



## Desarrollo de una red inalámbrica de sensores para medición de radiación ultravioleta de aplicación en la salud humana.

Javier Gustavo Belmonte  
Enrique Giandoménico  
Roberto Manuel Martínez  
Estela D'agostino  
Rosa Corti  
Rubén Piacentini

Recibido: Marzo 2010 – Aceptado: Abril 2010

E-mail: [belmonte@fceia.unr.edu.ar](mailto:belmonte@fceia.unr.edu.ar)

base a modelos. La expresión para calcular el UVI se basa en el espectro de acción de referencia para el eritema de la Comisión Internacional sobre Iluminación (CIE), y se normaliza en 1 para los 298 nm. El índice referido es adimensional y se define para una superficie horizontal mediante la siguiente expresión:

$$UVI = K_{err} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

donde:

$K_{err}$  : constante igual a 40 m<sup>2</sup> /W

$E_{\lambda}$  : irradiancia espectral solar

$S_{er}(\lambda)$  : espectro de acción de referencia para el eritema

La intensidad de la radiación UV a la que están expuestas las personas depende de los niveles de UVI en regiones, situaciones o trabajos en los que se desenvuelven.

El Índice UV se mide en plano horizontal en los distintos centros del mundo encargados de dar el pronóstico diario del mismo o de realizar investigaciones relacionadas. Sin embargo las personas exponen su cuerpo en todas direcciones y el Sol realiza un movimiento aparente en la bóveda celeste, lo que determina la necesidad de contar con información del Índice UV en distintos planos, a fin de reconstituir la incidencia solar en todo el cuerpo, tal como se hizo en forma manual y con un solo sensor en un trabajo previo<sup>[3]</sup>. Entonces, valores de UVI particularmente altos hacen necesario realizar varias mediciones en un área definida, con diferentes ángulos de captura. Estos casos se presentan por ejemplo en la Antártida, por la alta reflectancia existente a esta obras de construcción, por la cantidad de horas de los trabajadores expuestos al sol, en alturas considerables sobre el nivel del mar, o en regiones donde la atmósfera filtra menos la radiación UV por disminución de la capa de ozono. En estas situaciones es posible y conveniente la utilización de Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes-RISI<sup>[4]</sup>, para la recolección, almacenamiento temporal y transmisión de las mediciones. Una RISI está formada por nodos que se organizan y comunican entre sí mediante la autoconfiguración de una red de transmisión, en la cual se emplean técnicas y algoritmos específicos a esta funcionalidad. En las RISI cada nodo puede poseer y controlar, uno o más sensores adecuados al tipo de variable a medir. Además de adquirir y transmitir los datos, los nodos realizan otras funciones como una administración eficiente de la energía para maximizar el tiempo de vida de la red, almacenamiento temporal de la información, y procesamiento local de los datos aplicando diferentes técnicas<sup>[5]</sup>. En general, es la aplicación específica la que finalmente define la estructura y características de una RISI y sus nodos.

En este documento se reporta un trabajo conjunto realizado por el Grupo de Energía Solar (FCEIA - IFIR) y el Grupo Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes (FCEIA) para la implementación de una red de sensores con el fin de realizar mediciones de UVI.

El objetivo del trabajo descrito en este documento fue investigar la factibilidad del proyecto planteado y analizar, diseñar y construir un prototipo de nodo sensor apto para la medición de UVI y que sirva de base para la constitución futura de una Red de Sensores para la medición de UVI en las condiciones particulares señaladas, esto es, en la Antártida Argentina, sobre trabajadores expuestos durante períodos prolongados a la radiación solar y en actividades deportivas en la nieve, entre otras.

El resto de la publicación está organizado de la siguiente manera, en la sección 2 se detallan los requerimientos definidos para el sistema, en la sección 3 se describe el diseño e implementación del prototipo, y en la sección 4 se da cuenta de las pruebas de funcionamiento realizadas. Finalmente, las conclusiones obtenidas y las líneas de trabajo a futuro se reportan en la sección 5.

## 2. Requerimientos definidos para el sistema

Las aplicaciones de las RISI generalmente poseen requerimientos "ad-hoc" que deben ser tenidos en cuenta. Por lo tanto, si bien existen un conjunto de técnicas, protocolos de comunicaciones, sistemas de transmisión y tecnologías que son aplicables específicamente al diseño y constitución de las RISI<sub>[6]</sub>, la selección y empleo de estos recursos se define a la hora de analizar las particularidades de cada caso.

