

Espectrorradiómetro computarizado para estudios de aerosoles y especies contaminantes en la atmósfera

M. Raponi^{1,6}, E. Wolfram^{1,5}, L. Otero^{1,7}, J. Pallotta⁴, J. Salvador³, A. Tourón¹, F. González¹, R. D. Piacentini², F. Diodati¹, E. Quel¹

(1) CEILAP (CITEFA-CONICET), Juan B. de La Salle 4397 - B1603ALO, Villa Martelli, Argentina

(2) IFIR (U.N. de Rosario - CONICET) y FCEIA/UNRosario.

(3) UTN, FRBA, Bs. As. (4) UTN, FRH, Bs. As. (5) Becario CONICET

(6) Becario UNSAM. (7) Becario CONAE

mraponi@citefa.gov.ar

Se presenta el desarrollo de un sistema computarizado acoplado a un espectrorradiómetro destinado a la medición de la radiación solar en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. El sistema permite orientar un manojo de fibras ópticas y obtener espectros característicos de un estado dado del cielo, en un determinado lugar geográfico y para diferentes horas del día. Se ha desarrollado un software específico para adquirir espectros y controlar el funcionamiento global del sistema. Se presenta un espectro solar en el rango UV (290 nm – 400 nm) obtenido el 10 de septiembre de 2003 a las 16:08 horas local en el CEILAP, Gran Buenos Aires.

The development of a computerized system coupled to a spectroradiometer, dedicated to the measurement of the solar radiation in the ultraviolet, visible and near infrared ranges, is presented. The system allows to guide a bundle of optic fibers and to obtain characteristic spectra of a given sky condition, at a certain geographical place and for different hours of the day. A specific software was developed to acquire spectra and to control the global operation of the system. A UV solar spectrum UV (290 nm – 400 nm) obtained September 10, 2003 at 16:08 local time in CEILAP, Great Buenos Aires, is presented.

I. INTRODUCCIÓN

El espectrorradiómetro computarizado consiste en un analizador espectral, compuesto por un monocromador - espectrógrafo *Jarrell-Ash MonoSpec27*, una cámara CCD y un sistema de orientación y seguimiento solar de un manojo de fibras ópticas. Una PC provee la interfase visual para la adquisición de los espectros y el control de las mediciones.

La importancia de realizar mediciones del espectro solar incidente a nivel terrestre en el rango solar y en particular en el UV (290-400 nm) ha sido enfatizada en diferentes trabajos y cursos¹⁻³

II. COMPONENTES DEL SISTEMA

El monocromador está compuesto por un analizador de radiación dispersivo de doble paso, con 1 m de longitud de camino óptico total (configuración Czerny-Turner cruzada). Este dispositivo posee tres redes de difracción diferentes, montadas sobre un mismo soporte giratorio. Las características de las redes pueden observarse en la siguiente tabla:

| | Líneas/mm | Blaze | Región del espectro |
|-------|-----------|--------|---------------------|
| Red 1 | 600 | 700 nm | Infrarrojo |
| Red 2 | 600 | 500 nm | Visible |
| Red 3 | 600 | 300 nm | UV |

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DE DIFRACCIÓN DEL MONOCROMADOR/ESPECTRÓGRAFO

Dichas redes poseen curvas de trabajo con máximas eficiencias (blaze) en diferentes regiones del espectro, pudiendo cubrir en conjunto, un rango espectral entre 200 y 1000 nm aproximadamente.

La figura 1 muestra una imagen de los componentes del monocromador.

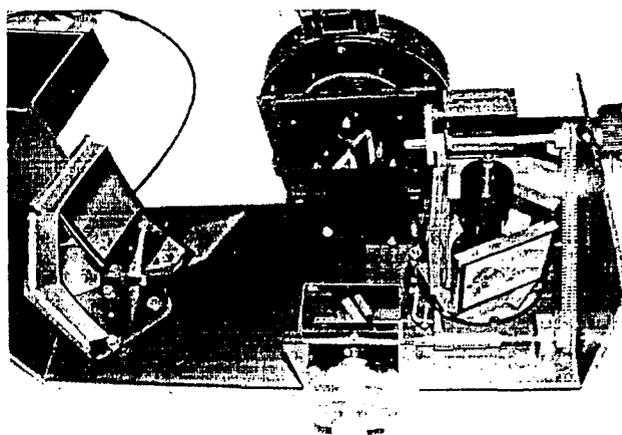


Figura 1. Elementos del monocromador y anexos.

