

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE GOTAS DE AGUA SOBRE UN PIRANÓMETRO TERMOELÉCTRICO

R. Righini, S. Bazán, R. Aristegui

GERSolar, INEDS-CONICET, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54 02323 440241)

RESUMEN: Se evalúa cuantitativamente la incidencia de la presencia de gotas de agua sobre la cúpula de un radiómetro termoelectrónico en la radiación medida por el mismo. Se discute la influencia del tamaño de las gotas y del ángulo de incidencia de la radiación, separando los efectos puramente ópticos de los asociados a la respuesta térmica del instrumento. Se determina también la variación de la irradiación medida por el radiómetro con el domo seco o rociado con gotas, analizando asimismo el proceso de estabilización térmica.

Palabras clave: piranómetro, gotas de agua, error de medición.

INTRODUCCIÓN

La evaluación del recurso solar requiere, para ser efectivamente útil, conocer con la mayor precisión posible el grado de incertidumbre con que la irradiancia solar es medida en un determinado sitio. Ya sea que el dato solarimétrico se emplee para determinar eficiencias de aplicaciones energéticas de la radiación solar, para trazar cartas que muestren la distribución espacial de la misma, para dimensionar sistemas de aprovechamiento o validar modelos de estimación del recurso, entre otras tantas aplicaciones posibles, la correcta cuantificación del grado de incerteza de las mediciones resulta fundamental (Grossi y Raichijk, 2018), (Righini y Aristegui, 2016). En ese aspecto, vale la pena señalar que la incerteza con que se mide la radiación solar no es, únicamente, la del propio radiómetro. Éste es parte de una cadena conformada por múltiples eslabones, que comprenden también el sitio de instalación, la nivelación y mantenimiento preventivo, el cableado, el adquirente de datos y el procesamiento de los mismos. Cada uno de estos eslabones hace su aporte a la incerteza total, por lo que evaluarlos resulta, en primera instancia, la acción básica para intentar disminuirlos.

La limpieza regular de las cúpulas de los radiómetros resulta imprescindible para obtener datos representativos de los niveles de irradiación solar. En particular, las gotas de rocío o de lluvia pueden ser causantes de desvíos del verdadero valor de irradiación (Hukseflux, 2020), (Rooster, 2018). Dado que su presencia resulta habitual, identificar su influencia tiene la importancia que implica conocer su peso en todo el proceso de medición.

El presente artículo pretende cuantificar el error asociado a la presencia de gotas sobre la cúpula de un radiómetro termoelectrónico, evaluando el impacto en la medición del instrumento en condiciones de laboratorio. Se trata de un primer paso que, necesariamente, deberá ser seguido de mediciones en el exterior con los equipos expuestos directamente a la radiación solar.

METODOLOGÍA

Para considerar el efecto de las gotas de agua se procedió a montar dos radiómetros en el laboratorio de calibración indoor que el GERSolar posee en su predio de la Universidad Nacional de Luján. Las limitaciones de las conclusiones y el trabajo en sí, tienen que ver con esa circunstancia: las condiciones existentes en el laboratorio son distintas, en general, a las que soporta un radiómetro que mida en el

exterior. De todas formas, una primera aproximación a la cuantificación del efecto de la presencia de las gotas puede desprenderse del presente trabajo. El radiómetro sobre el cual se analizó el efecto que causan las gotas sobre la cúpula fue un Kipp&Zonen CMP11, mientras que el instrumento usado como referencia fue un Kipp&Zonen CMP22. Los dos radiómetros son clase A (Norma ISO 9060;2018), siendo el CMP22 más preciso que el CMP11. Ambos se pusieron debajo de una lámpara Osram Powerball HCI-T 150W/942 situada en una luminaria 74405 -E150 Shane Proxy El espectro de emisión de la lámpara corresponde, aproximadamente, al de un cuerpo negro que se encuentre a una temperatura de 4200 K. Se los ubicó de manera que recibiesen una irradiación aproximadamente igual. Los datos provenientes de ambos equipos fueron almacenados por un datalogger CR1000 de la firma Campbell. Las mediciones se hicieron una vez por segundo, guardándose promedios cada cinco segundos de los niveles de voltaje entregados por ambos radiómetros y, también, el cociente Voltaje CMP11/ Voltaje CMP22. El balasto electrónico de la lámpara fue alimentado con una fuente GP INSTEK APS 7050, que entrega una tensión estabilizada al 0,5%.

