

EFFECTO DE LOS FACTORES AMBIENTALES EN LA EFICIENCIA DE
ARREGLOS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

FABIAN ALONSO GARCIA BARRIOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA

2018

EFFECTO DE LOS FACTORES AMBIENTALES EN LA EFICIENCIA DE
ARREGLOS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

FABIAN ALONSO GARCIA BARRIOS

Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Tutor:

Jonathan Fábregas Villegas
M. Sc. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA

2018

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, 15 de enero de 2018.

A mi esposa y a mis padres por todo su apoyo, amor y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

E2 Energía Eficiente S.A. E.S.P. por incentivar mi proceso de formación y por brindarme las herramientas para la realización de este trabajo de grado, a la Universidad Autónoma del Caribe en especial al profesorado de la maestría en Ingeniería Mecánica por su apoyo constante y al profesor Mikel Muñoz Escribano por su amable atención a mis preguntas.

CONTENIDO

CONTENIDO	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	7
GLOSARIO	8
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	19
3.1. General	19
3.2. Específicos	19
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1. MARCO TEÓRICO	20
4.1.1. Descripción del sistema	20
4.1.2. Curvas Corriente-Voltaje (I-V).....	21
5. DISEÑO METODOLÓGICO	24
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
8. BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXO A – FICHA TÉCNICA DE LOS PANELES SOLARES	39
ANEXO B – FICHA TÉCNICA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los paneles solares. Tomado de la ficha técnica del panel [Anexo A].	20
Tabla 2. Huella de carbono indirecta por reducción de la eficiencia del sistema PV.	34

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Generación de energía eléctrica por fuente en 2014. Tomado de sitio web de la International Energy Agency (www.iea.org).....	13
Fig. 2. (a) Arreglo de paneles solares; (b) Estación meteorológica.	21
Fig. 3. Curva de corriente-voltaje (I-V) que representa el comportamiento de un panel solar o arreglo en una condición de operación específica. Tomado de [4].....	22
Fig. 4. (a) Curva I-V del panel solar a temperatura constante (25°C); (b) Curva I-V del panel solar a radiación solar constante (1000 W/m ²). Las curvas fueron tomadas de la base de datos del software Helioscope.	25
Fig. 5. Representación gráfica del modelo de la potencia de los paneles en función su temperatura y de la radiación solar efectiva.....	28
Fig. 6. (a) Radiación solar Vs. Radiación solar efectiva; (b) Puntos del conjunto de validación con respecto al modelo.....	30
Fig. 7. Comparativo entre la temperatura ambiente y la temperatura del panel.	31
Fig. 8. (a) Eficiencia del modelo y eficiencia real diaria; (b) Déficit de energía generada y de las precipitaciones diarias; (c) Déficit de energía acumulado y de las precipitaciones diarias; (d) Energía no generada mensual.	33

GLOSARIO

Ángulo cenit: Es el ángulo entre la vertical y el haz de radiación proveniente del sol.

Ángulo horario: Es el desplazamiento angular que tiene el sol en el horizonte de Este a Oeste debido a la rotación de la tierra. Cada hora está representada por 15°. El ángulo horario puede tomar valores entre -90° y 90°, tomando valores negativos para las horas antes del mediodía y positivo para las horas pasadas del mediodía.

Ángulo incidente: Es el ángulo que existe entre el haz de radiación proveniente del sol y la superficie del panel solar PV.

Cambio climático: Es la modificación del clima por acción de la actividad humana directa o indirectamente que altera la composición de la atmósfera.

Clima: Son los promedio históricos del comportamiento de los factores climáticos en una región específica.

Declinación: Es la posición angular del Sol con respecto al Ecuador a mediodía. La declinación puede tomar valores entre -23.45° y 23.45°.

Efecto fotovoltaico: Es la propiedad que tienen algunos materiales semiconductores como el silicio y el germanio de generar una diferencia de potencial eléctrico al ser expuestos a la luz solar.

Ensuciamiento: Acción y efecto de ensuciar una superficie. En el caso de los paneles solares fotovoltaicos (PV), corresponde a la capa de material particulado y residuos que se depositan sobre la superficie de las celdas solares y reducen la cantidad de radiación que puede ser transformada en energía eléctrica.

EPC (*Engineering, Procure and Construction*): Es un esquema de negocio donde el usuario final contrata a una firma la cual es responsable de todas las actividades

de diseño, adquisiciones y construcción de un proyecto. Al final, el usuario final recibe el proyecto listo para operación.

Factores ambientales: Es el conjunto de factores climáticos y del entorno que inciden sobre la operación de un sistema de generación PV.

Gases de efecto invernadero: son gases atmosféricos que absorben y emiten radiación. Estos gases contribuyen al calentamiento global.

Huella de carbono indirecta: Esta corresponde a las emisiones de CO₂ que los sistemas de generación convencionales produjeron para suplir la energía no generada en los sistemas de generación con fuentes renovables por efecto de la reducción de la eficiencia. En el caso de los sistemas de generación PV, esta reducción de la eficiencia se debe principalmente al ensuciamiento de la superficie de los paneles.

Inclinación: Es el ángulo que forma un panel solar con respecto a la horizontal. La inclinación puede tomar valores entre 0° y 180°, valores de inclinación mayores a 90° indican que el panel está orientado hacia la tierra.