La detección se realiza a través de una cámara CCD (SBIG-ST-6V) que posee un rango de detección extendido hasta el ultravioleta, posibilitando de esta manera, capturar señales en el intervalo de 200 a 400 nm con una eficiencia cuántica superior a las demás CCD. Las características de la cámara son:

- Dimensión del "array": 3,6 x 8,8 mm

- Número de píxeles: 375 x 242
- Dimensión de los píxeles: 23 x 27 μm
- Conversor A/D: 16 bits de resolución

Debido a la dimensión del array, al tamaño de los píxeles y al número de líneas/mm de las redes, se logra enfocar en el chip de la CCD, una ventana espectral de un ancho aproximado de 50 nm. Por lo tanto, si se desea capturar un espectro entre 200 y 1000 nm, se deberán adquirir 16 ventanas y sumarlas digitalmente.

La radiación solar que analiza el monocromador, es transferida al mismo a través de un manajo de fibras ópticas que se une al equipo mediante un conector circular de 10 mm de diámetro, cuya terminación es una ranura de 3 mm de altura y 100 μm de espesor. El manajo de fibras de silicio fundido, posee una apertura numérica de 0.22 y se encuentra acoplado a un domo difusor para realizar mediciones de radiación solar global (figura 2).

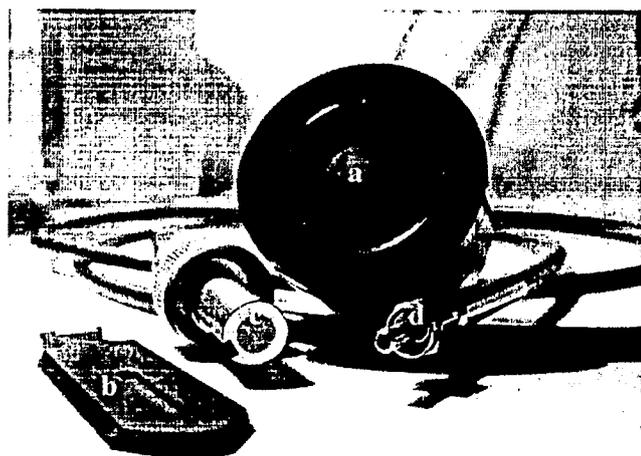


Figura 2. (a) Domo difusor, (b) slit de entrada de 50 μm , (c) conector circular con terminación en ranura de 100 μm , (d) conector de tipo SMA.

El sistema de orientación y seguimiento solar diseñado en el CEILAP, permite ubicar el manajo de fibras ópticas en la región espacial que se desea observar. Dicho sistema está conformado por motores, piezas mecánicas y circuitos de control.

III. CALIBRACIÓN

Para la calibración en longitud de onda, se utilizaron como patrones, lámparas de Hg y Hg-Cd y láseres de Ar-Ga y He-Ne, entre otros. La calibración en intensidad se efectuará utilizando como referencia la radiación de un cuerpo negro y mediciones efectuadas con equipos calibrados.

En la Argentina existen tres fotómetros solares del tipo CIMEL pertenecientes a la red AERONET (Aerosol Robotic Network) administrada por la NASA, que operan en la banda espectral 380 - 870 nm. Los tres fotómetros que se encuentran en nuestro país, se ubican en la provincia de Córdoba (Centro Espacial Teófilo Tabanera de CONAE, CETT - 31.5° S, 64.4° O), en Buenos Aires (CEILAP, CITEFA-CONICET, 34.5° S, 58.5° O) y en Puerto Madryn (42.78° S, 65.0° O)⁴. Estos instrumentos efectúan mediciones de espesor óptico de aerosoles y de

agua precipitable. Sus datos pueden ser utilizados para calibrar el espectrorradiómetro, especialmente haciendo uso del fotómetro ubicado en CITEFA, a metros de este equipo.

