

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN UN ESPECTRÓMETRO DE AMPLIO ESPECTRO

### DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR SOLAR RADIATION MONITORING BASED ON A BROAD-SPECTRUM SPECTROMETER

Faviola Romero\*, Oscar Urquidí\*, Omar Ormachea\*, Augusta Abrahamse\*,  
Joshua Pearce\*\*, Rob Andrews\*\*\*, Matthew de Vuono\*\*\*

\*Centro de Investigaciones Ópticas (CIO), Universidad Privada Boliviana

\*\*Materials Science and Engineering, Michigan Technological University, USA

\*\*\*Mechanical and Materials Engineering, Queens University, Canada

oormachea@upb.edu

(Recibido el 04 de noviembre 2011, aceptado para publicación el 30 de diciembre 2011)

#### RESUMEN

La eficiencia cuántica de materiales fotovoltaicos depende de la longitud de onda de la radiación incidente, el espectro solar influye en la producción de energía producida por estos sistemas. En el presente trabajo, se diseñó y construyó un prototipo funcional de un sistema de medición de radiación solar (global y difusa) basado en un espectrómetro de amplio espectro para el monitoreo solar en Cochabamba, Bolivia, conjuntamente con un sistema similar instalado en Kingston, Ontario. Los datos obtenidos en dos regiones con características geográficas muy distintas ayudarán en el estudio y optimización de materiales fotovoltaicos, para su implementación en diferentes partes del mundo, con características particulares de radiación incidente. Los resultados obtenidos serán publicados para que otras regiones también se beneficien de sistemas fotovoltaicos con materiales optimizados según las características geográficas.

Para la construcción mecánica del sistema, se utilizaron perfiles de aluminio de 60x30 mm. Esta estructura metálica sujeta a una fibra óptica de cuarzo lleva la radiación solar al espectrómetro Ocean Optics USB4000 (200-900 nm). La electrónica del sistema de control, está gobernada por un microcontrolador Arduino UNO, el cual se encarga de sincronizar el movimiento de dos motores PAP bipolares y la toma de datos en el espectrómetro que se activa con un *trigger* externo. La característica principal del sistema es permitir la medición del espectro de los componentes global y difuso de la radiación solar en diferentes ángulos de incidencia. El sistema mecánico ajusta un extremo de una fibra óptica de 0 a 90 grados en dirección norte, cada nueve grados, midiendo la radiación global y mediante una banda mecánica que produce sombra sobre la fibra óptica, mide la radiación difusa. Las medidas son tomadas cada hora y el rango espectral abarcado es del UVA, VIS y parte del IR cercano. Se realizaron pruebas preliminares en dos ciudades de Bolivia y se demostró que la cantidad de radiación UVA es mayor en el El Alto (4062 msnm), la ciudad con mayor elevación, en comparación con Cochabamba que se encuentra a 2570 msnm.

#### ABSTRACT

The quantum efficiency of photovoltaic materials depends on the wavelength of the incident radiation; hence variations in the solar spectrum influence the amount of energy produced by a photovoltaic system. In this work we describe the design and construction of a functional prototype based on a broad-spectrum (UV-VIS-NIR) spectrometer for monitoring solar radiation (global and diffuse) in Cochabamba, Bolivia. Together with a similar system installed in Kingston, Ontario, data collected in these two geographically distinct locations will aid in the study and optimization of photovoltaic materials for implementation in various parts of the world where the incident solar radiation likely has have different spectral characteristics.

The mechanical structure of the system, constructed from 60x30mm aluminum profiles, was designed to support a quartz fiber optic cable that transmits the solar radiation to an Ocean Optics USB4000 (200-900 nm) spectrometer. The electronic controls make use of an Arduino UNO microcontroller to synchronize the movement of two PAP bipolar (stepper) motors with the activation of the spectrometer via an external trigger. A principal characteristic of the system is that it enables the measurement of both global and the diffuse component of the solar spectrum at different angles of incidence. The mechanical system moves the end of the fiber optic cable, oriented to face north from 0 to 90 degrees with respect to the horizontal. Every 9 degrees measurements of the solar spectrum are taken. First the global radiation is recorded, then a semicircular shadow band, designed to block out the sun and the circumsolar disk, is moved into position, permitting the measurement of the diffuse component of the solar spectrum. The system takes hourly measurements of UVA, VIS and part of the NIR solar spectrum. We have taken preliminary measurements in El Alto (4062 masl) and Cochabamba (2570 masl) and find, as predicted, differences in the solar spectrum under similar environmental conditions. Notably, measurements show greater amounts of UVA at the higher elevation.

**Palabras Clave:** Monitoreo de Radiación Solar, Espectroscopia, Sistemas Fotovoltaicos.

**Keywords:** Solar Radiation Monitoring, Spectroscopy, Photovoltaic Systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Sol irradia energía en todas las direcciones, con un espectro cercano al de un cuerpo negro a 6000 K [1], y debido a la inclinación de la Tierra y su trayectoria variable en las diferentes épocas del año, la radiación en un lugar específico puede variar en un alto porcentaje. Muchos factores, como la misma atmósfera que absorbe un 16% [2] de la radiación total que llega a la Tierra antes de pasar por ésta, las nubes y aerosoles, entre otros, causan variaciones en la radiación recibida en la superficie de la Tierra.

El conocimiento preciso de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre es de gran importancia para una variedad de aplicaciones desde la agricultura hasta el estudio del calentamiento global [3-8]. En particular, para aplicaciones de obtención de energía eléctrica solar, la información sobre el *recurso solar* es muy importante. Las centrales eléctricas solares (térmicas) necesitan predecir la energía eléctrica producida con un margen de error menor al 5%, las centrales fotovoltaicas y los sistemas de micro-generación conectados a la red, requieren de datos precisos de la variabilidad del recurso solar [9].

La intensidad de la radiación solar, su variabilidad y, además, el espectro solar influyen en la potencia de generación eléctrica por sistemas solares [10-12].

El espectro estándar AM1.5 usado en la optimización de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino (actualmente el material más común para paneles fotovoltaicos) refleja principalmente las características del espectro solar en latitudes medias y alturas cerca el nivel de mar, estas características espectrales corresponden a muchas regiones de Europa y los Estados Unidos [13]. Nuevos materiales fotovoltaicos (películas delgadas, células de multiunión, etc.) tienen distintas eficiencias cuánticas, como estos materiales se están volviendo comercialmente viables, es importante estudiar el espectro solar en diferentes partes del mundo [14].

El espectro solar en Bolivia (un país caracterizado por su latitud ecuatorial y gran altura en muchas partes del país), tiene influencia en la eficiencia de los sistemas solares, por lo tanto, es importante caracterizar el espectro solar en esta región con características de radiación incidente muy variables.

