



Estimación de la componente directa de la radiación solar a partir de un sensor de iluminancia

Ricardo A. Mena Pérez, Danna M. Cortés Chablé, A. Cristina Valencia Rosado, Renato E. Castillo Marrufo

Solarimetría

Prof. [REDACTED]

1. Introducción

La medición de la radiación solar es de suma importancia en el ámbito de la energía solar porque permite realizar cálculos y estimaciones sobre la producción energética y el desempeño de los sistemas. Tanto los sistemas fotovoltaicos como los de concentración de potencia dependen de mediciones confiables de la radiación, no sólo durante sus operaciones sino también desde antes de su instalación, en la selección del terreno. Algunas de las principales aplicaciones de las mediciones de la radiación solar son: la prospección de terrenos, el diseño de sistemas fotovoltaicos o termosolares, el cálculo del desempeño y monitoreo de los sistemas de energía solar, el control de calidad de los módulos fotovoltaicos, la evaluación del desarrollo tecnológico, entre otros (Kipp & Zonen, 2018).

La energía que viene del sol lo hace de manera directa en rayos paralelos hasta el punto en el que atraviesa la atmósfera, a partir del cual, la radiación comienza a dispersarse a causa de la interacción con los gases presentes en esta. De esta manera, la radiación que alcanza la superficie de la Tierra puede clasificarse en una componente directa y en otra difusa. Se le denomina radiación global a la suma de estas dos componentes; sin embargo, este término generalmente hace referencia a la radiación que incide sobre una superficie horizontal, de tal manera que la relación se define por la siguiente ecuación:

$$GHI = DHI + DNI \cos(\theta) \quad (1)$$

Donde GHI es la irradiancia global sobre una superficie horizontal, DHI es la componente difusa sobre una superficie horizontal, DNI es la componente directa de la radiación y θ es el ángulo cenital. Las unidades están dadas en W/m^2 . En días de cielo despejado, la irradiancia global horizontal varía normalmente entre los 700 y 1,300 W/m^2 al medio día solar, dependiendo de la latitud, altitud y la época del año (Kipp & Zonen, 2018).

Los instrumentos que se usan para medir GHI se denominan piranómetros; asimismo, los pirheliómetros son los instrumen-

tos que miden la componente directa, DNI, y los difusómetros miden la componente difusa, DHI. Todos estos funcionan bajo el mismo principio ya que emplean una termopila como sensor. Las termopilas se basan en el efecto Seebeck, el cual establece que cuando dos metales a diferentes temperaturas son puestos en contacto, se genera una corriente denominada “termoelectrónica”, o un voltaje cuando el circuito está abierto (Camuffo D., 2014). Estas corrientes o voltajes son proporcionales a la diferencia de temperaturas. Las termopilas de los piranómetros miden la corriente generada por la diferencia de temperaturas entre una superficie negra sobre la que incide la radiación y el armazón del instrumento (Kipp & Zonen, 2018). Este voltaje es tan pequeño, del orden de los μV por cada W/m^2 , que es necesario el uso de un amplificador (OPAMP) para poder registrar estos valores; sin embargo, los OPAMPs de uso industrial degradan significativamente la señal de voltaje, por lo que para estas aplicaciones se usan amplificadores de alta calidad. Asimismo, para asegurar mediciones de buena calidad, se requieren también cables de alta calidad, aislamiento adecuado y que el amplificador sea de bajo desfase, bajo ruido y gran resolución (Kipp & Zonen, 2018). Aunque, todos estos elementos incrementan el costo del instrumento significativamente.

Los piranómetros de termopila tienen la ventaja de poder medir una amplia porción del espectro solar, por ejemplo, el piranómetro de la serie CMP21 opera a longitudes de onda desde 285 a 2,800 nm; a diferencia de los fotovoltaicos, que miden aproximadamente en el rango entre 400 a 1,100 nm (Hinckley A., 2017).

Por otro lado, existe una gran variedad de modelos determinísticos para estimar la radiación solar en un sitio sin necesidad de realizar mediciones. Este tipo de modelos están basados en las relaciones geométricas de la posición del sol a lo largo del día y en los diferentes días del año y toman en consideración factores atmosféricos que degradan o dispersan la radiación solar extraterrestre hasta llegar a la superficie, tales como la nubosidad, la turbidez atmosférica, nivel de contaminación, entre otros (Scarpa et al., 2017). Antonanzas et al., (2019) evaluaron 70 diferentes modelos de estimación, algunos muy sen-

cillos que sólo se complementan de las temperaturas, hasta otros más complejos que consideran varios factores atmosféricos. Estos autores encontraron que solamente 8 modelos mantienen un error cuadrático medio normalizado (nRMSE) menor al 5% para GHI y menor al 10% para DNI, los cuales fueron REST2, sSOLIS, ESRA, HE1, IP2002, K1980, mP1982 y mP2000.

1.1 Objetivos

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es: Diseñar y construir un instrumento que permita estimar la radiación solar directa a partir de un sensor de iluminancia de bajo costo. Para el cumplimiento de este, se proponen 3 objetivos específicos: Desarrollar un sistema de seguimiento solar automático que permita acoplar un sensor de radiación solar; diseñar un pirheliómetro a partir de un sensor de iluminancia considerando el estándar de la Organización Mundial Meteorológica (WMO); validar los datos medidos de radiación directa con el sensor a partir de la comparación con las estimaciones obtenidas del modelo ESRA (European Solar Radiation Atlas).

1.2 Actividades a desarrollar

Para la realización del proyecto se siguió el procedimiento ilustrado en la figura 1. Se inició por consultar el estándar de la WMO del diseño de pirheliómetros y medición de la radiación solar para definir los parámetros del sistema que se construyó. A partir de estos lineamientos, se procedió a diseñar un sistema de medición de la componente DNI de la radiación solar considerando el uso de componentes y materiales económicos y de fácil acceso. Este sistema consta de 3 elementos, según se establece en los objetivos específicos, los cuales son el seguidor solar, del cual fue necesario desarrollar un sistema mecánico y un programa de seguimiento en Arduino; el tubo colimador, el cual se diseñó con base en las especificaciones del estándar de la WMO y se hizo uso de materiales con propiedades específicas para eliminar la componente difusa de la radiación; y el sensor de radiación, del cual se hizo una selección en función de las dimensiones del sistema y se desarrolló un programa de medición en Arduino que cumple con las especificaciones de medición establecidas en el estándar de la WMO. Una vez que se completó el diseño y construcción de cada elemento, se procedió al ensamblaje del sistema y, posteriormente, a la realización de las mediciones. Tras las primeras mediciones, se compararon los resultados con el modelo ESRA para calibrar el sensor, ya que fue necesario definir una conversión experimental de lux a W/m^2 de acuerdo con las especificaciones del sistema y el sensor. Finalmente, se validó la conversión con la comparación de las mediciones y el modelo ESRA.

2. Estándar de pirheliómetros

La medición precisa de la radiación solar está normada por estándares internacionales tales como el ISO9060 y la Organización Meteorológica Mundial, en los cuales se indican aspec-

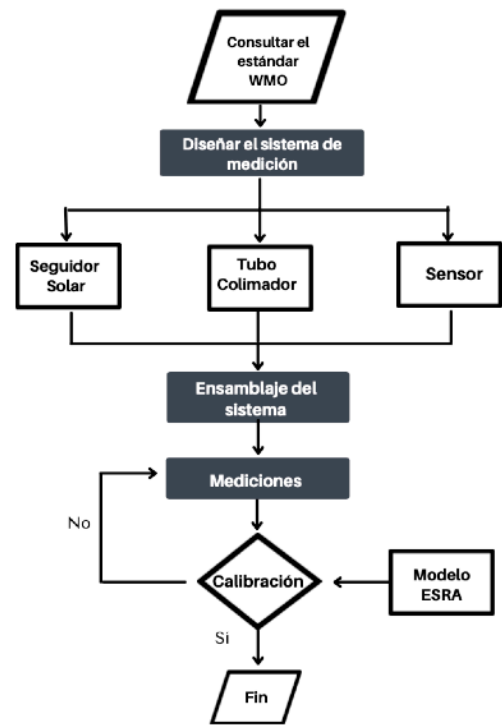


Figura 1. Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas.

tos del diseño para pirheliómetros, especificaciones para la realización de las mediciones, así como para la calibración y clasificación de estos instrumentos.

De acuerdo con la WMO, la radiación solar directa se mide mediante pirheliómetros cuyas superficies receptoras se encuentran en una posición normal al haz de radiación de luz solar directa. Esta componente DNI se mide a través de una abertura frontal que se extiende en un medio ángulo de 2.5° desde la superficie receptora o el sensor (2014). Los difusómetros, por el contrario, obstruyen la radiación directa en un ángulo de 5° , de tal forma que ambas mediciones sean complementarias (Kipp & Zonen, 2018).

En cuanto a las características del instrumento, la tabla A1, en los Anexos, presenta las que los pirheliómetros operativos deben cumplir, tanto en las especificaciones del sensor como en las estimaciones de las incertidumbres en las mediciones. Cabe señalar que algunos de los puntos en dicha tabla sólo aplican para pirheliómetros que emplean termopilas como sensor.

También, la WMO indica que el soporte del pirheliómetro debe permitir un ajuste rápido y suave en el azimut y el ángulo de elevación, para lo que se requiere el uso de un equipo automático de seguimiento solar (seguidor solar). Es necesario que el seguidor solar tenga una exactitud de 0.2° y no se vea influenciado por las condiciones ambientales, de tal manera que se pueda tener una grabación continua de datos con la mínima incertidumbre.