Además, en el CEILAP se encuentra en operación un instrumento medidor solar UV de banda angosta, GUV-541 de Biospherical Instruments, San Diego, USA, que sensa en valor absoluto las irradiancias de 305, 313, 320, 340 y 380 nm, con un ancho de banda de 10 nm, calibrado respecto de un espectrorradiómetro de referencia S100. EL GUV-541 también puede ser empleado para realizar una calibración de los datos que aporte el MonoSpec 27.

Por otro lado, utilizando modelos de simulación específicos, se pueden comparar los espectros adquiridos con los generados computacionalmente para un determinado día, una determinada hora y las condiciones atmosféricas correspondientes a esa fecha y lugar geográfico.

IV. TIPOS DE MEDICIONES

Los diferentes tipos de mediciones que se podrán realizar con este sistema son: a) seguimiento del sol (medición de radiación solar directa), b) almucantar (ángulo zenital y masa de aire constantes) y c) planos principales (ángulo zenital y masa de aire variables).

La utilización de este instrumento permite determinar el comportamiento espectral de la radiación solar y las acciones biológicas asociadas (eritema, daño al ADN y a las plantas, etc), y deducir la influencia que tienen sobre esta radiación, las nubes, el ozono y los aerosoles en suspensión en la troposfera baja, así como seguir la evolución diurna de especies contaminantes en la columna de observación.

V. VISUALIZACIÓN ESPECTRAL

El espectro completo se obtiene realizando un barrido espectral con ventanas de 50 nm de ancho que deben ser concatenadas posteriormente utilizando el software. Las señales adquiridas poseen distorsiones debidas a las características intrínsecas de los componentes ópticos que conforman el monocromador, como así también, a la respuesta de eficiencia cuántica variable en longitud de onda de nuestro sensor óptico (cámara CCD). Por tal motivo, se debe ajustar el espectro adquirido haciendo una calibración tanto en longitud de onda como en intensidad utilizando elementos patrones conocidos.

El software de control y visualización calcula la posición que posee el Sol en cada instante respecto a la ubicación específica del equipo y posteriormente envía a través de uno de los puertos de la PC, un comando que es interpretado por el sistema electrónico de control de posicionamiento. A su vez, se encarga del movimiento de las redes de difracción y del barrido espectral; estas tareas las realiza enviando señales de control a dos motores; en el primer caso, se trata de un motor de corriente alterna acoplado a un circuito de control, y en el segundo caso, al "driver" que alimenta el motor paso a paso conectado a la manivela de barrido de longitudes de onda (ver figura 3).

El software también se comunica con la cámara CCD a través de otro de los puertos de la PC, por el cual se envían los paquetes de datos y se recibe la información

visual. Posteriormente utilizando una pantalla de visualización, se presenta la curva espectral adquirida por la CCD y se la almacena en un archivo ASCII para su posterior análisis u observación.

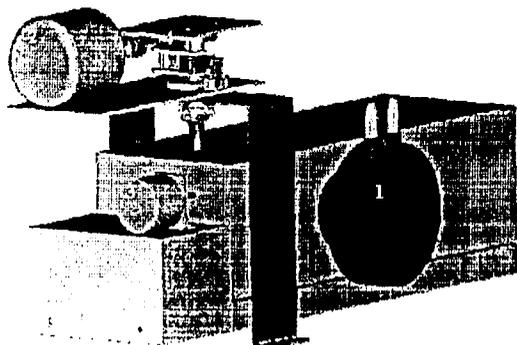


Figura 3: Disposición de los elementos anexos al monocromador. Se observa la ubicación de la cámara CCD (1), el motor de corriente alterna (2), el motor paso a paso (3) y las piezas mecánicas con sus respectivos soportes de sujeción (4).

VI. RESULTADOS PRELIMINARES

Una manera de analizar si los valores tomados con nuestro equipo son los que se esperan para la posición geográfica, el momento y las condiciones del cielo y componentes que atenúan la radiación solar, es comparar el espectro medido con el que surge de la modelización teórica empleando un algoritmo apropiado de cálculo de transferencia radiativa, con parámetros de ozono, aerosoles y reflectividad del suelo acordes al día considerado y lugar geográfico. En nuestro caso, se utilizó el algoritmo de Madronich/NCAR/USA TUV, versión 4.1 (<http://www.acd.ucar.edu/TUV/>).

