Artículo **Revista de Energías Renovables**
Diciembre 2018 Vol.2 No.7 1-12

Diseño y construcción de un pirheliómetro para medición de radiación directa

Design and construction of a pyrheliometer for direct radiation measurement

DIBENE-ARRIOLA, Luis†, DUARTE-FRANCO, Jorge, GONZALEZ-PALAFOX, Saray y PAREDES-VÁZQUEZ, Cesar

Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas, División de Ingenierías, Cuerpo Académico de Innovación y Aplicación Tecnológica. Blvd. Nuevo Vallarta no. 65, Col. Nuevo Vallarta, Bahía de Banderas, Nay.

ID 1er Autor: *Luis, Dibene-Arriola*

ID 1er Coautor*: Jorge, Duarte-Franco*

ID 2do Coautor: *Saray, Gonzalez-Palafox*

ID 3er Coautor: *Cesar, Paredes-Vázquez*

Recibido 30 de Julio, 2018; Aceptado 30 Noviembre, 2018

Resumen

El Cuerpo Académico “Innovación y Aplicación Tecnológica”, reconocido por PRODEP como UTBB-CA-4, con nivel en formación, recibió en septiembre del año 2016 la aprobación de un recurso económico por la cantidad de $300,000 pesos para un proyecto denominado “Evaluación integral del recurso solar en Nuevo Vallarta, Nayarit”. Dentro de los equipos que se requieren adquirir, está un aparato para medir radiación solar directa denominado pirheliómetro. Sin embargo, al cotizarlo su costo es de aproximadamente $22,000 dolares, IVA incluido, siendo el seguidor solar la parte más cara con un costo de casi $18,000 dolares. Debido a lo anterior, resulta casi imposible adquirirlo, por lo que nos estamos dando a la tarea de diseñar y construir un sistema de seguimiento solar y utilizar un piranómetro Kipp & Zonnen CMP-3 con que ya contamos, para construir el pirheliómetro, lo que pensamos costará mucho menos dinero. Además de lo anterior, es un compromiso dentro de dicho proyecto el involucrar a nuestros alumnos, por lo que invitamos a 2 de ellos, de la carrera Ingeniería en energías renovables para que nos apoyen con este proyecto y así coadyuvar en su formación y profesionalización.

Radiación, medición, pirheliometro

Abstract

The Academic Body "Innovation and Technological Application", recognized by PRODEP as UTBB-CA-4, with level in formation, received in September 2016 the approval of an economic resource in the amount of $ 300,000 pesos for a project called "Comprehensive evaluation of the solar resource in Nuevo Vallarta, Nayarit". Within the equipment that is required to acquire, there is an apparatus for measuring direct solar radiation called a pyrheliometer. However, when quoted, its cost is approximately $ 22,000 dollars, including IVA, with the solar tracker being the most expensive part with a cost of almost $ 18,000 dollars. Due to the above, it is almost impossible to acquire it, so we are taking the task of designing and building a solar tracking system and use a Kipp & Zonnen CMP-3 pyranometer with which we already have, to build the pyrheliometer, which We think it will cost much less money. In addition to the above, it is a commitment within this project to involve our students, so we invite 3 of them, from the engineering career in renewable energy to support us with this project and thus contribute to their training and professionalization.

Radiation, measurement, pyrheliometer

Citación: DIBENE-ARRIOLA, Luis, DUARTE-FRANCO, Jorge, GONZALEZ-PALAFOX, Saray y PAREDES-VÁZQUEZ, Cesar. Diseño y construcción de un pirheliómetro para medición de radiación directa. Revista de Energías Renovables. 2018. 2-7:1-12

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ldibene@utbb.edu.mx.)
† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El sol es el centro de gravedad del sistema solar y es el suministro de energía para la tierra. La energía emitida por el sol permite la existencia de la vida en la tierra. El sol emite radiación y parte de ésta alcanza la tierra provocando numerosos efectos directos e indirectos sobre los seres que en ella habitan. Estos efectos pueden ser positivos o negativos, como prevenir el raquitismo o provocarnos cáncer. Se considera que nuestra vida en este planeta sería absolutamente imposible sin la radiación solar.

Ello a través de nuestra comida, el agua que bebemos y el aire que respiramos. También influye en el clima, que es vital en nuestra moderna civilización y su progreso técnico. El poder del sol se aprovecha cada vez más para proporcionar una fuente de energía limpia y renovable sin una huella de carbono o emisiones de gases de efecto invernadero.

La energía solar se puede utilizar para generar electricidad y proporcionar calor. Además, el sol es un importante impulsor de la agricultura y la hidrología. Su espectro se compone principalmente de luz ultra violeta (UV), luz visible e Infrarrojo cercano. Esa radiación atraviesa el espacio en forma de ondas electromagnéticas colimadas hasta llegar a la capa exterior de la atmósfera y permanece prácticamente constante y se le conoce como “Constante Solar” (Vega de Kuyper & Morales, 2015).

El valor de dicha constante utilizado actualmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es de 1367 W / m^2 y se ha mantenido desde 1982; sin embargo, se ha medido por la NASA y su valor en el año 2008 fue de 1360.8 ± 0.5 W / m^2. Ese valor cambia a lo largo del año de acuerdo a la distancia entre la tierra y el sol en un 6.6% siendo más intensa en enero que en julio, y también cambia hasta un 0,1%, dependiendo de la actividad solar (Rosemann, 2011).