Latitud: Es la ubicación angular de un punto en el planeta con respecto al Ecuador. La latitud puede tomar valores entre -90° y 90°. Los puntos al Norte del Ecuador toman valores positivos mientras que los puntos al Sur del Ecuador toman valores negativos.

PPA (*Power Purchase Agreement*): Es un modelo de negocio en el cual se instala un proyecto de generación de energía para vendérsela a un cliente específico durante un tiempo de contrato definido que garantice el pago de la inversión.

Sistema de generación fotovoltaica: Es un conjunto de componentes interconectados que transforman la energía solar en energía eléctrica gracias al efecto fotovoltaico.

Transmitancia: es una magnitud física que representa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo por unidad de tiempo.

Variabilidad climática: Son condiciones atmosféricas extremas que se generan de forma natural y modifican el clima normal de una región tales como huracanes, sequías, el fenómeno del Niño y la Niña, entre otros.

RESUMEN

Identificar cómo afecta el ensuciamiento de los paneles al rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, ayudaría a mejorar sus ciclos de limpieza y reducir su huella de carbono indirecta. Por esto, se analizó un sistema fotovoltaico instalado en Barranquilla (Colombia); calculando su rendimiento teniendo en cuenta los factores climáticos y comparándolo con el rendimiento real del sistema. Se notó diferencias entre el rendimiento real y calculado, atribuibles al ensuciamiento de los paneles lo que aumenta la huella de carbono indirecta del sistema ya que la energía no generada por el sistema debe ser suministrada por fuentes de energía convencionales (combustibles fósiles); estas diferencias cambian en función de las lluvias. En consecuencia, la caracterización de las lluvias permitiría conocer un modelo para estimar su efecto sobre el ensuciamiento.

Palabras clave: Radiación solar, factores ambientales, panel solar fotovoltaico, ensuciamiento, huella de carbono indirecta.

ABSTRACT

Identifying how soiling affects the performance of photovoltaic systems, would help us to improve their cleaning cycles and reduce their indirect carbon footprint. For this reason, a photovoltaic system installed in Barranquilla (Colombia) was analyzed; calculating their performance considering the climatic factors and comparing it with the real performance of the system. Differences were noted between actual and calculated performances referable to soiling, what increase the system's indirect carbon footprint because the non-generated energy must be supply by a conventional energy source (fossil fuels); these differences change depending on the rains. So the characterization of the rains would allow to know a model to estimate the soiling.

Keywords: Solar irradiance, environmental factors, photovoltaic (PV) solar module, soiling, indirect carbon footprint.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía eléctrica ha aumentado de manera dramática anualmente debido al crecimiento de la población mundial. Actualmente, la energía eléctrica se genera principalmente a partir de combustibles fósiles los cuales tiene un impacto importante en la generación de gases de efecto invernadero (GHG, *GreenHouse Gases*); por lo tanto, el uso de paneles solares PV es una solución limpia para la generación de energía eléctrica y así reducir la emisión de GHG [1].

Figure 4: Fuel shares in world electricity production in 2014

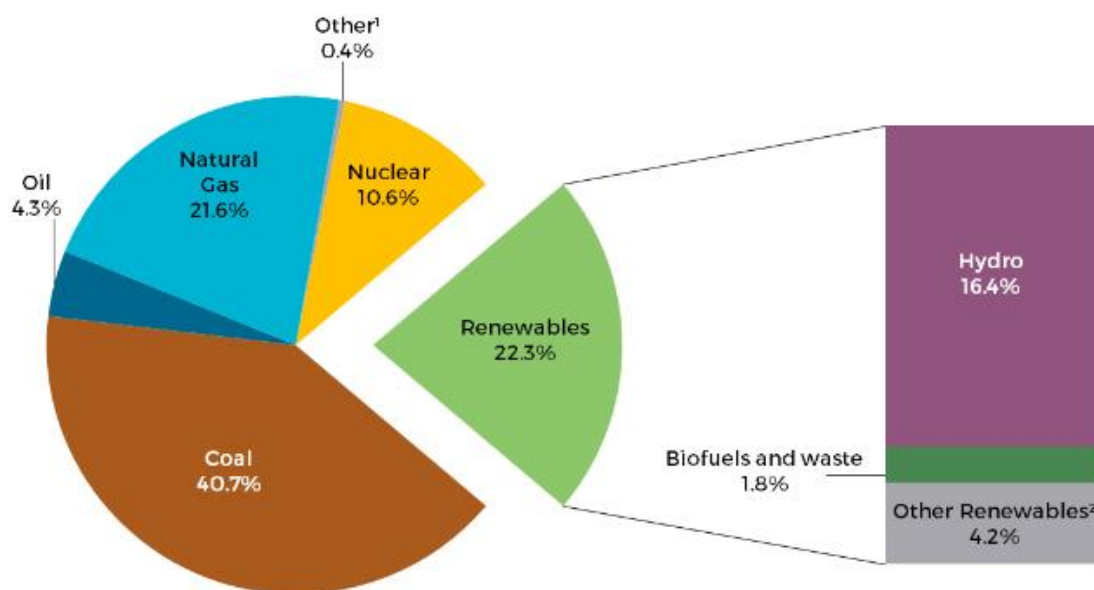


Fig. 1. Generación de energía eléctrica por fuente en 2014. Tomado de sitio web de la International Energy Agency (www.iea.org).