En la figura 4 presentamos resultados preliminares del espectro de la irradiancia solar incidente sobre el CEILAP, Gran Buenos Aires, el 10 de septiembre de 2003 medido entre las 16:08 horas y las 16:10 horas, en situación de cielo despejado.

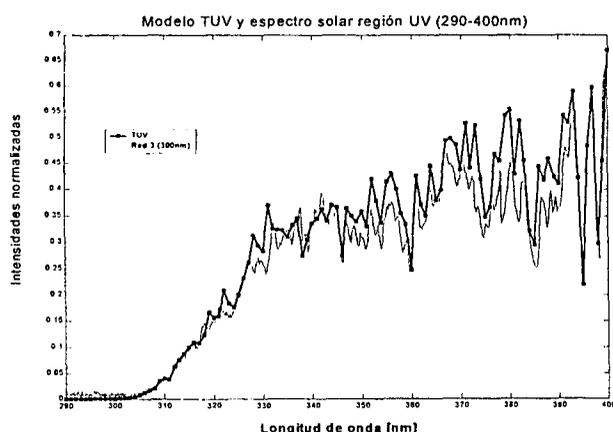


Figura 4. Espectro de radiación solar medido en el CEILAP, el 10 de septiembre de 2003 a partir de las 16:08 horas local, con un intervalo de medición de 2 minutos (UT - 3 horas). La curva representada en líneas y cuadrados, es la generada por el modelo para valores de los parámetros atmosféricos y de albedo característicos del lugar geográfico, y la curva en línea continua, corresponde a la medición realizada con el equipo.

La curva espectral fue generada utilizando la red apropiada para el rango UV solar (290 - 400 nm), dado que cada red posee un diferente rango de aplicabilidad.

Los espectros muestran las oscilaciones típicas debidas esencialmente a la estructura en la irradiancia espectral extraterrestre (ocasionada por las emisiones y absorciones en el propio Sol) y en menor medida al comportamiento fuertemente oscilante de la sección eficaz de fotodisociación del ozono atmosférico terrestre.

VII. DISEÑOS FUTUROS

Actualmente se encuentra en construcción el sistema de orientación y seguimiento solar. Consta de dos tipos de monturas: *azimutal* y *ecuatorial*, las que estarán incorporadas en un mismo mecanismo compuesto por partes móviles, reducciones y motores de movimiento paso a paso. La resolución del movimiento en azimut será de 0.045° y en elevación 0.01° . Con este diseño, será posible realizar todo tipo de posicionamiento y mediciones.

El sistema de orientación automático, estará compuesto por dos motores paso a paso y una serie de piezas mecánicas acopladas de manera apropiada para conseguir movimiento de alta resolución tanto en el plano horizontal (azimut) como en el vertical (elevación). A su vez, los motores poseen sus respectivos drivers que reciben datos desde un microcontrolador y alimentan los bobinados internos de los motores para generar micropasos en la dirección deseada. En la figura 5 en 3D, se pueden observar los elementos que componen el sistema de orientación y seguimiento previamente descrito.

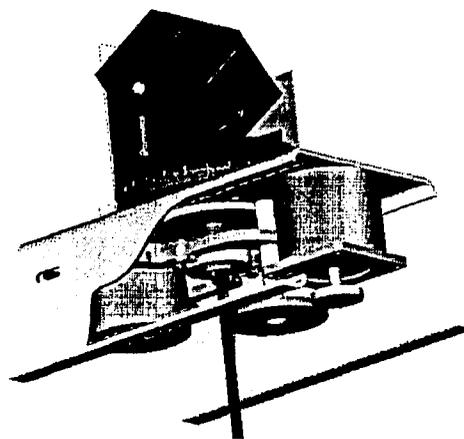


Figura 5. Sistema de orientación y seguimiento solar del espectrorradiómetro computarizado.

El comando de los dos *drivers* lo efectúa un circuito de control compuesto principalmente por un microcontrolador PIC 16F877 de la empresa Microchips, el cual se comunica a través de sus respectivos puertos con la PC y el sistema de posicionamiento.

