

CONSTRUCCION DEL PRIMER PROTOTIPO DE RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SUMERGIBLE DE BAJO COSTO

C.G. Bolzi¹, M.J.L. Tamasi^{1,2}, C.A.Cadena^{2,3}

¹Gerencia de Investigación y Aplicaciones - Centro Atómico Constituyentes – CNEA
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín- Buenos Aires- Argentina
Tel. (54-11) 6772-7837, Fax (54-11) 6772-7121

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

³Instituto de Investigación en Energías No Convencionales, UNSA-CONICET
Avda. Bolivia 9150, Salta Capital, CP 400, Salta
E-mail: bolzi@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 07/08/16, aceptado 06/10/16

RESUMEN: El Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica viene realizando desarrollos en equipos de medición de radiación solar fotovoltaicos para uso terrestre y espacial desde 1999. En este contexto y con el fin de completar el espectro de los equipos desarrollados, se diseñó y fabricó un prototipo de radiómetro fotovoltaico sumergible apto para uso en distintos medios acuáticos. El desarrollo de este instrumento tiene aplicaciones en distintas áreas, por ejemplo, para la apicultura y la producción de algas.

Se presentan los cálculos para el diseño, elaboración y caracterización del sensor de silicio así como el diseño del soporte con las características necesarias para ser sumergido en distintos ecosistemas. El prototipo desarrollado fue contrastado (dentro y fuera del agua) con un piranómetro Kipp & Zonen. Los resultados muestran un buen comportamiento del instrumento.

Palabras clave: radiómetro sumergible, sensor fotovoltaico, sensor, silicio, radiación

INTRODUCCIÓN

El Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha desarrollado radiómetros fotovoltaicos para uso terrestre y espacial desde finales de la década del 90 (Bolzi et al., 1999). Para el desarrollo de los radiómetros fotovoltaicos en particular, se ha trabajado con el apoyo y colaboración del Grupo de Estudios de la Radiación Solar de la Universidad Nacional de Luján vinculados a la medición de radiación solar en toda la Argentina y a la calibración de solarímetros. Además de aportar ideas e incentivar su desarrollo realizan la calibración de los radiómetros desarrollados. El DES viene comercializando este tipo de radiómetro desde hace más de 10 años buscando generar un producto de calidad comparable a los existentes comercialmente y de bajo costo (Bolzi et al., 2002). Siguiendo con esa misma línea, es que se planteó el desarrollo de un radiómetro sumergible para ir completando el espectro de dispositivos desarrollados para la medición de la radiación solar con sensores fotovoltaicos fabricados en el país.

La necesidad de medición de radiación solar bajo el agua tiene múltiples aplicaciones, por esto se ha planteado como objetivo el desarrollo de un radiómetro sumergible. Algunas de las aplicaciones que tiene la medición de radiación bajo el agua son, por ejemplo, las relacionadas con la apicultura y producción de algas. Por ejemplo en la década de 1950 se postuló por primera vez que el empleo de luz solar y agua marina, para obtener cultivos masivos de microalgas ricas en proteína de alta calidad, podría ser una buena alternativa para obtener alimento para el ser humano (Contreras Flores et al., 2003), también pueden encontrarse citas respecto a, por ejemplo, efectos de la radiación solar y el crecimiento del fitoplancton en aguas antárticas y subantárticas explicada en la tesis de Hernando, 2008.

DISEÑO DEL SENSOR

Como sensor se utilizó básicamente un celda solar fotovoltaica diseñada para cubrir los siguientes

parámetros:

1. Uso acuático: implica una disminución del valor de radiación en aire por efecto del agua
2. Independencia de la del ángulo de rotación respecto de la vertical
3. Zonas de soldabilidad en todo su contorno para facilitar el conexionado a la base.

Para el primer punto se tuvo en cuenta el área activa del sensor para alcanzar valores de corriente de cortocircuito cercanos a 12mA. Esto permite tener valores de tensión cercanos a 15mV medidos a través de una resistencia de $3,3\Omega$ para radiaciones del orden de los 1000 W/m^2 . El valor de resistencia utilizado se elige para que la medición indirecta de la corriente a través de la caída de tensión sea cercana a la de cortocircuito. Por otro lado, para cumplir con el punto b. la geometría del área activa del sensor debería tener simetría cilíndrica. La facilidad en la soldabilidad, punto 3, se logra simplemente metalizando el contorno completo del sensor para no limitar el conexionado a un punto determinado.