El desempeño de los paneles solares PV depende de factores ambientales tales como la radiación solar disponible, la velocidad y dirección del viento, la temperatura ambiente, la humedad relativa y el material particulado que se encuentra en la atmósfera (polución); y los depósitos de partículas sólidas que se acumulan en la superficie de los paneles [2, 3, 4].

En consecuencia para estimar el desempeño técnico y económico de un proyecto de generación con paneles solares PV, es necesario contar con un modelo que permita evaluar el desempeño operacional de los paneles en las condiciones específicas del sitio donde va a ser instalado [3]. El presente documento busca establecer un modelo para calcular la eficiencia de salida de un arreglo de paneles solares PV instalado en Barranquilla, por medio de las relaciones que se identifiquen entre la eficiencia, los factores climáticos y el nivel de ensuciamiento de los paneles. Cabe anotar que Barranquilla tiene una de las mejores radiaciones promedio de la región [5].

La acumulación de polvo sobre la superficie de los paneles (nivel de ensuciamiento), también afecta el desempeño de los sistemas de generación PV, puesto que reduce la transmitancia del vidrio protector de los paneles y reduce el aprovechamiento de la radiación incidente sobre los mismos. El nivel de ensuciamiento de los paneles (soiling) puede hacer que la potencia generada por un sistema PV se reduzca hasta un 50% [2]. Las primeras investigaciones acerca del efecto del soiling sobre desempeño de sistemas solares se realizaron en la década de 1940 sobre colectores solares térmico de placas (flat-plate collectors); obteniendo como resultado una reducción del desempeño de los colectores de sólo un 4.7%; este efecto tan pequeño se puede atribuir a que la investigación se realizó durante la estación de lluvia y el ángulo de inclinación de los colectores era de 30° lo cual facilitaba la limpieza natural de la superficie [3]. En la década de 1970, en Arabia Saudí y Kuwait se realizaron estudios del efecto del ensuciamiento en paneles solares PV; obteniendo que durante el primer mes sin limpieza el desempeño de los paneles se redujo un 33.5% y después de 6 meses sin limpieza la reducción alcanzó el 65.8% [3]. Desde la década de 1990, se han realizado numerosos estudios acerca del efecto del ensuciamiento en el desempeño de los paneles solares PV, en general todos presentan al ensuciamiento como uno de los factores claves en la reducción del desempeño de los paneles y uno de los pocos que se puede mitigar.

Estudios recientes han mostrado que la reducción en el desempeño de los paneles está fuertemente relacionada con la composición del material particulado.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los factores que impactan en el desempeño de los arreglos de paneles solares son en su mayoría externos e incontrolables. Sin embargo, el ensuciamiento de los paneles y las pérdidas en los conductores se pueden mitigar a través de programas de limpieza y el redimensionamiento de las acometidas, respectivamente. Pero estas dos acciones de mitigación son costosas y debido a la sensibilidad económica de los proyectos de generación fotovoltaica pueden afectar su rentabilidad.

Para el caso específico del ensuciamiento, la acción de mitigación tiene tres costos principales asociados que deben ser asumidos por el sistema de generación solar, estos son: El costo de los equipos de limpieza (Hidrolavadora, limpiavidrios, etc.), el costo de los servicios (Agua y energía eléctrica) y el costo de la mano de obra [14]. Establecer una rutina de limpieza periódica puede tener el efecto de hacer limpiezas excesivas en algunas épocas del año e insuficientes en otras; y tener como parámetro de limpieza la eficiencia del arreglo de paneles tampoco es recomendable, ya que dicho indicador es función de muchos factores diferentes al nivel de ensuciamiento y en consecuencia, una caída en la eficiencia no necesariamente será sólo a causa del ensuciamiento. Por lo tanto, si podemos aislar el efecto del ensuciamiento en la eficiencia del arreglo de paneles se podrían programar mantenimientos de forma más precisa y económicamente rentables; esto haría más rentables los sistemas de generación con paneles solares e impulsaría la competitividad de la región al tener disponibilidad de energía limpia y económica.

En cuanto a las pérdidas en el conductor, estas pueden ser producto de un error de diseño y se pueden identificar utilizando la curva I-V del arreglo. Esta acción de mitigación se recomienda realizarla en la medida que la mejora en la eficiencia y seguridad del sistema compense la inversión en el redimensionamiento de la acometida.

¿Cómo impacta el ensuciamiento y la variabilidad climática en el desempeño de los sistemas de generación fotovoltaico?

2. JUSTIFICACIÓN

Para la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica utilizando paneles solares PV, existen básicamente 2 esquemas de negocio: EPC (*Engineering, Procurement and Construction*) y PPA (*Purchase Power Agreement*). En el primer esquema, el propietario del inmueble financia la implementación y puesta en servicio de su sistema de generación, mientras que en el segundo esquema, un ente externo le propone un acuerdo de venta de energía al dueño del inmueble; la inversión, la operación y el mantenimiento es realizado por el ente externo y el dueño del inmueble sólo paga por la energía que se genere. En ambos casos, los tiempos de retorno son muy altos (10 – 20 años). Además, la rentabilidad del proyecto está fuertemente afectada por la variabilidad climática de la zona donde se encuentre instalado el proyecto.