La radiación extraterrestre que procedente directamente del Sol, es reflejada al entrar en la atmósfera por la presencia de las nubes, el vapor de agua, etc. y es dispersada por las moléculas de agua, el polvo en suspensión, etc.

Por todo esto la radiación solar que llega a una superficie terrestre procede de tres componentes: Radiación Directa (B): Formada por los rayos colimados procedentes del Sol directamente es decir, que no llegan a ser dispersados. Radiación Difusa (D): Aquella procedente de toda la bóveda celeste excepto la que llega del Sol. Originada por los efectos de dispersión mencionados anteriormente. Radiación Del Albedo (R): Procedente del suelo, debida a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre montañas, lagos, edificios, etc. Depende muy directamente de la naturaleza de estos elementos. Esta se obtiene del cociente entre la radiación reflejada y de la incidente sobre una superficie. La suma de estas tres componentes anteriores da lugar a la Radiación Global (G):

$G = B + D + R$ (IDEA, 2018).

Hoy en día, medir la radiación solar es extremadamente importante en muchos campos de aplicación diferentes, como climatología, meteorología, hidrología, predicción de contaminación, energía solar, agricultura y pruebas de materiales. La medición de la radiación solar para la climatología y el pronóstico del tiempo es una parte importante de muchas de las actividades diarias de nuestro mundo, de lo que ya no podemos prescindir. Por ejemplo, los datos obtenidos son esenciales para la aviación.

Durante los últimos años, la medición de la radiación solar también se ha vuelto más y más importante en el campo de las pruebas de materiales, en el que, por ejemplo, la resistencia a la radiación UV de productos y acabados ha pasado a primer plano. La precisión de los datos de radiación solar es fundamental para la industria de la energía solar. En investigación y desarrollo, elegir ubicaciones óptimas y tipos de sistemas, monitoreo de la eficiencia y programación del mantenimiento. Dentro de la atmósfera cerca del suelo, las características temporales y espaciales de los valores de radiación están influenciados por las características de la superficie del suelo. (Rösemann, 2011). Para observaciones de la radiación en la superficie de la Tierra, se definen dos regiones de longitud de onda; radiación de onda corta, de longitudes de onda de 300 nm a 4.000 nm, y radiación de onda larga desde 4.500 nm (4.5 μm) a más de 40 μm.

ECORFAN® Todos los derechos reservados

La radiación de onda corta incluye las bandas de longitud de onda ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. Las mediciones terrestres de alta calidad de la radiación solar siempre se realizan utilizando radiómetros con una respuesta espectral plana en un amplio ancho de banda espectral. Esto generalmente se logra usando un detector de "termopila" con un recubrimiento negro que absorbe la radiación entrante, se calienta y convierte el aumento de temperatura en una pequeña señal eléctrica.

Los tipos de piranómetros y pirheliómetros, las especificaciones de rendimiento, los métodos de calibración, etc., han sido definidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO). Los instrumentos que cumplen con las clasificaciones de la OMM e ISO, proporcionan mediciones precisas de la radiación solar en todas las condiciones climáticas.

Dado que el mundo meteorológico y la comunidad científica están utilizando los mismos tipos de instrumentos, los datos se pueden comparar con mediciones de redes y satélites de estaciones meteorológicas y climáticas, en varios lugares e independientemente del tipo de sistema de energía solar. (KIPP & ZONEN, 2018). De acuerdo con (Rösemann, 2011), Los factores más influyentes que afectan la radiación recibida en cualquier ubicación particular son:

- Ubicación en la tierra
- Fecha y hora
- Precipitación (nube, niebla, lluvia, nieve)
- Constricción del horizonte (campo de visión)
- Contaminación del aire (aerosoles y gases)
- Albedo

Debido a los efectos físicos mencionados anteriormente, a veces no es suficiente para muchos campos de aplicación medir simplemente la 'Radiación Global' proveniente de todo el lugar de medición. También puede ser necesario medir la "Radiación Directa" proveniente únicamente del sol y / o la "Radiación Difusa". Los equipos utilizados para medir la radiación solar son los siguientes:

Radiación solar directa

- Sensor: Pirheliómetro
- Rango espectral: 300 nm a 3000 nm
- Campo de visión: <5 °
- Accesorio necesario: seguidor solar
- Mide la radiación que proviene directamente del sol y su aureola.

El rastreador solar mantiene el pirheliómetro alineado con el sol durante el período de luz diurna. Es un parámetro clave para aplicaciones de energía solar, especialmente de concentración.

Radiación global

- Sensor: Piranómetro
- Rango espectral: 300 nm a 3000 nm
- Campo de visión: 180 °
- Accesorio Necesario: Ninguno
- Accesorio opcional: Unidad de ventilación

Es la medida básica para la mayoría de las aplicaciones.

Radiación difusa

- Sensor: Piranómetro
- Rango espectral: 300 nm a 3000 nm
- Campo de visión: 180 °

Accesorio necesario: Dispositivo de sombreado; Anillo sombreador o bola sombreadora y Seguidor solar.