Actualmente, en Bolivia se tiene déficit en la información sobre el recurso solar; en cuanto a datos sobre la distribución espectral de la radiación en el país, la información es aún más incipiente. La única fuente de datos sobre la radiación solar y accesible al público, son datos satelitales de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Aunque estos datos pueden ser útiles para estudios de pre-factibilidad, la exactitud de datos de satélites son muy variables [15, 16].

Estos datos son procesados para una red de 40x40 km<sup>2</sup>, distancias no suficientemente finas para tomar en cuenta variaciones micro-climáticas [17], además que la resolución temporal de estos datos son promedios de periodos de 3 horas, una resolución que no permite estudios de la variabilidad de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos [18, 19].

Actualmente, Bolivia cuenta con un mapa solar, Figura 1, el cual promedia extensas regiones de 1° de latitud por 1° de longitud en base a imágenes satelitales de la NASA y un método de interpolación [20], para estimar la radiación recibida en función de los meses del año, donde la exactitud de este mapa no ha sido verificado por un periodo a largo plazo. En general, la exactitud de datos de satélites es muy variable y en muchos casos mayor 10% [21-23].

Por lo mencionado, la existencia de una red de medición de radiación solar es imprescindible para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, térmicos y sistemas activados por radiación ultra violeta. Como se resaltó anteriormente, la radiación incidente en la superficie terrestre es función de la altura, Bolivia cuenta con territorios que se encuentran prácticamente al nivel del mar y a alturas que superan los 6000 msnm, teniendo una porción territorial habitada muy importante que se encuentra sobre los 4000 msnm, el altiplano boliviano. Sin embargo, los sistemas para el monitoreo y medición de radiación solar son caros (sistemas de alta precisión tienen costos por encima de los 30 000 \$US [24], que además no incorporan elementos para medir el espectro solar.

En este trabajo, se construyó y diseñó un sistema de medición de radiación solar en base a un espectrómetro de amplio espectro. El monitoreo de radiación solar con este instrumento, permitirá estudiar los efectos solares en Cochabamba para una mejor predicción de la eficiencia de sistemas solares, su optimización y el ajuste del mapa solar ya existente, que por estar basado en fotografías satelitales sólo puede ser usado como una estimación de radiación solar.

Se propone la instalación de una red de monitoreo, basado en el sistema construido (de relativo bajo costo), instalado en diferentes puntos del país. Los espectrómetros USB actuales, son de pequeño tamaño y costos relativamente bajos en comparación a los sistemas de monitoreo convencionales, basados en piranómetros, el prototipo propuesto medirá no sólo la radiación solar global directa, sino también la difusa, parámetros muy importantes para el diseño de celdas fotovoltaicas y sistemas térmicos fundamentalmente.

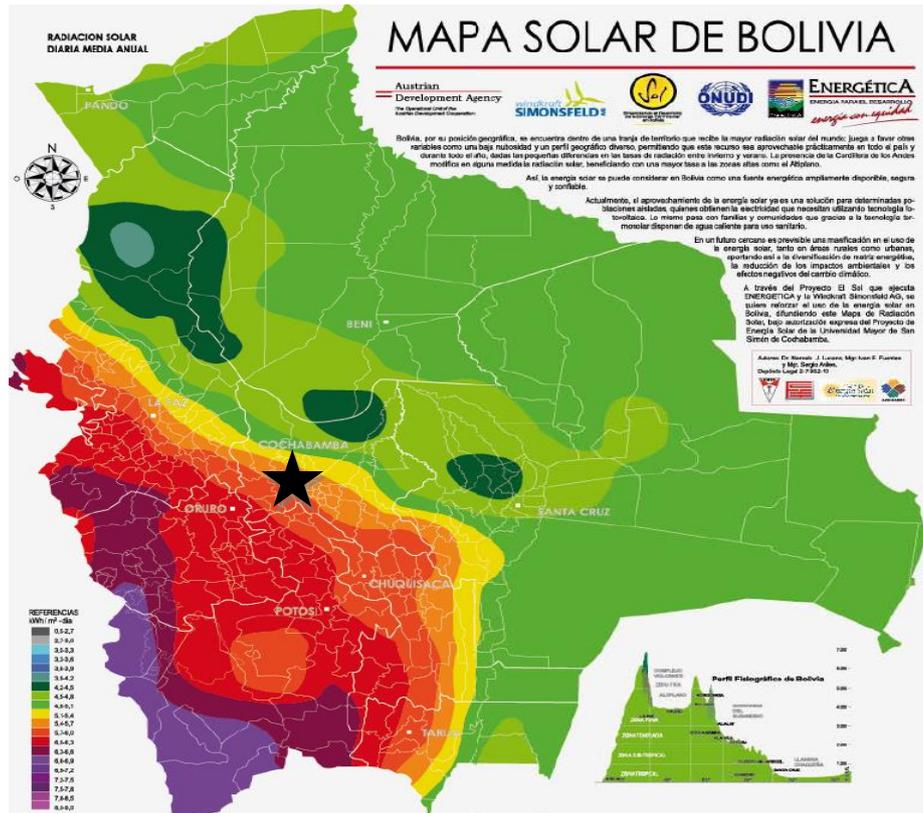


Figura 1 – Mapa solar de Bolivia [20].

## 2. MEDICION DE LA RADIACION SOLAR

Existen diferentes tipos de sensores para medir la radiación solar, por ejemplo, los piranómetros miden la radiación global y, según su diseño, pueden tener distintos niveles de exactitud en los datos tomados. Los piranómetros de bajo costo, utilizan sensores de silicón con una pequeña celda fotovoltaica que genera una corriente eléctrica que es aproximadamente cercana en proporción a la radiación solar. Sin embargo, estos sensores sólo miden una parte del espectro electromagnético solar que atraviesa la atmósfera, muchos de ellos sólo son sensibles a la parte visible y la exactitud en el mejor de los casos tiene un error de 5% [25].

