

METODO DE EXTRAPOLACION DE MEDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR ESPECTRAL EMPLEANDO RESULTADOS DE MODELIZACION

Graciela M. Salum – gmsalum@hotmail.com

Escuela de Ciencias Físicas y Nanotecnología, Yachay Tech, Urcuquí, Ecuador
Instituto de Física Rosario (CONICET-Univ. Nacional de Rosario), Rosario, Argentina

Olga Vilela – ocv.olga@gmail.com

Departamento de Energía Nuclear, Universidad Federal de Pernambuco, Recife - PE (Brasil)

Manoel Pedrosa – manoel.henrique@yahoo.com.br

Departamento de Energía Nuclear, Universidad Federal de Pernambuco, Recife - PE (Brasil)
Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Pernambuco, Pesqueira, Brasil

Javier Cruceño – cruceno@ifir-conicet.gov.ar

Instituto de Física Rosario (CONICET-Univ. Nacional de Rosario), Rosario, Argentina

Rubén D. Piacentini – ruben.piacentini@gmail.com

Instituto de Física Rosario (CONICET-Univ. Nacional de Rosario), Rosario, Argentina
LESyC, IMAE, Univ. Nacional de Rosario, Rosario, Argentina

Resumen. Se presenta un método para extrapolar datos de irradiancia solar espectral medidos en plano horizontal con el propósito de realizar el cálculo de la corriente fotogenerada para celdas solares de silicio monocristalino, silicio policristalino y telurio de cadmio. El método requiere del uso del modelo SMARTS y de base de datos satelitales. En particular se presentan los resultados parciales del método aplicados a la medición con espectrorradiómetro Optron OL756 de alta calidad en el rango 290-420 nm, del día 12 de setiembre de 2011 y el resultado final de aplicar las eficiencias cuánticas externas de las celdas citadas. El ajuste realizado entre medición y modelo resultó en una diferencia porcentual inferior al 0,07%, muy pequeña en comparación con el límite máximo establecido del 1%. La irradiancia solar espectral determinada a partir de la aplicación del modelo propuesto, fue aplicada al caso particular del cálculo de la corriente fotovoltaica que es posible generar con celdas de Silicio mono y policristalinos y de Teluro de Cadmio. Se obtuvieron diferencias significativas entre dichas celdas, produciendo la primera (de Si-monocristalino) un 24,7% más de corriente que la segunda (de Si-policristalino) y un 45,3% más que la tercera (de CdTe).

Palabras clave: Irradiancia solar espectral, modelo SMARTS, eficiencia fotovoltaica cuántica externa

1. INTRODUCCION

La irradiancia solar espectral refleja la contribución de los diferentes parámetros atmosféricos y terrestres en cada longitud de onda de la radiación solar emitida por el Sol (Duffie and Beckman, 2013). La irradiancia espectral tiene amplias aplicaciones: determinación de la contribución de diferentes acciones biológicas (eritema, daño al ADN, fotosíntesis, producción de vitamina D, etc.); cálculo de la irradiancia solar (a nivel terrestre u otro), análisis del aporte que cada rango espectral produce en cada hora del día; estudio del deterioro de materiales por exposición a la radiación solar UV; generación de potencia solar fotovoltaica, entre otras.

Se considera a continuación, el caso de la corriente fotogenerada en una celda solar ($I_{FV,A}$), la cual resulta del efecto de los fotones en dicha celda cuando es expuesta al Sol. Se la puede calcular en base a la Ec. (1) donde se considera la energía de los fotones en cada longitud de onda, la irradiancia solar espectral incidente y la carga eléctrica del electrón:

$$I_{FV,A} = \frac{q}{h \cdot c} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda, t) \cdot \varepsilon_{\lambda} \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

siendo q = la carga del electrón, h = la constante de Planck, ε_{λ} la eficiencia cuántica solar externa, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ el intervalo de longitud de onda que estará limitado por el rango de longitud de onda de la eficiencia cuántica solar externa de la celda solar e $I(\lambda, t)$ es la irradiancia solar espectral dependiente de la longitud de onda y del tiempo (Ghitas, 2012).