Debido a que al Cuerpo Académico “Innovación y Aplicación Tecnológica” reconocido ante PRODEP como UTBB-CA-4, actualmente “En Formación” le fueron aprobados en el año 2016 la cantidad de $300,000 pesos para su fortalecimiento y a su vez desarrollar un proyecto denominado “Evaluación integral del recurso solar en Nuevo Vallarta, Nayarit”, en el cual se requiere conocer; entre otros, el comportamiento de la radiación solar directa, a la par de la radiación global, que ya se está midiendo; tanto horizontal como inclinada 20° hacia el sur, la radiación de albedo y la UV total.

ECORFAN® Todos los derechos reservados

Al cotizar esos instrumentos; el pirheliómetro con su seguidor solar tiene un costo (IVA incluido) de $21,797.44 dólares, que excede en mucho el monto total aprobado, mientras que el albedómetro cuesta $5,100 dólares y el radiómetro para radiación UV total la cantidad de $4,125 dólares. De ese recurso, ya fueron ministrados en septiembre del 2017 $84,207.27 pesos que se usaron para adquirir una estación meteorológica compacta marca Lufft modelo WS600, y se espera que este año 2018 se entreguen los restantes $215,792.73 pesos.

Como puede verse, para lograr llevar a buen término dicho proyecto solo se dispone de la cantidad suficiente para adquirir este año el albedómetro y el radiómetro para UV total, pero imposible adquirir el pirheliometro. Debido a ello, en el UTBB-CA-4 decidimos construir el pirheliómetro aprovechando que tenemos 3 piranómetros Kipp&Zonnen CMP3 y usar uno de ellos para el piheliómetro y dejar los otros 2 midiendo radiación global horizontal y radiación global inclinada 20° hacia el sur.

Se aprovechó también para involucrar a 2 alumnos de la Ingeniería en Energías Renovables que ofrece la UTBB para que apoyaran en el diseño y construcción del seguidor solar y acoplarle al mismo el piranómetro al cual se le adaptó un tubo con una abertura frontal, con sus anillos de apertura y de una adecuada longitud del tubo de tal forma que se defina un campo de visión de 5° y el ángulo requerido de inclinación de 1°. Las superficies internas están ennegrecidas para evitar reflejos internos. El tubo y el detector de anteojos ópticos están protegidos por un vidrio plano. Lo anterior, de acuerdo con lo especificado por (Rösemann, 2011).

El seguidor solar

Se realizó una búsqueda sobre las bases del tema para después comenzar a proponer un diseño para el seguidor solar. Se tomaron las dimensiones y peso del piranómetro que será montado en la estructura del seguidor para adaptar nuestro diseño en esas condiciones. Para el diseño se recurrió a una lluvia de ideas, donde en su mayoría se aportaban ideas completas para la estructura del seguidor.

Conforme se presentaban los diseños se iban descartando los detalles poco convenientes, al final se hizo una combinación en la estructura con las partes que se consideraban viables y se creía estable la estructura. La idea es que tenga 2 grados de libertad en su movimiento. En las figuras 1 y 2 se muestran los esquemas del diseño del seguidor solar al que finalmente se llegó:

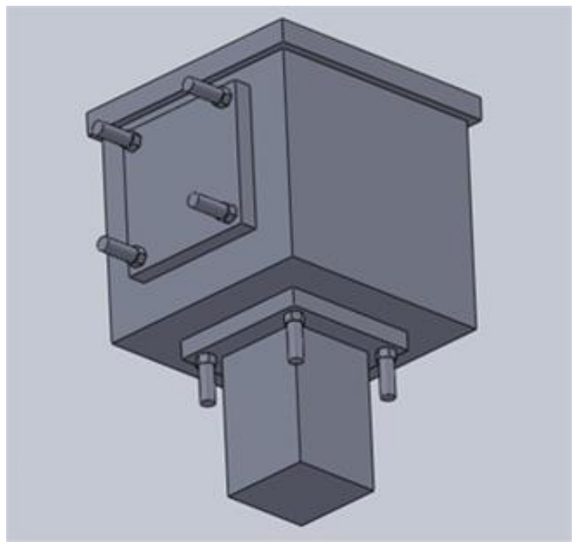

Figura 1 Esquema del seguidor solar. Elaborado con solidworks. Vista isométrica inferior
Fuente: Elaboración Propia

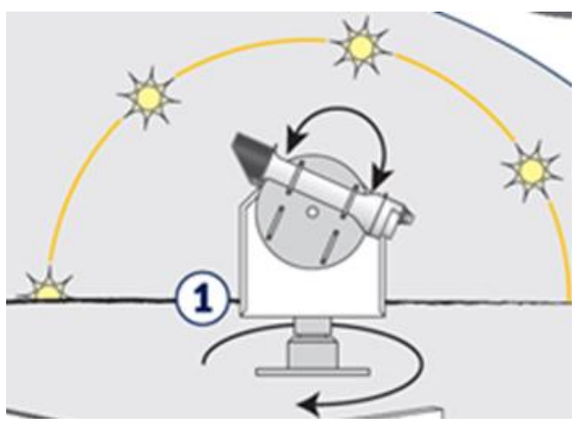

Figura 2 Esquema del seguidor solar mostrando los 2 grados de libertad de movimiento
Fuente: Recuperado de KippZonen_InstructionSheet_Pyrheliometer_CHP1_V1603