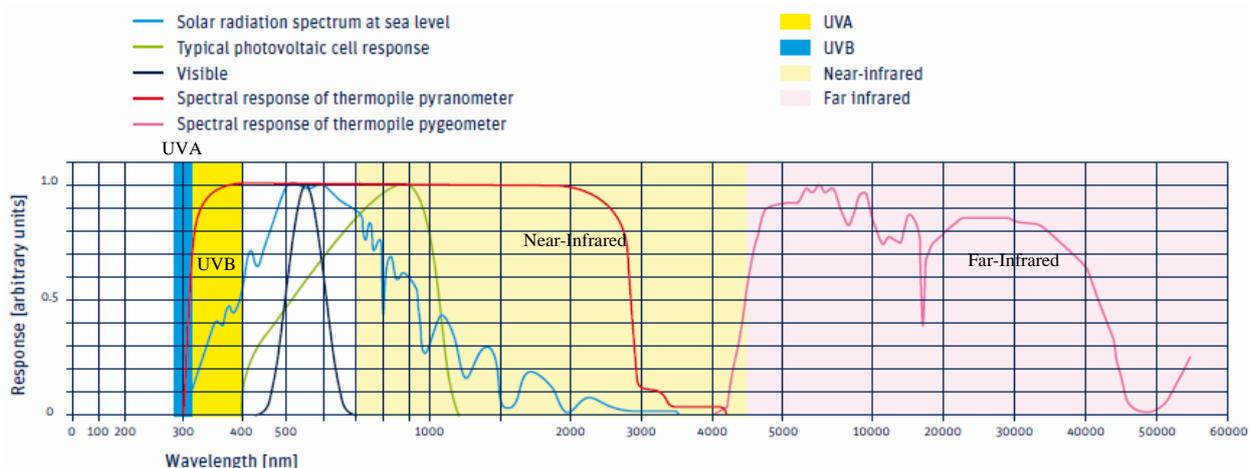
Los piranómetros utilizan un plato negro de un material sensible, montado debajo de dos domos de vidrio. Este plato se calienta con la radiación recibida y un termo acoplador convierte la diferencia de calor entre el plato y el ambiente en una señal de voltaje, proporcional a la radiación. Estos sensores pueden obtener un error anual de menos del 2% [26]. Para medir la radiación directa normal, el sensor está montado en el final de un tubo que bloquea a la radiación difusa. Este equipo, llamado pirheliómetro, tiene que ser montado en un sistema de seguimiento al Sol de dos ejes muy preciso. Si el sensor de un piranómetro se halla en la sombra permanentemente, éste mide solamente la radiación difusa. Los piranómetros más precisos, llamados *secondary standard*, tienen un error de 1 a 3%. Estos sensores, además de tener precios bastante altos (arriba de los 4 000 \$US, deben mantenerse libres de polvo y de sistemas de seguimiento imprecisos para evitar bajar la calidad de los resultados) [24].

Los sensores de medición más apropiados como los piranómetros, miden la intensidad solar integral en un rango de 300 nm a 4  $\mu$ m aproximadamente. Un espectrómetro es sensible a la radiación electromagnética en diferentes partes del espectro, este instrumento se puede calibrar de tal manera que pueda servir como un elemento de medición de radiación solar en función de la longitud de onda.

En la Figura 2 se observa la respuesta de distintos sensores en función de la longitud de onda, para mediciones de la radiación solar, específicamente la respuesta espectral de un piranómetro, un pirheliómetro, a nivel del mar y la respuesta típica de una célula fotovoltaica.

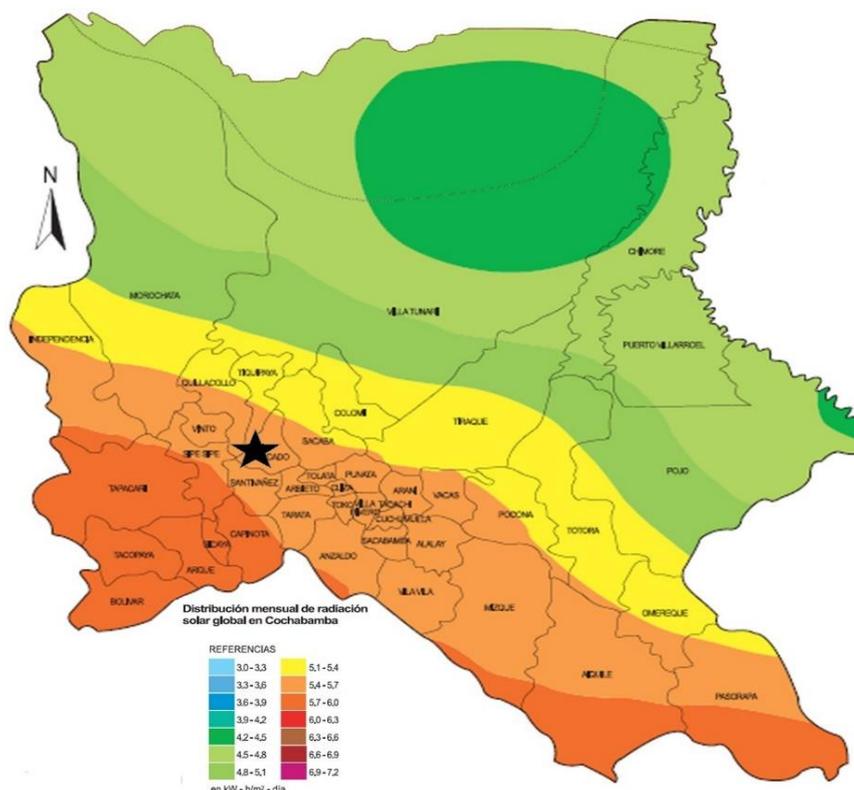
Bolivia, en relación con Europa, recibe más del doble de radiación solar promedio por encontrarse en la franja de territorio que a nivel mundial recibe mayor radiación solar. Esto hace que la energía solar se considere como una fuente

de energía renovable ampliamente disponible en el País. Cochabamba, en particular, recibe un nivel de radiación bastante alto. La media anual de radiación global más baja es entre 4,2 y 4,5 kWh/m<sup>2</sup>-día, se da en la región noreste que es la zona de baja altitud (entre 1000 a 235 msnm), caracterizada por su clima tropical y alta humedad, lo que genera una mayor dispersión de la radiación solar [19]. En la zona suroeste, la radiación solar aumenta a valores entre 5,7 y 6,3 kWh/m<sup>2</sup>-día, esta región se localiza la Cordillera Oriental Central y se caracteriza por su clima seco. Se estima que el promedio anual de radiación solar para el Municipio de Cercado, está en 5,44 kWh/m<sup>2</sup>-día [20].



**Figura 2** – El espectro solar y la respuesta de células fotovoltaicas e instrumentos para medir la radiación solar [26].

En la Figura 3 se muestra la distribución promedio de radiación solar global para el departamento de Cochabamba. Considerando un día solar de 8 horas, el promedio anual es de 680 W/m<sup>2</sup>, teniendo niveles de radiación máxima de 787.5 W/m<sup>2</sup> y mínima de 556,25 W/m<sup>2</sup>. En Europa existe mucha diferencia entre los niveles de radiación solar según la estación del año y región *e.g.* en el sur de Europa la radiación solar máxima está en el rango de 582,2 a 616,4 W/m<sup>2</sup> y en el norte de Europa oscila entre 239,7 y 410,9 W/m<sup>2</sup> [27].



**Figura 3** – Radiación solar promedio para el departamento Cochabamba [20].

Los datos para realizar la gráfica de la Figura 3 fueron tomados por la metodología SSE de la NASA, e interpolados mediante el paquete de análisis geoestadístico ILWIS [20].