La lámpara puede ser inclinada variando su ángulo, respecto a la normal del plano de apoyo de los equipos, en un rango que va desde 0° a 90°. (Fig.1).

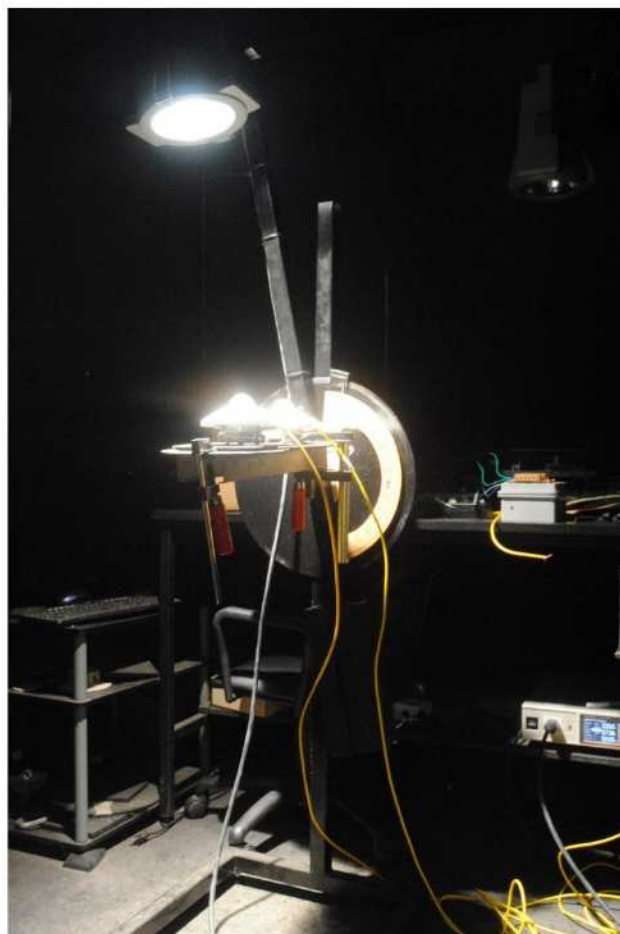


Figura 1: Estructura de soporte de la lámpara. Los radiómetros se sitúan debajo de ella, pudiendo variarse el ángulo de incidencia del haz de luz que emerge de la luminaria

PROCEDIMIENTO

Ambos radiómetros se posicionaron bajo la lámpara (Fig.2). El CMP11 fue rociado con agua, con gotas cuyo diámetro varió entre 0,2 mm y 3 mm, midiéndose, tal como se explicó, el cociente entre su voltaje y el voltaje del CMP22 usado como referencia. Después de transcurrido unos minutos de haber rociado la cúpula del CMP11 (lapso mucho mayor que el tiempo nominal de respuesta de ambos radiómetros), se la secó, esperándose hasta que la relación de señales se estabilizase para luego, volver a rociar. La posición de la lámpara se fue variando cada 10°, entre 0° y 80°, tomándose no menos de

dos series de datos para cada posición angular, cada una de las cuales consta de al menos 100 mediciones.

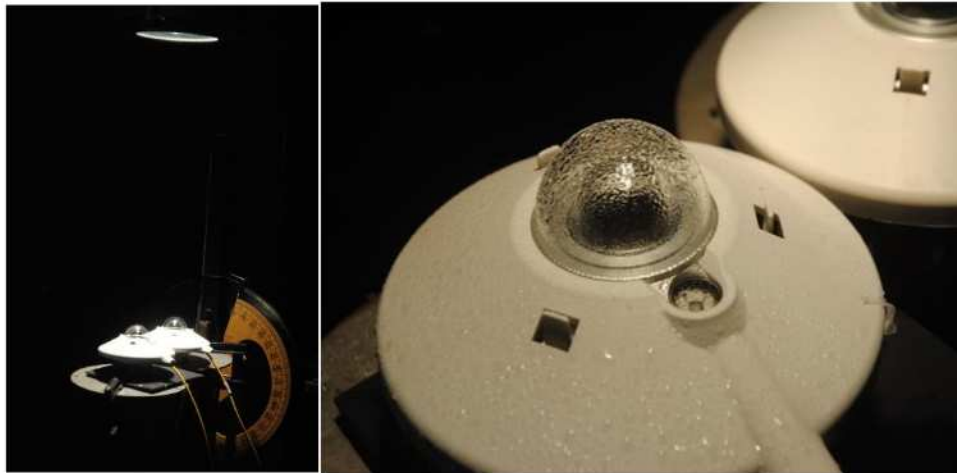


Figura 2: Izquierda: posición de los radiómetros bajo la lámpara (en posición vertical en este caso). Derecha: vista del CMP11 luego de rociarlo con gotas de agua. A su derecha puede verse el CMP22 usado como referencia.