Según Silvestre et al. (1999), en las células solares de última generación, la corriente fotogenerada puede ser aproximada por la corriente de cortocircuito, la cual se mide a distintas longitudes de onda, usando una fuente de luz monocromática filtrada. Este dato no es menor a la hora de comparar los cálculos con datos reales. A su vez, la corriente de cortocircuito depende de la distribución espectral de la radiación solar incidente tal que sin cambios en el espectro de la radiación incidente, no debería notarse modificación alguna en la corriente de corto circuito. Este aspecto fue investigado por Guitas (2012), quien midió los espectros solares incidentes a diferentes horas del día para analizar el cambio en la distribución espectral.

Para la determinación de la irradiancia solar espectral en la ciudad de Rosario, Argentina, se utilizó un espectrorradiómetro doble-monocromador Optron OL756. Pero el rango de medición del espectrorradiómetro (290 to

800 nm) no es suficientemente amplio para realizar el cálculo de la corriente fotogenerada para diferentes tipos de células solares. Como puede verse en la Fig. 1, los rangos de eficiencia cuántica de las células solares consideradas son: 362-1202 nm para Si monocristalino, 362-1182 nm para Si policristalino y 362-892 nm para CdTe. Esto significa que el rango de medición no es suficiente. El método propuesto para extender el rango de medición al rango requerido, es utilizar el modelo SMARTS (Gueymard, 2005).

La eficiencia cuántica solar externa de una celda solar resulta del cociente de la corriente fotogenerada por los portadores y del flujo de fotones incidentes en la superficie de la célula solar. Como se presentó en el trabajo de Salum et al. (2015), las eficiencias cuánticas empleadas fueron obtenidas directamente de las hojas de datos del fabricante de las celdas solares.

El modelo SMARTS es un algoritmo desarrollado por Gueymard (1995) que requiere del ingreso de parámetros atmosféricos y terrestres y calcula transmitancias espectrales, irradiancias espectrales y otros parámetros, a través de ecuaciones paramétricas. En el presente trabajo, este conjunto de parámetros de entrada se ha obtenido de variadas bases de datos satelitales y luego se han corregido hasta lograr la mejor aproximación de los datos de salida del modelo a las mediciones.

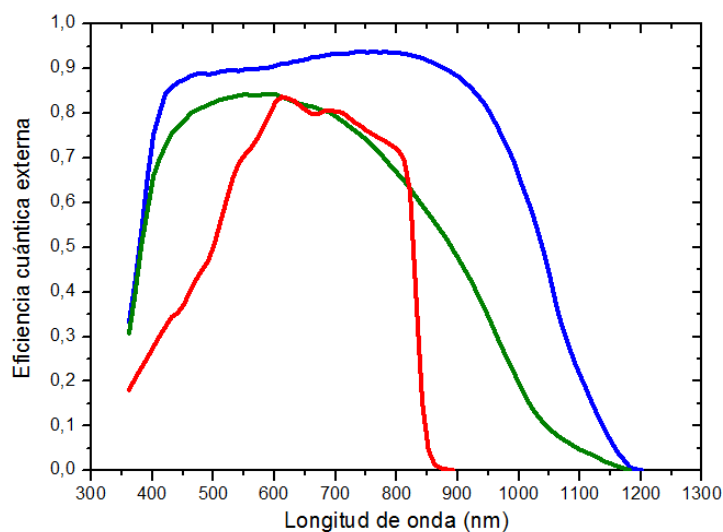


Figura 1 – Distribución espectral de eficiencia cuántica externa de diferentes celdas solares: Si monocristalino (línea azul), Si policristalino (línea verde) y CdTe (línea roja) Salum et al. (2015).

A continuación se presenta la metodología sugerida de extrapolación y aproximación de las irradiancias solares provistas por el modelo a los datos medidos para ampliar la gama de longitud de onda. Se considera como aplicación la determinación de la corriente fotovoltaica producida por diversas celdas solares.

2. METODO DE EXTRAPOLACIÓN

A los efectos de contar con datos de radiación solar espectral, se midió la irradiancia solar espectral en plano horizontal en el Observatorio Astronómico Rosario (32,95° S, 60,68°W, 25 m snm) durante días de cielo claro (con una cobertura nubosa menor al 25%). Para ello se empleó el espectrorradiómetro portátil OL756 (Fig. 2), doble monocromador, del Instituto de Física Rosario (CONICET – Universidad Nacional de Rosario).