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACION SOLAR TERRESTRE

La temperatura en la superficie del Sol es la que caracteriza el espectro solar. De toda la radiación recibida que pasa a través de la atmósfera, aproximadamente el 6.4% es radiación UV, el 48% VIS y el 45.6% IR. La capa de ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono de la atmósfera absorben ciertas porciones del espectro electromagnético al llegar a la superficie terrestre, Figura 4. En esta figura, se observa la emisión del cuerpo negro a una temperatura de 5800°K, correspondiente a la temperatura solar en su superficie. La parte del espectro que atraviesa la atmósfera, se clasificada en longitudes de onda de radiación solar y atmosférica para aplicaciones meteorológicas, la Tabla 1.

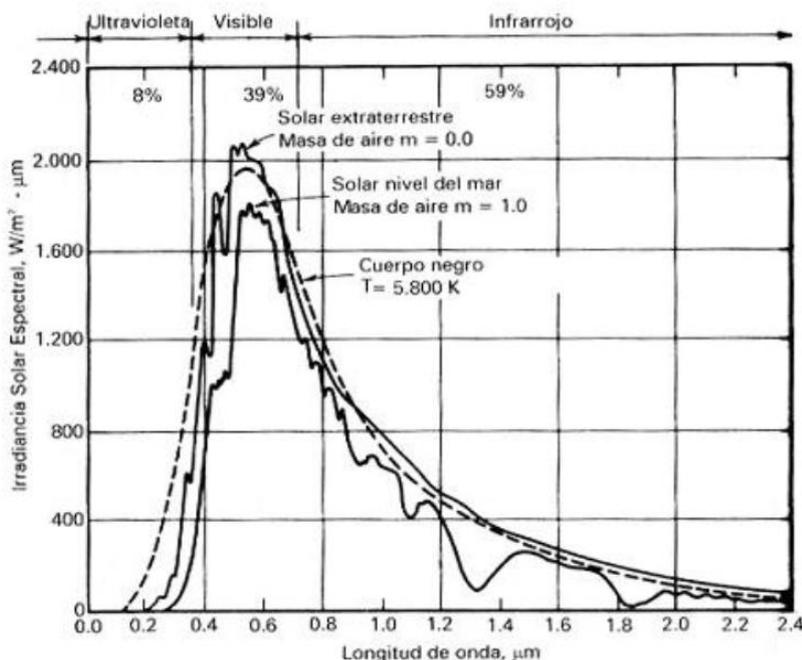


Figura 4 – Intensidad solar en función de la longitud de onda.

La constante solar, denotada  $CS$ , es la energía recibida del Sol en unidades de energía sobre un área perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a la distancia promedio entre el Sol y la Tierra ( $1,495 \times 10^{11} \text{m}$ ) fuera de la atmósfera [3]. La tecnología actual permitió medir la radiación casi al borde de la atmósfera y se obtuvieron valores entre  $1322$  y  $1395 \text{ W/m}^2$ , el World Radiation Center ha adoptado el valor de  $1367 \text{ W/m}^2$  para cálculos ingenieriles, con una incertidumbre y error del 1% [3].

TABLA 1 - LONGITUDES DE ONDA PARA APLICACIONES METEOROLÓGICAS

|            |                          |               |   |
|------------|--------------------------|---------------|---|
| Onda corta | UV-C                     | 100 – 280 nm  | Emitido por el sol, totalmente absorbida por la atmósfera de la tierra, antes de llegar al suelo                        |
|            | UV-B                     | 280 – 315 nm  | Emitido por el sol, 90% absorbido por la atmósfera de la tierra pero biológicamente muy activo, ya que causa quemaduras |
|            | UV-A                     | 315 – 400 nm  | Emitido por el sol, casi todo llega a la superficie, pero no muy activo biológicamente                                  |
|            | Visible                  | 400 – 780 nm  | Luz visible, desde violeta hasta rojo   |
| Onda larga | Infrarrojo Cercano (NIR) | 780 nm – 3 μm | Radiación calorífica del sol  |
|            | Infrarrojo Lejano (FIR)  | 3 μm – 50 μm  | Radiación calorífica de la atmósfera, nubes y alrededores de la tierra  |

Si el Sol se encuentra perpendicular a la superficie terrestre, las ondas provenientes sólo tienen que atravesar la masa de aire ( $AM$ ) de la atmósfera una vez, por lo que este estado se llama  $AM1$ . En otros casos, la ruta hacia la superficie es más larga, dependiendo de la altura a la que se encuentra el Sol (dependiente del ángulo de incidencia de los rayos y de la época del año), por lo que  $AM2$  indica que el camino de la luz solar es el doble de  $AM1$ , este es el caso de la incidencia con un ángulo de  $30^\circ$  [3].

En general, la definición simplificada de la masa de aire es:

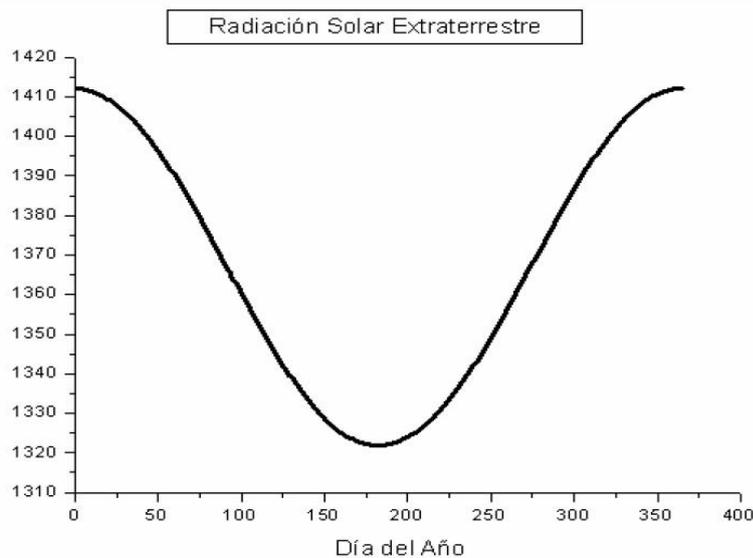
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (1)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo zenit *i.e.* ángulo de incidencia de los rayos solares respecto a la normal del plano.

El documento ASTM G173-03 [28] define las condiciones estándar para aplicaciones fotovoltaicas, con un  $AM1.5$  en un ángulo de plano inclinado de  $37^\circ$  desde el Ecuador, de frente al Sol, es decir, con una elevación de  $41.8^\circ$  sobre el horizonte con la normal de la superficie apuntando al Sol.

Como el valor de energía recibida del Sol no es constante durante el año debido al movimiento de traslación de la Tierra, en consecuencia, el valor de la constante definida cambia. Este nivel de radiación puede ser estimado ya que el movimiento de la Tierra es constante. Esta función se puede expresar con la ecuación (2), donde la única variable es  $n$ , que representa el número de día del año, siendo 1 el primero de enero y 365 el 31 de diciembre [1].

$$CS_d = CS \left( 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \frac{kW}{m^2} \quad (2)$$



**Figura 5** – Radiación solar recibida en función del día del año.

#### 4. CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Los Paneles fotovoltaicos generalmente están instalados inclinados hacia el norte con un ángulo fijo, sin embargo, es importante medir el espectro en diferentes ángulos de incidencia, además de tomar en cuenta, que el albedo de la superficie de la Tierra, en adición a la radiación solar, influye en el espectro incidente y varía en proporción al factor de visión *view factor* [30]. Para tomar en cuenta estos efectos, el espectrómetro toma medidas regularmente en varios ángulos con respecto a la horizontal.

