV glass and encapsulant have been always utilized. Three measurements have been done in each case. The average short circuit currents and its variation against the average reflectance between 400 and 1100 nm are presented in Fig. 4.

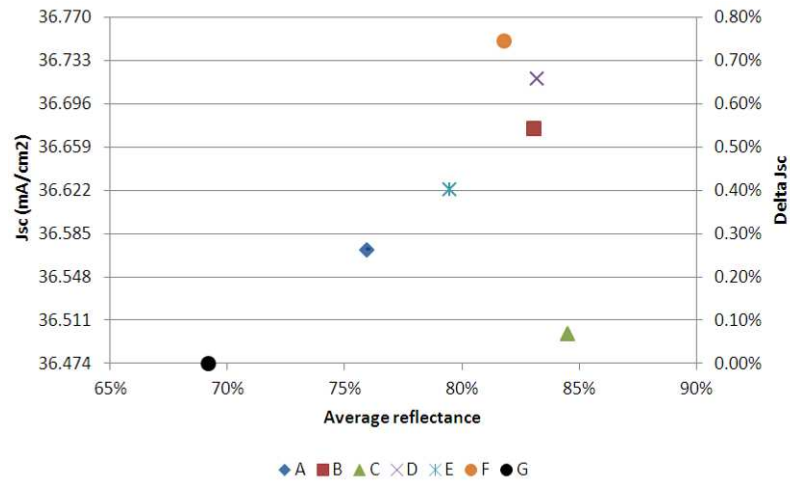


Fig. 4: Relationship between the average global reflectance of the backsheet and the short circuit current of the PV mini module.

According to those results, and regardless of the use of fluoropolymer or no fluoropolymer based backsheets, in general the relationship between the average reflectance and the short circuit current is almost lineal. Then, backsheets with higher reflectances are necessary to improve the power of a PV module. A similar tendency has been shown by other researches [18]. With those results in mind, comparing the analyzed backsheets with the highest and the lowest global reflectance, an increase of 0.75% absolute on the power can be achieved. Extrapolated to a standard PV module, the power shifts from 255.00 W to 256.93 W.

But on the other hand, in our study it has been found one backsheet where that behavior has not been so. In this sense, the module with the backsheet with the highest global reflectance (the C one) has one of the lowest short circuit currents. The variation measured on the short circuit current is up to 0.7%. Assuming no changes on the open circuit voltage and on the fill factor of a PV module, that variation supposes a power increases from 255.00 W to 256.75 W.

To give an explanation of that behavior, a study of the angular dependence of the light reflected on the backsheet is presented below.

3.1 Angular dependence of different backsheets

Two PET based backsheets with similar average global reflectances but with a notable difference on the short circuit current measured on test mini modules have been selected for this study: the C and the D ones.

Based on Thorlabs’ optics components, an angular measurement set up has been performed to determine the angular dependence of the light reflected on those backsheets. In order to analyze the specular reflectance, the backsheets have been rotated 5° respect to the ray of light. Fig. 5 shows a schema of the set up used.

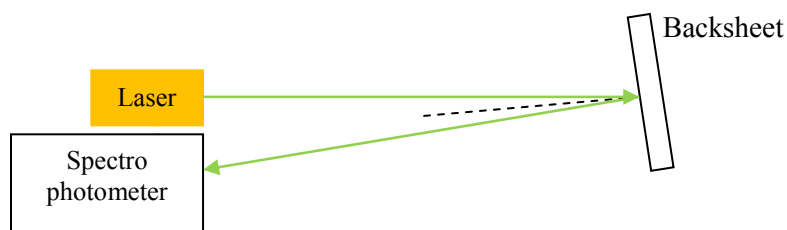


Fig. 5: Set up used to measure the angular dependence of the backsheets.

The laser has been positioned at 180° . Then, the specular reflectance of the backsheet is found at 170° . To obtain the angular dependence, both the laser and the backsheet have been kept in constant positions. The spectrometer has been turned from 170° to 90° using a Thorlab’s NanoRotator 360° rotation stage and the APT precision motion controller.