La luz que penetra la superficie del agua es absorbida y dispersada por las moléculas de agua, además de la contribución de las partículas suspendidas y disueltas. Incluso en el agua muy clara la transmisión de la luz se atenúa a un ritmo significativo, en estas aguas alrededor de los 30m menos llega menos de una décima parte de la luz que penetra en la superficie (Dustan, 1982), y en aguas más turbias, el 90% se puede absorber a una profundidad menor a 15m en lugares tales como un arrecife costero (Fabricius y Alderslade, 2001). En la Figura 1 se muestra la transmitancia a distintas profundidades de agua pura o destilada.

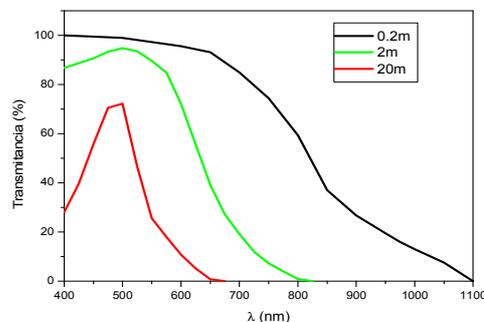


Figura 1. Variación de la transmitancia en función de la longitud de onda para distintas profundidades de agua. (Pope y Fry, 1997; Dunne y Brown, 2001)

Se calculó en principio la densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}) de un sensor a fin de evaluar la variación en la corriente obtenida para un radiómetro a distintas profundidades a partir de datos convencionales. La J_{cc} se calculó a partir de la respuesta espectral medida en uno de los sensores elaborados, un espectro estándar de radiación solar AM 1.5 (Gueymar C., 2001) y la transmitancia del agua para 0,2, 2 y 20m. La corriente de corto circuito (I_{cc}) se obtiene a partir del producto de la J_{cc} con el área activa del sensor. En la Figura 2 se muestran estos resultados gráficamente.

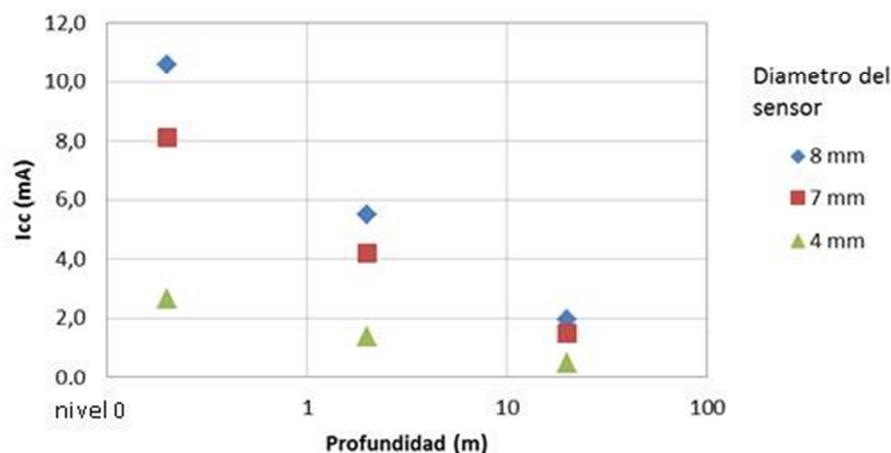


Figura 2. I_{cc} en función de la profundidad de agua para sensores de 8, 7 y 4mm de diámetro

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR FOTOVOLTAICO

Los sensores solares de silicio utilizados para medir radiación solar son básicamente celdas solares de silicio monocristalino, donde fundamentalmente cambia su geometría y uso, pero no el proceso de elaboración. Por tal motivo, se utilizó para su elaboración el mismo proceso que el Departamento Energía Solar de la CNEA desarrolló como proceso estándar para celdas solares de silicio monocristalino. La estructura electrónica de las celdas y sensores solares de silicio monocristalino consta, típicamente, de una estructura n^+pp^+ . La concentración de dopante y la profundidad del emisor frontal influyen en forma importante sobre el funcionamiento de la celda o sensores. En particular, determinan parcialmente la respuesta espectral y la resistencia serie, y consecuentemente las pérdidas resistivas del dispositivo.