Diagrama de conexión

Se realizó el cableado electrónico como se muestra en la imagen 1 siguiente:

ECORFAN® Todos los derechos reservados

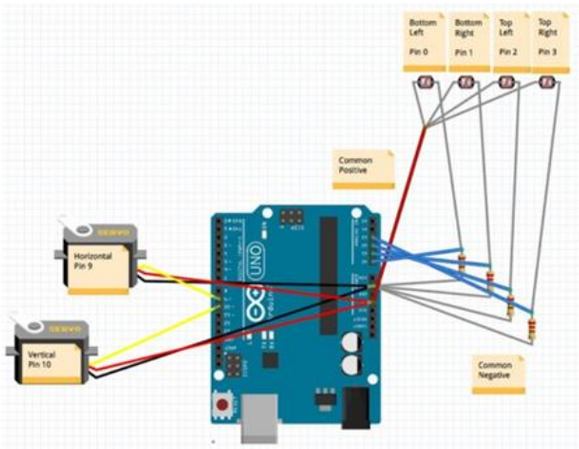

Imagen 1 Diagrama de conexión del cableado electrónico al ARDUINO UNO
Fuente: Elaboración Propia

Ya que no se alcanza a apreciar con claridad en la imagen, a continuación se describen los pines a los que van conectadas las 4 “LDRS” y los dos servomotores:

- Pin A0 - LDR1,
- Pin A1 - LDR2,
- Pin A2 - LDR3,
- Pin A3 - LDR4,
- Servo horizontal a pin 9,
- Servo Vertical a pin 10.

La Programación del seguidor Solar

Por medio del Arduino Uno se cargó la programación del seguidor solar, como se muestra en la fotografía 1 siguiente:

Imagen 2 Fotografía del Arduino Uno y Computadora para su programación
Fuente: Fotografía propia

El programa que se elaboró se muestra en la siguiente imagen:

Esta_es_la_buena

```
#include <Servo.h> // libreria para los servo motores

// 180 horizontal MAXIMO
Servo horizontal; // declaramos el valor para el servo horizontal
int servoh = 90;

int servohLimitHigh = 180; //limite en posicion superior
int servohLimitLow = 0; //limite para posicion inferior


Servo vertical;   // vertical servo
int servov = 90;
int servovLimitHigh = 180;
int servovLimitLow = 0;



int ldrlt = 0; // conexion a las resistencias LDR
int ldrrt = 1;
int ldrld = 2;
int ldrrd = 3;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  horizontal.attach(11); //servo horizontal pin digital 9
  vertical.attach(12); // servo vertical pin digital 10
  horizontal.write(80);
  vertical.write(45);
  delay(3000);
}

void loop()
{
  int lt = analogRead(ldrlt); // top left (superior izquierdo)
  int rt = analogRead(ldrrt); // top right (superior derecho)
  int ld = analogRead(ldrld); // down left (inferior izquierdo)
  int rd = analogRead(ldrrd); // down rigt (inferior derecho)

  int dtime = 20;
  int tol = 100;

  int avt = (lt + rt) / 2; // valor superior maximo
  int avd = (ld + rd) / 2; // valor inferior maximo
  int avl = (lt + ld) / 2; // valor izquierdo maximo
  int avr = (rt + rd) / 2; // valor derecho maximo

  int dvert = avt - avd; // diferencia entre superior e inferior
  int dhoriz = avl - avr;// diferencia entre izquierdo y derecho


  Serial.print(lt);   // Imnprimir valores  de posicion en monitor serial
  Serial.print(" ");
  Serial.print(rt);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(ld);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(rd);
  Serial.print("   ");
  Serial.println(" ");

if (lt, rt, ld && rd == false){

 vertical.write(95);
  horizontal.write(79);
  delay(15);
}
  if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // revisar la diferencia para cambiar al angulo vertical
  {
  if (avt > avd)
  {
    servov = ++servov;
     if (servov > servovLimitHigh)
     {
      servov = servovLimitHigh;
     }
  }
  else if (avt < avd)
  {
    servov= --servov;
    if (servov < servovLimitLow)
  {
    servov = servovLimitLow;
  }
  }
  vertical.write(servov);
  }

  if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // revisar la diferencia para cambiar al angulo horizontal
  {
  if (avl > avr)
  {
```


ECORFAN® Todos los derechos reservados

```
    servoh = --servoh;
    if (servoh < servohLimitLow)
    {
    servoh = servohLimitLow;
    }
  }
  else if (avl < avr)
  {
    servoh = ++servoh;
     if (servoh > servohLimitHigh)
     {
     servoh = servohLimitHigh;
     }
  }
  else if (avl = avr)
  {

  }
  horizontal.write(servoh);
  }
   delay(dtime);

}
```

Imagen 3 Programa que se elaboró para el seguidor solar en el Arduino
Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento del Circuito

El funcionamiento general del circuito logra la localización del sol debido al uso de sensores LDR que procesan la señal de cuatro puntos diferentes, los cuales están sincronizados y si alguno marca un estado diferente, se manda una señal al ARDUINO para que este controle los servomotores y se posicione la estructura siempre perpendicular a la incidencia mayor de radiación solar. Específicamente, el seguimiento del sol se realiza por control de lazo cerrado, controlando servomotores a partir de las señales recibidas de los LDR.