Las rutinas de limpieza son muy importantes para mantener la eficiencia de los paneles en niveles óptimos de tal forma que se genere la mayor cantidad de energía posible. Sin embargo, no solo el ensuciamiento afecta la eficiencia de los paneles. Es posible que se tengan una reducción de la eficiencia de los paneles y que estos se encuentren con niveles de ensuciamiento aceptables, ya que la eficiencia de los paneles es afectada por otros factores como lo son: la radiación solar incidente, la declinación del sol, la temperatura de los paneles, entre otros.

Por lo tanto, identificar en qué medida el ensuciamiento afecta la eficiencia de los paneles se vuelve muy importante, ya que así se pueden definir rutinas de mantenimiento más precisas que ayuden a optimizar el desempeño de los sistema de generación con paneles solares.

Esto podría ayudar a dar viabilidad económica a proyectos de generación de energía con paneles solares en la región.

3. OBJETIVOS

3.1. General

Evaluar el efecto que tienen los factores climáticos y el ensuciamiento en la eficiencia de un arreglo de paneles solares PV, ubicado en la ciudad de Barranquilla. Con el objeto de establecer políticas de limpieza basadas en la eficiencia del sistema.

3.2. Específicos

- Estimar la temperatura de los paneles solares PV a partir de factores meteorológicos.
- Calcular la eficiencia global de los arreglos de paneles solares PV teniendo en cuenta la variabilidad climática.
- Estimar por diferencias el efecto que tiene el ensuciamiento sobre la eficiencia de los arreglos de paneles solares PV.
- Identificar los criterios que deben ser tenidos en cuenta la elaboración de las políticas de limpieza.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEÓRICO

4.1.1. Descripción del sistema

Para este análisis se tomó como planta un sistema de generación de energía eléctrica con paneles solares ubicado en Barranquilla, Colombia. El sistema consta de 150 paneles solares policristalinos de 315 Wp¹ y tres inversores de 14 kW. Además, el sistema cuenta con una estación meteorológica que registra las siguientes variables: Temperatura ambiente, punto de rocío, humedad relativa, precipitación, presión barométrica, velocidad y dirección del viento y radiación solar, ver detalles en el Anexo B. En la Tabla 1 y en la Fig. 2, se muestran las características de la planta utilizada.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los paneles solares. Tomado de la ficha técnica del panel [Anexo A].

Referencia	CHSM661P-315
Fabricante	Astroenergy
Potencia nominal	315.0 Wp
Voltaje máxima potencia	35.83 V
Voltaje circuito abierto	45.55 V
Corriente de corto circuito	9.02 A
Corriente de máxima potencia	8.71 A
Tecnología	Si-Poly (72 celdas)
Dimensiones	0.994m x 1.956m

¹ Wp: Esta notación corresponde a la unidad Vatio pico. Esta unidad es utilizada en la especificación técnica de los paneles solares fotovoltaicos y se refiere a la potencia pico que puede generar un panel en condiciones estándar (Radiación solar incidente igual a 1kW/m² y temperatura de panel igual a 25°C).



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Arreglo de paneles solares; (b) Estación meteorológica.

El análisis se realizó sólo sobre un arreglo de 52 paneles solares PV, los cuales están conectados a un inversor en dos (2) lazos de 26 paneles cada uno. Esto con el objetivo de reducir la cantidad de datos a procesar.

4.1.2. Curvas Corriente-Voltaje (I-V)

Las curvas corriente-voltaje (I-V) representan la capacidad de conversión de energía de un panel PV o arreglo de paneles a unas condiciones de radiación y temperatura determinadas [5]. Estas curvas representan todos los posibles puntos de operación corriente-voltaje (y potencia de salida) para un panel solar PV específico con unas condiciones de radiación solar incidente y temperatura de la celda determinados. Estas curvas permiten calcular la potencia de salida del panel solar o arreglo de paneles ya que los paneles pueden operar sobre cualquier punto de la curva y para cada valor de voltaje existe su respectivo valor de corriente [6].

En la Fig. 3, se muestra la que la curva I-V va desde la corriente de corto circuito (I_{sc}) a cero voltios hasta la corriente cero con el voltaje en circuito abierto (V_{oc}). En un sistema PV en operación, una de las funciones del inversor es mantener la carga de tal forma que se obtenga la máxima potencia DC del arreglo [7].

En la Fig. 4, se muestra el comportamiento de la curva I-V ante la variación de la radiación y la variación de la temperatura del panel. Las curvas I-V son útiles como herramientas de diagnóstico del arreglo de paneles PV. Ya que desviaciones de la medición real con respecto a la curva I-V del panel indican posibles problemas en los paneles PV o en la configuración del arreglo de paneles. Por ejemplo, si la corriente es menor a la esperada en la curva esto es indicativo de Soiling ó degradación de los paneles; o si la pendiente de la curva al acercarse al voltaje de circuito abierto no coincide con la pendiente esperada, esto puede significar que el conductor que se utilizó para el arreglo no tiene la capacidad suficiente.