El proceso de elaboración de los sensores de silicio es similar a la elaboración de dispositivos fotovoltaicos (Tamasi, 2003). El mismo involucró limpiezas, formación de las junturas y el empleo de técnicas fotolitográficas para deposición de contactos metálicos. Se difundieron obleas de silicio tipo p, marca Siemens, resistividad $2 \Omega \text{ cm}$ según el proceso utilizado para la formación de la juntura por Basore et. al (1994) a 870°C para lograr una estructura n^+pp^+ simultáneamente (Tamasi et. al, 2003).

Para la deposición de los contactos metálicos se evaporó en cámara de alto vacío una multicapa de Ti-Pd-Ag. Engrosándose electroquímicamente para lograr un espesor apropiado para la soldadura de los interconectores y se realizó el sinterizado de los contactos en ambiente de una mezcla de $\text{H}_2\text{-N}_2$ a 400°C .

La manera de caracterizar eléctricamente los sensores elaborados es a través de la medición de la curva de corriente-tensión (IV) y electrónicamente mediante la medición de la respuesta espectral. Como ejemplo de los resultados obtenidos, en la Figura 3 se muestran las curvas IV características de un conjunto de sensores de Si elaborados de distintas áreas y fabricados en un mismo proceso de difusión.

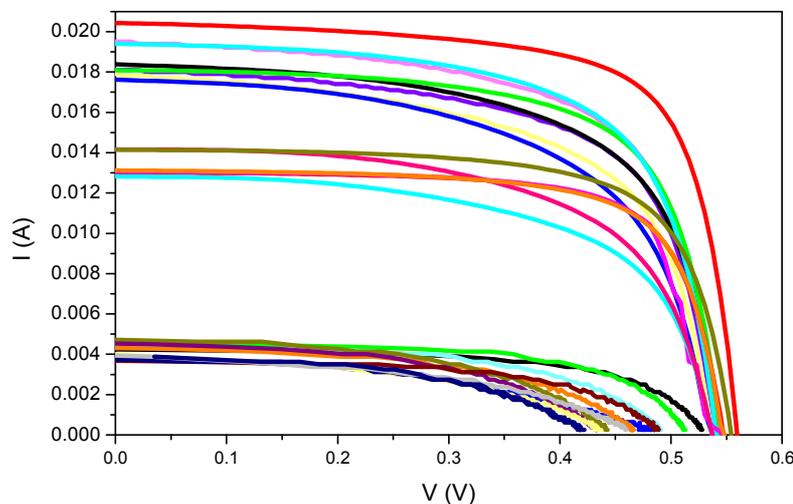


Figura 3. Curva IV de sensores de distintas áreas.

Como se dijo anteriormente y como parte de su caracterización eléctrica, se midieron también para dos de los sensores elaborados la respuesta espectral (Fortin et al., 2005). En la Figura 4 se observa el gráfico correspondiente a dos sensores denominados 1 y 2.

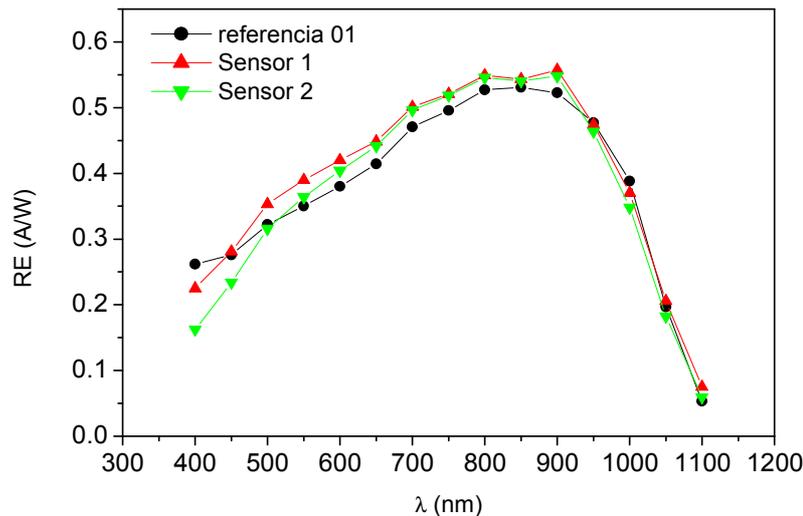


Figura 4. Respuesta espectral de dos sensores elaborados

Teniendo en cuenta los requerimientos y resultados, finalmente se fabricaron sensores con las siguientes características:

- Diámetro del área activa: 7 mm
- Área activa: 38,5 mm²
- Corriente de cortocircuito (1000W/m² AM1.5): 13 a 14,3 mA.