El microcontrolador envía a los motores corrientes eléctricas precisas y recibe desde un sensor óptico, señales que serán procesadas para comandar el seguimiento del Sol, efectuando los ajustes finos de posicionamiento. Estas acciones sobre los motores se efectúan de manera automática e independientemente de

la PC, una vez que el software habilitó a la placa encargada del control.

Para lograr ubicar el astro celeste y efectuar el seguimiento solar durante un cierto tiempo, el sistema de posicionamiento efectúa dos tipos de ajustes. En una primera etapa, se realiza un posicionamiento "grueso" del manojo de fibras en la dirección del Sol. Dicha tarea la lleva a cabo el software, el cual calcula matemáticamente la posición actual del Sol valiéndose de ciertos datos introducidos por el usuario (latitud y longitud del lugar, hora universal, y fecha) y envía un comando al sistema de control de posicionamiento que decodificará y actuará sobre los respectivos motores que conforman el sistema de orientación

En la siguiente etapa, un elemento óptico electrónico se encargará, junto con el microprocesador, de ajustar segundo a segundo la nueva posición solar y lograr de esta manera un seguimiento continuo enfocado sobre la zona de mayor iluminación (posicionamiento "fino").

En el interior del monocromador se instalará un circuito electrónico para determinar el posicionamiento inicial y final del instrumento, en longitud de onda. Se utilizará para ello una serie de sensores ópticos en herradura y de microswicht, conectados a una placa de control. Con este mecanismo, se espera lograr la exactitud necesaria en la selección de las ventanas de adquisición y en la repetitividad de las mediciones.

VIII. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos un espectrorradiómetro completamente controlado por una PC, la cual comandará el posicionamiento automático de la fibra óptica, el barrido espectral, el cambio de redes de difracción y los ciclos de medición que se desean implementar. Este equipo colaborará en el estudio del medioambiente que viene llevando a cabo el CEILAP (CITEFA-CONICET) y el IFIR (CONICET -UNRosario) a través de mediciones de radiación solar y de diferentes parámetros atmosféricos utilizando distintos equipos y técnicas de sensado remoto.

Si bien la medición es relativa, su comportamiento general está en buen acuerdo con la variación esperada para el día de cielo claro y lugar geográfico considerado en el presente trabajo, determinada a partir de la solución

de la ecuación de transferencia radiativa mediante el modelo TUV.

El monocromador/espectrógrafo, que pertenece a la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (FCEIA/UNR) y que está siendo automatizado en el CEILAP, colaborará, junto al resto de los equipos de sensado remoto pasivo, en el estudio y caracterización de aerosoles atmosféricos vinculados con la contaminación de origen antropogénico, y la medición de radiación solar y sus acciones biológicas relacionadas.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a las instituciones que colaboraron con el aporte de becas (ver detalle al comienzo) y al FOMEC/Ministerio de Educación de la Nación por el aporte del espectrorradiómetro. El presente trabajo está parcialmente financiado mediante el Proyecto ANPCyT PICT 6760 que realizan en forma conjunta investigadores del CEILAP y del IFIR.

REFERENCIAS

- 1- Bais, A. F. "Spectrometers: Operational errors and uncertainties", en "Solar Ultraviolet Radiation", Zerefos, C. y Bais A. F. Editores, Springer, 165-173 (1997).
- 2- McKenzie, R. L., Johnston, P. V., Seckmeyer G. "UV Spectro-radiometry in the Network for Detection of Stratospheric Changes (NDSC)", en "Solar Ultraviolet Radiation", Zerefos, C. y Bais A. F. Editores, Springer, 279-287 (1997).
- 3 - Blumthaler, M. "UV Spectroradiometric Measurements", en el Curso de Posgrado y Doctorado: "Solar UV and effects", Madronich, S. y Piacentini R. D., Responsables del Curso, Facultad de Cs. Exactas, Ing. y Agrim./UNRosario y Observatorio Astronómico de Rosario, Argentina, Oct 30 - Nov 3, 2000.
- 4- Otero, L. A., Ristori, P. R., Fochesatto, G. J., Quel, E. J., Holben, B. "Detección de procesos de intrusión de masas de aire utilizando un análisis estadístico de series temporales de fotómetros solares". Anales AFA, 14:289-293 (2002).