Los requerimientos planteados en este trabajo se sintetizan en los siguientes puntos básicos:

**Frecuencia de las Mediciones:** Los nodos de las RISI pueden realizar mediciones en forma ininterrumpida, por demanda, periódica o disparadas por eventos del medio. Para nuestros casos particulares la medición del UVI requiere la adquisición de datos en forma periódica con intervalos de entre 10 y 30 minutos. No obstante, existe la posibilidad de tener que realizar mediciones a mayor frecuencia (30 segundos o menos). Se definió entonces que la estructura de la red y los nodos debían ser lo suficientemente flexibles para abarcar estos rangos y permitir una reconfiguración en línea de los tiempos de detección. Sin embargo, como la red "duerme" en los períodos en los cuales no debe medir y transmitir, residiendo allí la forma de economizar energía<sub>[7]</sub>, se calculó el tiempo de vida de la red y de los nodos para el caso de realizar mediciones cada un minuto.

**Bajo Consumo de Energía:** En las RISI, los nodos constituyentes normalmente adquieren la energía necesaria para su funcionamiento de pilas o baterías internas. En muchas ocasiones, la ubicación de los nodos sensores impide el uso de fuentes de energía renovables y es posible que las baterías se encuentren en lugares de difícil o imposible acceso como para proceder a un cambio frecuente de las mismas. Esta característica lleva a plantear un diseño que maximice el tiempo de vida de la red<sub>[8]</sub>, minimizando el consumo en cada uno de los nodos sensores. Este tipo de restricción es necesaria para varias de las aplicaciones de interés, fundamentalmente las orientadas a mediciones en la Antártida, donde se requiere una autonomía mínima de los nodos de entre 3 y 6 meses.

**Numero de Variables a Medir:** La medición tradicional para el UVI se realiza en orientación vertical, es decir, este índice está definido en referencia a una integración en superficie horizontal a nivel del suelo. En este caso las aplicaciones planteadas exigen la necesidad de realizar varias mediciones simultáneas con diferentes grados de inclinación, con un mínimo de 5 direcciones. Además resulta conveniente la medición de otras variables de interés como por ejemplo la temperatura. Se decidió así trabajar sobre un diseño flexible de los nodos, que permitiera la adquisición de un mínimo de 6 variables, con posibilidades futuras de expansión, mediante multiplexado.

**Topología de la Red:** La ubicación relativa de los nodos en las RISI, puede adoptar las más diversas formas, con nodos fijos o móviles. Desde el punto de vista lógico estas redes pueden estructurarse en las formas clásicas: en estrella, anillo, bus, árbol jerárquico o malla<sub>[9]</sub>, pero en todos los casos la información proveniente de la red termina siendo recolectada en un nodo especial denominado normalmente "sink". El prototipo implementado posee un número reducido de nodos, pero las aplicaciones futuras pueden requerir desplegar un número elevado de estos dispositivos. Por lo tanto, se adoptó para el prototipo una topología en estrella operando en forma de punto-multipunto, definiéndose al "sink" como receptor directo de la información enviada por los nodos. Es posible que la red migre a una topología "peer-to-peer", para contemplar aplicaciones donde no todos los nodos sensores pueden conectar directamente con el "sink", debiendo recurrir a nodos intermedios para la transmisión de los mensajes. Se decidió definir que el prototipo opere bajo el protocolo 802.15.4 de la IEEE, que permitirá en un futuro montar algoritmos de encaminamiento de mayor nivel y complejidad<sub>[10]</sub>.

**Transmisión Diferida:** Para alguna de las aplicaciones planteadas sería posible que el "sink" esté fuera de servicio o del alcance de toda la red como modo normal de trabajo. Si este fuese el caso, se torna necesario proveer almacenamiento local para las mediciones, ya sea en todos los nodos o en algunos con funcionalidad ampliada, a fin de retener las mediciones realizadas en un largo período de tiempo y transmitir las en el momento de detectarse la presencia del "sink". Si bien se consideró para los diseños una posible inclusión de este almacenamiento temporal, el mismo no fue implementado en el prototipo, siendo su agregado objetivo de un trabajo posterior.