DISEÑO DEL ALOJAMIENTO Y HERMETICIDAD DEL SENSOR

Se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones para el diseño y construcción del soporte:

- Uso acuático
- Agua salada o dulce
- Estanco
- Apto para profundidades de hasta 25 m

El uso acuático, en el diseño de un instrumento sumergible si bien pueden resultar triviales, el hecho de que pueda usarse en distintos tipos de ambientes acuáticos no lo es, ya que implica una elección adecuada de materiales que no sean atacados, por ejemplo, en un medio salino. El radiómetro se construyó de manera que tenga simetría cilíndrica y consta de un cuerpo o base y una tapa vidriada, esta última protegida por una brida que se une al cuerpo por medio de tornillos. El interior fue diseñado de manera que permita la integración del sensor y su conexión de manera estanca. A partir de un análisis de distintos materiales posibles, se decidió utilizar polipropileno como material tanto para la base como para la brida. La elección del polipropileno fue por sus cualidades inertes tanto en agua dulce como salada, la tolerancia a ambientes ligeramente ácidos o básicos, su facilidad para el maquinado entre otras propiedades mecánicas.

La medición de la corriente de cortocircuito del sensor (parámetro lineal con la radiación solar) se realiza midiendo la caída de potencial sobre una resistencia conocida. Se decidió colocar la resistencia en la caja de conexionado del adquisidor de datos para tener una mayor libertad en caso de necesitar variar el valor de la misma.

El interior del cuerpo del radiómetro donde se encuentra el sensor y el orificio que permite la salida de los cables de señal fueron sellados también con silicona. El pegado del sensor al vidrio fue realizado utilizando silicona transparente de curado neutro para evitar cualquier tipo de corrosión en los contactos metálicos del sensor o las soldaduras. La silicona que se usó es la que se usa comúnmente para el sellado de ventanas en la construcción. En la Figura 5 se muestran algunas fotos del proceso de armado y en la Figura 6 el radiómetro terminado.



Figura 5. Imágenes del radiómetro en proceso de armado (izquierda) y terminado (derecha).

En un sensor fotovoltaico, como se dijo anteriormente, la corriente de cortocircuito es proporcional a la radiación solar. Este valor se mide de manera indirecta a través de la medición de la caída de tensión sobre una resistencia de bajo valor. Para el caso del radiómetro construido se utilizó una resistencia de $3,3 \Omega$. Para tener mayor libertad en caso de querer cambiar el valor de la resistencia utilizada y para evitar que pueda influir el largo de cables, la misma se colocó en la bornera de la caja de conexiones del adquisidor de datos. Por simplicidad se decidió que el cable, bifilar con envainado resistente a la radiación ultravioleta, salga por la parte inferior del radiómetro.

CALIBRACIÓN Y ESTUDIOS DE CAMPO

Sobre una instalación fotovoltaica que el Departamento Energía Solar tiene sobre la terraza de uno de los edificios del Centro Atómico Constituyentes, se integró un soporte que permite hacer una contrastación del equipo fabricado con un piranómetro comercial de manera de poder calibrar el primero en las etapas previas y posteriores a los ensayos acuáticos.

Se contrastó el equipo fabricado con un pirómetro Kipp & Zonen modelo CMP6 para su calibración, en la Figura 6 se muestra una foto del montaje.



Figura 6. Imagen del Radiómetro acuático montado en aire para su contrastación con Solarímetro CMP6 de Kipp & Zonen.

La contrastación se realizó conectando ambos equipos a un adquisidor de datos autónomo. Para el montaje del sistema de adquisición de datos se utilizó una caja estanca (IP67) para evitar filtraciones. La contrastación se realizó tomando de manera simultánea los valores de tensión de ambos radiómetros con el sistema de adquisición. A partir de los mismos se calcularon las integrales diarias para ambos instrumentos y se graficaron los valores de tensión de las integrales diarias del radiómetro

sumergible R_s en función del radiómetro comercial R_g . En la Figura 7 se muestra el gráfico correspondiente a una de las dos calibraciones iniciales las cuales no arrojaron diferencia entre sí.