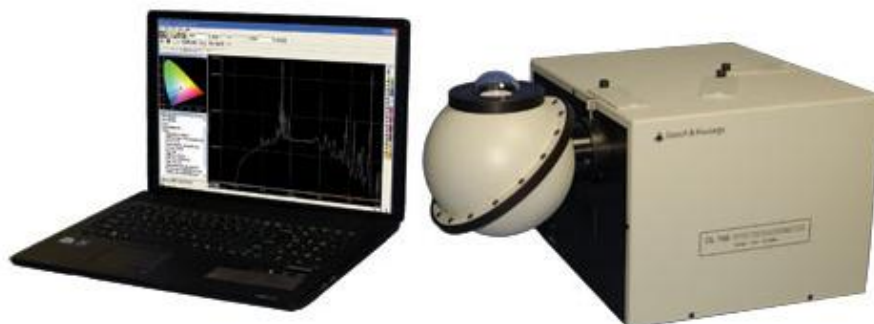


Figura 2 – Espectrorradiómetro portátil OL 756, medidor de radiación electromagnética en los rangos ultravioleta y el visible.

Entre las características técnicas de este instrumento de alta precisión, caben mencionarse (ver más detalles en www.opteema.com/upload/pubfiles/B162_756.pdf): muy baja stray light (radiación que ingresa al instrumento en otras direcciones que la normal y perturba las mediciones, principalmente a bajas longitudes de onda, menores de unos 300 nm) por ser doble monocromador (con un valor menor a 10^{-8} a 285 nm), precisión y estabilidad en longitud de onda: $\pm 0,15$ nm, resolución en longitud de onda: 0,05 nm; fibra óptica y esfera integradora. Es particularmente importante el sistema de calibración, lo que permite mantener al instrumento en un muy alto nivel de medición.

2.1 Cálculo de irradiancias

Las mediciones se realizaron en el rango de 290 a 420 nm. Si se consideran todos los rangos de las celdas fotovoltaicas solares que se propone analizar, se tiene un rango total de 362 a 1202 nm. Esto justifica la necesidad de realizar una extrapolación de los datos medidos.

Para ello se empleó el algoritmo SMARTS que calcula la irradiancia solar espectral según un conjunto de parámetros de entrada. Existen razones de importancia por las cuales es necesario extrapolar los datos: a) el limitado rango espectral del instrumento y b) la poca cantidad de días con cielo claro alrededor del mediodía solar.

El modelo SMARTS permite ingresar los datos de diferentes formas, dependiendo el grado de detalle que se pueda tener en los datos. Se puede por ejemplo, ingresar una mayor cantidad de datos que expliquen mejor las características atmosféricas del lugar a modelizar o bien optar por atmósferas dadas por defecto por el modelo.

Los datos de ingreso para el modelo SMARTS se presentan en la Tab. 1, donde se consigan también la base de datos satelital utilizada y se explica el concepto de cada uno.

Tabla 1 – Parámetros de entrada, considerando la fuente y detallando el concepto.

<i>Parámetros modelo</i>	<i>Fuente</i>	<i>Concepto</i>
Latitud, longitud, altitud		
Fecha		
Zona horaria		
Temperatura del aire	SSE/NASA	temperatura del aire a 10 m sobre la superficie terrestre
Humedad relativa	SSE/NASA	calculada con la temperatura ambiente y la humedad específica
Columna total de agua precipitable	SSE/NASA	cantidad total de vapor de agua contenido en una columna vertical por unidad de área desde el tope de atmósfera
Albedo superficial	SSE/NASA	relación de la energía solar reflejada por la superficie y la energía solar promedio mensual incidente en la misma superficie
Columna total de ozono	Giovanni/NASA OMI/NASA	es la densidad atmosférica del ozono en una columna vertical de aire
AOD _{550nm} (profundidad óptica de aerosoles)	Giovanni/NASA MODIS-Aqua Deep Blue	es la medición de la extinción de la radiación (de 550 nm) al encontrar aerosoles (material particulado) en la atmósfera
Columna total CO ₂	ESRL/NOAA	promedio mensual de la concentración de CO ₂ en la atmósfera medido en Mauna Loa

2.2 Obtención de datos de entrada

A continuación se detallan las bases de datos satelitales de los datos que se ingresan en el modelo SMARTS. Todos los datos son promedios mensuales.