De igual manera, los instrumentos deben inspeccionarse una vez al día y sobre todo si las condiciones climatológicas así lo demandan, ya que se debe mantener limpia la ventana que protege al sensor y asegurarse que no aparezca condensación en el interior. Asimismo, las mediciones deben realizarse en ausencia

de obstrucciones y en un sitio que sea representativo de la región donde se mide (WMO, 2014).

En cuanto al registro de datos, la irradiancia y la radiación diaria son las cantidades comúnmente registradas y archivadas con promedios y totales superiores a 1 h, para el caso de la irradiancia. También, hay algunos requisitos para los que se toman datos en periodos más cortos, hasta 1 minuto o incluso decenas de segundos, donde 1 minuto es el valor promediado de mediciones cada segundo. Los totales diarios de exposición radiante o radiación se utilizan con frecuencia, pero se expresan como una media diaria (WMO, 2014).

Por otro lado, la ISO 9060 indica la clasificación y especificaciones de los instrumentos para mediciones de radiación solar hemisféricas y de radiación directa. Describe que los pirheliómetros son piranómetros con un tubo colimador que restringe el ángulo de visión a 5° y tiene un disco de cuarzo como ventana de entrada de la radiación. El cuarzo (SiO_2) es un material birrefringente, es decir, cuenta con 2 índices de refracción que crean rayos ordinarios y extraordinarios, estos rayos siguen el mismo camino a través del cristal y mantiene la polarización del haz (Kipp & Zonen, 2018). El cuarzo transmite más del 90% en el rango de 0.18 a $3.5 \mu\text{m}$ (figura 2) y también posee una alta transmitividad para longitudes de onda mayores a $50 \mu\text{m}$. Entre sus propiedades ópticas, el cuarzo presenta una birrefringencia muy baja (0.009), y sus dos índices de refracción son $n_w = 1,544$ y $n_e = 1,553$ (Gil-Crespo, 2020).

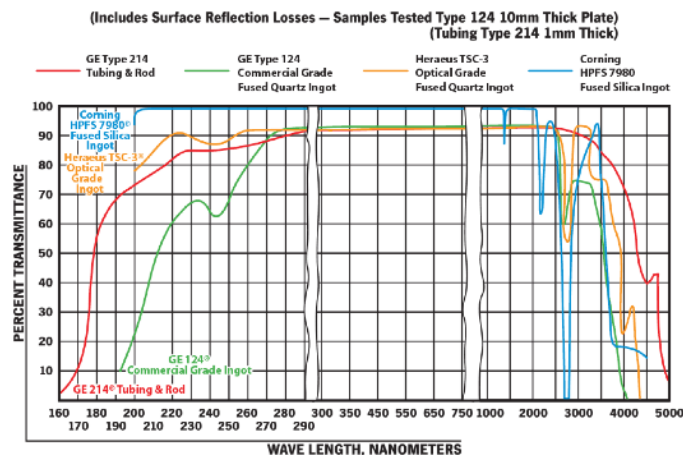


Figura 2. Curvas de transmitancia de algunos cristales de cuarzo y cuarzo/silicio (TGP Inc.).

La clasificación actual de los pirheliómetros según la ISO 9060 se divide en Clases A, B y C, y una clase más alta, la Clase AA. La mayoría de los pirheliómetros en el mercado son Clase B (Kipp & Zonen, 2018).

Para la calibración de los pirheliómetros, se dan las comparaciones internacionales, que tienen lugar cada 5 años en el Centro Mundial de Radiación (WRC) en Davos con la finalidad de mantener la Referencia Radiométrica Mundial (WRR). Los estándares de los centros regionales se comparan con el World Standard Group (WSG). Como todos los datos de radiación solar deben referirse al WRR, los pirheliómetros absolutos

también utilizan un factor determinado por comparación con el WSG, después de dicha comparación, ese pirheliómetro puede ser utilizado como patrón para calibrar (WMO, 2014).

3. Diseño y construcción del sistema de medición

Para poder medir apropiadamente la componente DNI, fue necesario desarrollar y construir un sistema de seguimiento solar o seguidor solar así como un tubo colimador, y conseguir un sensor de iluminancia, una vez conociendo los lineamientos descritos en los estándares.

3.1 Seguidor solar

Un sistema de seguimiento solar puede clasificarse dependiendo del tipo de posicionamiento que emplee, ya sea de tipo pasivo, es decir, que usa la propia radiación solar para calentar un gas que mueve el sistema; activo, a través de sensores y controladores que determinan el movimiento de un actuado; o de tipo *open loop*, en los que el sistema cuenta con datos predefinidos de la posición del sol (Madanhire et al., 2019). Asimismo, un seguidor solar puede ser de uno o dos ejes, dependiendo de la aplicación que se le de; en este caso es necesario que cuente con dos ejes de libertad que permitan el movimiento azimutal y de altitud solar.

Para diseñar el sistema, se realizó una breve revisión de diferentes sistemas de seguimiento para pirheliómetros y se observó que la mayoría posiciona al tubo colimador como un elemento a parte, como se muestra en el ejemplo de la figura 3, en la que se muestra un elemento de soporte para el pirheliómetro.



Figura 3. Ejemplo de pirheliómetro montado en un seguidor solar SOLYS Gear Drive (OTT HydroMet).

Tomando este modelo como referencia, se empezó por seleccionar los materiales con los que se construiría el sistema, tratando de optimizar costos haciendo uso de materiales con los que ya se disponga. Se definió que el armazón del sistema serán dos latas de aluminio, una de 15.5 cm de diámetro y 22 cm de alto para el mecanismo del eje azimutal y la electrónica, y otra más pequeña de 10 cm de diámetro y 12 cm de alto para el mecanismo del eje de altitud solar. De igual forma, se definió que el tubo colimador será posicionado junto a la lata superior, como se muestra en el modelo de la figura 4.



Figura 4. Modelo 3D del sistema de medición.

Teniendo ya delimitadas las dimensiones del sistema, se procedió a diseñar un mecanismo de engranajes para el movimiento azimutal y de altitud solar. Como se mencionó en el apartado anterior, en el estándar de la WMO se establece una exactitud de 0.2° para el movimiento rotacional de los ejes, sin embargo, dada la complejidad del sistema que esto requeriría, se definió como objetivo tener una exactitud mínima de 1° . Teniendo esto en cuenta, los motores que se usaron para mover los ejes fueron dos motores DC de tipo TT (tracción trasera) ya que se reutilizaron de un carro seguidor de línea. Dado que la velocidad en el eje de estos motores es de 45 rpm a 3V, fue necesario diseñar un tren de engranes que permita reducir la velocidad rotacional al mismo tiempo que se incrementa el torque del motor. Se utilizó el software Autodesk Fusion 360 para modelar el mecanismo de engranajes. Puesto que se pretendía alcanzar la misma exactitud con ambos motores, se diseñó un mismo mecanismo reductor para ambos ejes, este consiste en 3 etapas de reducción con relación de 9 a 49 dientes, y una última etapa definida por un engrane de 13 dientes y el engrane acoplado al eje de movimiento, siendo de 44 dientes para el eje de altitud solar y de 104 para el eje azimutal. Dada esta diferencia de tamaños, en el eje de altitud solar sí se alcanzó una exactitud de 1° , mientras que en el eje azimutal se alcanzó una exactitud de 0.5° , dando como resultado una exactitud combinada de 1.118° con respecto al movimiento del sol.

Para la manufactura de estas reductoras, se utilizó una impresora 3D con una exactitud de 0.1 mm y filamento de plástico PLA (ácido poliláctico).

La figura 5a muestra la estructura interna del seguidor solar y en las figuras 5b y 5c se observan las reductoras impresas y ensambladas de los ejes de altitud solar y azimutal, respectivamente.

Los ejes están sostenidos por rodamientos para reducir la fricción y facilitar el movimiento, así como proporcionar estabilidad. El sistema se diseñó de tal manera que pueda ser desensamblado con facilidad en caso de que se requieran hacer ajustes o reparaciones. Se usaron tubos de PVC para el eje azimutal y el tubo colimador y para todos los seguros se usaron pernos, varillas roscadas y rondanas de $1/4''$.

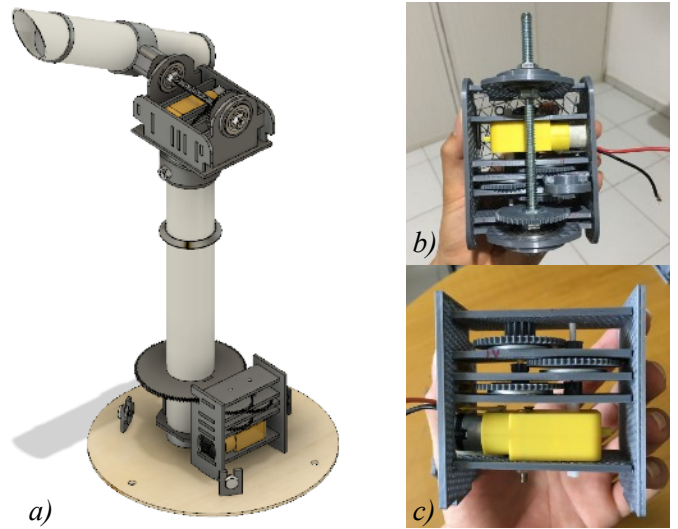


Figura 5. a) Mecanismo interno del seguidor solar, b) reductora ensamblada y acoplada al eje de altitud solar, c) reductora ensamblada del eje azimutal.