PRIMEROS RESULTADOS

Las primeras mediciones, realizadas con la lámpara en el cenit de los radiómetros (ángulo cenital de 0°) se muestran en la Fig.3.

Pueden notarse varios detalles particulares: el cociente entre ambos votajes es de 0,98 hasta el momento en que se produce el rociado de las gotas sobre el CMP11. Posteriormente al rociado, el cociente baja rápidamente, llegando a un valor mínimo. En ese momento se procede al secado de la cúpula, retirándose todas las gotas. Lo notable es que, luego del secado (con papel absorbente), el CMP11 demora varios minutos en estabilizarse nuevamente como muestra la figura 3..

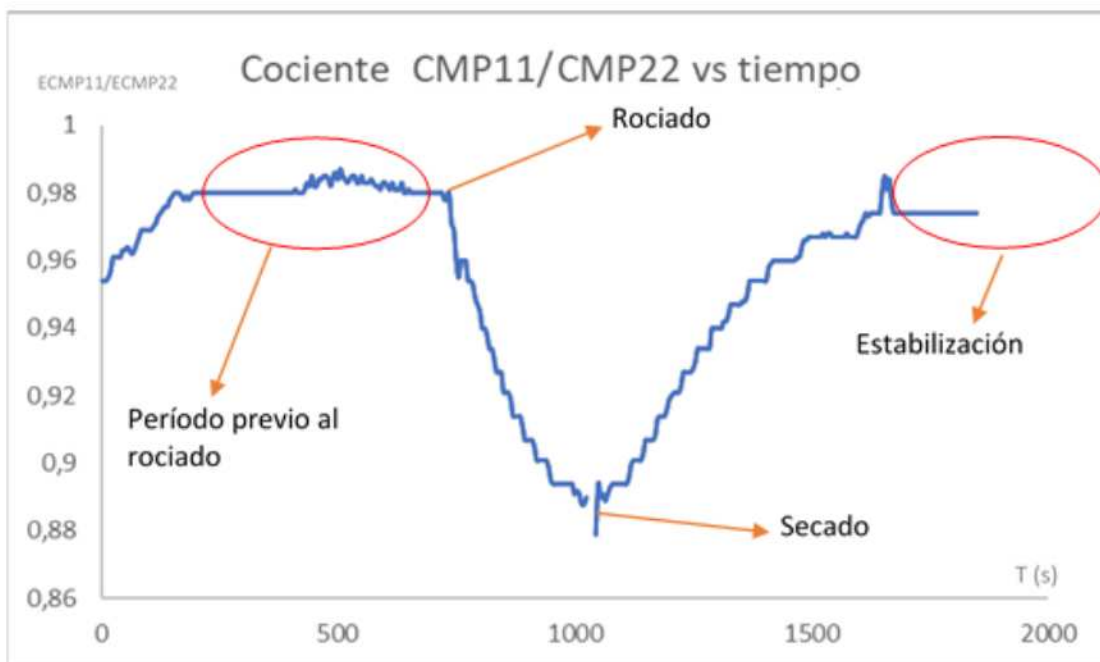


Figura 3: visualización de los momentos de rociado y secado de las gotas

En total, todo el proceso desde el rociado a la estabilización posterior lleva unos 15 minutos. Las primeras preguntas que surgen son: ¿por qué, una vez secada la cúpula, tarda tanto la señal del CMP11 en alcanzar el valor que tenía previo al rociado? ¿Se trata de un efecto de estabilización térmica del radiómetro? Y si efectivamente se tratase de un período de estabilización, ¿cuál es el verdadero efecto de las gotas? ¿Cuánto influyen, específicamente las gotas y cuánto hay de influencia del enfriamiento de la cúpula en el efecto observado? Y, en definitiva, ¿qué es lo que debe considerarse para evaluar la influencia de las gotas en la medición de la radiación solar?