- SSE/NASA: La NASA publica en la página web *Solar meteorology and Solar Energy* datos de energía solar y meteorológicos derivados de más de 200 satélites y promediados mensualmente en un total de 22 años de datos (desde enero de 1983 hasta diciembre de 2004). A su vez, permite ingresar los datos de latitud y longitud para seleccionar el lugar del que se desea obtener los datos. Los datos satelitales meteorológicos corresponden a mediciones de pixeles de 1° de latitud por 1° de longitud (aproximadamente 111,3 km de latitud por 111,1 km de longitud). Los parámetros obtenidos de esta fuente son: temperatura del aire a 10 m sobre la superficie terrestre, humedad relativa, columna total de agua precipitable y albedo superficial. La dirección de la página web es: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>.

- ESRL/NOAA: El *Earth System Research Laboratory* perteneciente a la National Oceanic and Atmospheric Administration (ESRL/NOAA) informa en su página web el dato promedio mensual de la concentración de CO₂ en la atmósfera medido en la cumbre del volcán Mauna Loa, Hawái, desde 1958. La dirección de la página web es: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

• Giovanni/NASA: El *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)* perteneciente a NASA presenta una página web para poder acceder diferentes portales informáticos dependiendo del tipo de información satelital al que se desee acceder. En particular, se accedió al portal de OMI/NASA para obtener la columna total de ozono y al portal de MODIS-Aqua Deep Blue para obtener los datos profundidad óptica de aerosoles a una dada longitud de onda, en particular a 550 nm (AOD_{550nm}). La dirección de la página web es: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

2.3 Aproximación entre datos del modelo y datos medidos

Con el objetivo de obtener un buen ajuste de los datos derivados del modelo a las mediciones realizadas, los parámetros relacionados con el contenido de ozono y aerosoles se modificaron hasta lograr el acuerdo buscado. Este análisis se realiza sobre un rango acotado de longitudes de onda (el rango medido) que se encuentra entre los 290 a 420 nm.

El criterio de ajuste elegido es el criterio del “área ajustada”. Para ello se calculan: a) el área debajo de la curva espectral obtenida de los datos resultantes del modelo ($A_{\text{modelizada}}$) y b) el área de los datos medidos (A_{medida}), en el rango de las mediciones y posteriormente se comparan. El criterio elegido consistió en re-calcular la irradiancia modelizada hasta que la diferencia porcentual de las áreas fuera igual o inferior al 1%, dado que implicaba un 1% de diferencia porcentual máxima de irradiancia instantánea. Matemáticamente,

$$\text{diferencia \%} = \frac{A_{\text{medida}} - A_{\text{modelizada}}}{A_{\text{medida}}} \cdot 100\% \leq 1\% \quad (2)$$

3. RESULTADOS

3.1 Método de área ajustada aplicado a la medición de irradiancia espectral solar realizada en Rosario, Argentina y modelización correspondiente

Se decidió analizar los datos de irradiancia espectral del día 12 de setiembre de 2011 a las 12:58 hora local (UT – 3 horas), en plano horizontal, medidos en el Observatorio Astronómico de Rosario, Argentina. En la Tab. 2 se muestran los valores de los parámetros de entrada obtenidos de las fuentes satelitales y el intervalo de valores correspondiente (valor máximo/valor mínimo). En el caso de los parámetros de temperatura del aire, humedad relativa, columna total de agua precipitable y albedo superficial, los datos son promedios mensuales de un año promedio. En cambio, los parámetros columna total de ozono y AOD_{550nm} son datos promedios mensuales del año en cuestión (2011).

Un caso especial es la columna total de CO_2 dado que es un dato promedio mensual medido (no satelital) en el volcán Mauna Loa, cuyo máximo se obtuvo en mayo de 2015. La concentración del CO_2 medido en el volcán Mauna Loa es representativo de la evolución de este gas atmosférico a nivel mundial. Buchwitz et al. (2005) presenta datos de la columna de CO_2 obtenidas de mediciones del modelo SCIAMACHY para el 24 de enero de 2003, donde se muestra que el dato en Mauna Loa es representativo.

Tabla 2 – Valores de los parámetros de entrada para el mes de setiembre y el intervalo de datos en el año.