Para el control de los motores, se fabricaron un par de puentes H con transistores de la serie 2N2222A de tal manera que sólo se necesite una fuente de poder para accionar los motores tanto hacia adelante como en reversa, y puedan ser activados por medio de señales de corriente controladas. En la figura 6a se muestra uno de estos circuitos de puente H y en la figura 6b se observan las conexiones internas del seguidor solar antes de ensamblar el eje de altitud solar.

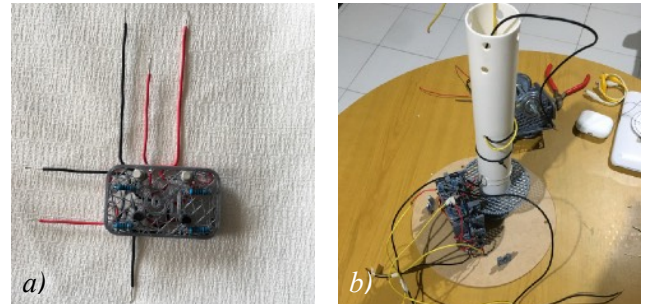


Figura 6. a) Circuito del puente H para el control de los motores, b) conexiones internas del sistema de seguimiento.

Una vez ensamblado el sistema de seguimiento, se procedió a crear el programa de orientación, el cual toma en cuenta el movimiento aparente del sol y calcula los ángulos de altura solar y azimut con las ecuaciones (2) y (3), respectivamente, descritas por Messinger, et. al (2005).

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \arccos \left[\frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right] \quad (3)$$

Donde α es la altura o elevación solar, ϕ es la latitud del lugar, δ es la declinación solar, ω el ángulo horario y γ_s el azi-

mut. Para calcular cada uno de estos valores, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365}(n + 284) \right] \quad (4)$$

$$\omega = -15(12 - HSL) \quad (5)$$

Donde n es el día del año en el calendario Juliano y HSL es la hora solar local en decimales, va de 0 a 24 y se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$HSL = HSE + 4(L_s - L_e) + E_t \quad (6)$$

$$E_t = [0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma)](229.18) \quad (7)$$

$$\text{Siendo } \Gamma = 2\pi \frac{n - 1}{365} \quad (8)$$

En las cuales HSE es la hora solar estándar, definida por el meridiano de referencia, L_e y L_s son la longitud del meridiano local y la longitud del meridiano estándar, respectivamente.

Todas estas ecuaciones son resueltas en el programa de orientación para definir los ángulos α y γ_s . Se definen los valores constantes de la latitud en 21° , L_e de 89.62° y L_s de 90° . Los valores de las horas, minutos, mes y día del año los obtiene de un dispositivo RTC (Real Time Clock). El sistema de orientación está controlado por un Arduino UNO, el cual contiene el programa de orientación que se incluye en la sección de Anexos. Este programa realiza un ajuste de orientación independiente por cada eje cada vez que el sol se desplaza 1° de suposición de altitud solar o 0.5° de su posición azimutal. En este sentido, el sistema de orientación es de tipo *open loop* ya que calcula la posición del sol en tiempo real de acuerdo con los modelos matemáticos de su movimiento aparente y se ajusta con base en estos.

3.2 Tubo colimador

Colimación es un concepto que se utiliza principalmente en la óptica de telescopios, en esencia, consiste en convertir un haz de luz divergente en uno de rayos paralelos ya sea incrementando la distancia de enfoque o reduciendo el tamaño de la fuente de luz (Edmund Optics). El estándar de diseño de pirheliómetros de la WMO establece la relación que se debe cumplir entre el largo del tubo colimador y el diámetro del agujero de entrada de luz con respecto al diámetro del sensor para lograr una correcta colimación. La figura 7 muestra las especificaciones que se deben cumplir. Como se mencionó anteriormente, el ángulo de apertura del tubo colimador debe ser de 5° y el ángulo entre el borde del sensor y el borde del agujero debe ser de 1° .

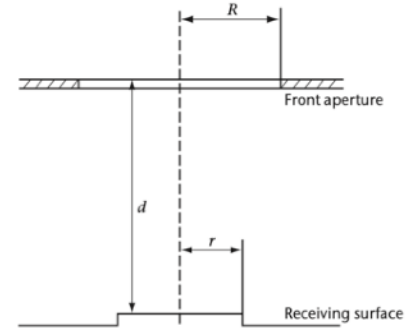


Figura 7. Especificaciones del diseño del tubo colimador (WMO, 2017).

Donde R es el radio del agujero frontal, r es el radio de la superficie del sensor y d es la distancia entre estas dos superficies, es decir, el largo mínimo del tubo colimador.

De esta manera, el tubo colimador en un pirheliómetro elimina la componente difusa de la radiación incidente, ya sea proveniente de la dispersión atmosférica o de la reflexión por el albedo de las superficies. Además, permite eliminar la porción de la luz que se dispersa al atravesar el lente de cuarzo (Campbell Scientific).

En el diagrama de la figura 8 se observa el análisis radiativo del tubo colimador. Con este diseño y las proporciones correctas, la radiación directa es la única que logra incidir sobre la superficie del sensor; la radiación difusa, al provenir de diferentes ángulos, incide sobre las paredes del tubo colimador, para poder eliminarla, se usan pinturas de alta absorptividad, en este caso se utilizó esmalte negro mate con una absorptividad de 0.96 (Alchapar et al., 2012); asimismo, existe un pequeño grado de reflexión interna, esta radiación se elimina tras volver a incidir sobre las paredes del tubo, por eso es importante que este tenga una longitud suficiente. La cubierta de cuarzo también genera una ligera dispersión ya que su transmitividad no es de 1, sin embargo, esta también se elimina al incidir sobre las paredes del tubo. Además, el tubo colimador debe estar pintado de color blanco por fuera o tener un alto valor de reflectividad, aunque en realidad no le llegue a incidir radiación directa ya que se encuentra orientado hacia esta, si el albedo de los alrededores es muy alto, una parte de esta radiación podría pasar a través

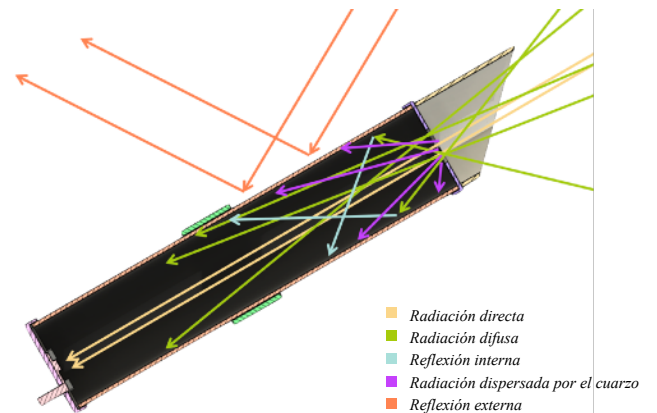


Figura 8. Análisis radiativo en el interior del tubo colimador.

del tubo, lo cual induciría a errores en la medición. Para este proyecto, se utilizó PVC blanco con reflectividad de 0.817 (R. Echazú, et al, 2012) para el tubo colimador.

Es importante proteger al tubo colimador de la radiación externa ya que, como un pirheliómetro estándar funciona con una termopila, cualquier contribución de radiación que no provenga de la componente directa producirá errores o ruido en la medición.

En la figura 9a se muestra el interior del tubo colimador pintado con esmalte negro mate y en la figura 9b se observa el tubo colimador ensamblado con su base de soporte para acoplarse al seguidor solar.

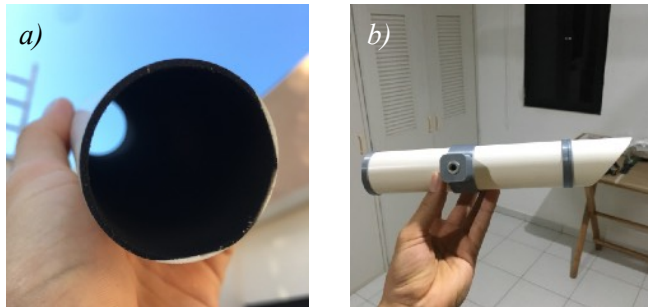


Figura 9. a) Interior del tubo colimador pintado con esmalte negro de alta absorptividad, b) tubo colimador ensamblado.

Las dimensiones del tubo y el agujero frontal se encuentran en los planos de los Anexos, siendo el largo del tubo de 19 cm y el radio del agujero frontal de 0.83 cm, considerando un radio de incidencia sobre el sensor de 0.5 cm.

3.3 Sensor de iluminancia

Para la medición de la intensidad de la radiación se seleccionó el sensor de luz ambiental BH1750FVI, el cual mide la iluminancia y tiene un rango de respuesta de 1 a 65535 lx (lux). La respuesta espectral de este sensor es similar a la del ojo humano ya que entrega de datos en luxes (unidad de medida de luz visible). Tiene una baja influencia de la temperatura, por lo que el sensor puede operar con temperaturas de -40 a 85°C, asimismo, tiene una señal de salida lineal (figura 10a) y su respuesta espectral solamente responde a la del espectro visible, aunque, no presenta un comportamiento uniforme dentro de este espectro ya que se trata de un fotodiodo (figura 10b), aproximadamente en 540 nm, la sensibilidad del sensor decae ligeramente pero, para otras longitudes cercanas a los 510 nm y 560 nm la respuesta espectral es máxima (Rohm, 2009).