Para intentar responderlas y considerar qué datos hay que tomar en cuenta y cuáles de las condiciones en las que se realizan las mediciones pueden estar influyendo en los resultados obtenidos, se procedió de la siguiente manera:

1. Se interpuso una barrera oscura entre ambos radiómetros, con el objetivo de descartar que la radiación reflejada por las gotas del CMP11 tuviese influencia en las mediciones del CMP22 tomado como referencia. Si el reflejo de la radiación incidente en las gotas que están en la cúpula del CMP11 alcanzase al CMP22, este último mediría mayor radiación que la que recibiría en condiciones normales, por lo que el cociente entre las energías de ambos instrumentos debería decrecer, incrementando erróneamente el efecto atribuido a la presencia de las gotas.
2. Se roció con agua fría y con agua caliente la cúpula, para ver qué efectos tiene la temperatura del agua en el proceso.
3. Se roció sólo el cuerpo del CMP11, sin que se depositaran gotas en la cúpula. El objetivo fue ver si se manifestaba algún efecto particular en esas circunstancias.
4. Se colocó una cúpula adicional sobre el CMP11 (Fig. 4), con el propósito de corroborar cuál es el efecto de las gotas y cuál el de la estabilización térmica.
5. Se roció con gotas de diferente diámetro para evaluar la influencia de su tamaño en la medición del radiómetro.
6. Se midió, como ya se mencionó, para ángulos cenitales de la lámpara que variaban entre 0° y 80° , incrementándolos de a 10° .



Figura 4: Izquierda: cúpula adicional colocada sobre el CMP11 para verificar efectos térmicos debido al rociado de gotas Derecha: cúpula adicional colocada sobre el radiómetro

RESULTADOS

1. La barrera oscura interpuesta entre ambos radiómetros reveló que no existe efecto apreciable debido a la reflexión de las gotas en el CMP11 que pueda influir en la medición del CMP22 tomado como referencia.
2. No se detectó ningún efecto debido a la diferencia de temperatura en el agua que se usó para rociar la cúpula del CMP11.
3. Cuando se roció con agua sólo el cuerpo del CMP11, no se notó ningún efecto sobre la irradiancia medida por el instrumento.
4. La colocación de la cúpula adicional sobre el CMP11 permitió desacoplar el efecto óptico de las gotas del efecto térmico que supone el intercambio de calor entre ellas y la cúpula del radiómetro CMP11. Cuando se roció sobre la cúpula adicional, se obtuvieron los valores mostrados en la Fig.6.
En las mediciones efectuadas, se nota el rápido descenso debido a la presencia de gotas en la cúpula adicional (cuando se la rocía). El ascenso posterior tiene que ver con que las gotas se van juntando y cayendo, descubriendo de agua progresivamente la cúpula. En cuanto se retira esa cúpula adicional, el CMP11 instantáneamente alcanza el valor que tenía antes de colocarla. Este hecho permite concluir que el lento proceso de alcanzar la estabilización, del orden de los 15 minutos, que experimentaba la señal de salida del CMP11 se debe a efectos térmicos de intercambio de calor entre las gotas, la cúpula y el resto del equipo. Los efectos ópticos sobre la radiación medida ante la presencia de gotas son alcanzados rápidamente; la estabilización térmica es, obviamente, más lenta. Este hecho es conocido y característico de los fenómenos de offset térmico (Sánchez et al.)
5. Se roció con gotas cuyo diámetro varía entre 0,2 mm y 3 mm. No se apreciaron diferencias significativas del comportamiento del CMP11 en función del diámetro de las gotas rociadas sobre su cúpula. Esta afirmación está basada en varias mediciones realizadas para distintos ángulos de incidencia de la radiación sobre la lámpara.