A dual wavelength laser with emissions at 530 nm and at 810 nm has been selected for this study. The reason for choosing this laser is that the backsheet’s maximum reflectance is close to 530 nm, whereas depending on the backsheet’s based layers, there is a notable reduction on the reflectance at 810 nm. Besides, according to the EQE of a standard silicon solar cell, both wavelengths have a great contribution in its short circuit current. Fig. 6 shows the angular dependence on backsheets C and D.

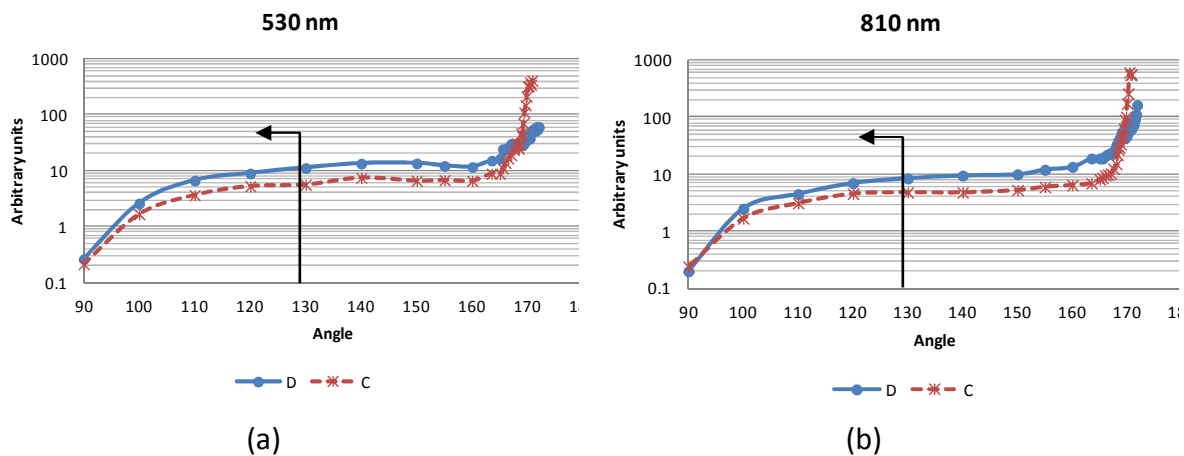


Fig. 6: Angular dependence on two PET based backsheets at two different wavelengths. According to Eq. 1, arrows indicate the photons that can be reused.

In accordance with Fig. 6, there is a clear difference between the backsheet C and D on their angular responses. For backsheet C, the specular component has a great importance against the diffused one. On the other hand, for backsheet D the diffused response has a higher magnitude. Besides, a similar angular tendency has been found for both wavelengths studied. Because of that, it is conceivable that the diffuse component of the reflected light is higher for all wavelengths on backsheet D. The higher diffused component justifies the variation found between the current of the PV modules.

4 Summary

A study of the optical features and its relationship with the short circuit current of PV mini modules done with four non fluoropolymer (three different PET/PET/Primer and one PET/Al/PET/Primer), one single fluoropolymer (KYNAR[®]/PET/Primer) and two double fluoropolymer (KYNAR[®]/PET/KYNAR[®] and TEDLAR[®]/PET/TEDLAR[®]) based backsheets has been presented.

It has been shown that in general and regardless of the use of fluoropolymer or no fluoropolymer based backsheets, the relationship between the reflectance and the short circuit current of a PV mini module is almost lineal. But it has been found one PET based backsheet that does not follow this trend. To give an explanation of that behavior, a characterization of the angular dependence of the reflected light demonstrated that despite

having a high reflectivity, if the value of the specular component respect to the diffused reflectance increases, the current of the PV module will decrease. Because of that, in order to have a better correlation between the backsheets used and the short circuit current expected on a PV module, it is important to consider not only the global reflectance of the backsheets, but their angular dependence of the reflected light.