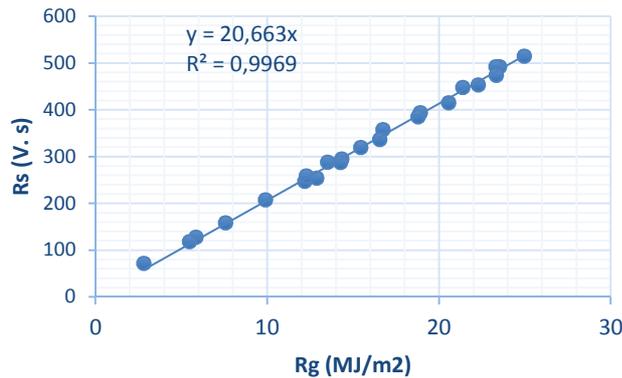


Figura 7. Valores de tensión de las integrales diarias del radiómetro sumergible R_s en función del radiómetro comercial R_g .

Para estimar el error, se tuvieron en cuenta los errores estadísticos de la regresión lineal, el error del solarímetro utilizado como patrón, el error del voltímetro y el error debido a la diferencia del comportamiento a la ley del coseno. Para el caso de la ley del coseno la estimación se realizó teniendo en cuenta los resultados de Bolzi et al (1999) ya que la cubierta y adhesivos utilizados son los mismos que los usados en dicho trabajo. El resultado del error surge del cálculo de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores relativos porcentuales que se tuvieron en cuenta. Este cálculo arroja un valor de 3%.

De las calibraciones iniciales (antes de ser sumergido) se obtuvo la siguiente constante para el primer prototipo del radiómetro sumergible:

$$K = (20,66 \pm 3\%) \mu\text{V/W/m}^2$$

esta constante se calculó a través de una regresión lineal realizada con los valores del gráfico construido a partir de las integrales diarias de los valores de tensión adquiridos.

Si bien para determinar que el prototipo es adecuado se requiere de meses o incluso años de uso en condiciones reales que claramente excede los fines de este trabajo. Sin embargo, como complemento a la calibración en condiciones más realistas para el instrumento diseñado, se midió simultáneamente radiación solar utilizando el radiómetro desarrollado sumergido en agua corriente y el utilizado como patrón (al aire) por aproximadamente 20 días, obteniéndose el gráfico de la Figura 8. Para esto se utilizó un recipiente con aproximadamente unos 8 a 10 cm de columna de agua sobre el sensor. Asegurando, con una inspección cada dos días, que el nivel de agua no baje del especificado. La calibración posterior no se registró cambios en los valores de la constante cuyo valor es el mismo que registrado anteriormente

$$K_{\text{agua}} = (20,06 \pm 3\%) \mu\text{V/W/m}^2$$

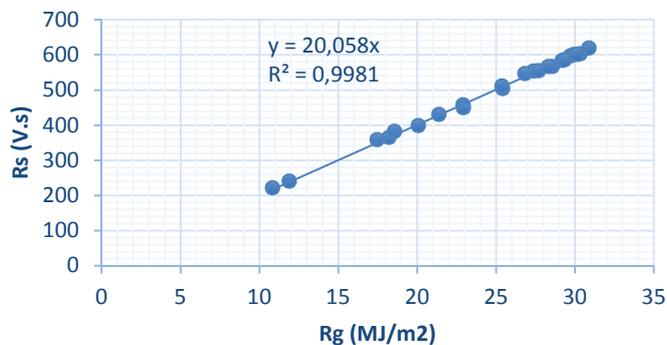


Figura 8. Valores de tensión de las integrales diarias del radiómetro sumergible R_s en función del radiómetro comercial R_g luego del recipiente de presión.

CONCLUSIONES

El desarrollo de un radiómetro sumergible permite completar el espectro de dispositivos desarrollados por el Departamento Energía Solar (DES) para la medición de la radiación solar con sensores fotovoltaicos. Se construyó un prototipo de radiómetro capaz de ser sumergido a distintas profundidades sin alterar su calibración y dado los materiales que se eligieron resultaría apto para ecosistemas marinos o su utilización, por ejemplo, en aguas contaminadas que podrían corroer otro tipo de material.