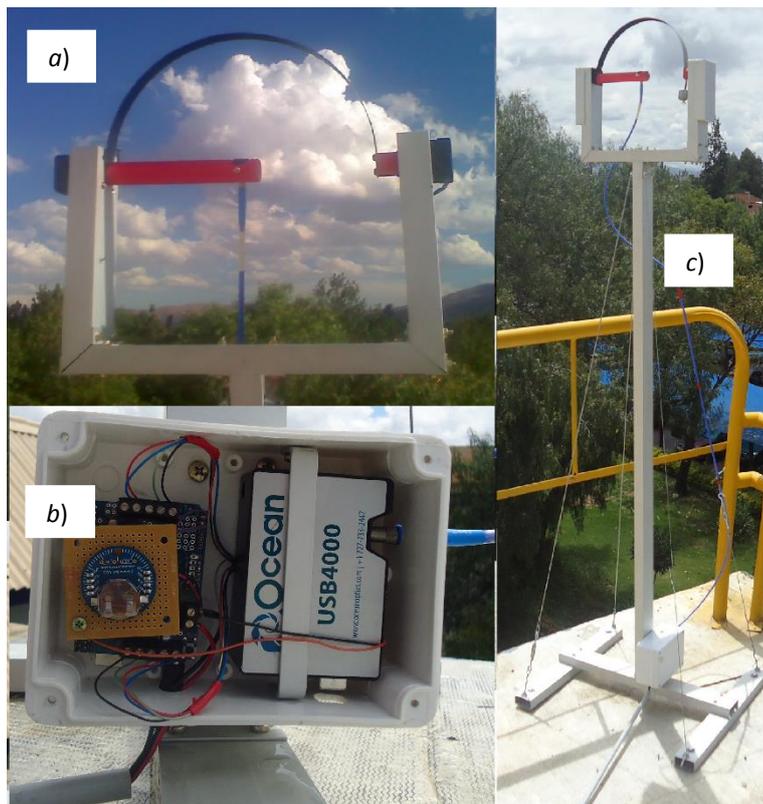
El sistema de medición de radiación solar construido, consta de un espectrómetro comercial Ocean Optics USB4000, ajustado a una fibra de cuarzo de diámetro  $1000 \mu m$ , cuyo extremo contiene un corrector o receptor de coseno Stellarnet CR2 y su acople para medir radiaciones intensas, como la del Sol, un Stellarnet CR2 AP con 10% de apertura. El extremo de la fibra óptica está sujeto a una barra a una distancia determinada, la cual es desplazada por el primer motor paso a paso, en incrementos de 9 grados en un espacio de 0 a 90 grados, para tomar una medida en cada lugar.

Adicionalmente, el sistema fue diseñado para permitir la medición del espectro de la radiación difusa. Un segundo motor está sujeto a una banda de sombra de radio y ancho determinados para dar sombra al sensor, según el día y época del año. Un total de 20 medidas serán tomadas cada hora, diez de radiación directa en distintos ángulos y otras diez de radiación difusa, también a distintos ángulos. El control y sincronización del sistema está gobernado por un microcontrolador Arduino UNO, el cual se encarga de mover ambos motores con ayuda de la placa controladora Adafruit Motor Shield, se necesita además realizar el cálculo respectivo de la posición del Sol para poder dar sombra al sensor y sincronizar y ordenar la captura de datos al espectrómetro. Para llevar un control de la hora y fecha actuales, datos necesarios para el cálculo de la posición del Sol, se conectó un RTC (*real time clock*) al Arduino, el cual al poseer una batería independiente, mide la hora y fecha exactas aún si el sistema no está energizado. Se utilizó la versión más actualizada del reloj, llamada Chronodot v2.1. El espectrómetro está directa y permanentemente conectado a un computador en el cual los datos son almacenados por fecha para su posterior análisis.

#### ▪ Estructura Mecánica

La estructura mecánica del sistema se construyó de piezas de perfil de aluminio de 30x60mm unidas por pernos de distintos diámetros y profundidades, para dar lugar a un soporte del sistema compuesto de dos motores, el soporte de la fibra de cuarzo, Figura 6a, y una caja hermética para contener el espectrómetro y el microcontrolador, Figura 6b. El aluminio es un material de costo relativamente bajo y alta disponibilidad.

La altura de la estructura mecánica es de 2m, figura 6c. Los elementos básicos de la estructura son ambos soportes de los motores, uno de ellos fijado a una barra de teflón que sostiene la fibra de cuarzo que se conecta con el espectrómetro y el otro que sostiene a la banda de sombra (semicírculo para producir sombra en la fibra y permitir la medición de la radiación difusa). Para calcular el diámetro y el ancho de la banda de sombra, se utilizó una equivalencia entre el diámetro y el radio de un piranómetro certificado. El resultado fue de un radio de 13.5 cm y un ancho de 2.5 cm. En función de estos parámetros, se diseñó la estructura metálica, el soporte del sistema y la caja que contiene al espectrómetro y al microcontrolador dependen del espacio disponible y de la estructura del cableado.



**Figura 6** – Estructura mecánica de motores y fibra (a), caja hermética (b), estructura mecánica instalada (c).

La altura de la estructura mecánica es de 2m, figura 6c. Los elementos básicos de la estructura son ambos soportes de los motores, uno de ellos fijado a una barra de teflón que sostiene la fibra de cuarzo que se conecta con el espectrómetro y el otro que sostiene a la banda de sombra (semicírculo para producir sombra en la fibra y permitir la medición de la radiación difusa). Para calcular el diámetro y el ancho de la banda de sombra, se utilizó una equivalencia entre el

diámetro y el radio de un piranómetro certificado. El resultado fue de un radio de 13.5 cm y un ancho de 2.5 cm. En función de estos parámetros, se diseñó la estructura metálica, el soporte del sistema y la caja que contiene al espectrómetro y al microcontrolador dependen del espacio disponible y de la estructura del cableado.