La retroalimentación se realiza por medio de los mismos sensores (LDR) y la programación de Arduino, lo que permite detectar el movimiento o giro. El LDR entrega niveles de voltajes proporcionales a la resistencia contra el sol, una vez que los 4 LDR llegan a un estado en el que tienen la misma resistencia, estos son procesados por el Arduino y de esta forma se puede conocer la posición del panel solar necesaria para el movimiento de los servomotores.

Cabe resaltar que el estado de balance de las 4 resistencias tendrá como efecto una posición en la que la carga mecánica reciba radiación directa. En la imagen 4 siguiente se muestra el funcionamiento general del circuito:

Imagen 4 Funcionamiento general del circuito del seguidor solar
Fuente: Elaboración propia

El seguidor podrá estar en operación los 365 días del año siendo alimentado por una batería cargada por paneles solares haciendo así totalmente autónomo el seguimiento de la trayectoria solar del pirheliómetro lo cual representa un costo de operación nulo que nos ayuda a tener un considerable ahorro monetario. La siguiente fotografía muestra como quedó construido el seguidor:

Imagen 5 Fotografía del seguidor que se construyó para el proyecto. Con dos grados de libertad de movimiento
Fuente: Fotografía propia. Julio 2018

Materiales utilizados para construir el seguidor

Los materiales que se utilizaron para construir el seguidor solar así como su respectivo costo se muestran en la tabla 1 siguiente:

ISSN: 2523-6881
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Descripción	Cant	Unidad	Precio Unitario	Total
LDRs	4	Piezas	$ 17.00	$ 68.00
Cable calibre 12	8	m	$ 8.00	$ 64.00
Resistencias de 1 kΩ	4	Piezas	$ 1.00	$ 4.00
Servomotores	2	Pieza	$ 120.00	$ 240.00
Placa Arduino con su respectivo cable USB	1	Pieza	$ 650.00	$ 650.00
Placa fenólica perforada	1	Pieza	$ 30.00	$ 30.00
Soldadura para estaño	1	Bote	$ 30.00	$ 30.00
Cables macho-macho y hembra-macho	25	Piezas	$ 3.00	$ 75.00
Kola loka	3	Tubos	$ 25.00	$ 75.00
Placa metálica galvanizada	1	Pieza	$ 400.00	$ 400.00
Bases giratorias de 15.5 x 15.5 cm con rodamientos	2	Piezas	$ 90.00	$ 180.00
Cuadrado de fierro de 10 x 10 cm y 25 cm de altura	1	Pieza	$ 30.00	$30.00
Ángulo de 25.4 mm	1	m	$ 50.00	$50.00
Tornillos de 6.3 mm x 5 cm	16	Piezas	$ 1.00	$ 16.00
Rondanas de 13 mm x 6.3 mm	8	Piezas	$ 1.00	$ 8.00
Tuercas de 6.3 mm	16	Piezas	$ 1.00	$ 16.00
Pijas de 10 mm de longitud x 2 mm	8	Piezas	$ 1.00	$ 8.00
Juntas de silicón	1	Pieza	$ 60.00	$ 60.00
Abrazaderas sinfín de 75 mm	2	Piezas	$ 15.00	$ 30.00
Taquetes de 6 mm x 50 mm	8	Piezas	$ 1.00	$ 8.00
Indirectos				$ 200.00
Total				**$2,242.00**

Tabla 1 Materiales y su costo, utilizados para construir el seguidor solar
Fuente: Elaboración Propia

El Pirheliometro

De acuerdo con (Rösemann, 2011), visto desde la Tierra, el sol tiene un ángulo sólido de aproximadamente 0.5° y, de acuerdo con las recomendaciones de la OMM, se ha determinado un campo de visión de 5° y un ángulo de inclinación de 1° como la configuración óptica para pirheliómetros.

Debido a este ángulo, el sensor detectará no solo la radiación directa sino también parte de la radiación circumsolar. La radiación circumpolar es causada por la di- fracción de la luz del sol debido a la condición de la atmósfera, principalmente aerosoles, y también está influenciada por la altitud solar.

Es por eso que es necesario estandarizar el ángulo de apertura y otros detalles geométricos para lograr la comparabilidad de los resultados de medición entre diferentes tipos y marcas de pirheliómetros. Los pirheliómetros de campo generalmente tienen una ventana plana de cuarzo para proteger el detector y el tubo de la vista y medir toda la radiación solar de onda corta en el rango de 200 nm a 4.000 nm (4 µm). Algunos instrumentos más antiguos pueden tener ventanas de vidrio y, por lo tanto, un rango espectral más restringido. Por lo general, hay alguna forma o escudo de lluvia para proteger la ventana. Una imagen de un pirheliómetro se puede ver en la imagen 6 siguiente:

Imagen 6 Pirheliómetro mostrando protector de la lluvia y de apoyos de alineación
Fuente: (Rösemann, 2011)