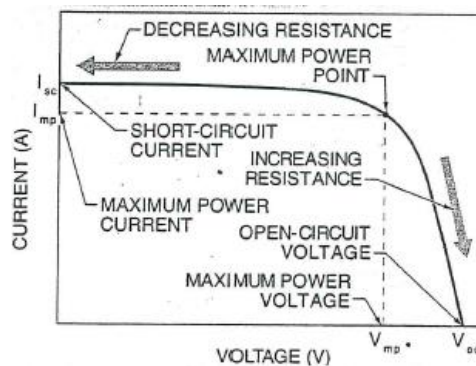


Fig. 3. Curva de corriente-voltaje (I-V) que representa el comportamiento de un panel solar o arreglo en una condición de operación específica. Tomado de [4].

De las curvas I-V se pueden hallar dos características importantes de los paneles: la primera es el punto de máxima eficiencia para diferentes niveles de radiación solar o para diferentes valores de temperatura de panel y la segunda es el factor de llenado (Fill Factor, FF) del panel. El punto de máxima eficiencia es el punto sobre la curva I-V donde el panel entrega la mayor cantidad de potencia, es decir donde el producto de la corriente y el voltaje se maximiza [6].

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (1)$$

Donde P_{mp} es la potencia máxima [W], V_{mp} es el voltaje de potencia máxima [V] y I_{mp} corriente de potencia máxima [A].

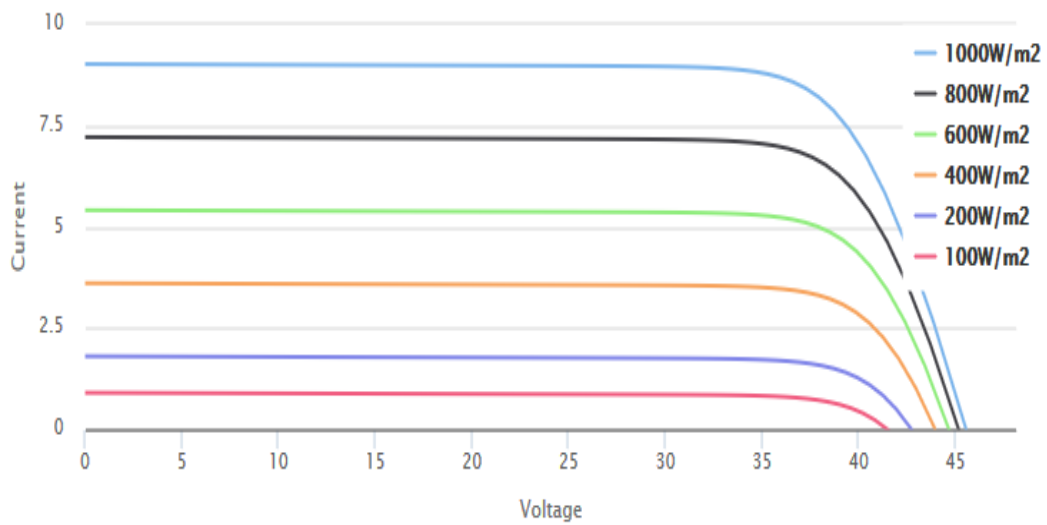
Este parámetro depende de la carga a la cual se encuentre conectado el sistema. El Factor de llenado (FF) es la relación entre la máxima potencia que puede entregar un panel (Potencia en el punto de máxima eficiencia) y el producto del voltaje en circuito abierto y la corriente de corto circuito. FF representa el desempeño del panel con respecto a la curva I-V [6].

5. DISEÑO METODOLÓGICO

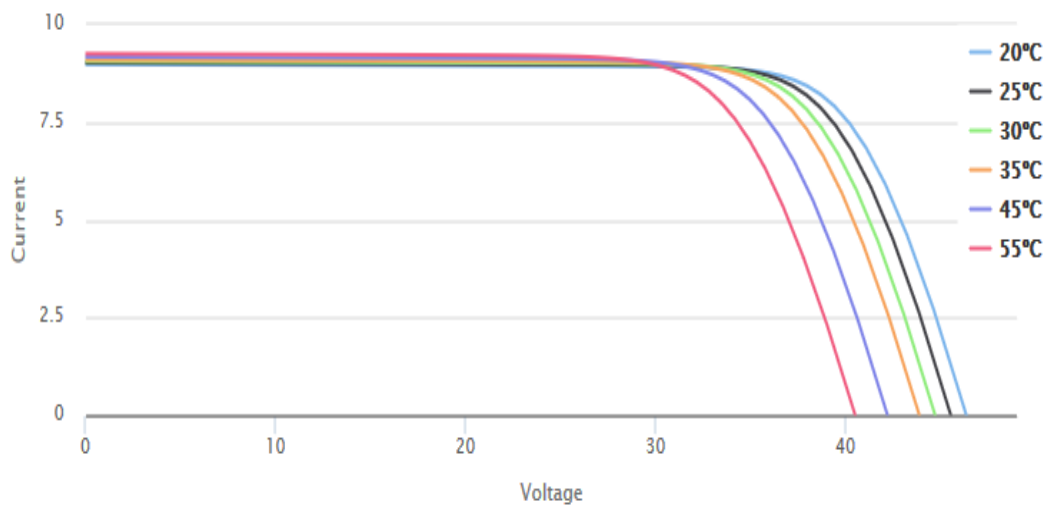
La curva I-V describe el comportamiento de los paneles solares PV, y es específica para cada modelo de panel. El comportamiento de esta curva depende de dos factores climáticos: La radiación solar [W/m^2] y la temperatura del panel [$^{\circ}\text{C}$], ver Fig. 3. Cómo en condiciones de operación típicas tanto la temperatura del panel como la radiación solar varían se hace necesaria la creación de un modelo matemático que describa el comportamiento de la potencia de salida del panel solar en función de estas dos variables [6, 7]. Para esto se consideró un modelo no lineal polinómico de segundo orden como se presenta en (1).

