



## CARACTERIZACIÓN DEL EVA DE MÓDULOS FV POR COMPARACIÓN CON FILTROS PLÁSTICOS

M. T. Montero<sup>1</sup>, G. Fernández<sup>2</sup>, R. Echazú<sup>2</sup>, C. Cadena<sup>1</sup>

Facultad de Ciencias Exactas – INENCO - CIUNSA<sup>2</sup>

Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150. Salta. Argentina

++54 387 4255424 - e-mail: marite@unsa.edu.ar

**RESUMEN** En un trabajo anterior se presentó el estudio del daño sufrido en los módulos fotovoltaicos después de varios años de exposición a la intemperie, donde se relaciona la pérdida de potencia con la degradación del encapsulante. En este trabajo se muestran algunos resultados obtenidos de la caracterización del material transparente constituido por varias capas de material encapsulante a base de geles de siliconas (etileno vinilo acetileno, EVA), por comparación con la disminución de la trasmittancia provocada por el agregado de filtros plásticos. Se busca también la caracterización del polvo acumulado sobre la superficie del panel. Se concluye que la pérdida de potencia por la degradación de este material no es despreciable.

**PALABRAS CLAVE:** fotovoltaico, degradación, EVA, pérdida de potencia, respuesta espectral

### INTRODUCCIÓN

No todos los fotones se comportan del mismo modo en la producción de electricidad por el efecto fotovoltaico, algunas frecuencias son más apropiadas que otras para producir el efecto, de acuerdo a los materiales semiconductores utilizados, por lo que la **respuesta espectral** es una medida de la eficiencia con que un determinado dispositivo fotovoltaico produce la conversión de energía luminosa en energía eléctrica para una determinada frecuencia de la radiación incidente. La respuesta espectral de un panel es la corriente de corto circuito por unidad de potencia radiante recibida en cada longitud de onda; así, la corriente de cortocircuito puede ser calculada como la integral de la respuesta espectral por la densidad espectral de la radiación incidente como funciones de la longitud de onda

En una célula de silicio monocristalino típica dicha eficiencia de conversión sólo es significativa para longitudes de onda comprendidas entre 350 y 1100 nanómetros, con un máximo en alrededor de los 800 nanómetros. Como la radiación solar que llega a la tierra está formada por una mezcla de fotones de frecuencias diferentes, la eficiencia de conversión será la conjunción de la respuesta espectral para cada frecuencia, obteniéndose un resultado global para cada material utilizado. Es así que la corriente generada por un dispositivo fotovoltaico está influenciada por la distribución espectral de la luz solar, la cual varía, ligeramente durante el día, siendo en las primeras horas de la mañana más rojiza y en las últimas horas del día más azulada.

Por otra parte, es sabido que los módulos FV no generan toda la potencia que podría esperarse, puesto que existen factores predominantes que disminuyen su eficiencia entre los que se encuentran:

- 1.- Pérdidas por reflexión en la superficie
- 2.- Absorción incompleta del espectro solar.
- 3.- Utilización en forma parcial de la energía
- 4.- Recolección incompleta de los pares electrón-hueco
5. El *factor de forma*
- 6.- Degradaciones adicionales resultantes de la existencia de la resistencia intrínseca serie y paralelo, efectos de superficie, camino óptico con trasmittancia menor que la unidad, entre otras.

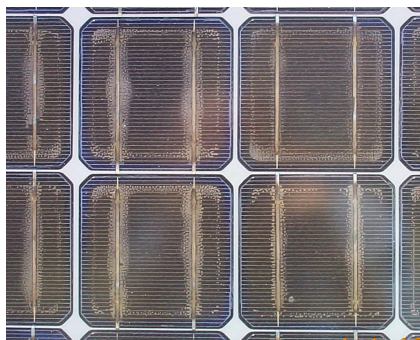


Figura 1: fotografía de un módulo dañado

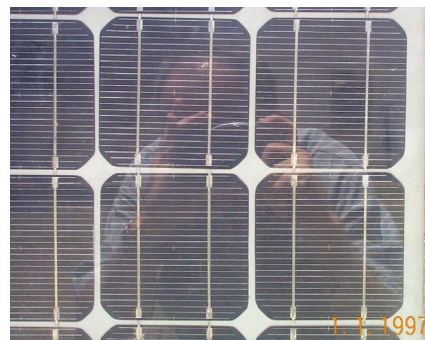


Figura 2: fotografía de un módulo sin uso

<sup>1</sup> INENCO instituto de la UNSa

<sup>2</sup> Personal de apoyo del CIUNSA. Parcialmente financiado por el CIUNSA

Algunos de estos factores tienen que ver con las limitaciones básicas, mientras que otros quedan determinados por aspectos técnicos que pueden llegar a ser minimizados con la investigación y desarrollo de los dispositivos.