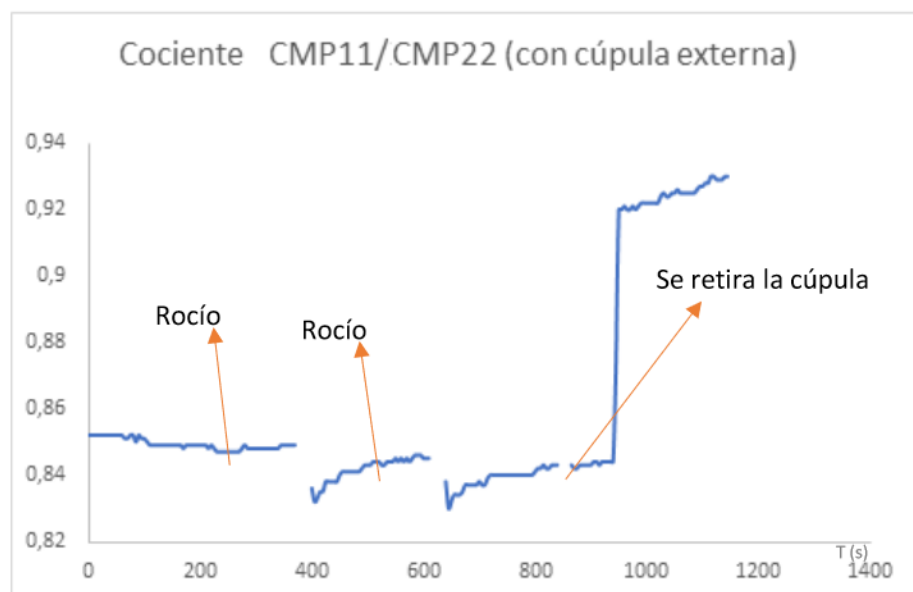


Figura 5: Efecto del rocío de gotas de agua sobre la cúpula adicional colocada sobre el CMP11. Nótese el rápido descenso del cociente de los voltajes y, cuando se retira la cúpula, el inmediato ascenso a los valores previos.

6. Se midió para ángulos cenitales de la lámpara que variaban entre 0° y 80°, incrementándolo de a 10°. Teniendo en cuenta los efectos térmicos de las gotas sobre el radiómetro, se tomaron en cuenta los primeros momentos, registrándose valores de irradiancia entre los primeros 15 y 60 segundos luego de rociar la cúpula como representativos de su influencia óptica.
7. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos. La diferencia porcentual ha sido calculada como:

$$Diferencia\% = 100 * \left(\frac{R_{Vcongotas} - R_{Vsingotas}}{R_{Vsingotas}} \right)$$

donde:

$$R_{Vcongotas} = \frac{VoltajeCMP11_{congotas}}{VoltajeCMP22}$$

$$R_{Vsingotas} = \frac{VoltajeCMP11_{singotas}}{VoltajeCMP22}$$

Los errores relativos que se asumen para el CMP11 y el CMP22 son del 1,5%, por lo que el error instrumental asociado con el cálculo de la denominada “Diferencia%” es del 2,1%.

Los voltajes son los voltajes de salida de los instrumentos, almacenados en la CR1000, siendo los errores asociados a la determinación de las tensiones mucho menores que los errores de la constante asociada a cada radiómetro.

Los errores estadísticos de las diferencias promedio determinadas son evaluados mediante el desvío estándar relativo al promedio de cada una de las series de medición. Los errores estadísticos e instrumentales fueron directamente sumados para evaluar el error total de medición.

Ángulo (°)	Diferencia % promedio
0	-3,9 ± 0,3
10	-3,7 ± 0,3
20	-3,1 ± 0,3
30	-3,1 ± 0,2
40	-2,0 ± 0,3
50	0,7 ± 0,2
60	-2,0 ± 0,4
70	-3,7 ± 0,9
80	9,3 ± 5,2

Tabla 1: Diferencia promedio entre valores medidos con la cúpula del CMP11 cubierta con gotas y con la cúpula seca.

Es necesario considerar que lo que se presenta en la Tabla 1 son los promedios de las series de mediciones realizadas, para cada ángulo de la lámpara en particular. No obstante, hay que tener en cuenta que, si bien en la mayoría de los casos la irradiación que recibe el radiómetro cubierto por las gotas rociadas sobre la cúpula es menor que cuando no está cubierto, en algunos casos particulares la irradiación resulta mayor. Esto es particularmente visible a medida que el ángulo cenital de la lámpara aumenta, acercándose a la horizontal. Resultados tan altos como un exceso de un 12% en la irradiación medida son alcanzados con el ángulo cenital de 80°. Reafirmando lo anterior, los valores inferiores medidos se relacionan con ángulos cenitales que están entre 0° y 30°, promediando todos ellos un -3,5%.