Existen sin embargo, aspectos que deben ser mejorados o tenidos en cuenta para la continuación de este desarrollo, tanto en el diseño del instrumento como en los métodos de contrastación. Respecto a la calibración, en este trabajo se realizó con un solarímetro Kipp & Zonen CMP6 por simplicidad y comodidad dado que el DES no posee un patrón primario o secundario. Este solarímetro fue instalado en la terraza de uno de los edificios del Centro Atómico Constituyentes y tenía la facilidad de la cercanía y accesibilidad inmediata. El próximo paso sería realizar esta calibración en las instalaciones de GERSOLAR en la Universidad Nacional de Luján donde sí poseen estos patrones. Quedan pendientes, además, calibraciones a profundidades mayores a la conseguida a través del balde utilizado y mediciones en condiciones reales en campo.

Otros aspectos pendientes son variantes en el diseño del radiómetro como por ejemplo, el realizar la cubierta directamente de polipropileno en lugar de vidrio. Queda pendiente también el diseño y fabricación del soporte que permita sumergir el radiómetro que no era necesaria en esta etapa del desarrollo. Una vez realizadas estas modificaciones y con la calibración adecuada podría disponerse para pruebas en campo de un primer prototipo de radiómetro sumergible de bajo costo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a, H.Socolovsky, J. F. Vázquez, O. Romanelli, S. Muñoz, C. Rinaldi, M. M. Bogado y J. Di Santo por su colaboración y apoyo y en particular a J. M. Olima por su colaboración en la fabricación del soporte para el sensor y la toma de datos y a D. Raggio por el soporte para definir el sistema de adquisición y su puesta en marcha. Todos miembros del Dpto. Energía Solar de la CNEA.

REFERENCIAS

- Basore P., Gee M.J., Buck M.E., Schubert W.K. y Ruby D.S. (1994). Simplified High-Efficiency Silicon Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **34**, 91
- Bolzi C.G., Durán J.C., Dursi O., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (1999) Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA. *AVERMA* 1 pág. 4.8.
- Bolzi C.G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 11.01.
- Contreras Flores C.; Peña Castro J. M.; Flores Cotera L.B. y Cañizares Villanueva R. O. (2003) *Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas*. Interciencia. vol. 28 N° 8.
- Dunne R.P. y Brown B.E. (2001). The influence of solar radiation on bleaching of shallow water reef corals in the Andaman Sea, 1993-1998. *Coral Reefs* 20:201-210
- Dunstan P. (1982). Depth-dependent photoadaptation by zooxanthellae of the reef coral *Montastrea annularis*. *Mar. Biol.* 68:253-264.
- Fabricius K. y Alderslade P. (2001). *Soft Corals and Sea Fans: A comprehensive guide to the tropical shallow water genera of the central-west Pacific, the Indian Ocean and the Red Sea*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia. 264pp.
- Fortin, S., Martínez Bogado, M. G., & Plá, J. (2005). Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 04-01.
- Gueymar C. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, vol. 71, No.5, 325-346

- Hernando, M.P. (2008) Efectos de la radiación solar y el crecimiento del fitoplancton en aguas antárticas y subantárticas. Tesis en Ciencias Marinas. FCEyN. Universidad de Buenos Aires.
- Pope, R. M., y Fry E. S. (1997). Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water, II, integrating cavity measurements. *Appl. Opt.* 36: 8710–8723.
- Tamasi, M. J. (2003). Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización. Universidad Nacional de General San Martín. República Argentina.

ABSTRACT

The Solar Energy Department of the National Atomic Energy Commission has been making developments in photovoltaic equipment for solar radiation measurement for terrestrial and space uses since 1999. In this context and in order to complete the spectrum of developed equipment, a photovoltaic solar sensor of monocrystalline silicon and the support for a submersible photovoltaic solarimeter suitable for use in different aquatic environments were designed and manufactured. This development is important, for example, for beekeeping and algae production.

The manufacturing process of photovoltaic silicon sensors used at the instrument, its design according to the sensor signal due to attenuation when immersed and its size adaptation are presented. The prototype developed was contrasted (in and out of the water) with a Kipp & Zonen pyranometer. The results show that it complied with the specifications originally raised.

Keywords: Submersible radiometer , photovoltaic sensor , sensor , silicon , solar radiation