El dispositivo consiste en un fotodiodo, el cual es capaz de convertir la luz recibida en corriente y que, a diferencia de una fotorresistencia, este responde a los cambios de iluminación con más velocidad (Bolaños). Para mejorar su sensibilidad espectral y acercarse a la sensibilidad del ojo humano, el fotodiodo incluye una película epóxica que actúa como filtro para reaccionar únicamente a la irradiancia de cierta longitud de onda, la luz en el rango visible, es decir, en aproximadamente 560 nm, como se observa en la figura 11a. De no tener esa

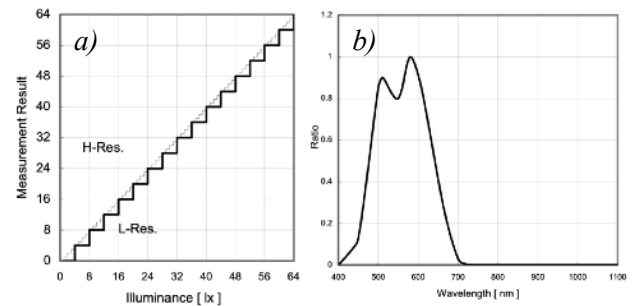


Figura 10. a) Gráfica de linealidad de señal de salida del sensor, b) gráfica de respuesta espectral del sensor.

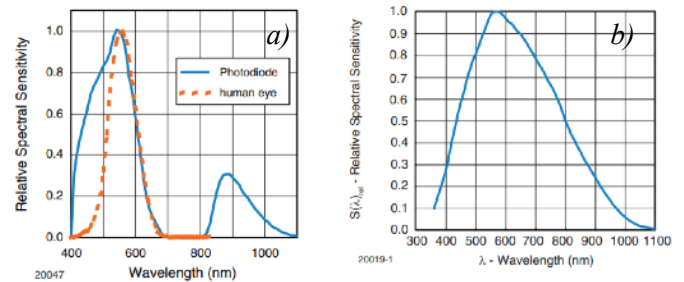


Figura 11. a) Fotodiodo con película epóxica, b) fotodiodo sin película epóxica.

membrana, el rango espectral abarcaría hasta los 800 nm (figura 11b) (Vishay, 2020).

Aunque existen sensores sin el filtro epóxico y con una respuesta espectral más amplia, como los sensores fotovoltaicos, que entregan los datos en W/m^2 ; por cuestiones económicas, de accesibilidad y de diseño se optó por este sensor de iluminancia.

Se creó un programa a través del software Arduino, el cual se incluye en la sección de Anexos, para la obtención y registro de los datos. Este se programó para realizar mediciones cada segundo, las cuales se promediaban a un dato por minuto, como lo indica el estándar. Sin embargo, dado que el sensor únicamente entrega datos de iluminancia (lx) y no de irradiancia, se requirió hacer una conversión de lx a W/m^2 .

4. Conversión de unidades

No existe una conversión directa entre lx y W/m^2 debido a que las unidades son de naturaleza distinta (Keim, 2016). La iluminancia se considera una unidad fotométrica y la irradiancia una unidad radiométrica, la diferencia entre estas dos es que las unidades radiométricas se basan en la potencia física, con todas las longitudes de onda ponderadas por igual, mientras que las unidades fotométricas tienen en cuenta el hecho de que el ojo es más sensible a algunas longitudes de onda que a otras y, en consecuencia, a cada longitud de onda se le asigna un peso diferente (Gómez, 2006).

En el caso del sensor BH1750, como se mencionó, su respuesta espectral únicamente abarca las longitudes de onda del espectro visible, si se realizara una conversión con estos datos se estaría calculando únicamente la energía en este espectro. La primera conversión que se plantea toma en cuenta que la luz

verde, al ser la más sensible para el ojo humano y por ende la de mayor energía, requiere una potencia de 1,464 mW m² para producir un lumen en esta longitud de onda (550 nm), es decir, se necesitan 683.002 lx para producir 1 W/m² de luz verde. Sin embargo, la sensibilidad del ojo humano cambia drásticamente de una longitud de onda a otra y, en consecuencia, el factor de conversión de irradiancia a iluminancia también cambia drásticamente, en este sentido, cualquier otro factor de conversión será menor a 683 (Keim, 2016).

Otra conversión planteada considera que la radiación solar tiene longitudes de onda y un espectro de color diferentes, por lo que tiene un factor diferente de lx a W/m². La luz solar brillante es de aproximadamente 136,000 lx, por lo que sería igual a 1075 W/m². Esta relación cambia ligeramente según la hora del día y condiciones tales como nubosidad, humedad en el aire, entre otras, pero se considera 0.01267 como un factor razonable y aproximado (Michael, 2019) de conversión de unidades de lx a W/m².

5. Modelo ESRA

El modelo de estimación de la radiación solar ESRA es un modelo determinístico ya que se basa únicamente de descripciones matemáticas del movimiento aparente del sol y las condiciones atmosféricas para calcular la componente DNI. El único parámetro que se requiere ingresar es el factor de turbidez de Linke bajo un aire masa de 2.0 (TLAM2). El factor de turbidez de Linke se define como el número de atmósferas puras y de aire seco (sin aerosoles ni vapor de agua) que se requerirían para producir una extinción de la radiación directa igual a la medida en un lugar y tiempo determinado, sin considerar la distribución espectral (WMO, 2009). En este sentido, el TLAM2 es una forma de considerar el efecto de los aerosoles presentes en la atmósfera que causan la extinción de la radiación directa, mismos que pueden ser de causas naturales como el vapor de agua o antropogénicos como la contaminación.

Para calcular la radiación directa, el modelo ESRA emplea la ecuación (10), según se describe por Rigollier et al. (2009).

$$DNI = I_0 \varepsilon \sin(\alpha) \exp(-0.8662(TLAM2) m \delta_R(m)) \quad (10)$$

En la cual, I_0 es la constante solar definida como 1367 W/m², ε es la corrección de la excentricidad, m es el valor del aire masa óptico y $\delta_R(m)$ es el grosor óptico de Rayleigh. Estos últimos dos términos se obtienen de las ecuaciones (11), (12) y (13).

$$\varepsilon = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (11)$$

$$m(\alpha_s^{\text{true}}) = \frac{(p/p_o)}{\sin(\alpha_s^{\text{true}}) + (0.50572(\alpha_s^{\text{true}}) + 6.07995) - 1.6364} \quad (12)$$

$$\delta_R(m) = \begin{cases} m \leq 20, 6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 + 0.00650m^3 - 0.00013m^4 \\ m < 20, 10.4 + 0.718m \end{cases} \quad (13)$$

De las cuales se tienen las siguientes relaciones:

$$p/p_o = \exp(-z/z_h) \quad (14)$$

$$\alpha_s^{\text{true}} = \alpha + \Delta\alpha_{\text{ref}} \quad (15)$$

$$\Delta\alpha_{\text{ref}} = \frac{0.1594 + 1.1230(\pi/180)\alpha + 0.065656(\pi/180)2\alpha^2}{1 + 28.9344(\pi/180)\alpha + 277.3971(\pi/180)2\alpha^2} \quad (16)$$

Donde z es la elevación del sitio y zh la altura de escala de la atmósfera de Rayleigh cerca de la superficie, con un valor definido de 8434.5 metros.

Para obtener el valor de TLAM2 se recurrió a la base de datos de acceso libre sobre datos de radiación solar “SoDa”, la cual proporciona mapas en escala de grises donde se encuentran codificados los valores del TLAM2 para cualquier coordenada y mes del año. Para ello, se requirió el uso del software RStudio, programa de acceso libre con el que se realiza la georeferenciación.

Una vez que se tuvo acceso a los datos, fue necesario extraer la información de las coordenadas donde fueron realizadas las mediciones, en este caso, Mérida, Yuc. La información viene codificada en píxeles que representan un área mínima de 2.5 km², la cual va aumentando conforme nos alejamos tanto en longitud como en latitud. Por esta razón, primero se debe calcular el número de fila y de columna de la imagen de satélite que corresponde al píxel en el que se ubica el sitio de interés. Para realizar esta georeferenciación, se recomienda obtener el valor de TLAM2 en 5 píxeles aproximados al sitio de interés así, al promediarlos, se puede tener una mayor precisión en el valores (Galindo et al., 2014).

Finalmente, ya que se tenían todos los datos disponibles, se creó en Matlab el código para graficar el valor de DNI para cualquier día del año y en un intervalo de horarios determinados, considerando un TLAM2 de 2.9 para Mérida, Yuc., el cual se obtuvo tras realizar el procedimiento antes descrito. La figura 12 muestra la curva de DNI para el día 5 de Febrero entre las 7:00 y 18:00 (HSE).