<i>Parámetros</i>	<i>Valores para el mes de setiembre</i>	<i>Intervalo (máximo/mínimo)</i>
Temperatura del aire	16,1 [°C]	31,0 / 7,02 [°C]
Humedad relativa	56.8 [%]	73.5 / 54.3 [%]
Columna total de agua precipitable	1,69 [cm]	2.96 / 1.45 [cm]
Albedo superficial	0,14	0,15 / 0,11
Columna total de ozono	300,4 [UD]	315,2 / 265,2 [UD]
AOD_{550nm}	0,1811	0,2351 / 0,0966
Columna total CO_2	389,04 [ppm]	403,94 [ppm] (mayo 2015)

Luego de utilizar el modelo SMARTS con los valores de la Tab. 2, se graficó el resultado en la Fig. 3, donde también se muestra la medición con el espectrorradiómetro OL 756, superpuesta a la modelización. A la izquierda se detalla la irradiancia espectral solar en el rango de interés para el presente trabajo (362 a 1202 nm) y a la derecha la irradiancia solar en el rango de medición (290 y 420 nm).

Calculando la integral de la irradiancia espectral medida se obtiene $59,59 \text{ W/m}^2$ y la integral de la irradiancia del modelo en el mismo rango de longitud de onda es $52,26 \text{ W/m}^2$. La diferencia porcentual es:

$$diferencia \% = \frac{59,59 - 52,26}{59,59} \cdot 100\% = 12,3 \% \quad (3)$$

Esto implica una diferencia porcentual de 12,3%, lo cual supera ampliamente el criterio elegido.

Para aproximar la irradiancia modelizada a la irradiancia real (medida) se cambi6 el valor del AOD_{550nm} a 0,12, luego de efectuar una serie de c6culos de prueba y ajuste y de esa forma se logr6 una integral de valor $59,63 \text{ W/m}^2$. Cabe recordar que el valor de AOD_{550nm} obtenido de la base de datos satelital es un promedio mensual y no un valor instant6neo, por ello se justifica el cambio del valor de dicho par6metro. Entonces la diferencia porcentual resulta ahora:

$$diferencia \% = \frac{59,59 - 59,63}{59,59} \cdot 100\% = 0,067\% \quad (4)$$

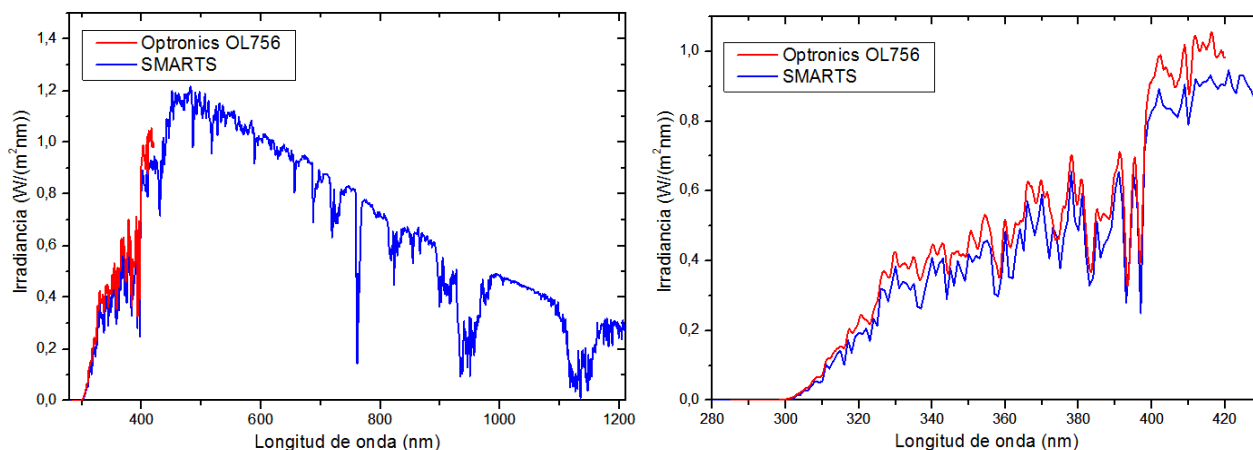


Figura 3 – Irradiancia solar espectral incidente en plano horizontal en Rosario, Argentina, el 12 de Setiembre de 2011. Izquierda: en el rango de longitudes de onda de inter6s. Derecha: detalle en el rango de la medici6n. Medici6n con instrumento OL756 (l6nea roja), modelizaci6n con SMARTS (l6nea azul).

Por lo tanto, esta nueva irradiancia modelizada con este cambio en la variable de profundidad 6ptica de aerosoles, se logra un muy buen acuerdo seg6n el criterio de ajuste adoptado en la Ec. (2) ($\leq 1\%$ de diferencia porcentual). Este acuerdo puede observarse en la Fig. 4. Por lo tanto, esta nueva irradiancia modelizada se considera la mejor opci6n para extrapolar la irradiancia medida.