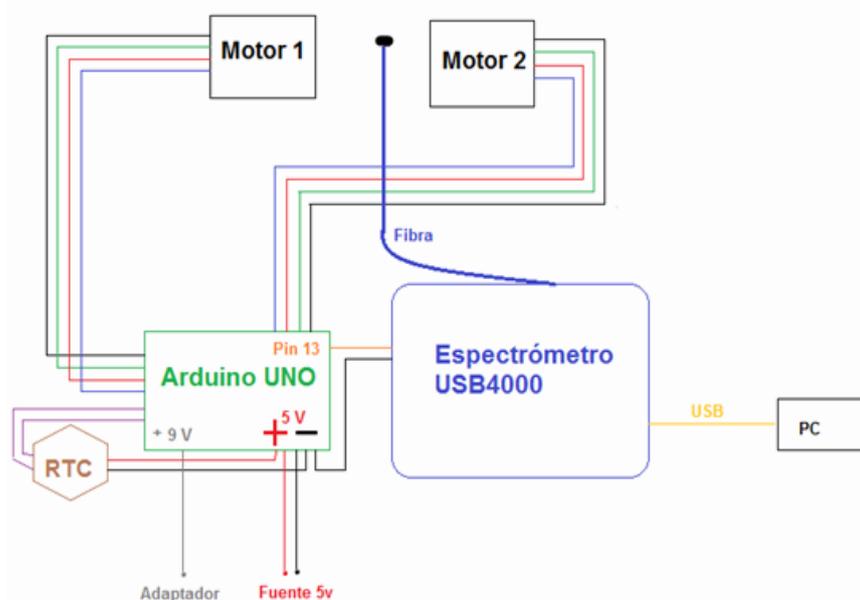
Se consideraron además detalles en el diseño para hacer que la estructura resista los cambios climáticos, por lo que se cubrió los motores con placas de aluminio y se las selló con silicona. Igualmente, los orificios de entrada y salida de cables en la caja hermética fueron sellados con silicona para evitar filtraciones de agua, adicionalmente se agregaron cables tensores en las cuatro esquinas del soporte para evitar el movimiento en caso de vientos fuertes. Finalmente, la estructura fue empernada al piso en el techo, para asegurar la fijación en su orientación, con el sensor y la banda de sombra apuntando al norte magnético, con una inclinación de 8 grados al oeste, siendo la latitud 17.4° Sur y la longitud 66,2° Oeste, datos correspondientes a la ciudad de Cochabamba [29].

#### ▪ Electrónica y Control

Debido a que el sistema está controlado por el microcontrolador Arduino, el programa principal se escribió en lenguaje C. El Arduino UNO es un microcontrolador que consta de 6 entradas/salidas analógicas y de 13 entradas/salidas digitales, las cuales pueden ser programadas para el propósito requerido. La comunicación con el ordenador para quemar los programas se realiza mediante la conexión de un puerto USB, previamente instalados los drivers. El Arduino UNO puede funcionar con la energía del computador o bien gracias a una conexión a una fuente externa de 9VDC. Se tomaron en cuenta tres aspectos cruciales para la elaboración del programa: el movimiento de ambos motores, el cálculo de la posición del Sol en el medio día de cada día y el reloj RTC para llevar una cuenta exacta del tiempo.

#### ▪ Estructura Electromecánica

La estructura electromecánica del sistema está dentro de la estructura de aluminio de una caja hermética, excepto por los cables de alimentación de motores y conexión con el computador. El sistema comprende dos motores bipolares, paso a paso, de cuatro hilos. Para ponerlos en funcionamiento, se extendió las cuatro entradas hasta la caja hermética y se conectó con la placa controladora de motores acoplada al Arduino UNO, que tiene una alimentación de 9V para el microcontrolador y una de +5V y GND para los motores. Se tomó en cuenta también la curva de respuesta de los motores para obtener el torque suficiente para que estos sean capaces de mover tanto la fibra como la banda de sombra. En la Figura 7 se observa la conexión de motores según su función en los pines de la placa controladora de motores. Se comprobó experimentalmente que la corriente necesaria para lograr el suficiente torque es de al menos 1.5 A.



**Figura 7** – Diagrama electromecánico de conexiones del sistema.

Por otro lado, el pin digital #13 del Arduino está conectado al espectrómetro en su pin#7, el cual envía el pulso para obtener la captura de datos, y también una conexión a GND en el pin#6 del espectrómetro. Los puertos analógicos #4 y #5 del Arduino están conectados al RTC en sus puertos SDA y SDC, encargados de datos y hora, respectivamente. El RTC está alimentado por +5V y con una conexión a GND, para evitar que la batería independiente se gaste muy rápidamente.

### ▪ Calibración del Sistema

El espectrómetro Ocean Optics USB4000 posee una certificación de fábrica, en lo que se refiere a la calibración en función de la longitud de onda en un rango de 200 – 900 nm. Este instrumento, respecto a las unidades de intensidad, muestra unidades arbitrarias *counts*.

Para obtener los datos en intensidades (valores absolutos), se necesita calibrar al sistema, esto está previsto para estos instrumentos utilizando el software SpectraSuite, conectado al espectrómetro en el modo de Irradiancia Absoluta, en unidades de  $\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$  en el eje vertical, y la longitud de onda en *nm* en el eje horizontal.

Para la calibración del sistema, se utilizó una lámpara de halógeno de alta potencia (300 W – 120 VAC), cuya curva espectral fue tomada en la *Queens University*, Canadá, por el espectrómetro Avantes de 200 – 2500 nm, el cual se halla certificado y calibrado de fábrica (intensidad en función de longitud de onda), la lámpara halógena se posicionó a una distancia de 251 mm y se registró la curva obtenida. Se dispuso de esa lámpara para el proceso de calibración del espectrómetro Ocean Optics USB4000.

Utilizando la curva obtenida, se realizaron dos tareas:

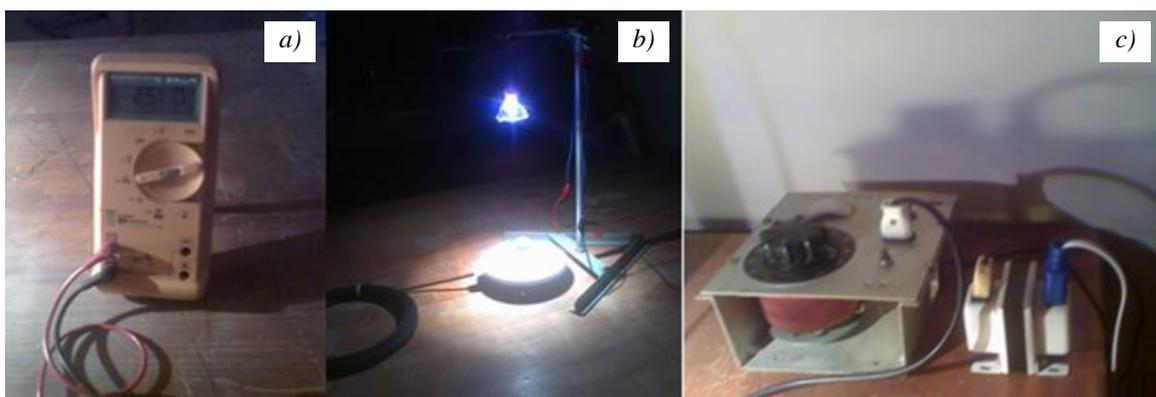
- crear un archivo de referencia, con la extensión “.lpm”
- integrar la curva, para obtener el dato de la intensidad integral total.