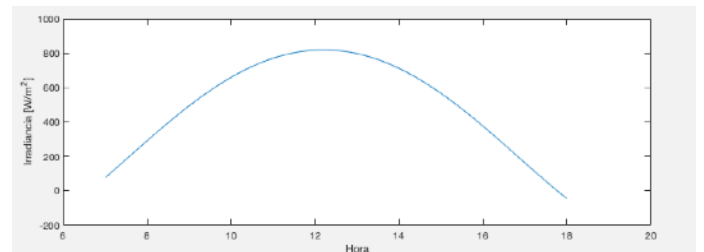


Figura 12. Curva de DNI obtenida del modelo ESRA para Mérida, Yuc. durante el 5 de Febrero.

6. Mediciones y resultados

Una vez ensamblado el sistema, se realizó una medición o prueba preliminar para corroborar que todo estuviera funcionando según lo esperado. El procedimiento que se siguió para tomar las mediciones fue el siguiente, mismo que se encuentra ilustrado en la figura 13:

1. Encontrar un lugar despejado, es decir, sin obstrucciones de visión durante el periodo que se fuese a medir.
2. Orientar el seguidor solar hacia el sur utilizando una brújula magnética ya que la declinación magnética entre el norte polar y el norte magnético no es tan significativa para Mérida.
3. Nivelar la base del seguidor utilizando un nivel de burbuja.
4. Conectar el controlador del seguidor solar cuidando que se encuentre en su posición inicial e inicializar el programa de medición para la captura de los datos.



Figura 13. a) Ubicación del sensor sin obstrucciones, b) orientación hacia el sur, c) correcta nivelación del sensor, d) conexiones de datos y carga.

Teniendo el sistema ya posicionado y orientado, se procedió a la toma de mediciones. En esta medición preliminar se tomaron datos de las 10:44 a las 15:00 del día 1° de Febrero del 2021 y se usó el factor de conversión de 0.0127 W/m²lux. Los datos se registraron en intervalos de 1 segundo para evaluar el comportamiento instantáneo del sensor y luego hacer el promedio a 1 minuto y 10 minutos. Tras esta primera medición, se obtuvieron los resultados de la figura 14, en la cual se observa una gran variabilidad e intermitencia en los valores de irradiancia debido a la alta incidencia de nubes (figura 15). Sin embargo, también se puede notar que durante todo el periodo de captura, los valores máximos de irradiancia llegan a un límite constante, el cual se encuentra un 17% por debajo del valor más alto que la hoja de datos indica que puede medir el sensor. Aunque,

se llegó a la conclusión que este es el límite real del sensor y no el que indica el fabricante, al que denominamos su valor saturante, correspondiente a 54612 lx.

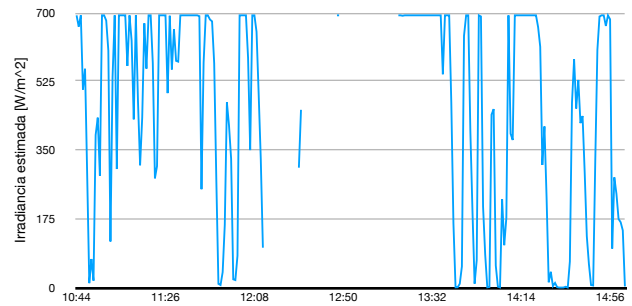


Figura 14. Irradiancia registrada en la medición preliminar utilizando el factor de conversión de 0.0127.

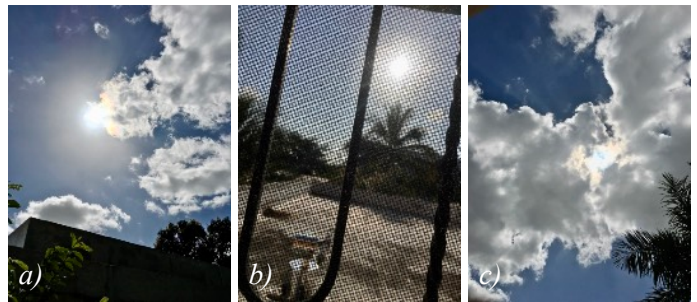


Figura 15. Condiciones de nubosidad en los sitios de toma de medición los días a) 1° de Febrero, b) 7 de Febrero y c) 9 de Febrero.

Dada esta situación, fue necesario buscar una forma de reducir la intensidad de la luz que incidía sobre el sensor, para lo cual se probaron materiales como el cuarzo puro y el cristal pero estos no alcanzaban a reducir la intensidad lo suficiente o la mermaban demasiado. Se encontró que el plástico LDPE (Polietileno de baja densidad), presente en las bolsas de plástico de súper, posee un índice de transmitividad de entre el 60 y 70% para el rango entre 500 y 600 nm (figura 16) (Alghdeir, 2019), el cual es el rango con la mayor respuesta espectral del sensor que se utilizó.

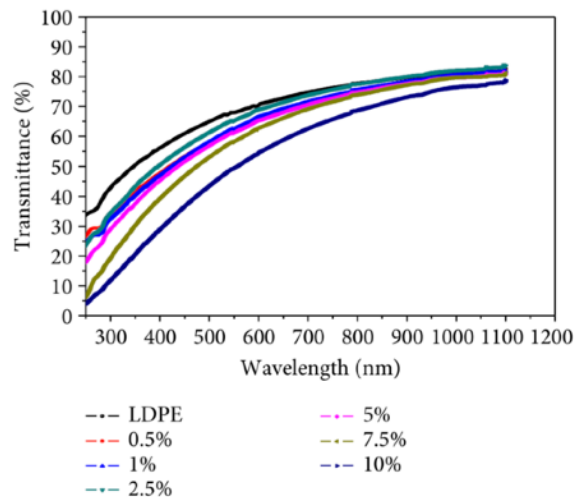


Figura 16. Transmitividad del plástico LDPE en varias longitudes de onda incluyendo el espectro visible (Alghdeir, 2019).

Se realizaron ensayos con 4 lámparas diferentes para registrar la caída de iluminancia al utilizar 3 capas de bolsa de plástico LDPE semi-transparente. Las lámparas que se utilizaron fueron 3 de luz LED de diferentes tonos (blanco, luz natural y rojo) y una lámpara de calor (luz cálida). Las pruebas consistieron en registrar el valor de la iluminancia con el filtro de plástico y sin este para encontrar el porcentaje de reducción. Cada prueba se realizó bajo las mismas condiciones, como se muestran en la figura 17.

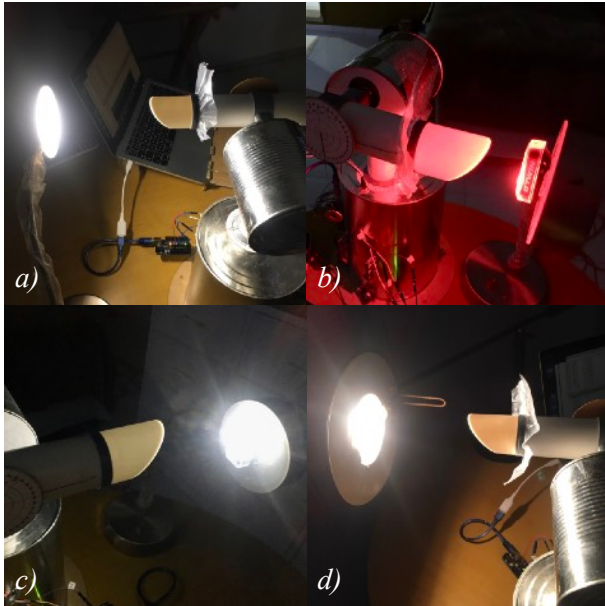


Figura 17. Pruebas de transmitividad realizadas con a) una lámpara LED de escritorio de luz natural, b) un foco LED para bicicleta de luz roja, c) un foco LED para bicicleta de luz blanca y d) una lámpara incandescente de calor.

Tras la ejecución de estas pruebas, se obtuvo que en promedio, la luz se transmite en un 47.4%. Concretamente, la transmitividad con la lámpara de luz natural fue del 39.47%, para el LED rojo fue del 50.02%, para el LED blanco de 48.21% y para la lámpara de calor del 51.89%. La variación no es muy grande, sin embargo, la razón por la que la luz roja y la incandescente presenten mayores porcentajes se le atribuye a la transmitividad del plástico y a la respuesta espectral del sensor, ya que estas dos luces se caracterizan por tener una mayor longitud de onda que la luz blanca y natural, las cuales tienden a ser luces más “frías” dado el espectro de emisión de los LEDs (The Red Alternative). Las figuras 16 y 10b muestran una alta transmitancia para la luz roja y una respuesta moderadamente alta del sensor, mientras que para la luz azul, la transmitancia es relativamente baja y la respuesta espectral del sensor es considerablemente menor.

Los valores registrados fueron menores al 60% indicado por Alghdeir debido a que se presenta una gran dispersión ya que la textura de la bolsa no es uniforme y el plástico no fue transparente, y al probarse en el tubo colimador, gran parte de la luz dispersada fue absorbida, lo cual es un efecto deseable en este caso, ya que la intensidad de la luz solar satura al sensor.