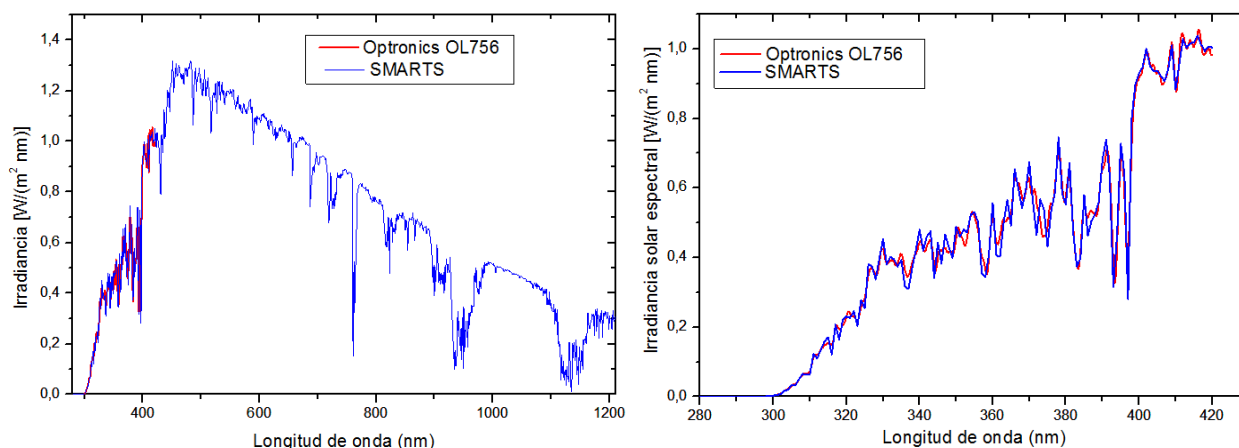


Figura 4 – Comparaci6n de la irradiancia solar espectral medida (l6nea roja) y modelizada (l6nea azul) el 12 de Setiembre de 2011. Izquierda: en el rango de longitudes de onda de inter6s. Derecha: detalle en el rango de la medici6n.

3.2 Aplicaci6n a la determinaci6n de la corriente fotovoltaica

La Ec. (1) se calcula en el siguiente orden: primero se calcula la densidad de corriente espectral ($\rho_{FV,A}$):

$$\rho_{FV,A} = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot I(\lambda, t) \cdot \varepsilon_{\lambda} \quad (5)$$

El resultado de la densidad de corriente espectral para los tres tipos de celdas analizadas se presenta en la Fig. 5.

Luego, se integra $\rho_{FV,A}$ y se calcula la corriente fotogenerada ($I_{FV,A}$):

$$I_{FV,A} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \rho_{FV,A} \cdot d\lambda \quad (6)$$

De dichas integraciones se obtuvo, para las celdas solares de Silicio monocristalino, Silicio policristalino y CdTe, una corriente fotogenerada de 26,67 [mA/cm²], 20,08 [mA/cm²] y 14,59 [mA/cm²], respectivamente, lo que implica que la primer celda aprovecha la energía solar un 24,7% más que la segunda y un 45,3% más que la tercera.

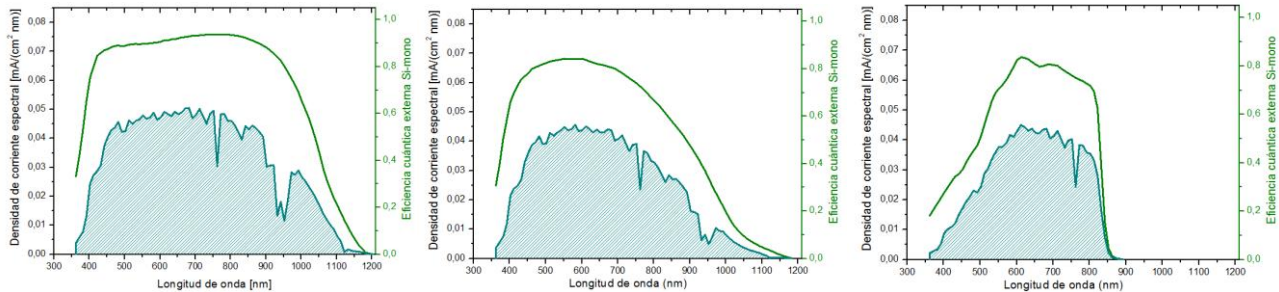


Figura 5 – Eficiencia cuántica externa (línea verde) y densidad de corriente espectral (línea celeste) para el 12 de setiembre de 2011. Izquierda: Silicio monocristalino. Centro: Silicio policristalino. Derecha: CdTe.