El archivo de referencia .lmp se utiliza para comparar la curva obtenida con el espectrómetro en “ua” por nm y la de la radiación real, en  $\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$  por nm, a través de esta operación se crean datos en formato Excel, importándolos a un archivo de texto de dos columnas, la primera es la longitud de onda en nm y la segunda la irradiancia en  $\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ .

El espectro obtenido se integró numéricamente. Se posicionó la lámpara halógena a 251 mm de distancia del sensor (tal como se hizo en Canadá) obteniéndose un valor de 12553.17  $\mu\text{V}$ , correspondientes a 791,20  $\text{W}/\text{m}^2$  para la lámpara halógena mencionada. En esta experiencia, se utilizó el piranómetro Kipp&Zonen CMP-6 de primera clase como sensor de radiación electromagnética, este instrumento entrega un voltaje que es función de la intensidad recibida, donde el valor equivalente es hallado a través de la relación (9).

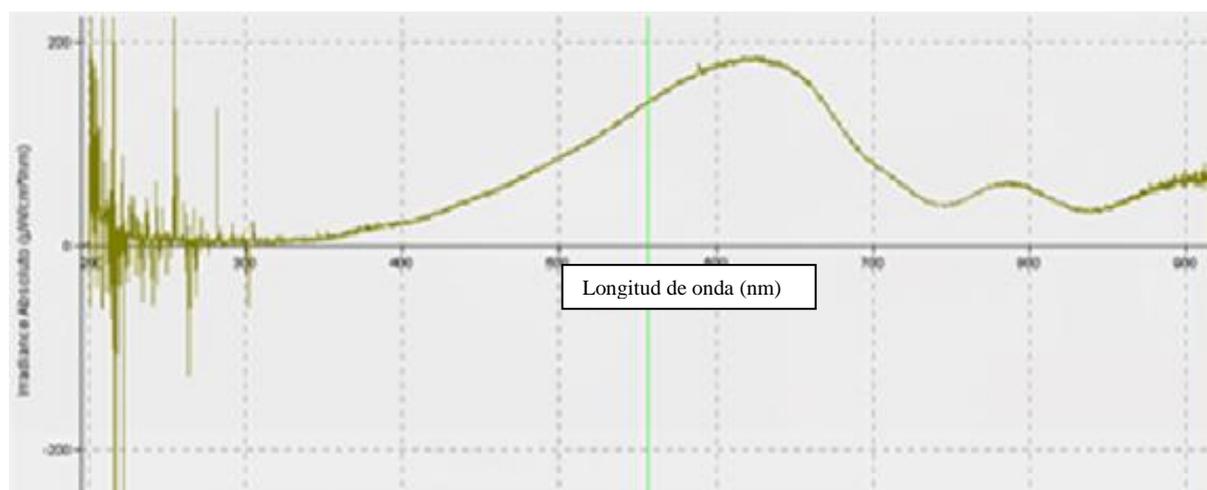
$$\text{Radiación solar} \left[ \text{W} / \text{m}^2 \right] = \frac{\text{Salida del piranómetro} \left[ \mu\text{V} \right]}{\text{Cte. de sensibilidad del piranómetro} \left[ \mu\text{V} / \left( \text{W} / \text{m}^2 \right) \right]} \quad (3)$$

Se utilizó además un circuito estabilizador compuesto por un transformador y un *variac*. Para estabilizar a la lámpara halógena, Figura 8, se incrementó la intensidad hasta que el piranómetro entregue el valor equivalente en  $\mu\text{V}$  a 791.20  $\text{W}/\text{m}^2$ .



**Figura 8** – Sistema de calibración, multímetro Fluke (a), lámpara halógena y piranómetro Kipp&Zonen CMP-6 (b), variac y transformador (c).

En la fórmula (3), la constante de sensibilidad, propia del piranómetro utilizada, es de 15.87  $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ , se utilizó un multímetro Fluke con resolución del orden de  $\mu\text{V}$ , para la obtención del valor en voltaje. El tiempo de respuesta del piranómetro es de 18 segundos, el valor del voltaje alterno que alimenta la lámpara es de 81.2 V y se recomienda esperar 20 minutos hasta que la fuente de luz se estabilice.

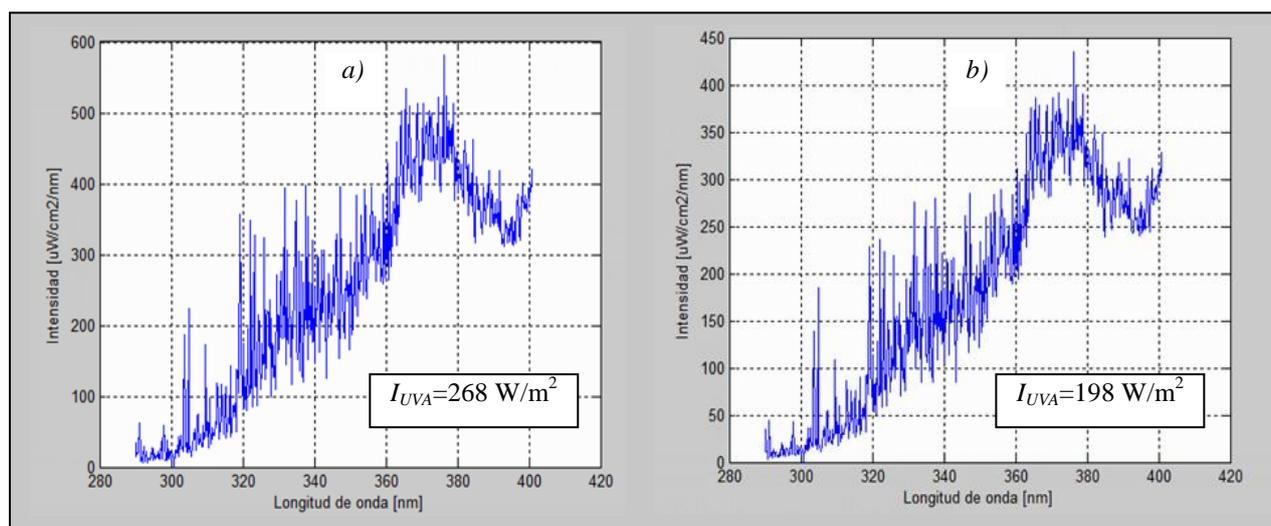


**Figura 9** – Imagen de la medición de radiación  $\mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$  en función de la longitud de onda nm.