$$P = A \cdot G_{eff}^2 + B \cdot G_{eff} + C \cdot T_{cell}^2 + D \cdot T_{cell} + E \cdot G_{eff} \cdot T_{cell} + F \\ \cdot G_{eff}^2 \cdot T_{cell} + G \cdot G_{eff} \cdot T_{cell}^2 + H \quad (1)$$

Donde P es la potencia de salida del panel, G_{eff} es la radiación solar efectiva que incide sobre el panel haciendo la corrección el ángulo de inclinación (W/m^2), T_{cell} es la temperatura del panel ($^{\circ}\text{C}$) y; A , B , C , D , E , F , G y H son los coeficientes del modelo.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Curva I-V del panel solar a temperatura constante (25°C); (b) Curva I-V del panel solar a radiación solar constante (1000 W/m²). Las curvas fueron tomadas de la base de datos del software Helioscope.

Para el cálculo de la radiación efectiva que incide sobre el arreglo de paneles solares es necesario, hacer la corrección de la radiación con respecto al ángulo de inclinación del arreglo; en este caso, 10° en dirección al Sur.

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta \quad (2)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \sin \omega \quad (3)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

$$G_{eff} = R_b \cdot I \quad (5)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el arreglo de paneles, ϕ es el ángulo de la latitud donde se encuentra instalado el arreglo de paneles, β es el ángulo de inclinación del arreglo de paneles con respecto a la horizontal, δ es la declinación del sol, ω es el ángulo de la posición del sol, θ_z es el ángulo del zenith, R_b es la relación entre la radiación sobre una superficie horizontal y una superficie inclinada, I es la radiación solar sobre la horizontal (W/m^2) y G_{eff} es la radiación solar efectiva que incide sobre el panel haciendo la corrección el ángulo de inclinación (W/m^2) [8].

La temperatura del panel solar depende de la transferencia de calor por radiación proveniente del sol y de la transferencia de calor por convección de las corrientes de viento a las que es sometido el arreglo de paneles solares. [9, 10, 11, 12]

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G_{eff}}{U_0 + U_1 W_s} \quad (6)$$

Donde T_{amb} es la temperatura ambiente ($^{\circ}C$), U_0 es el coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m^2-K), U_1 es el coeficiente de transferencia de calor por convección (Ws/m^3-K) y W_s es la velocidad del viento (m/s).

En consecuencia, si se reemplazan (5) y (6) en (1) se obtiene la potencia generada del arreglo de paneles. A esta potencia generada se le debe hacer una corrección por el envejecimiento de los paneles que según el fabricante es del 2.5 % el primer año. Y así se obtiene la potencia generada nominal sin tener en cuenta el efecto del ensuciamiento de los paneles.

Por otra parte, se obtiene la potencia real generada por el arreglo de paneles a través de los registros de voltaje DC y corriente DC de los inversores. Para

finalmente, comparar la eficiencia diaria del sistema modelo con la eficiencia real del sistema [13].

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este análisis se tuvo en cuenta los datos de las variables climáticas y de las variables eléctricas, del 15 de mayo al 15 de septiembre de 2017.

Se desarrolló un modelo de regresión no lineal que describe, con un R-Cuadrado ajustado del 99.993 %, para valores de radiación efectiva mayores a 50 W/m² y temperaturas de panel entre 20 y 55 °C, el comportamiento de un panel solar a partir de su curva I-V característica. Ver (7) y Fig. 4.

$$\begin{aligned}
 P = & (-7.45E - 6) \cdot G_{eff}^2 + (3.56E - 1) \cdot G_{eff} + (-5.31E - 5) \\
 & \cdot T_{cell}^2 + (1.01E - 2) \cdot T_{cell} + (-1.19E - 3) \cdot G_{eff} \\
 & \cdot T_{cell} + (5.90E - 9) \cdot G_{eff}^2 \cdot T_{cell} + (-1.74E - 7) \\
 & \cdot G_{eff} \cdot T_{cell}^2 + 2.80
 \end{aligned} \tag{7}$$