Resulta también notable el hecho de que los errores van creciendo a medida que el ángulo cenital aumenta (resultan muy grandes para el ángulo de 80°: 58%). Este hecho no se debe al error

instrumental sino a la dispersión de los datos. Mayor ángulo implica mediciones que presentan apartamientos mayores respecto al valor medio, lo que se refleja en el incremento del desvío estándar. En nuestra opinión la explicación puede relacionarse con la geometría y los efectos ópticos que las gotas de agua ocasionan en relación a la radiación incidente. Para ángulos cenitales altos las gotas pueden reflejar parte de la luz incidente en la cúpula dirigiéndola a la termopila del radiómetro, incrementando así la radiación medida. Cuando el ángulo cenital es menor, predomina el efecto dispersivo y por ello la radiación recibida por el instrumento disminuye.

En aquellos casos en que la irradiación recibida luego del rociado de la cúpula es mayor, el CMP11 vuelve rápidamente a lo medido antes del rociado, sin embargo, luego su lectura sigue disminuyendo, tardando en alcanzar la estabilidad final el mismo tiempo que en aquellos casos en que la irradiación recibida es menor. La siguiente figura muestra un ejemplo de ello. (Fig. 6).

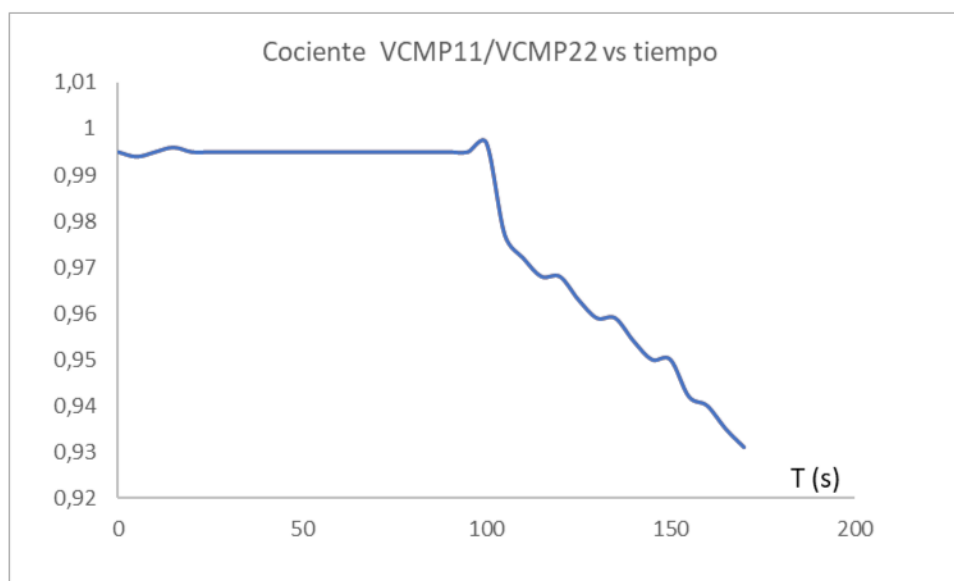


Figura 6: Evolución temporal de la relación de voltajes para un caso en el que luego de rociar la cúpula la energía medida por el CMP11 es mayor que antes de rociar. El ángulo cenital de la lámpara fue de 50°.

Una cuestión que resultó clara en la serie de experimentos realizados fue que la influencia en la irradiación recibida por el radiómetro sólo está relacionada, a primer orden, con la presencia de las gotas que interceptan primero al haz de luz incidente. En efecto, se comprobó, secando progresivamente distintas zonas de la cúpula rociada, que las gotas que interfieren con la radiación incidente son las que primero son alcanzadas por el haz proveniente de la lámpara. Los reflejos secundarios de las gotas ubicadas en sitios de la cúpula cuya normal forme con la dirección del haz un ángulo mayor a 90°, no ejercen ningún efecto apreciable para ningún ángulo de incidencia.

Consideración conjunta de los efectos térmicos y ópticos de las gotas

Hasta ahora nos hemos concentrado en el efecto óptico exclusivo que origina la presencia de las gotas de agua sobre el radiómetro. Ya sea que incremente o decremente la radiación recibida por el mismo, lo breve del intervalo de tiempo en que lo consideramos permite evaluarlo con independencia de los efectos térmicos. Pero estos últimos están, obviamente, presentes durante todo el proceso de rocío y secado. Por lo que pudo inferirse de las mediciones realizadas, los mismos son responsables de una reducción de la radiación medida por un radiómetro que presenta gotas en su cúpula, lo que contribuye a un error sistemático que puede acumularse a escala horaria y diaria. Recordemos que estos efectos térmicos persisten aún después de secada la cúpula, y lo hacen durante muchos minutos posteriores al secado. Más allá de lo que pueda suponerse en lo que respecta a la capacidad del

radiómetro en cuestión de responder rápidamente a las variaciones de irradiancia (un tiempo del orden de los 5 segundos, según el fabricante), el efecto térmico de la presencia de las gotas está presente durante un intervalo temporal mucho mayor. Ello tiene que ver, seguramente, con el enfriamiento de la cúpula externa, debido a la presencia de las gotas y a su posterior evaporación.