Obtenidos los parámetros necesarios de emisión de la fuente patrón, se procedió a cambiar el piranómetro por el sistema construido, basado en un espectrómetro de amplio espectro, donde el extremo de la fibra, ajustado al corrector de cosenos, lleva la radiación incidente al sensor mencionado. Posteriormente, con el espectrómetro conectado a un computador, dentro del software SpectraSuite, en File>New>New AbsoluteIrradianceMeasurement, se eligió la fuente de toma de datos y se procedió a cargar los espectros de referencia con y sin luz. Se cargó el archivo .lpm de referencia. Debido al corrector de cosenos, se tiene una apertura de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, es decir 6350  $\mu\text{m}$  de diámetro con  $180^\circ$  de campo de vista. En la Figura 9 se observa la curva de respuesta en el modo de Irradiancia Absoluta del espectrómetro ya calibrado, en el cual se puede observar los valores en intensidad.

## 5. RESULTADOS PRELIMINARES

Con el sistema calibrado se instaló el sistema y se tomó datos de forma automatizada en Cochabamba, a 2570 msnm. La parte del espectro electromagnético UVA, es de gran importancia pues, con la altura, la cantidad de radiación en esta región se incrementa. En la Figura 10 se muestra dos tomas de intensidad para Cochabamba y la ciudad de El Alto, esta última se halla a 4062 msnm. Ambas mediciones fueron tomadas bajo condiciones similares en días claros sin nubes y a un ángulo aproximado de  $90^\circ$  con respecto a la normal. En la ciudad de Cochabamba se tomaron estos datos el día 24 de noviembre 2011, mientras que en El Alto al día siguiente, a las 12:12 horas en ambos casos. Estos datos muestran un incremento del 25,8 % de radiación global integral (directa + difusa) en función de la altura correspondiente a una diferencia de 1492 m entre ambas ciudades.



**Figura 10** – Imagen de la medición de radiación solar UVA para una altitud de 4062 msnm (a) y 2570 msnm (b).

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló y construyó un sistema de monitoreo de radiación solar basado en un espectrómetro de amplio espectro. El sistema fue calibrado usando una lámpara halógena (como fuente patrón), de la que se obtuvo previamente su espectro en el laboratorio *Mechanical and Materials Engineering* de la Queens University.

El sistema fue instalado en la ciudad de Cochabamba donde se está actualmente obteniendo datos de la radiación directa y difusa en función de la longitud de onda, de manera automatizada. Se realizaron además pruebas de medición en la región espectral UVA, en dos ciudades de Bolivia que se encuentran a diferentes alturas, se comprobó experimentalmente que por lo menos en esta parte del espectro se tiene un incremento sustancial, aproximadamente del 25 %, de la radiación incidente que es función de la altura. De esta manera, se demostró que este sistema es de mucha importancia y que, potencialmente, una red de medición de radiación solar en Bolivia, basada en estos sistemas, podría dar datos más precisos para el diseño de sistemas fotovoltaicos, térmicos y aplicaciones en la región UVA. Se muestra además que con estos datos se puede ajustar el mapa de radiación solar boliviano existente.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Tonda. *El oro solar y otras fuentes de energía*, México, Fondo de cultura económica, 2003.
- [2] R. Rösemann. *Solar Radiation Measurement*, 2004.
- [3] J. A. Duffie and W. A. Beckman. *Solar engineering of thermal processes*, Jhon Wiley & Sons Inc., 2006.
- [4] J. P. Dunlop. *Photovoltaic Systems*, American Technical Publishers Inc, 2010.
- [5] R. A. Messenger and J. Ventre. *Photovoltaic Systems*, Florida: CRC Press, 2004.
- [6] R. Escalera y O. Ormachea. "Remoción de arsénico (V) asitida por oxidación UV solar en un fotoreactor de sección circular." *Investigación & Desarrollo*, pp.58-79, 2009.
- [7] S. H. Tapanes. *Luminoterapia: Radiaciones infrarrojas y ultravioletas*. Internet: [www.sid.cu/sitios/rehabilitación/temas.php?idv=916](http://www.sid.cu/sitios/rehabilitación/temas.php?idv=916). 2011.
- [8] E. P. Tarran. *Desinfección por luz ultravioleta*, Sao Paulo - Brasil: Tech Filter.
- [9] D. Renné et al., *Technical Report NREL/TP-581-42301*, 2008.
- [10] G. R. Betts et al., "The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells." *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 85, pp.415-428, 2005.
- [11] Y. Hirata and T. Tani. *Output variation of photovoltaic modules with environmental factors—I, The effect of spectral solar radiation on photovoltaic module output*, Sol. Energy, vol. 55, pp.463-468, 1995.
- [12] R. Gottschal et al., "Experimental investigation of spectral effects on amorphous silicon devices in outdoor operation." *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, pp.1138-1141, 2002.
- [13] S. Michael and E. L. Meyer. "The effects of spectral evaluation of c-Si modules." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, 1, pp.1-10, 2011.
- [14] M. Muller et al., "An Investigation into Spectral Parameters as they Impact CPV Module Performance." Presented at the 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Freiburg, Germany, 2010.
- [15] C. Gueymard and S. Wilcox. "Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data." *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp.1068-1084, 2011.
- [16] T. Cebecauer et al. "Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally." *Proc. SolarPACES Conj*, Granada, Spain, pp.20-23, 2011.
- [17] H. T. Ngyen and J. M. Pearce. "Estimating potential photovoltaic yield with r.sun and the open-source Geographical Resources Analysis Support System." *Solar Energy*, vol.84, no. 5, pp.831-843, 2010.
- [18] P. Derewonko and J. M. Pearce. "Optimizing design of household scale hybrid solar photovoltaic combined heat and power systems for Ontario, 2009." Presented at the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC, pp.1274-1279, 2009.
- [19] D. Renné et al., *Solar ResourceAssessment*, 2008.
- [20] M. Lucano y I. Fuentes. "Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales." *Revista Boliviana de Física*, vol. 16, pp.13-21, 2010.
- [21] C. Gueymard and S. Wilcox. "Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data." *Solar Energy*, vol.85, no. 5, pp.1068-1084, 2011.
- [22] T. Cebecauer et al. "Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally." *Proc. SolarPACES Conj*, Granada, Spain, pp. 20-23, 2011.
- [23] C. A. Gueymard. "Uncertainties in modeled direct irradiance around the sabara as affected by aerosols: Are current datasets of bankable quality." *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 133, pp.031024, 2011.
- [24] Solar Resource and Meteorological Assessment Project (SOLRMAP) Solar and Meteorological Station Options: Configurations and Specifications, Steve Wilcox and Tom Stoffel, NREL Report, 2009

- [25] T. Stoffel et al., *Concentrating Solar Power: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data (CSP)*, 2010.
- [26] Kipp&Zonen. CMP-CMA serie Piranometers, Albedometers - Manual del Usuario . Delft, Holanda: Kipp&Zonen, 2010.
- [27] [http://www.sun-networks.org/html/-radiation\\_solar.html](http://www.sun-networks.org/html/-radiation_solar.html) (Sun Networks)
- [28] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [29] <http://magnetic-declination.com/#>
- [30] R. Andrews and J. M. Pearce. *The Effect of Spectral Albedo on Amorphous Silicon and Crystalline Silicon Solar Photovoltaic Device Performance*, in press.