Estos factores pueden reunirse en grupos en sentido siguiente:

- factores 1, 2 y 4 afectan a la *eficiencia general de colección*, y están conectados a través de las características de absorción del material.
- factores 1 al 4 determinan la corriente de cortocircuito.
- factor del 5 describe pérdidas basadas en las características de la curva I-V del dispositivo.
- factor 7 relacionado con el envejecimiento del módulo

Para la cuantificación del daño que se observa a simple vista, se realizaron ensayos comparativos entre paneles que estuvieron expuestos, con otros que no. El deterioro que los primeros han sufrido es notorio, como puede observarse en la imagen fotográfica de la figura 1. Se observa que las zonas más dañadas, se encuentran sobre las metalizaciones principales. Esto es debido a que son más calientes, pero además porque están expuestas a mayor radiación, por la reflexión en las mismas. En la imagen fotográfica de la figura 2, se observa un módulo, de la misma partida sin exponer.

En cierta forma la comparación de las curvas de transmitancia permite obtener resultados sobre cómo la opacidad y coloración del EVA, como así también la acumulación de una película de polvo, influyen en la disminución de la transmitancia y en consecuencia en la pérdida de potencia en general y en la disminución de la corriente de cortocircuito en particular. Consecuentemente el objetivo general del trabajo será el de relacionar el daño en el EVA con la respuesta espectral.

## METODOLOGIA DE TRABAJO

La metodología que se propone en este trabajo es la realización de una serie de experiencias que permitan en primer lugar caracterizar un conjunto de filtros, entre los cuales se incluye el material encapsulante del panel EVA por un lado, y una delgada capa de polvo equivalente a la que se acumula en la superficie de los dispositivos fotovoltaicos si no se les realiza tarea de mantenimiento durante 30 días por otro.

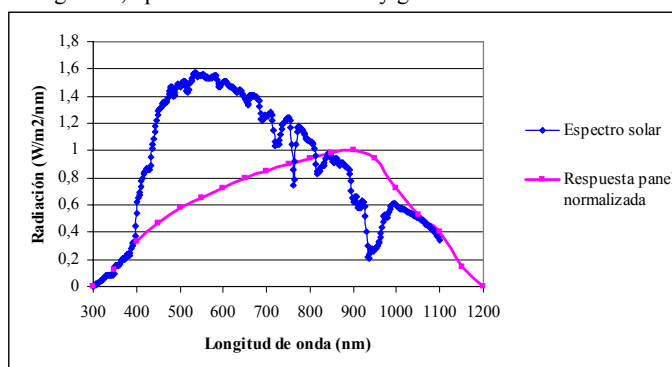
Estas experiencias consisten en medir la transmitancia de los mismos con un espectrómetro. Estos filtros se utilizarán en las experiencias que se detallan a continuación para medir la respuesta de los paneles a distintas longitudes de onda.

En segundo lugar se determinará el tamaño del polvo y densidad de acumulación del mismo al depositarse en la superficie de los módulos y en tercer lugar construir las curvas características I-V de los módulos bajo las siguientes condiciones:

- 1.- los módulos (nuevo y expuesto) con una capa de polvo acumulada en su superficie
- 2.- los módulos en estas condiciones pero cubiertos una vez con cada filtro
- 3.- los módulos limpios (condiciones normales de trabajo)
- 4.- los módulos limpios cubiertos con los filtros

## RESPUESTA ESPECTRAL

Se midió la radiación total del espectro solar y la transmitancia de los filtros que se utilizaron en las otras experiencias con un espectrómetro LI-COR 1800. Se trata de un instrumento portátil que se utiliza para medir la radiación espectral en las bandas ultravioletas, visible e infrarrojo cercano, con un ancho de banda de 6 nm, que contiene en un solo gabinete la óptica de entrada, el monocromador, el sensor, el microprocesador y los bancos de memoria. Toda la operación del equipo se comanda desde una computadora por medio de una interfase RS232, empleando un programa de comunicación que tiene incorporados los comandos para presentación gráfica, operaciones matemáticas y gestión de archivos.