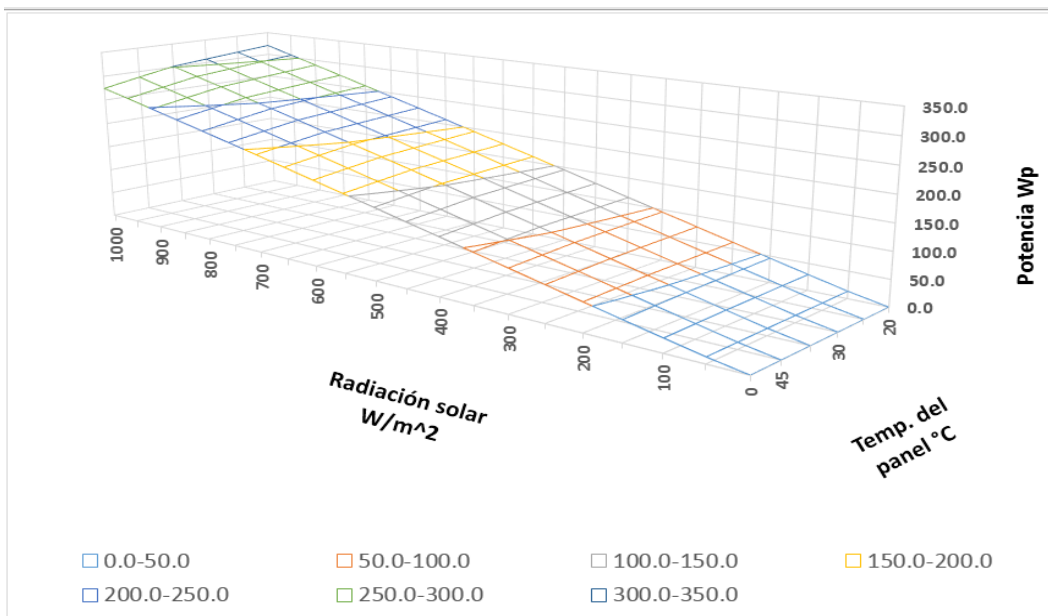
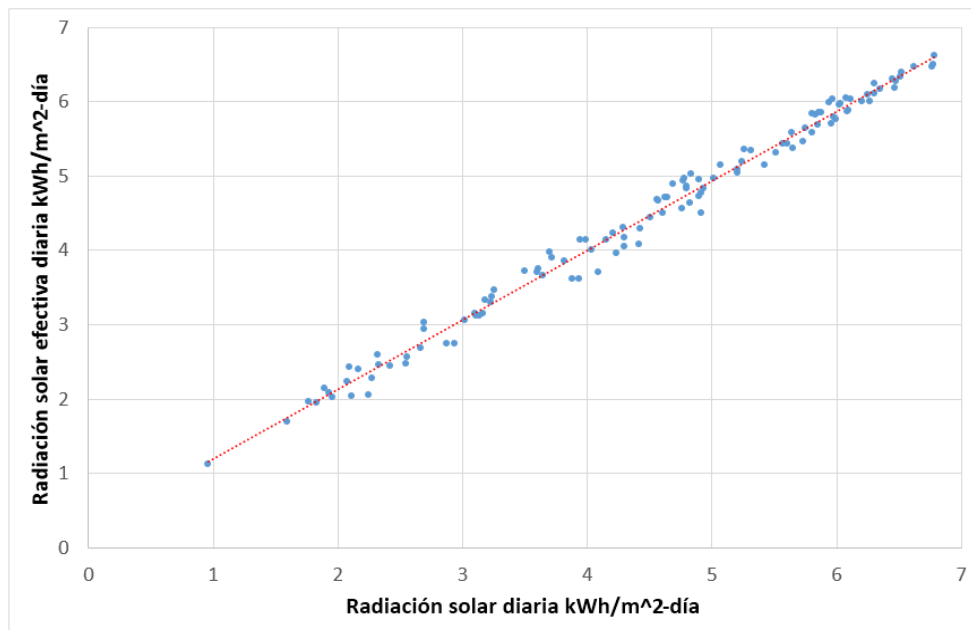


Fig. 5. Representación gráfica del modelo de la potencia de los paneles en función su temperatura y de la radiación solar efectiva.

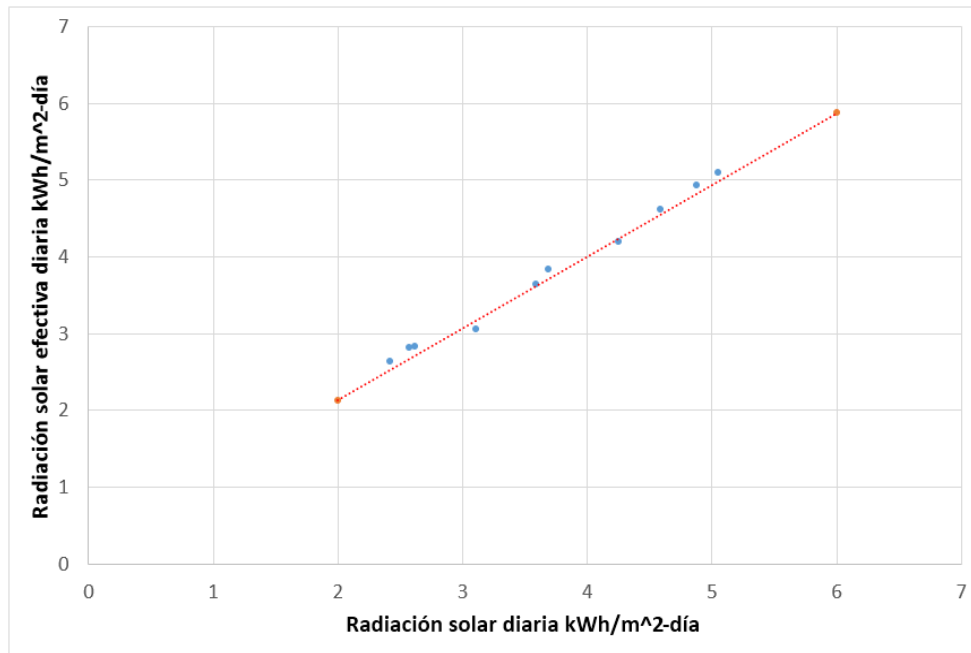
La Fig. 5(a), muestra un comportamiento lineal entre radiación solar efectiva y la radiación solar, con una correlación del 98.98 %. En (8), se presenta el modelo lineal obtenido.