Tabla 1

Transmitividades del filtro de LDPE bajo diferentes luces

Lámpara	Iluminancia sin filtro [lx]	Iluminancia con filtro [lx]	Porcentaje transmitido [%]
LED natural	126.67	50.0	39.47
LED rojo	23.33	11.67	50.02
LED blanco	46.67	22.5	48.21
Incandescente	618.23	320.83	51.89

Una vez que se comprobaba que el plástico LDPE reduce lo suficiente la intensidad de la luz para que el sensor no se sature, el 5 de Febrero se procedió a realizar la primera medición, sin embargo, esta tuvo sus inconvenientes no sólo por las nubosidades que se muestran en la figura 15 sino también porque el seguidor solar tenía un error en su programación que no fue resuelto sino hasta la mitad de la segunda medición, el 7 de Febrero. En la figura 18 se puede observar la comparación entre el modelo de estimación ESRA y las mediciones realizadas el 5 de Febrero, se puede notar en primera instancia que el factor de conversión utilizado ($0.0127 \text{ W/m}^2/\text{lux}$) no es el adecuado ya que la diferencia entre las mediciones y la estimación es muy grande, aunque, descartando los datos antes de las 14:18, en los cuales se presentaron problemas de sombreado, se observa una tendencia a seguir la forma de la curva. Asimismo, a lo largo de toda la medición se observa un patrón constante de subidas y bajadas, el cual se debió a un error en la programación que causaba un atraso en el seguidor solar, por lo que cada intervalo de tiempo el sensor se sombreaba y luego se volvía a ajustar.

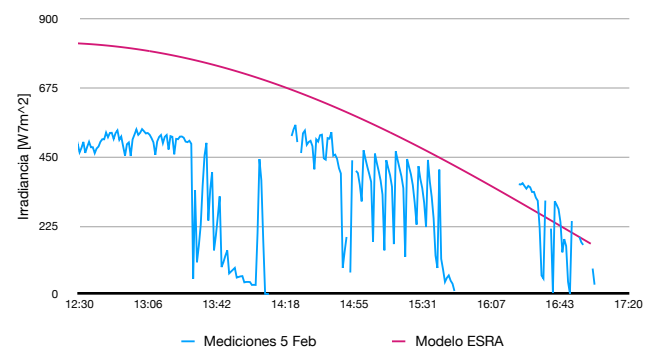


Figura 18. Comparación entre las mediciones realizadas el 5 de Febrero y el modelo ESRA para el mismo día.

Tras esta medición, resultó evidente que era necesario encontrar un factor o coeficiente de conversión experimental que permita aproximar los valores de lux a W/m^2 . Para ello, se decidió tomar mediciones tratando de abarcar desde el amanecer hasta el anochecer y sin convertir los valores, es decir, registrando los valores en unidades de lux. Sin embargo, dadas las condiciones meteorológicas de la temporada, se tuvieron que tomar 3 días de mediciones para tener al menos una parte representativa de todo un día con cielo despejado o con mínima nubosidad. En la figura 19 se observan las mediciones realizadas

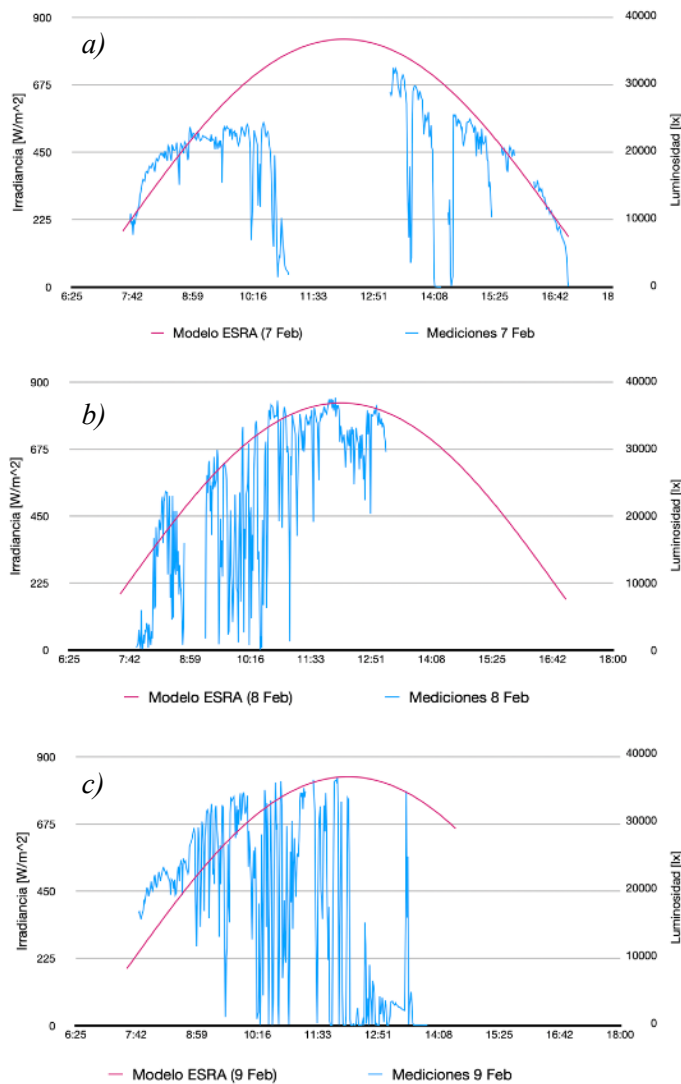


Figura 19. Mediciones realizadas los días a) 7, b) 8 y c) 9 de Febrero, comparadas con su respectiva curva del modelo ESRA.

del 7 al 9 de Febrero comparado con su respectiva curva de DNI obtenida del modelo ESRA para cada día. Cabe recalcar que durante estos días se presentó mucha nubosidad. Durante la primera parte del 7 de Febrero, se detectó y corrigió el error en el programa de orientación, por lo que a partir del medio día se comenzó a observar la tendencia a seguir el modelo de radiación directa, ya que durante esas horas no se presentaron nubes. Por el contrario, al amanecer del 8 de Febrero, el cielo se encontraba muy nublado y conforme avanzó el día se fueron presentando algunas nubes densas. El 9 de Febrero amaneció con nubes pero estas casi no afectaron en la medición hasta después de las 10:00, donde incluso se presentaron ligeras precipitaciones.

Lo anterior se tomó en cuenta ya que para la definición del factor de conversión experimental se rechazaron los datos que se encontraban durante periodos de mucha nubosidad.

5. Calibración

Para poder definir un factor de conversión, se analizó la relación entre el valor de luminosidad y la irradiancia estimada

entre los 3 días, de tal forma que se pueda seleccionar un valor representativo. Sin embargo, como se observa en la figura 20, no hay un valor que sea constante durante todo el día. Este mismo comportamiento se puede observar en las figuras 19a-19c, donde los valores de luminosidad parecen estar sobredimensionados en la mañana y subdimensionados después del medio día. Esta variabilidad o discrepancia entre las mediciones y el modelo ESRA podría deberse a variaciones en el factor de turbidez de Linke que no fueron tomados en cuenta ya que el modelo se calculó con un valor constante para cada día o posibles variaciones en las propiedades ópticas del LDPE debidas a la temperatura; ya que de otra manera, es incongruente tener valores de irradiancia sobredimensionados al amanecer y al anochecer.

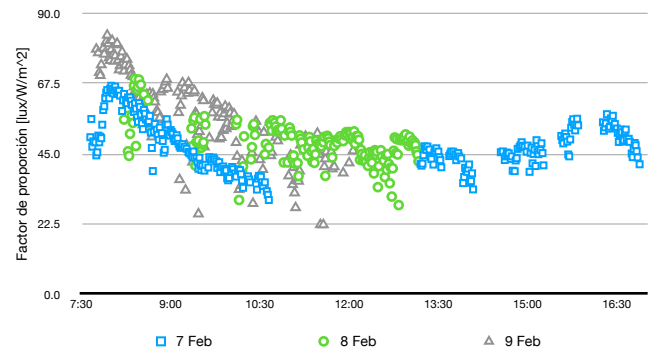


Figura 20. Relaciones de lux/irradiancia entre los valores medidos y el modelo ESRA.

Los valores del factor de proporción mostrados en la gráfica de la figura 20 fueron analizados y ponderados para definir 3 factores de proporción, cada uno calculado para un cierto intervalo de horarios, los cuales se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Factores de proporción ponderados

Intervalo	Factor de proporción [lux/W/m²]	Desviación estándar	Conversión* [W/m²/lux]
7:00 - 10:30	59.50	11.7	0.0168
10:30 - 14:30	45.33	5.98	0.0221
14:30 - 17:00	48.44	4.57	0.0206

*La conversión es el inverso del factor de proporción y tiene las mismas unidades que las conversiones presentadas anteriormente.

Una vez que se definieron los factores de proporción para cada horario, se llevó a cabo el procesamiento de los datos de los 3 días considerando únicamente los valores que no se ven afectados por nubosidades. Para ello, se tomó como criterio que no se presente una variación mayor a ± 40 W/m² entre el valor estimado del modelo ESRA y tras la aplicación de los factores de proporción a los datos de luminosidad, con lo que se obtuvieron los resultados de la figura 21.