La cúpula externa, al enfriarse, debe favorecer un drenaje de calor desde la termopila hacia ella, lo cual determina que el voltaje de salida sea inferior al de las condiciones existentes antes de rociar al instrumento. Por ello, según opinamos, la presencia de gotas aún durante un corto período de tiempo siempre determina, superados los transitorios iniciales, valores menores de irradiancia medida. Aún en aquellas ocasiones en las que el efecto óptico primigenio debido a la presencia de gotas establece un incremento de la radiación, dicho efecto es anulado rápidamente por el descenso posterior ocasionado por los efectos térmicos.

Para evaluarlo cuantitativamente haremos algunas suposiciones:

- El efecto de las gotas es disminuir la irradiancia medida por el radiómetro.
- La curva de evolución de la radiación medida por el radiómetro mojado (y luego evaporada las gotas en forma natural) es similar la mostrada en la figura N° 8 (respuesta típica del radiómetro cuando desciende la irradiancia medida para ángulos entre 0° y 30°).
- La curva de evolución es continua por lo que puede integrarse a lo largo del tiempo.
- La relación entre la radiación original inicial (antes de rociar las gotas) medida por el CMP11 y el CMP22, usado como referencia, se mantiene constante, aún en el caso de variaciones mínimas en la iluminación brindada por la lámpara durante el período considerado.
- La evolución temporal de la irradiancia medida es en todos los casos similar, independientemente del ángulo de incidencia de la luz y del incremento o decremento de la energía recibida durante los primeros segundos debido a la presencia de gotas de agua.

Bajo esas suposiciones, puede evaluarse la disminución de la irradiancia integrando la curva mostrada en la Fig. 7.

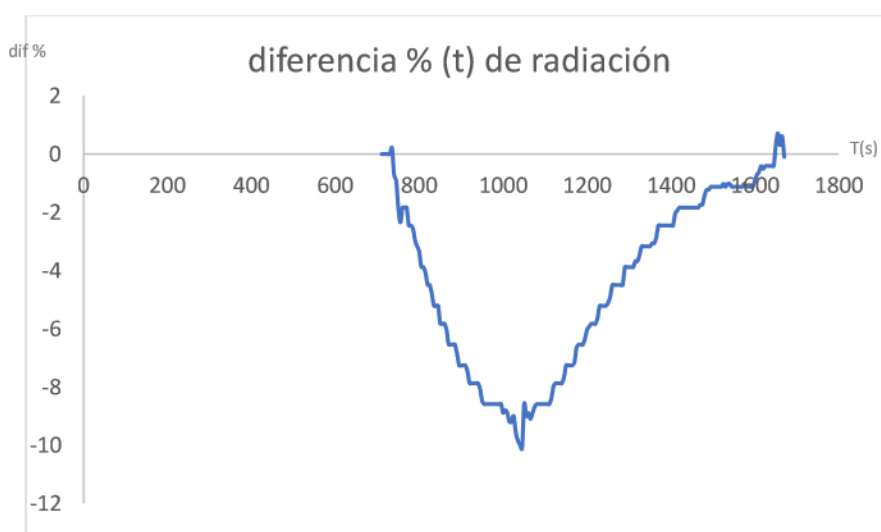


Figura 7: Evolución temporal típica de la diferencia porcentual ($dif\%(t)$) de irradiancia entre las mediciones del CMP11 con presencia de gotas en la cúpula respecto al CMP11 con la cúpula seca

Por lo tanto, evaluamos la diferencia total entre la irradiación incidente y la medida por el radiómetro con gotas, luego del secado como:

$$\text{diferencia integrada\%} = \frac{\int_0^T \text{dif\%}(t) \cdot dt}{T}$$

donde:

dif%(t) es la función representada en la figura N° 7, y T el período total de integración, que abarca desde el momento en que la curva desciende de cero hasta que alcanza su valor de convergencia.