Normalmente se instala un pirheliómetro en un sistema de seguimiento solar automático de dos ejes para la medición continua de la irradiancia solar directa como se muestra en la imagen 7 siguiente:

Imagen 7 Pirheliometro montado en un seguidor solar
Fuente: (Rösemann, 2011)

Los pirheliómetros de campo constan de los siguientes componentes principales, que se muestran en la figura 3 siguiente:

ECORFAN® Todos los derechos reservados

– Elemento sensor termoeléctrico
– Tubo
– Ventana protectora
– Anillos de apertura
– Ayudas de alineación

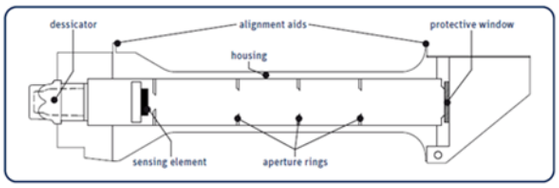

Figura 3 Construcción de un pirheliómetro
(Rösemann, 2011)

En los pirheliómetros de campo, la medición se realiza mediante un detector termoeléctrico totalmente negro similar al utilizado en piranómetros porque se requiere una gran estabilidad y una absorción de radiación no selectiva en un amplio rango espectral. La abertura frontal, los anillos de apertura y la longitud del tubo están construidos de tal forma que definen un campo de visión de 5 ° y el ángulo requerido de inclinación de 1 °.

Las superficies internas están ennegrecidas para evitar reflejos internos. El tubo y el detector de anteojos ópticos están protegidos por la ventana plana mencionada anteriormente. Los pirheliómetros de mejor rendimiento utilizan una construcción de doble tubo. Esto es similar, en principio, a domos duales en un piranómetro y reduce los efectos del viento y el enfriamiento evaporativo en las mediciones.

Los pirheliómetros y otros instrumentos para la medición de la radiación solar directa deben apuntar de forma precisa y continua al sol. La precisión de puntería debe tener una desviación máxima de 0.5 ° del eje solar para cumplir con los requisitos de monitoreo de rutina de la OMM. Sin embargo, para fines científicos, se requiere 0.1 °. (Rösemann, 2011).

Para determinar el diámetro y longitud del tubo que permita adaptar el piranómetro CMP3 en pirheliómetro, se requieren primero las medidas de dicho piranómetro, que se mestran en la figura siguiente:

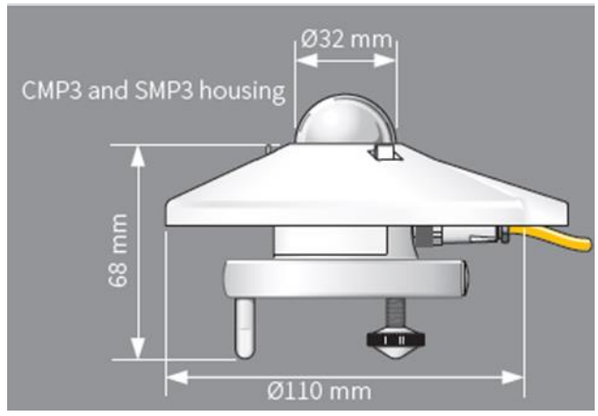

Figura 4 Medidas piranómetro CMP3
(KIPP&ZONEN, 2018)

Las medidas del elemento sensible de color oscuro son de 1” de diámetro, el cual se puede ver en la imagen siguiente:

Imagen 8 Fotografía del Piranómetro CMP3 donde puede verse el domo de 32 mm, el elemento sensor oscuro de 25.4 mm (1”) y el tubo de 38 mm
Fotografía propia. Julio 2018

Las medidas estándar del pirheliómetro CHP1 de Kipp&Zonen se muestran en la figura siguiente:

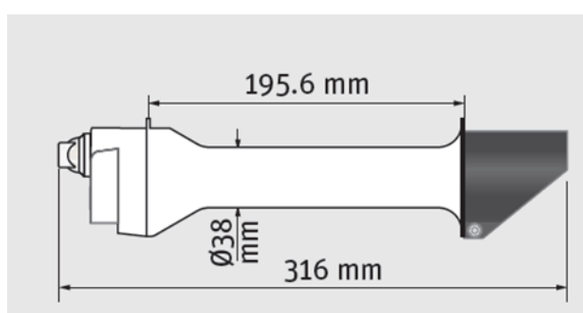

Figura 5 Medidas exteriores de un pirheliometro
Recuperado de: KippZonen_InstructionSheet_Pyrheliometer_CHP1_V1603 el 15 de Julio de 2018

ECORFAN® Todos los derechos reservados

Estas medidas se respetaron para el proyecto.

Construcción del priheliómetro

La idea es ajustarse a los criterios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), por lo que se conservaron las dimensiones especificadas para el pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1, utilizando un tubo de aluminio de 38 mm externos como carcaza externa, otro tubo de 32 mm de diámetro exterior para la carcaza interna y se adaptaron 3 anillos de CPVC de 32 mm de diámetro interior para que los rayos solares lleguen directamente y completamente al elemento sensor del piranómetro.