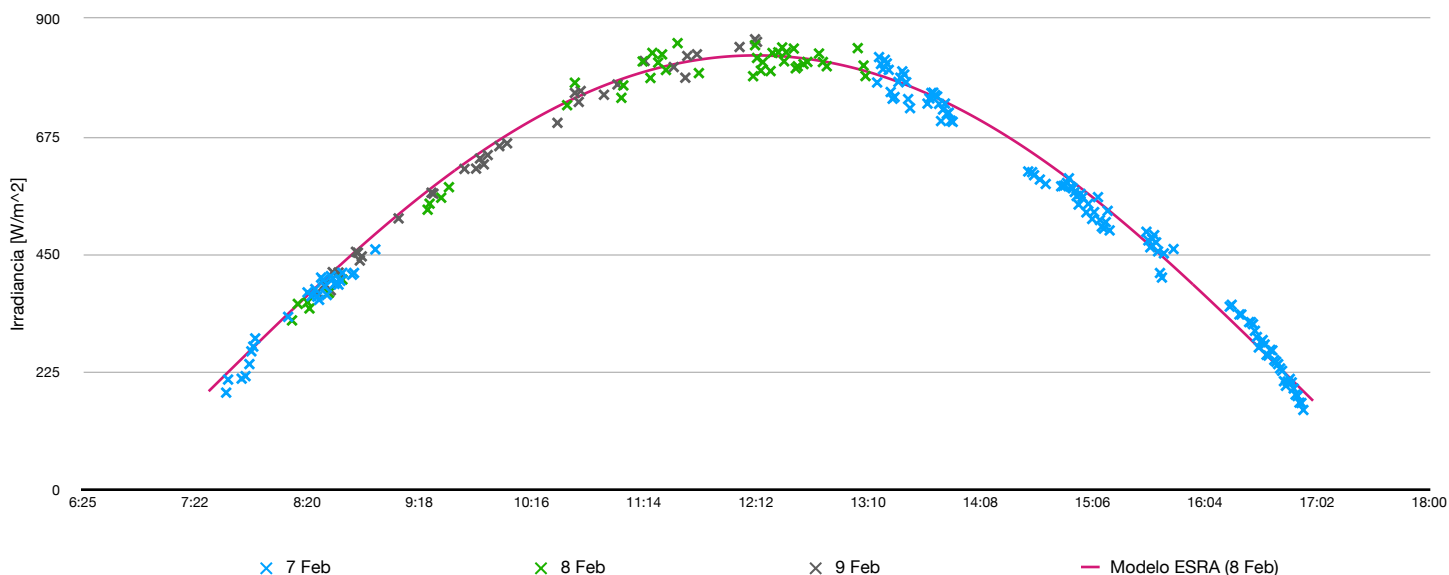


Figura 21. Aproximación de los valores medidos bajo condiciones de cielo despejado a la curva DNI del modelo ESRA.

En la figura 21 se puede observar que al aplicar la calibración con los factores de proporción, los valores pico de irradiancia medidos con el sensor de iluminancia se aproximan bastante a la curva definida por el modelo ESRA. Aunque, tomando las especificaciones del estándar de la WMO, no podría considerarse como un instrumento de alta ni buena calidad debido a sus altos valores de incertidumbre.

6. Conclusiones

La medición precisa de la radiación solar es de gran relevancia en el ámbito de las energías renovables, de las cuales la solar es la que domina el panorama internacional actual. Son necesarios instrumentos precisos y de gran exactitud para poder estimar lo mejor posible el recurso solar y los beneficios económicos de su aprovechamiento. Su estimación a partir de modelos matemáticos no permite conocer la variabilidad que en realidad existe cuando se mide en campo, para ello se requieren instrumentos físicos. En este trabajo se demostró que es posible medir con gran aceptación la radiación solar directa a través de instrumentos de bajo costo como un sensor de iluminancia, lo cual podría permitir la prospección de terrenos o espacios muy amplios con menor incertidumbre que aplicando modelos espaciales de estimación, ya que de esta forma se obtiene una caracterización de la variabilidad del recurso solar según las condiciones meteorológicas específicas en el punto de instalación. Sin embargo, es necesario un estudio más a fondo de los materiales utilizados, especialmente el filtro de radiación, así como el desarrollo de sistemas más precisos de seguimiento solar a través de controladores automáticos. Asimismo, la selección de un sensor de iluminancia que presente una respuesta espectral más estable y con mayor resolución y rango de operación podrían mejorar la calidad de las mediciones.

Es importante recalcar que para validar los factores de proporción encontrados es necesario realizar más mediciones bajo

condiciones diversas pero principalmente bajo cielo despejado. Es posible que de este análisis sea necesario definir factores de proporción diferentes para condiciones climáticas diversas. Asimismo, si se quisiera utilizar modelos determinísticos como el ESRA para realizar la calibración de los sensores de iluminancia, es necesario tener una buena descripción de la atmósfera a través del TLAM2.

Por otro lado, los datos de iluminancia directa también pueden ser aprovechados en ámbitos distintos a las renovables pero de igual relevancia como la eficiencia energética y el diseño bioclimático, ya que se puede conocer la intensidad y dirección de la luz visible, así como se tienen los mapas de irradiancia solar. De esta manera, se pueden diseñar espacios que aprovechen la mayor cantidad de luz por medio de ventanales y tragaluces, con el fin de reducir el consumo energético debido a la iluminación artificial; o incluso, establecer controles de iluminación en espacios ya existentes que no cuentan con un control de este tipo.

7. Referencias

- Kipp & Zonen. (2018). *The benefits of accurately measuring solar irradiance*, recuperado de <https://images.otthydromet.com/asset-get.download.jsa?code=411646>
- Camuffo D. (2014). *Microclimate for Cultural Heritage*. Capítulo 11: Measuring Temperature. Segunda Edición, ELSEVIER, págs. 395-432.
- Hinckley A. (2017). *Pyranometers: What You Need to Know*. Campbell Scientific, recuperado de <https://www.campbellsci.com/blog/pyranometers-need-to-know>
- F. Scarpa, V. Bianco, L. Tagliafico. (2017). *A clear sky physical based solar radiation decomposition model*. Thermal Science and Engineering Progress; 323-329.
- F. Antonanzas, R. Urraca, J. Polo, O. Perpiñán, R. Escobar. (2019). *Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 107; 374-387

- I. Madanhire, T. Chikuku and L. Nyahunda. (2019). *Development of Mechanical Solar Tracker Design*. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, recuperado de <http://www.ieomsociety.org/ieom2019/papers/67.pdf>
- OTT HydroMet. (s.f.). *Kipp & Zonen SOLYS Gear Drive Sun Tracker*, recuperado de <https://www.otthydromet.com/en/Ott/p-kippzonen-solys-gear-drive-sun-tracker/0381900>
- Rohm (2009). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. 09046 datasheet. Recuperado de: <https://www.vistronica.com/images/Documentos/BH1750FVI.pdf>
- Bolaños D. (s/f). *Fotodiodos: recopilación, electrónica*. Recuperado de: <http://www.bolanosdj.com.ar/TEORIA/SENSORESOPICOS.PDF>
- Vishay .(2020). *Ambient Light Sensors - Circuit and Window Design*. 84154 datasheet. Recuperado de: <https://www.vishay.com/docs/84154/appnote-sensors.pdf>
- Keim R. (2016). *Medición y cálculo de valores de lux*. All About Circuits. Recuperado de: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/measuring-and-calculating-lux-values-part-1/>
- Messenger, R. A., Ventre, J. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton, CRC Press. Segunda Edición, págs. 51-54.
- Lechner N. (s/f). Iluminación natural. Tectónica. Recuperado de: https://pro-tectionica-s3.s3.eu-west-1.amazonaws.com/art26pdf_1553942040.pdf
- Edmund Optics Inc. (s.f.). *Considerations in Collimation*, recuperado de <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/considerations-in-collimation/>
- Campbell Scientific. (S.f.). *RaZON+ ALL-IN-ONE Solar Monitoring System*, recuperado de https://s.campbellsci.com/documents/ca/product-brochures/razon_br.pdf
- Technical Glass Producers, Inc. (s.f.). *Fused quartz/fused silica average transmittance curves*, recuperado de https://technicalglass.com/fused_quartz_-_transmission/
- World Meteorological Organization (2014) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO No. 8.
- Peter Michael. (2019). A Conversion Guide: Solar Irradiance and Lux Illuminance . IEEE Dataport. <https://dx.doi.org/10.21227/mxr7-p365>
- Gil-Crespo, P. (2020) Cuarzo. Mineorología Óptica. Recuperado de <http://www.ehu.es/mineralogiaoptica/cuarzo.html>
- Gómez E. (2006). Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría. 8 de febrero de 2021, de Universidad de Sevilla Sitio web: <http://laplace.us.es/campos/optica/general/opt-guia2.pdf>
- N. Di Lalla. (2001) Películas selectivas de Cr2O3 negro para absorbentes fototérmicos 8 de Febrero de 2021, de CONICET Dep de Materiales Sitio web: <https://core.ac.uk/download/pdf/301093518.pdf>
- N. Alchapar, E. Correa, M. Canton. (2012). Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana. 8 de febrero de 2021, de Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Sitio web: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v12n3/v12-n3a08>
- Alchapar, N., Correa, E. (2015). Reflectancia solar de las envolventes opacas de la ciudad y su efecto sobre las temperaturas urbanas. Informes de la Construcción, 67(540): e112, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.131>.
- R. Echazú, , C. Cadena, L. Saravia. (2012). ESTUDIO DE MATERIALES REFLECTIVOS PARA CONCENTRADORES SOLARES. 8 de Febrero de 2021, de Universidad Nacional de Salt Sitio web: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/79370/Documento_completo.PDF-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- C. Rigollier, O. Bauer, L. Wald. (2009). *On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method*. HAL archives ouvertes, id: hal-00361373.
- Galindo G., Espejo O. J., Rubiano J. C., Vergara L. K., Cabrera E., (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. 8 de febrero de 2021. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia., Sitio web: https://redd.unfccc.int/files/anexo_a_protocolo_procesamiento_digital.pdf
- World Meteorological Organization (1981). Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source. WMO No. 557. Switzerland.
- M. Alghdeir. (2019). *Characterization of Nanosilica/Low-Density Polyethylene Nanocomposite Materials*. Journal of Nanomaterials, 8 págs., <https://doi.org/10.1155/2019/4184351>