### 3. Diseño e Implementación del Prototipo

#### 3.1. Descripción general

El "sink", encargado de recolectar todas las mediciones realizadas por los sensores, es un nodo operando en el modo coordinador dentro de la especificación del protocolo 802.15.4.

La implementación del prototipo, tanto de los nodos remotos como el coordinador se realizó con el transceptor de Maxstream (hoy DIGI Int.) modelo XBEE<sub>[11]</sub> 802.15.4. Este transceptor maneja adecuadamente los ciclos de recepción, transmisión y "sleep" para maximizar el ahorro de energía.

Además posee un conversor analógico digital de hasta 7 canales, interfaz RS-232 y salidas digitales para telecontrol. Posee una interfaz programable adecuada para su control y configuración.

La distancia entre un nodo remoto y el coordinador dentro de la cual es posible el enlace dependerá del tipo de módulo y antena utilizados, y del despeje existente entre los mismos, variando entre 90 mts y 1600 mts en el exterior con antena externa y despeje total.

El nodo coordinador, al que reportan los nodos remotos que contienen los sensores, incluye indicadores de nivel de señal recibida y testigos de transmisión/recepción que permiten visualizar la operabilidad del mismo. Este se ubica en el punto de recolección de los datos y se conecta a una PC mediante la interfaz RS-232.

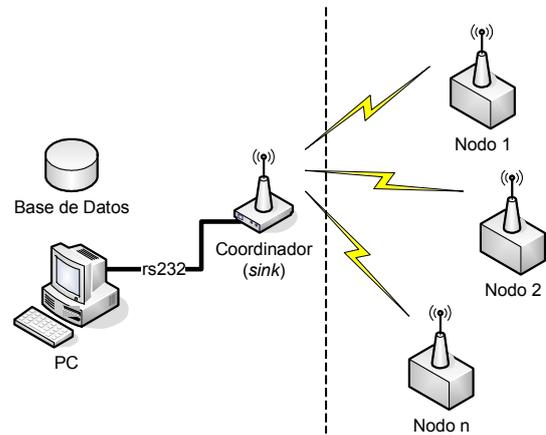


Figura 1

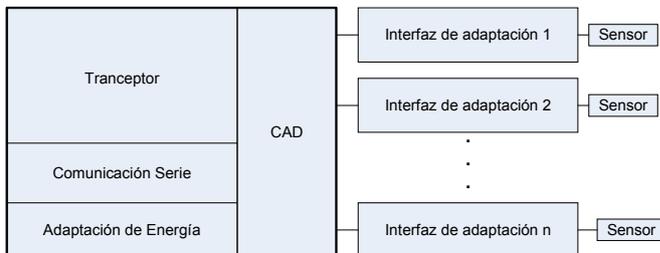


Figura 2

Esta PC, por medio de un software desarrollado especialmente para la aplicación, es la que administra y almacena los datos provenientes de los nodos remotos y sus sensores. La figura 1 muestra un esquema general de la red.

Los nodos remotos se definieron en forma modular. En un módulo se incluyeron los componentes relativos a la

conversión analógica digital, adecuación de energía y transmisión. En otro se consideró los componentes relativos a la amplificación y adecuación de niveles de las señales, muy débiles en su origen, proveniente de los sensores. De esta manera, es posible cambiar variables a medir y/o sensores sin alterar la disposición u operación del nodo. La figura 2 muestra un diagrama en bloques del nodo remoto. Esta estructura guarda estricta relación con la programación del software de control.

#### 4. Implementación del Nodo

Los nodos remotos pueden ser heterogéneos, tanto en tipo como respecto al número de sensores que poseen. Se dotó a cada nodo de capacidad para medir hasta 6 variables analógicas o digitales, más una exclusivamente digital.

La alimentación de los nodos en el prototipo se realiza mediante 4 pilas AA alcalinas, que totalizan aproximadamente unos 8000 mAH, permitiendo una autonomía superior a 6 meses. Para alcanzar esta autonomía se emplearon componentes de muy bajo consumo y el referido transceptor operando en modo "sleep" en todo instante, excepto durante los períodos de transmisión/recepción. La tabla 1 muestra la distribución y cálculo del consumo considerando una frecuencia de medición aproximada de una vez por minuto.