**Figura 3:** respuesta espectral de un típico módulo fotovoltaico de Si monocristalino y espectro solar medido en la ciudad de Salta a las 13:00 hs

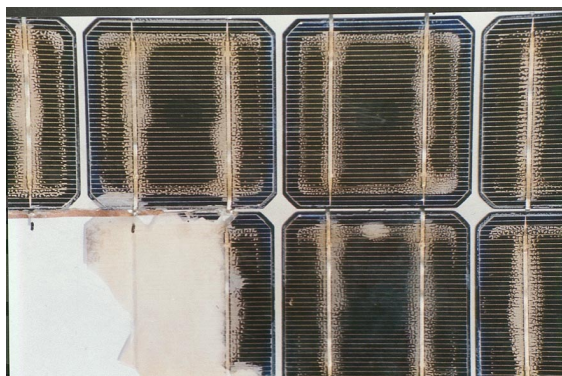
En la figura 3 se observa la respuesta espectral de un módulo fotovoltaico de silicio monocristalino típico (King, D. et al, 1997) en comparación con la radiación espectral solar medida en la ciudad de Salta a las 13:00 hs, correspondiente al mediodía solar.

En la misma se observa que el máximo de conversión fotovoltaica se produce alrededor de los 900 nm.

Para poder realizar las comparaciones de trasmittancia espectral se caracterizaron cuatro filtros de color amarillo, rojo, azul y verde, un trozo de EVA deteriorado extraído de uno de los módulos expuesto por más de 10 años, un trozo de EVA sin exponer y una película de polvo de características similares a las que se deposita en la superficie de los paneles en una instalación fotovoltaica.

Para el estudio de las propiedades ópticas de los materiales, se procedió a la extracción de muestras de material, cortando con un bisturí el encapsulado, desde la cara posterior del panel, levantándolo totalmente, desprendiendo la oblea de silicio, desoldando los contactos y finalmente extrayendo muestras del material adhesivo transparente ubicado entre el vidrio y el silicio. Se considera que la pérdida de transparencia del EVA, es el principal responsable de la disminución de potencia de los módulos aunque no único, ya que existen otros factores que no se analizan en este trabajo.

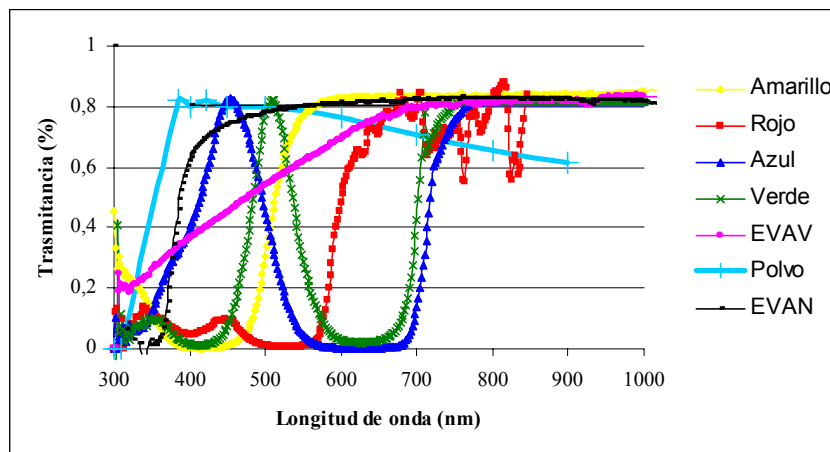
Las celdas no pudieron ser extraídas enteras, por lo que luego de los ensayos, el módulo, constituido originariamente por treinta y seis celdas en serie, pasó a tener treinta y cuatro. Finalmente, se lo selló con un adhesivo siliconado para preservar su estanqueidad



**Figura 4:** fotografía del módulo al cual se le extrajeron las muestras de EVA

Los datos obtenidos con el espectrómetro se utilizaron para determinar la trasmittancia de cada uno de estos elementos y determinar la longitud de onda característica de cada filtro.

En la figura 5 se muestra la trasmittancia espectral de los filtros observándose la similitud de la forma de las curvas de los filtros rojo y amarillo con las del EVA y del panel cubierto de polvo. Desde el punto de vista de la trasmittancia espectral: todas son del tipo “paso alto”. En cambio los filtros azul y verde tienen además de la característica del “paso alto”, un “paso banda” en los azules y verdes respectivamente.