Para el caso particular que nos ocupa, T = 935 seg. Por lo que se obtiene, durante el transitorio:

$$\text{diferencia\% integrada típica} = -4,4\% \pm 0,1\%$$

Considerándose aquí para la determinación del error solamente el error instrumental.

CONCLUSIONES

La presencia de gotas de agua sobre la superficie de la cúpula de un radiómetro no ha sido históricamente evaluada con suficiente profundidad. Si bien se admite que el radiómetro presenta variaciones en su registro cuando están presentes, no se ha discutido suficientemente si estas variaciones incrementan o decrecientan la irradiación medida respecto a la realmente presente. Este trabajo permite, en nuestra opinión, evaluar las dificultades asociadas a predecir el efecto de las gotas provenientes del rocío y de la lluvia. Los efectos parecen ser independientes de la altura solar: implican una disminución en la irradiación medida siempre, aunque pueda haber un aumento en un corto lapso de tiempo en las mediciones de irradiación solar para valores altos del ángulo cenital. No obstante, estas conclusiones están realizadas basadas en mediciones indoor. Si bien constituyen una aproximación en primera instancia a la cuantificación de la influencia de las gotas, para dotarlo de mayor representatividad el trabajo debe ser completado con mediciones realizadas en exteriores, sujetas a las condiciones ambientales normales.

Porcentualmente la importancia del efecto óptico de las gotas se revela como creciente cuando la altura solar es baja, pero los valores que permiten sostener esta afirmación están lo suficientemente dispersos como para impedir una conclusión categórica.

Los efectos térmicos que la presencia de gotas supone sobre la cúpula del radiómetro persisten aún después de que las gotas han desaparecido, manteniendo su influencia hasta 15 minutos posteriores al secado.

En general, para ángulos cenitales de incidencia de la radiación entre 0° y 30° se aprecia una disminución promedio del orden del 3,5% en la radiación medida por el instrumento, en presencia de gotas. Ángulos cenitales mayores presentan una dispersión mayor de las medidas y, en varias ocasiones, suponen un incremento de la radiación registrada, quizá debido a que la disposición geométrica de las gotas aumenta la irradiación incidente sobre la termopila del sensor solarimétrico. No pudo establecerse una dependencia directa de la variación de la radiación medida con el tamaño de las gotas. Mediciones más precisas y un abordaje óptico teórico posibilitarán arribar a conclusiones al respecto.

Las gotas que influyen en la variación de la medida son aquellas que primero interactúan con el haz incidente.

Si se consideran los efectos térmicos persistentes en el radiómetro luego de la desaparición de las gotas de agua sobre la cúpula, la irradiación medida en el intervalo típico de tiempo que demora la

convergencia térmica supone una disminución de un 4,5% de la energía recibida por el sensor durante los 15 minutos que demora la estabilización.

No escapa a nuestra percepción que este análisis sobre el tema permite un primer abordaje cuantitativo de la influencia de lluvias intermitentes o rocío sobre un radiómetro termoelectrico. De esta manera se hace posible evaluar de manera más precisa uno de los eslabones presentes en la cadena de incertezas que supone todo el proceso de medición de la radiación solar a nivel de la superficie terrestre.

REFERENCIAS

- Grossi H. y Raichijk C. (2018). Radiación solar: medición y modelado. edUTecNe-Asades (300pp).
Hukseflux, (2020). Quality control for pyranometer data: What to do against frost and dew, technical Note.
Righini R. y Aristegui R. (2016). Plantas fotovoltaicas: perjuicios por no evaluar convenientemente el recurso solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 4, pp. 08.69-08.76.
Rooster R. (2018). Rain, dust and dew: qualitative influence in pyranometer data. Solar instruments, African solar radiation magazine (ISSN 0735-4458).
Sanchez G., Serrano A, Cancillo M. L., y García J. A. Pyranometer Thermal Offset: Measurement and Analysis. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol 32, pp 234-246, (2014).

ABSTRACT: The incidence of the presence of drops of water on the dome of a thermoelectric radiometer in the radiation measured by it is quantitatively evaluated. The influence of the size of the droplets, the angle of the incident radiation, is discussed, separating the purely optical effects from those associated with the thermal response of the instrument. The variation of the energy measured by the radiometer with respect to that actually existing during the thermal stabilization process is also determined.

KEYWORDS: pyranometer, water drops, quantitative analysis