Tabla 1. Consumos previstos.

	modo	Tiempo	consumo	distribución
Transceptor	sleep	60 s	50uA	5,45%
	transmisión	4 ms	250mA	3,64%
	idle/receive	1 s	50 mA	90,91%
Consumo promedio transceptor			885 uA	
Interfaces Sensores UV ( 5 x 3uA)			15uA	
otros consumos (incluye sensor de temperatura)			65uA	
Total			965uA	

Con este consumo, y aún considerando una eficiencia general del sistema del 80% o menos, se está muy por encima de los 6 meses fijados para la autonomía requerida. Estos valores teóricos fueron medidos y verificados sobre el prototipo.

Analizando la disponibilidad de niveles de tensión admitida por el transceptor y la fuente de energía disponible, se definieron niveles de conversión en el rango 0 – 3V. Estos valores resultan asimismo compatibles con niveles posibles para las interfaces descritas en el punto 3.3, para la situación mas critica.

Se incluyó en el diseño del nodo un sensor de temperatura que se adaptó en forma directa en la placa principal. Para fines de control, también se incluyó la posibilidad de reportar como variable medida el nivel de tensión de las pilas.

Debe destacarse que desde el punto de vista práctico y atendiendo que tanto los nodos remotos como el coordinador se basaron en el mismo transceptor XBee, fue conveniente el desarrollo de un solo circuito para el cumplimiento de ambas funciones, definiéndose el rol de utilización en el momento de montaje del nodo, incluyendo según corresponda los componentes necesarios para cada función.

La figura 3 muestra el impreso desarrollado y la figura 4 un montaje del mismo para cumplir con la función de nodo remoto.

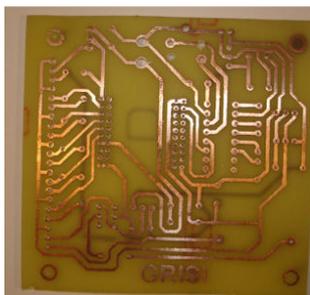


Figura 3

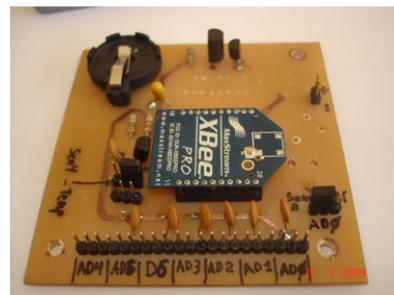


Figura 4

## 5. Sensores UV e Interfaces

Para la determinación del UVI debe procederse a la medición de la radiación ultravioleta proveniente de la fuente Sol, desde unos 290 nm hasta los 400 nm de longitud de onda, e integrar estos valores ponderándolos de acuerdo a la curva de eritema de la piel. Como alternativa, pueden utilizarse dispositivos cuya respuesta a la luz ultravioleta es equivalente a la curva de eritema. En el prototipo se seleccionó un fotodiodo desarrollado por SGLux[12] y fabricado en Estados Unidos por Cree Research Inc., denominado EryF\* (EryFstar) cuya curva de respuesta se muestra en la figura 5 y que permite realizar mediciones con una precisión de +/- 0,5 UVI.

Este fotodiodo esta basado en una aleación de carburo de silicio (SiC) que le asegura una gran durabilidad y puede operar desde los -25 °C hasta los 70 °C. En condiciones de exposición a la luz ultravioleta produce una corriente en el orden de los nanoamperes, la cual debe ser amplificada. Para este fin se utilizaron técnicas y componentes especiales para lograr un consumo de potencia muy bajo. En particular, se seleccionaron amplificadores operacionales (AO) encargados de la amplificación de las corrientes entregadas por los fotodiodos con tensiones y corrientes de "offset" muy bajas, entre otras características, y para operar como