8. Anexos

Characteristic	High quality ^a	Good quality ^b
Response time (95% response)	< 15 s	< 30 s
Zero offset (response to 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature)	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change in W m ⁻²)	0.51	1
Stability (percentage of full scale, change/year)	0.1	0.5
Temperature response (percentage maximum error due to change of ambient temperature within an interval of 50 K)	1	2
Non-linearity (percentage deviation from the responsivity at 500 W m ⁻² due to the change of irradiance within 100 W m ⁻² to 1 100 W m ⁻²)	0.2	0.5
Spectral sensitivity (percentage deviation of the product of spectral absorptance and spectral transmittance from the corresponding mean within the range 300 to 3 000 nm)	0.5	1.0
Tilt response (percentage deviation from the responsivity at 0° tilt (horizontal) due to change in tilt from 0° to 90° at 1 000 W m ⁻²)	0.2	0.5
Achievable uncertainty, 95% confidence level (see above)		
1 min totals		
%	0.9	1.8
kJ m ⁻²	0.56	1
1 h totals		
%	0.7	1.5
kJ m ⁻²	21	54
Daily totals		
%	0.5	1.0
kJ m ⁻²	200	400

Tabla A1. Características de operación de pirheliómetros (*WMO, 2017*).

Programa de orientación:

```
// PROGRAMA DE ORIENTACIÓN
// 7 REV AZ
// 2 FWD AZ
// 3 REV A
// 4 FWD A

#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
RTC_DS3231 RTC; //pones el modelo de tu rtc

#define PI 3.1415926535897932384626433832795 //Declaramos Pi para
usar luego

// LLENAR VALORES INICIALES
float aActual = 52.5;
float azActual = 69; // Considerando que W es 0

/*int t1 = 704; // FWD azimuthal (cambiar)
int t2 = 790; // REV azimuthal (cambiar)
int t3 = 704; // FWD altura solar
int t4 = 790; // REV altura sola */
int t;
int n;
int diaActual = 0;
int mes;
int dia;
float hora;
float minuto;
float segundo;
float minActual=0;

float D = 180/PI; //para convertir de radianes a grados
float R = PI/180; //para convertit de grados a radianes
float phiR = 21*R;
float Ls = 90;
float Le = 89.62;
float gamma;
float Et;
float k;
float az;
float a;
```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if(! RTC.begin()){
    Serial.println("Modulo RTC no encontrado !");
    while(1);
  }
  //RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));

  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);

  DateTime fecha = RTC.now();
  minActual = fecha.minute();

  delay(1000*15);
}

void loop() {
  DateTime fecha = RTC.now(); //Conseguir la fecha y hora del RTC(Real
Time Clock)
  mes=fecha.month();
  dia=fecha.day();
  hora=fecha.hour();
  minuto=fecha.minute();
  segundo=fecha.second();

  // Envia la señal al otro arduino para la cuenta de hora
  if(minActual != minuto){
    digitalWrite(6, HIGH);
    delay(2000);
    digitalWrite(6, LOW);
    minActual = minuto;
  }

  if (diaActual != dia){
    switch (mes) { // Puede ser mes+1
      case 1:
        n = dia; break;
      case 2:
        if (dia != 29) {
          n = 31 + dia;
        }else
          n = 59; break;
      case 3:
        n = 90 + dia; break;
      case 4:
        n = 59 + dia; break;
      case 5:
        n = 120 + dia; break;
      case 6:
        n = 151 + dia; break;
      case 7:
        n = 181 + dia; break;
      case 8:
        n = 212 + dia; break;
      case 9:
        n = 243 + dia; break;
      case 10:
        n = 273 + dia; break;
      case 11:
        n = 304 + dia; break;
      case 12:
        n = 334 + dia; break;
      default:
        n = 0; break;
    }

    gamma = (2*PI*(n-1))/365;
    Et = ( 0.000075 + 0.001868*cos(gamma) -
(0.032077*sin(gamma))-0.014615*cos(gamma*2)-0.04089*sin(gamma*2))*229.1
8; //Ecuación del tiempo
    k = 4*(Ls-Le)+Et;

    diaActual = dia;
```

```

}

// Calculo de la posicion del sol
float HSE = hora + minuto/60 + segundo/3600; // Hora solar estandar
float T = HSE + k/60;

float w = (15*(12-T));
float dR = R*(23.45*sin((360*(n+284)/365)*R));
float a = asin(sin(dR)*sin(phiR)+cos(dR)*cos(phiR)*cos(w*R))*D; // Altura
solar
float az = acos((sin(a*R)*sin(phiR)-sin(dR))/(cos(a*R)*cos(phiR)))*D; // Azi-
muth
if (w >= 0) {
    az = 90 - az;
} else
    az = 90 + az;
// a va de 0 a 90+
// az va de 0 a 180

Serial.print(hora);Serial.print(":"); Serial.print(minuto);
Serial.print(" Az: "); Serial.print(az);
Serial.print(" , Az actual: "); Serial.print(azActual);
Serial.print(" - a: "); Serial.print(a);
Serial.print(" , a actual: "); Serial.println(aActual);

// Posicionamiento azimutal
// FWD AZIMUTAL
float diffaz = (az - azActual)/0.5;
if (diffaz >= 1){
    int N = floor(abs(diffaz));
    for( int i=0; i<N; i++){
        if (azActual> 140){
            t = 905;
        } else t = 898;
        digitalWrite(2, HIGH);
        delay(t);
        digitalWrite(2, LOW);
        delay(700);
        azActual = azActual + 0.5;
    }
    Serial.print("Cambio: Az: "); Serial.print(az);
    Serial.print(" , Az actual: "); Serial.println(azActual);
}
// REV AZIMUTAL
if (diffaz <= -1){
    int N = floor(abs(diffaz));
    for( int i=0; i<N; i++){
        if(azActual<=105){
            t = 892;
        } else if(azActual<75){
            t = 906;
        } else t = 909;
        digitalWrite(7, HIGH);
        delay(t);
        digitalWrite(7, LOW);
        delay(700);
        azActual = azActual - 0.5;
    }
    Serial.print("Cambio Az: "); Serial.print(az);
    Serial.print(" , Az actual: "); Serial.println(azActual);
}

// Posicionamiento altitud solar
// FWD ALTITUD
float diffa = a - aActual;
if (diffa >= 1){
    int N = floor(abs(diffa));
    for( int i=0; i<N; i++){
        if(aActual<50){
            t = 721;
        } else if(aActual<65){
            t = 717;
        } else t = 719;
        digitalWrite(4, HIGH);
        delay(t);
        digitalWrite(4, LOW);
        delay(700);
    }
}

```

```

aActual = aActual + 1;
Serial.print("Cambio: a: "); Serial.print(a);
Serial.print(" , a actual: "); Serial.println(aActual);
}
}

if (diffa <= -1){
    int N = floor(abs(diffa));
    for( int i=0; i<N; i++){
        digitalWrite(3, HIGH);
        delay(703);
        digitalWrite(3, LOW);
        delay(700);
        aActual = aActual - 1;
    }
    Serial.print("Cambio: a: "); Serial.print(a);
    Serial.print(" , a actual: "); Serial.println(aActual);
}
}

```

```

delay(1000);
}

```

Programa Sensor de Iluminancia:

```

/*
- VCC to 3.3V
- GND to GND
- SCL to SCL A5 on Arduino Uno
- SDA to SDA A4 on Arduino Uno
- ADD to (not connected) or GND
*/

#include <BH1750.h>
#include <Wire.h>

BH1750 lightMeter(0x23);

int minuto = 57; // DEFINIR LOS MINUTOS
int hora = 7; //DEFINIR LAS HORAS

float Irradiancia = 0;
float SumLux = 0;
float SumIrr = 0;
int count = 0;

void setup() {
    pinMode(A0, INPUT);
    Serial.begin(9600); // Initialize the I2C bus (BH1750 library doesn't do this
    // automatically)
    Wire.begin(); // On esp8266 you can select SCL and SDA pins using Wire.-
    begin(D4, D3);
    // begin returns a boolean that can be used to detect setup pro-
    blems.

    if (lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE)) {
        Serial.println(F("BH1750 Advanced begin"));
    } else {
        Serial.println(F("Error initialising BH1750"));
    }
}

void loop() {
    if (lightMeter.measurementReady()) {
        float lux = lightMeter.readLightLevel();
        Irradiancia = lux/47.93;
        SumIrr += Irradiancia;
        SumLux += lux;
        count += 1;

        // Cambio de minutos
        int pinValue = analogRead(A0);
        if(pinValue >=500){
            minuto += 1;
            if(minuto >= 60){
                hora += 1;
            }
        }
    }
}

```



```

    minuto = 0;
}

float Irrmin = SumIrr/count;
float luxmin = SumLux/count;
Serial.print(hora); Serial.print(":"); Serial.print(minuto);
Serial.print(" "); Serial.print(luxmin);
Serial.print(" Irr "); Serial.println(Irrmin);

count = 0;
SumLux = 0;
SumIrr = 0;
delay(2000);
}

delay(990);
}
}

```