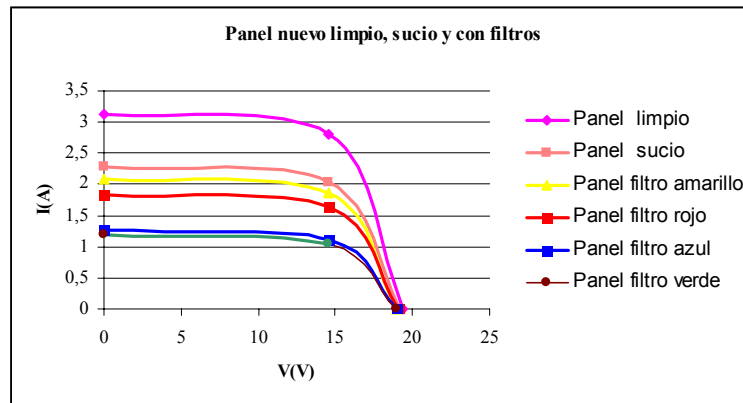
**Figura 5:** trasmittancia espectral a través de 4 filtros de color, EVA expuesto a radiación solar 12 años y sin exponer y una capa de polvo de densidad 1.032 mg/cm<sup>2</sup>

En esta gráfica tenemos la trasmittancia de cada uno de los elementos por separado pero no debemos perder de vista que en el módulo expuesto están actuando dos de ellos el filtro de color que está transmitiendo en su longitud de onda y además el EVA. La combinación de estos dos materiales disminuye la trasmittancia en la longitud de onda del “paso banda” un 30%. Como se desprende de la gráfica, el deterioro del EVA se encuentra ubicado principalmente en la zona del visible, por lo que el análisis se realizará en esta zona ya que en la zona del infrarrojo no se producen mayores cambios en la trasmittancia del material encapsulante

## CURVAS CARACTERISTICAS I-V

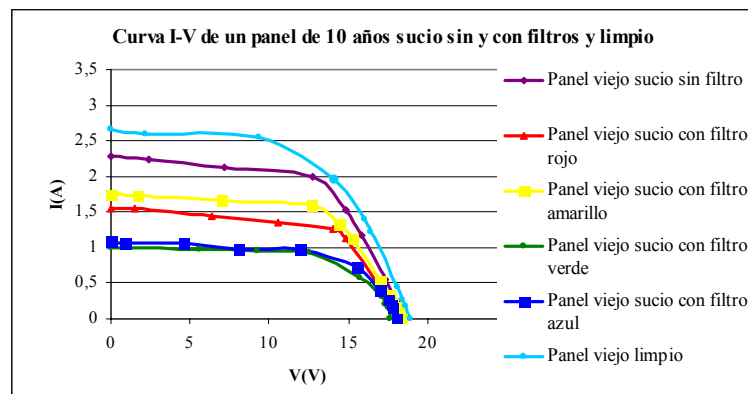
Para obtener los puntos que nos permitan construir las curvas características I-V se cargaron los paneles con una resistencia variable. Se midieron simultáneamente los valores de V e I con multímetros digitales y se controló con un medidor LI-COR 250 que la radiación global solar se mantuviera constante durante la experiencia. Los cuales se muestran en las figuras 6, 7 y 8.

En la figura 6 se graficaron las curvas I-V para el panel no expuesto. En estas se observa que la máxima corriente de cortocircuito que puede producir el panel es 3,14 A pero al encontrarse con una cubierta de polvo, esta decrece un 14 %. Lo que se traduce en una pérdida de potencia del 10% debida principalmente a la disminución de la corriente de cortocircuito. Esto es lo que normalmente sucede cuando a una instalación no se le realizan tareas de mantenimiento tan simples como es la limpieza del polvo acumulada sobre la superficie.



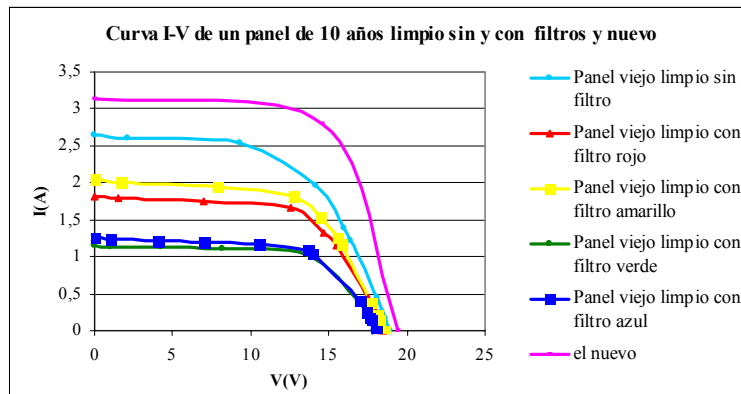
**Figura 6:** curvas características I-V para un módulo nuevo en diferentes condiciones