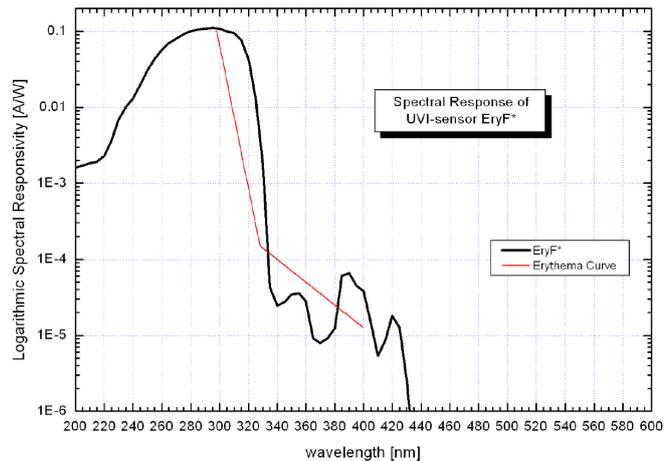


Figura 5

amplificadores de transimpedancia en la primer etapa. El AO seleccionado fue el LMC6442, cuyo consumo, con dos amplificadores en el chip es del orden de 0,95µA por amplificador. Esta selección se fundamentó en que la aplicación exigía un consumo de energía extremadamente bajo. El nivel de amplificación se calculó para que no exista saturación aún con niveles de UVI muy altos, superiores a 20, lo que garantiza la posibilidad de medir en regiones de Argentina donde existe riesgo extremo –como ocurre en verano en la zona de muy alta montaña intertropical Puna de Atacama[13].

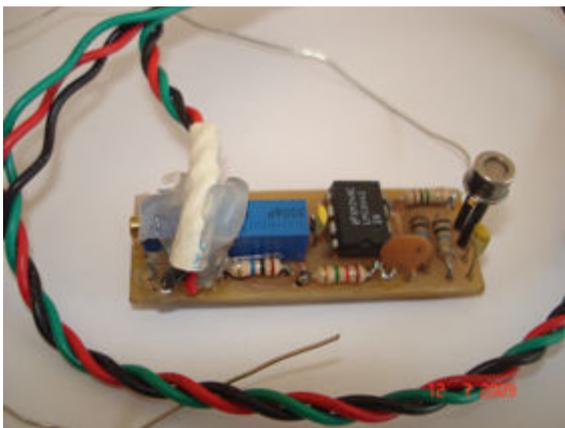


Figura 6

Algunas de las aplicaciones previstas para la red requieren que los nodos puedan ser desplazados con facilidad, por lo tanto en el prototipo, el circuito y tamaño de la interfaz se redujeron al mínimo, aunque utilizando por cuestiones prácticas el encapsulado DIP para los AO. Físicamente el montaje se realizó en una plaqueta de 15 x 45mm. La figura 6 muestra la interfaz terminada, con el sensor montado. Dados los bajos niveles de corriente generados por el fotodiodo, el circuito de entrada del adaptador es de muy alta impedancia, motivo por el cual se requiere blindaje del mismo para evitar captar ruidos eléctricos.

## 6. Montaje de los componentes

Se construyeron dos nodos remotos: uno con los sensores de UVI descritos (EryF\*) y otro utilizando fotodiodos de respuesta plana en el espectro UVB y UVC (AG32S[14] de SGLux). El montaje de cada uno se realizó colocando un sensor en forma vertical y otros cuatro en forma horizontal, de manera de ensayar la medición en varias direcciones, conforme los requerimientos planteados.

Todo el conjunto se alojó en una caja estanca apta para intemperie. Las figuras 7 y 8 muestran el nodo terminado.