4. CONCLUSIONES

Se implementó un método para la extrapolación de datos de irradiancia solar medidos (con espectrorradiómetro de alta calidad OL756) en base a datos obtenidos por modelo (SMARTS). De esta forma se pueden extrapolar datos medidos en el rango UV e inicio del visible, a un rango amplio que incluye todo el rango solar. En particular en este trabajo sólo se requiere expandir el rango de longitudes de onda hasta 1202 nm para poder calcular la corriente fotogenerada de celdas solares cuya eficiencia cuántica externa requiere un rango de 362 a 1202 nm (celdas solares de Si mono y policristalino y telurio de cadmio, CdTe).

Para realizar el cálculo de irradiancia espectral con el modelo se utilizan datos satelitales (cuyas fuentes se presentan) que luego cambian para ajustar los datos modelizados con los datos reales (medidos). Se muestra una medición particular a la que se ajusta logrando un acuerdo menor al 0,07%, que a su vez es inferior al criterio elegido (diferencia porcentual $\leq 1\%$).

Las razones por las cuales se decidió extrapolar los datos son: a) el rango limitado en longitudes de onda del instrumento, y b) la posibilidad de encontrar días en los que la atmósfera se encuentre en condición de cielo claro es al mediodía solar (máximo diario de irradiancia) muy azarosa.

Además de obtener la irradiancia solar en un rango espectral mayor al de las mediciones, la utilización del modelo y la adaptación de los valores de entrada para el mismo permiten encontrar los valores más probables de los parámetros atmosféricos del lugar de medición y caracterizar así el estado de la atmósfera.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a las siguientes instituciones: CONICET (Argentina), Yachay Tech University (Ecuador) y CNPq (Brasil).

REFERENCES

- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., Meirink, J. F., Goede, A. P. H., Bergamaschi, P., Korner, S., Heimann, M., and Schulz, A., 2005. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 941–962
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Ghitas, A.E., 2012. Studying the effect of spectral variations intensity of the incident solar radiation on the Si solar cells performance. *National Research Institute of Astronomy and Geophysics*, 1, 165-171
- Gueymard, C.A., 1995. SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. Technical Report No. FSEC-PF-270-95. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
- Gueymard, C., 2005. SMARTS code, version 2.9.5 for Windows User's manual.

- Salum, G.M, Vilela, O., Pedrosa, M., Cruceño, J., y Piacentini, R.D., 2015. Spectral solar irradiance, atmospheric component and its relation with the production of photovoltaic current. Solar World Congress ISES 2015 (enviado para ser presentado en el Congreso)
- Silvestre, S., Sentís, L. y Castañer, L., 1999. A Fast Low-Cost Solar Cell Spectral Response Measurement System with Accuracy Indicator. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, 5, 944-948.

EXTRAPOLATION METHOD OF SPECTRAL SOLAR IRRADIANCE MEASUREMENTS EMPLOYING MODELIZATION RESULTS

Abstract. *We present a method for extrapolating measured spectral solar irradiance data in horizontal plane with the purpose of the calculation of the current photogenerated for solar cells of monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, and cadmium telluride. The method requires the use of the SMARTS model and satellite data base. In particular, there are the partial results of the method applied to the measurement with spectroradiometer Optronics OL756 of high quality in the 290-420 nm range, the day September 12, 2011 and the final result of applying the external quantum efficiencies of these cells. The setting between measurement and model resulted in a percentage difference less than 0.07%, very small compared with the maximum established limit of 1%. The solar spectral irradiance determined from the application of the proposed model was applied to the particular case of the calculation of photovoltaic current than can be generated with solar cells of mono- and polycrystalline silicon and cadmium telluride. Significant differences were obtained between these cells, producing the first one (of monocrystalline Si) 24.7% more current than the second (of polycrystalline Si) and 45.3% higher than the third (of CdTe).*

Keywords: *Spectral solar irradiance, SMARTS model, external quantum photovoltaic efficiency*