Se decidio que mejor no se le montara al pirheliómetro la ventana protectora de lluvia (de vidrio), al no encontrar sus especificaciones de la misma en la bibliografía y se optó mejor por conservar el domo transparente del piranómetro. Se cortó el tubo de aluminio de 38 mm de acuerdo a la figura 5 y el tubo de 32 mm con 2 cm menos para que no tocara el domo transparente (ver imágenes 9 y 10 siguientes):

Imagen 9 Fotografía del Piranómetro con su domo y los 2 tubos de aluminio cortados de acuerdo a las medidas de la figura 5
Fotografía propia. Julio 2018

Imagen 10 Fotografía del Piranómetro con los 2 tubos de aluminio y el seguidor al fondo
Fotografía propia. Julio 2018

Asimismo, al tubo de 32 mm se le adaptaron 3 anillos de tubo CPVC de 32 mm de diámetro exterior y 25.4 mm de diámetro interior, de modo que el haz de luz solar pase libremente por el espacio interior en un cilindro de 25.4 mm de diámetro, pero rebote si viene con un ángulo de inclinación mayor a 5°. El interior del tubo y los anillos se pintaron de color negro mate, de acuerdo a las especificaciones de construcción del pirheliómetro. Esto puede verse en la imagen siguiente:

Imagen 11 Fotografía mostrando los detalles de la parte final del pirheliómetro. Se ven los tubos de aluminio de 38 y 32 mm, y el primer anillo de CPVC de 25.4 mm interior, pintados en su interior de negro mate
Fotografía propia. Julio 2018

ISSN: 2523-6881
ECORFAN® Todos los derechos reservados

La imagen 12 muestra el pirheliómetro montado en su base y en el seguidor solar. Asimismo, se aprecia la manera como se fijó al seguidor y el tubo de 38 mm al piranómetro

Imagen 12 Fotografía del Pirheliómetro montado en el seguidor solar
Fotografía propia. Julio 2018

La imagen 13 muestra el pirheliómetro con su cubierta protectora de lluvia fijada mediante abrazadera sinfín al tubo.

Imagen 13 Fotografía del detalle de la cubierta protectora del pirheliómetro
Fotografía propia. Julio 2018

La imagen 14 muestra a los alumnos de 9° IER Jorge Duarte y Saray Gonzalez revisando la programación del segruidor solar.

Imagen 14 Fotografía de Jorge y Saray Programando el seguidor solar
Fotografía propia. Julio 2018

La imagen 15 muestra al seguidor solar con el pirheliómetro funcionado. Para ellos se utilizó la luz de un teléfono celular la cual impactaba directamente en los elementos sensores LDR y se movia al celular y el equipo lo seguía con sus dos grados de libertad de movimiento de acuerdo a lo buscado.

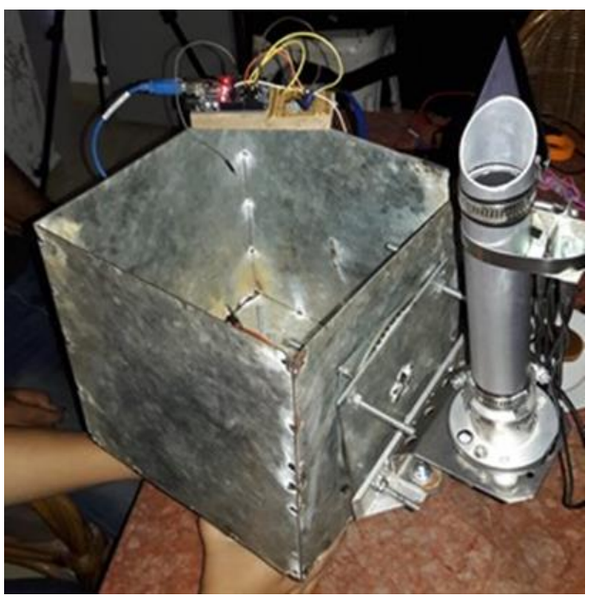

Imagen 15 Fotografía del Pirheliómetro funcionando
Fotografía propia. Julio 2018

La imagen 16 muestra el detalle de los sensores LDR montados en el tubo de 38 mm y alineados con dicho tubo para que se siga al sol.

ISSN: 2523-6881
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Imagen 16 Fotografía con detalle de los 4 sensores LDR montados en el tubo del pirheliómetro
Fotografía propia. Julio 2018

Materiales y costos de adaptación del piranómetro en pirheliómetro

Debido a que ya se contaba con el pirenómetro Kipp&zonen CMP3, su adaptación a pirheliómetro solo implicó un costo aproximado de $1500 pesos. La tabla 2 muestra los materiales utilizados para ello.