Figura 8

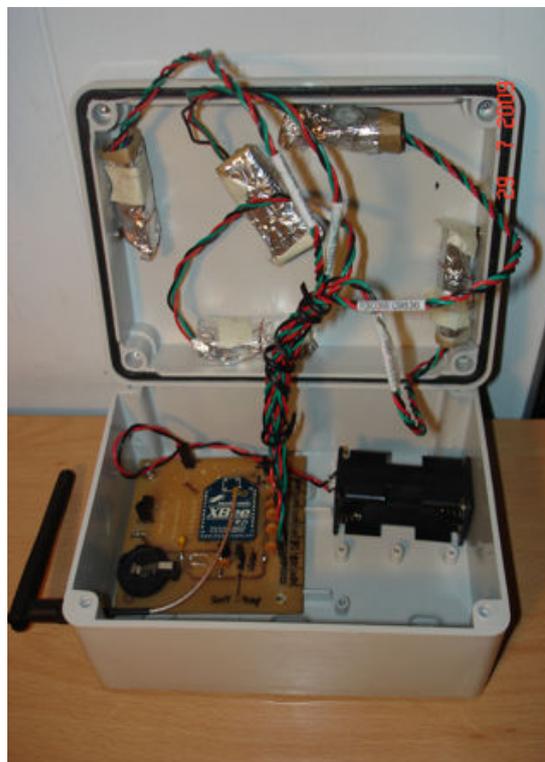


Figura 7

## 7. Software de aplicación

El objetivo del programa desarrollado es manejar las comunicaciones con los nodos y almacenar en una base de datos los valores registrados por distintas variables bajo control. Se incluyeron asimismo ciertas facilidades para controlar en tiempo real el estado de las comunicaciones, alertando respecto de caídas de los nodos o pérdida de mensajes. La figura 9 muestra la interfaz principal del programa.

No se incluyeron en la aplicación software herramientas de análisis ya que se asumió la exportación de los datos almacenados hacia programas específicos, por lo tanto la aplicación almacena los valores digitales reportados por los sensores, previa conversión de los mismos a unidades representativas de la variable medida. En particular y dado el objetivo principal de medir valores de UVI, dicha conversión es parametrizable en la forma de una ecuación cuadrática. Se eligió esta forma a partir de pruebas realizadas contrastando los valores obtenidos con un biómetro (medidor de irradiancia eritémica solar marca YES) utilizado como patrón, del Grupo de Energía Solar, emplazado en el Observatorio Astronómico de Rosario y aportado por la World Meteorological Organization, a través del Servicio Meteorológico Nacional.

Form1

ESTRUCTURA: **BASICA**

Características Com Num Baudios Paridad Data Bits Stop Bits Control Flujo

Nodo Coordinador COM1 9600 N 8 1 NO

**CARACTERÍSTICAS NODOS FINALES**

Nodo ID	Tiempo entre transm.	Cant. Lect p/Tran...	Tiempo entre Lecturas	% Max Transm. Perdida
1	20000	2	250	10
3	30000	1	150	10
5	50000	5	550	5

Click sobre la fila del nodo para ver sus sensores

**PINES Y TIPO DE SENSORES DE CADA NODO FINAL**

Nodo ID	Id Pin	ID Tipo Sen...	Tipo Señal	Mgntd	A	B	C	Valor Max	Valor Min	% Posib. Alerta
1	0	6	DI	OK	0,0	0,0	6,0	1	0	0
1	1	1	ADC	°C	0,0023	0,0	1,0	2700	10	10
1	2	2	ADC	°C	0,232	0,0	2,0	300	25	5
1	3	3	ADC	% HUMEDA	1,0	0,0	3,0	5000	50	8

ULTIMA LECTURA REALIZADA EN CADA NODO

STATUS: S0 S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 VALORES

Haga DobleClic sobre la fila del nodo para ver historial de lecturas

Modificar Parametros

Figura 9

## 8. Pruebas de funcionamiento

El nodo fue probado en laboratorio manifestando un funcionamiento acorde a los parámetros de diseño. La calibración para cero UVI (en oscuridad total) y medición en cielo diáfano en horas del mediodía solar en el mes de enero, produjeron valores tales que garantizan la no saturación del nodo para toda condición natural posible. Posteriormente se realizaron pruebas en el área del Observatorio Astronómico de la ciudad de Rosario. Se calibraron las interfaces y se ajustaron los parámetros de conversión a fin de obtener indicadores análogos a los reportados por una estación meteorológica Davis instalada en el lugar, para los sensores ubicados en forma vertical. Se verificó en todo momento la consistencia de la señal y un correcto reporte de las variables y su almacenamiento. El prototipo fue entregado al Grupo de Energía Solar para contrastación y pruebas intensivas.

## 9. Conclusiones y Trabajos Futuros

El presente trabajo permitió convalidar teórica y prácticamente la aplicación de técnicas y tecnologías referidas a Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes orientadas a la medición múltiple de índices UVI, aún para condiciones y restricciones no usuales. La estructura modular dada al nodo se comprobó efectiva e implementable. Resultó directamente apta para varias de las condiciones de uso fijas y muy simple de adaptar a aplicaciones que requieren movilidad de los nodos, sustituyendo el vínculo cableado de la interfaz por enlaces Bluetooth. La selección de un fotodiodo de respuesta eritémica directa para el sensado de UVI fue determinante para alcanzar los requerimientos en cuanto a tiempo de vida del nodo y la red. Por estos motivos, el prototipo logrado se constituye en una buena base, sustentable, para desarrollos futuros.