En lo referente a la influencia de los filtros se observa que la longitud de onda de corte del amarillo se encuentra en 550 nm y la del rojo en 660 nm (valores medidos). Pero con los filtros verde y azul se ve que tienen un “paso banda” en los 520 nm y 476 nm respectivamente, zona en la cual la conversión fotovoltaica es algo menor que la máxima, para luego adquirir una forma similar al amarillo y rojo.



**Figura 7:** curvas características I-V para un módulo con más de 10 años de exposición en diferentes condiciones

En la figura 7 se graficaron los valores obtenidos para el panel con más de 10 años de exposición que en condiciones óptimas de mantenimiento (superficie limpia) entrega una corriente de cortocircuito de 2,65 A la cual ha disminuido un 15,6 % respecto del panel nuevo, que se traduce en una pérdida de potencia mayor a un 30%. Se observa que si la superficie del módulo se encuentra cubierta con polvo (densidad de polvo medida 1,032 gr/cm<sup>2</sup>) su corriente de cortocircuito decrece aproximadamente un 14 % que sumado a lo que se pierde al tener el EVA un cierto grado de deterioro este valor aumenta a un 27%. Lo que nos conduce a una pérdida total de potencia de alrededor del 54% .



**Figura 8:** Curvas I-V del panel nuevo y expuesto limpios y el panel expuesto limpio pero con los filtros de colores

Si se comparan ahora las graficas obtenidas para el panel nuevo y el expuesto vemos que se mantiene el orden decreciente en las corrientes de cortocircuito con los filtros ya que el EVA tiene su máxima trasmittancia cerca de las longitudes de onda de la máxima conversión fotovoltaica.

En la figura 8 se comparan las curvas I-V del panel nuevo con el panel expuesto limpios sin la presencia de la lámina de polvo donde se puede notar la disminución de la corriente de corto circuito que como dijimos anteriormente es de un 15,6%.

### CARACTERIZACION DEL POLVO

Para poder evaluar la influencia de una capa de polvo sobre un panel y trazar la curva I-V se caracterizó la película de polvo que se deposita sobre los paneles después de 30 días de exposición.

Esta caracterización se realizó depositando una capa de polvo sobre una celda nueva, cuadrada de 100 mm de lado, de iguales características a las que tienen los módulos. Se midieron los diámetros de las partículas con un microscopio, se determinó la cantidad de polvo depositada por  $\text{cm}^2$  pesando en una balanza de precisión la celda limpia y luego la celda con la película de polvo y por diferencia se determinó la cantidad depositada de este y finalmente se determinó la corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto.

Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla siguiente:

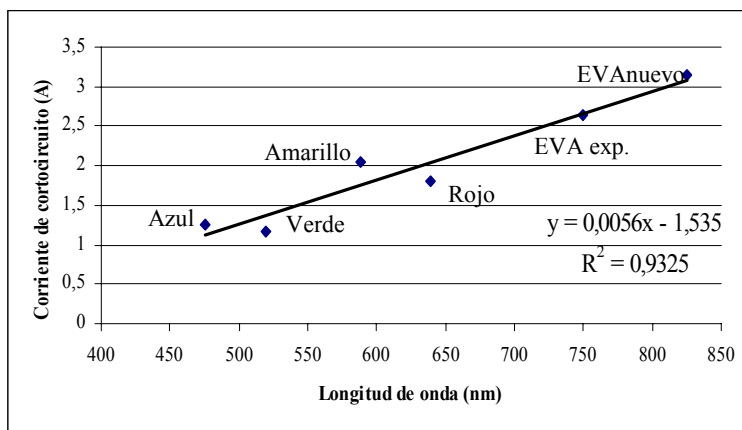
<i>Características del polvo depositado y su influencia sobre la producción de electricidad de las celdas</i>		
<i>Cantidad de polvo acumulado en una celda de 10X10 cm</i>	0.1032 g	$0.001032\text{g}/\text{cm}^2$
<i>Diámetro medio de partículas</i>	$58 \times 10^{-6}\text{m}$	
<i>Valor mínimo</i>	$24 \times 10^{-6}\text{m}$	
<i>Valor máximo</i>	$105 \times 10^{-6}\text{m}$	
<i>Corriente de cortocircuito celda limpia</i>	3,2A.	
<i>Tensión de circuito abierto celda limpia</i>	0,53V	
<i>Corriente de cortocircuito celda sucia</i>	2,91A.	
<i>Tensión de circuito abierto celda sucia</i>	0,52V	