Descripción	Cant	Unidad	Precio Unitario	Total
Tubo Aluminio 38 mm diámetro exterior	1	Pieza	$500.00	$500.00
Tubo Aluminio de 32 mm diámetro exterior	1	Pieza	$480.00	$480.00
Tubo CPVC de 25.4 mm de diámetro interior	1	m	$55.00	$55.00
Abrazadera Sinfín de 38 mm de acero	2	Pieza	$40.00	$80.00
Abrazadera Sinfín de 51 mm de acero	1	Pieza	$60.00	$60.00
Pintura esmalte negro mate	1	Bote	$55.00	$55.00
Pintura esmalte blanca	1	Bote	$55.00	$55.00
Tornillo de 6.3 mm x 38 mm	1	Paquete con 4 piezas	$22.00	$22.00
Rondana acerada de 6 mm diámetro interior	10	Piezas	$0.50	$5.00
Tuerca de 6.3 mm de diámetro	8	Piezas	$2.50	$20.00
Indirectos				$200.00
Total				**$ 1,532.00**

Tabla 2 Materiales y sus costos para adaptar el Piranómetro CMP3 en Pirheliómetro
Fuente: Elaboración Propia

Al anterior costo habría que agregar el costo de las horas-hombre destinadas a este proyecto, el cual se muestra en la tabla 3 siguiente, pero que no fueron remuneradas ya que esta es una investigación de interés propio y los gastos fueron ejercidos por los autores de este proyecto.

Acción	Subtotal HH
Revisión de documentos y diseño del seguidor	40
Adquisición de partes para el seguidor	10
Construcción del seguidor	40
Pruebas y ajustes del seguidor	40
Revisión de documentos y diseño del pirheliómetro	40
Adquisición de partes del pirheliómetro	10
Construcción del pirheliómetro	10
Pruebas y ajustes del pirheliómetro en el seguidor	10
Total de horas empleadas	**200**

Tabla 3 Horas hombre dedicadas al diseño y construcción del seguidor solar y de la adaptación del piranómetro CMP3 en pirheliómetro
Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Se elaboró un programa para el seguidor solar, en el Arduino. Se diseñó el circuito electrónico para el seguidor solar, se adquirieron los componentes del mismo y se conectaron.

Se diseñó la caja y la base para construir el seguidor solar, se compraron los componentes y se construyó la misma.

Se adaptó un Piranómetro Kipp&Zonnen CMP3 para que solo reciba radiación solar directa. Esos componentes se adaptaron a la caja del seguidor solar.

Se hicieron pruebas de funcionamiento del seguidor solar, con el pirheliómetro adaptado, el cual trabajó adecuadamente y siguió una fuente de luz.

ISSN: 2523-6881
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Conclusiones

Fue posible diseñar, construir y poner en funcionamiento el pirheliómetro montado en un seguidor solar por una fracción del costo original, el cual era de $21,797.44 dolares (alrededor de $400,000.00 pesos), pues ocupamos la cantidad de $3,774.00 pesos en total, y que fueron aportados por los autores del artículo, más unas 200 horas-hombre para terminar este proyecto, de modo que el recurso destinado al Cuerpo Académico "Innovación y aplicación tecnológica" por PRODEP de $300,000.00 pesos para fortalecer el Cuerpo Académico "Innovación y Aplicación tecnológica" será suficiente para adquirir un albedómetro (CMP6) y un Radiometro para Radiación UV total. Así tendremos instalados en nuestra estación de monitoreo climático 2 piranómetros CMP3 para medir radiación solar global horizontal e inclinada 20° al sur; 1 pirheliómetro para medir radiación directa; 1 albedómetro y 1 radiómetro para radiación UV total además de la estación meteorológica compacta LUFFT WS 600 que mide precipitación, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura del aire, humedad relativa y presión barométrica; todos estos equipos conectados a un datalogger CR-1000 y generando una base de datos sincronizada en el tiempo y que permitirá buscar correlaciones entre los diversos parámetros medidos. Además, se involucró a 2 alumnos de Ingeniería en Energías Renovables.

Recomendaciones

La generación de los datos de radiación directa será motivo de otro artículo, para compararla con los datos de satélite. Ya se tiene un artículo comparando las lecturas de radiación horizontal e inclinada 20° hacia el sur contra datos de satélite.

Agradecimientos

Se agradece a la UTBB por facilitar el piranómetro CMP3 para adaptarlo y convertirlo en pirheliómetro y a los alumnos Jorge Duarte y Saray González Palafox, quienes contribuyeron con el seguidor solar y trabajaron muy duro para su diseño y construcción.

Referencias

Agenda Internacional de Energia . (2012). Retrieved 2013 йил 14-Octubre from World Energy Outlook. Resumen ejecutivo. : http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Spanish.pdf

Duarte, F. J. (Junio de 2018). Base pirheliometro. Nuevo Vallarta, Nayarit, México.

DEA, G. (19 de 07 de 2018). *RADIACIÓN SOLAR.* Obtenido de http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm.

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : processes and systems.* USA: Elsevier.

KIPP & ZONEN. (20 de Junio de 2018). *Solar Radiation Measurements for Solar Energy Applications*. Obtenido de http://www.kippzonen.com/Knowledge-Center/Theoretical-info/Solar-Radiation.

KIPP&ZONEN. (15 de Julio de 2018). *http://www.kippzonen.es/Product/213/CMP3-Piranometro#.W1kU9NIzbIU*. Obtenido de KippZonen_Brochure_Pyranometers.pdf: file:///C:/Users/User/Downloads/KippZonen_Brochure_Pyranometers.pdf

Rösemann, R. (2011). *a Guide to Solar Radiation Measurement.* Netherlands: Gengenbach Messtechnik.

Vega de Kuyper, J. C., & Morales, S. R. (2015). *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones.* México, D.F.: Alfaomega.

ECORFAN® Todos los derechos reservados