In our study, the highest currents have been obtained on the PV modules with KYNAR[®] and PET based backsheets. Comparing the backsheets with the highest and the lowest global reflectance, a variation of 0.75% on the short circuit current has been found. Besides, taking in account the average reflectivity of the backsheets, the angular response of the reflected light is responsible of a difference up to 0.7% on the short circuit current. That variation is equivalent to an increase of 1.75W in a PV module of 255 W.

Because of that, it has been demonstrated that despite if the global reflectance is high, if the diffused component of the light reflected on the backsheet has a low importance, there is a decrease on the percentage of light that can be reuse. Consequently, the short circuit current of the PV module will be lower.

References

- [1] K. McIntosh, J. Cotsell, J. Cumpstom, A. Norris, N. Powell and B. Ketola: *An optical comparison of silicone and EVA encapsulants for conventional PV modules: a ray-tracing study*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (2009).
- [1] J. Jaus, M. Duell, J. Eckert, F. Adurodija, B. Li, R. Mickiewicz, D. Doble: *Approaches to improving energy yield from PV modules*, Proc. SPIE 7773, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems III, 77730S (2010).
- [¹] D. Richard: *The right chemistry*, Photon International, August 2011.
- [¹] M. Schmela and D. Richard: *Quo vadis encapsulation?*, Photon International, August 2012.
- [1] M. Temchenko: *Current trends in backsheet evolution*, 2nd Polymer Apps in PV Conference (2012).

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Michael Barker, <http://www.solarbuzz.com/resources/blog/2013/03/reaching-new-heights-cumulative-pv-demand-to-double-again-by-2015>
- [2] Intersolar North America, *Approaches to Energy Yield Improvement in PV Modules*. San Francisco, USA, 2010, pp. 3.
- [3] S. Ponce-Alcántara, A. Vivas and G. Sánchez, *Optical characterization of backsheets to improve the power of photovoltaic modules*. Shangahi 2014, ch. 3.
- [4] A. El Amrani, A. Mahrane, F. Y. Moussa and Y. boukennous, *Solar Module Fabrication*, Algeria 2007
- [5] Krempel Group, <http://www.krempel-group.com/spanisch/home/productos/films-y-papeles-especiales/tedlarpvfilms0.html>
- [6] RESINEX, Distribution of Plastics & Elastomers, <http://www.resinex.es/productos/kynar.html>
- [7] Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [8] Portobella Ixtebe, *Proceso de creación de una planta fotovoltaica conectada a la red*, ETSETB, Sep 2010
- [9] Alma F Taylor, *Illumination Fundamentals*, Polytechnic Institute 2000
- [10] K. McIntosh, J. Cotsell, J. Cumpstom, A. Norris, N. Powell and B. Ketola, *An optical comparison of silicone and EVA encapsulants for conventional PV modules: a ray-tracing study*, Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2009.
- [11] JDS Uniphase, http://www.utwente.nl/tnw/onderwijs/practica_tnw/doc/apparatuur/lasers/helium_neon_laserheads_1100s.pdf
- [12] Jinko Solar, <http://www.jinkosolar.com/>
- [13] PVinsights, <http://pvinsights.com/ES/>
- [14] K. McIntosh, J. Cotsell, J. Cumpstom, A. Norris, N. Powell and B. Ketola: *An optical comparison of silicone and EVA encapsulants for conventional PV modules: a ray-tracing study*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (2009).
- [15] J. Jaus, M. Duell, J. Eckert, F. Adurodija, B. Li, R. Mickiewicz, D. Doble: *Approaches to improving energy yield from PV modules*, Proc. SPIE 7773, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems III, 77730S (2010).
- [16] D. Richard: *The right chemistry*, Photon International, August 2011.
- [17] M. Schmela and D. Richard: *Quo vadis encapsulation?*, Photon International, August 2012.
- [18] M. Temchenko: *Current trends in backsheet evolution*, 2nd Polymer Apps in PV Conference (2012).