**Tabla 1:** Características del polvo depositado y su influencia sobre la producción de electricidad de las celdas

De la misma manera que para un panel completo, se encontró que la disminución de potencia en un módulo nuevo, expuesto a idénticas condiciones de polvo, sufre una pérdida de potencia superior al 10 % debido principalmente a la disminución de la corriente de cortocircuito.

### RELACION ENTRE LONGITUD DE ONDA Y CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

En la figura 9 se ha graficado la longitud de onda de los filtros y la corriente de cortocircuito del panel expuesto cubierto por los mismos. En la misma se observa que esta relación es lineal con un coeficiente de correlación de Pearson,  $R = 0,9657$ .



**Figura 9:** gráfica de la relación entre la longitud de onda de la radiación incidente y la corriente de cortocircuito

De esta gráfica se desprende que a medida que la longitud de onda de la radiación incidente se acerca a los valores donde la conversión fotovoltaica es más eficiente, la corriente de cortocircuito aumenta. Vemos que el EVA, debido a su deterioro, provoca que la corriente de cortocircuito disminuya y por ende haya una disminución en la producción de potencia. Este filtro sigue transmitiendo en la zona cercana a la de máxima conversión fotovoltaica.

## CONCLUSIONES

De este trabajo se desprende que a pesar del deterioro sufrido por el EVA de un módulo fotovoltaico expuesto a la intemperie y particularmente a la radiación solar por más de 10 años su máxima transmitancia se encuentra muy cercana a las longitudes de onda de la radiación en la cual la conversión fotovoltaica es máxima pero no obstante eso la pérdida de potencia es de un 30 %.

El rendimiento de operación de una célula solar está dado por el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía solar interceptada por su superficie. Pero existen ciertos factores que influyen en mayor o menor medida en el rendimiento de una célula solar. Estos pueden ser de origen interno o externo como características del material, espesor de la oblea, superficie activa, geometría de los contactos, etc. También pueden ser factores ambientales como temperatura de operación y composición espectral de la radiación incidente. Este último factor es el que se ha estado analizando a lo largo de este trabajo desde el punto de vista del deterioro de uno de los materiales componentes del módulo.

En razón a que se caracterizó espectralmente al daño sufrido por los materiales transparentes ubicado en el camino óptico de la radiación con ensayos destructivos, queda para una etapa posterior, la realización de los ensayos fotocolorimétricos que podrían identificar el daño y en consecuencia estimar la pérdida de potencia a través de técnicas de identificación de color.

## REFERENCIAS

- Quintana, M.; King, D. "Diagnostic analysis of silicon photovoltaic modules after 20 years field exposure". IEEE. 2000
- Ahmad Y. Al-Hasan, A New Correlation for Direct Beam Solar Radiation Received by Photovoltaic Panel with Sand Dust Accumulated on its Surface, Solar Energy Vol.63, N°5, pp.323-333, 1998.
- Duffie y Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1991.
- Takao, Yamada et al "Reflection loss analysis by optical modeling of PV module" Solar Energy Materials & Solar Cells 67 (2001) 405-413.
- Martin, N-Ruiz, J "Calculation of de PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model" Solar Energy & Solar Cells 70 (2001) 25-38.
- King, D. et al "PV Module performance and durability following long-term field exposure" Sandia National Laboratories Albuquerque, NM 87185-0752, 2001.
- King, D. et al "Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors" Sandia National Laboratories Albuquerque, NM . 26<sup>th</sup> PVSC; Sept.30-Oct.3, 1997; pag. 113-1116, Anaheim,CA.

## ABSTRACT

In a previous paper we presented the study of the damage suffered by the PV modules after several years of outdoor exposure, relating the loss of power with EVA degradation. In this article we show some results obtained from the characterization of the transparent material constituted by several sheets of capping encapsulating material based on silicone gels in comparison with the decrease of the transmittance by the addition of plastic filters. The characterization of accumulated dust on the surface is also being searched. We can conclude that the loss of power by the degradation of this material is not negligible.