Los ensayos revelaron una excesiva direccionalidad del fotodiodo utilizado, por lo que es de prever la necesidad de incorporar pantallas difusoras al nodo, a fin de equiparar su respuesta a los instrumentos patrones en condiciones de baja elevación del Sol. Por otro lado, las pruebas realizadas indican que resulta necesario refinar el diseño de la interfaz de adaptación, para conseguir mayor inmunidad a las variaciones de temperatura, cuyas magnitudes resultaron mayores a las esperadas. Esta mejora consistirá fundamentalmente en la incorporación de un doble ajuste de "offset" en los AO y selección de componentes de mayor precisión. Se puede prever que este rediseño impactará en el tamaño de las interfaces por lo que resultará en ese momento conveniente pasar a un montaje del tipo superficial.

## Referencias

- 
- [1] UNEP. Environmental effects of ozone depletion and its interaction with climate change. United Nations Environmental Programme Report 2006. Photochemical and Photobiological Sciences, 2007.
  - [2] McKinlay A. F., Diffey B. L. A reference action spectrum for ultraviolet-induced erythema in human skin. In Human exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations. W R Passchler and B F M Bosnjakovic, Editores Elsevier, Amsterdam, 1987.
  - [3] Piacentini R D et al. Incidencia de la radiación eritémica en todo el cuerpo, medida durante el verano en la región de Rosario. Argentina. Medicina Cutánea. Mayo-Junio. 2009
  - [4] Culler D., Estrin D., Srivastava M. Overview of Sensor Networks. IEEE Computer Magazine. vol 37 nº 8 pp41-49.2004.
  - [5] Corti R., D'Agostino E., Giandoménico E., Martínez R. Algoritmo de encaminamiento para redes de sensores inalámbricas utilizando técnicas de agregación. Anales XIII Congreso Argentina de Ciencias de la Computación. Corrientes. 2007
  - [6] Aboelaze M., Aloul F. Current and Future Trends in Sensor Networks: A Survey. IEEE Wireless and Optical Communications Networks, WOCN 2005. Second IFIP International Conference. ISBN: 0-7803-9019-9. March 2005
  - [7] Pantazis N.A., Vergados D.J., Vergados D.D., Douligeris C. Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling. Ad Hoc Networks. 2008.
  - [8] Atay Ozgovde, Cem Ersoy. WCOT: A utility based lifetime metric for wireless sensor networks. Computer Communications. Volume 32, Issue 2, pp 409-418. Disponible en <http://www.sciencedirect.com>
  - [9] Lewis, F.L., Wireless Sensor Networks. Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications, ed. D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York, 2004.
  - [10] D'Agostino E., Giandoménico E., Corti R., Martínez R., Belmonte J. Algoritmo de encaminamiento para redes inalámbricas de sensores inteligentes. Anales 36º Jornadas argentinas de informática, AST 2007. Mar del Plata. 2007
  - [11] Product Manual - 802.15.4 Protocol XBee®/XBee-PRO® OEM RF Modules. Versión 1.xCx. [Archivo pdf en línea]. Digi International Inc. Publicado 04/09/2008. [citado febrero 10, 2009]. Disponible en <http://www.digi.com>
  - [12] UV-index sensor based on SiC- EriF\* Datasheet. Rev. 1.4. [archivo pdf en línea]. sglux SolGel Technologies GmbH. [citado agosto16, 2008]. Disponible en <http://www.sglux.de>.
  - [13] Cede A., Luccini E., Nuñez L., Piacentini R.D. and Blumthaler M, Monitoring of Erythema Irradiance in the Argentina Ultraviolet Network. J. Geophysical Research, D13 - 2001JD001206, 2002.
  - [14] Ultraviolet selective AlGaN based UV sensor- AG32s Datasheet. Rev. 1.4. [archivo pdf en línea]. sglux SolGel Technologies GmbH. [citado agosto16, 2008]. Disponible en <http://www.sglux.de>.