$$G_{eff} = 0.9357 \cdot I + 0.2549 \quad (8)$$

Donde I corresponde a la radiación solar incidente sobre un plano horizontal W/m^2 . En la Fig. 5(b), se valida el modelo con datos del 16 al 25 de septiembre de 2017; obteniendo una correlación entre los datos y el modelo del 98.73 %.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Radiación solar Vs. Radiación solar efectiva; (b) Puntos del conjunto de validación con respecto al modelo.

Para el cálculo de la temperatura de los paneles, se utilizó la ecuación (6); tomando como coeficientes U_0 y U_1 , $30.02 \text{ W/m}^2\text{-K}$ y $6.28 \text{ W-s/m}^3\text{-K}$, respectivamente, estos coeficientes fueron especificados para paneles solares policristalinos en [12]. En la Fig. 6, se observa la desviación entre la temperatura ambiente y la temperatura del panel.

Teniendo la radiación solar efectiva y la temperatura del panel, se utilizó (1) para calcular la potencia generada teórica y la eficiencia teórica. Para hacer más preciso el cálculo teórico; a la eficiencia calculada se aplicó un factor de corrección que corresponde a la pérdida de rendimiento de los paneles por envejecimiento. Según el fabricante de los paneles, estos experimentan una pérdida acumulada 2.5 % de su eficiencia al final del primer año de servicio y se asumió que dicha pérdida es lineal durante todo el año.

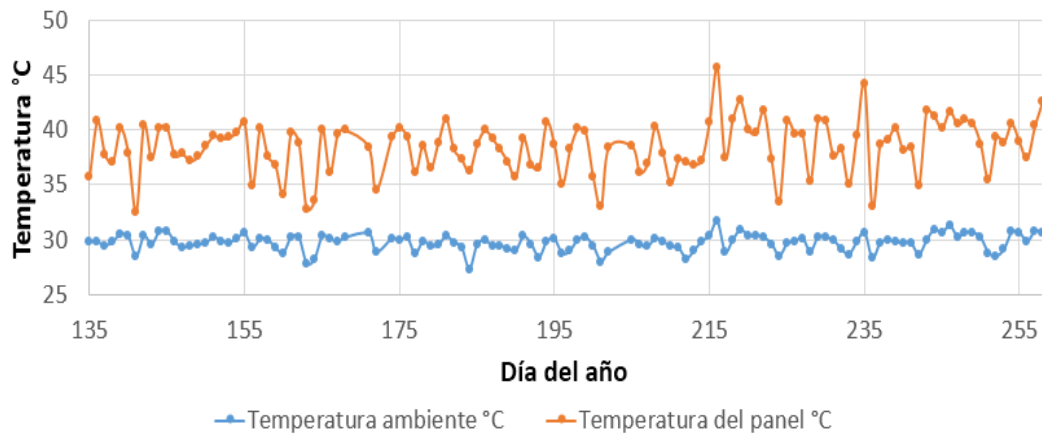
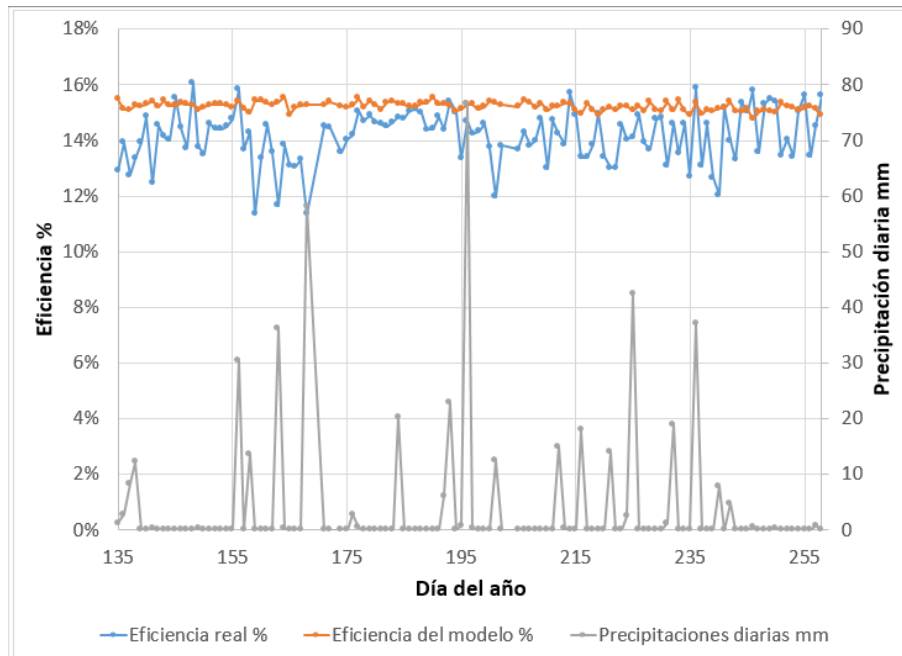
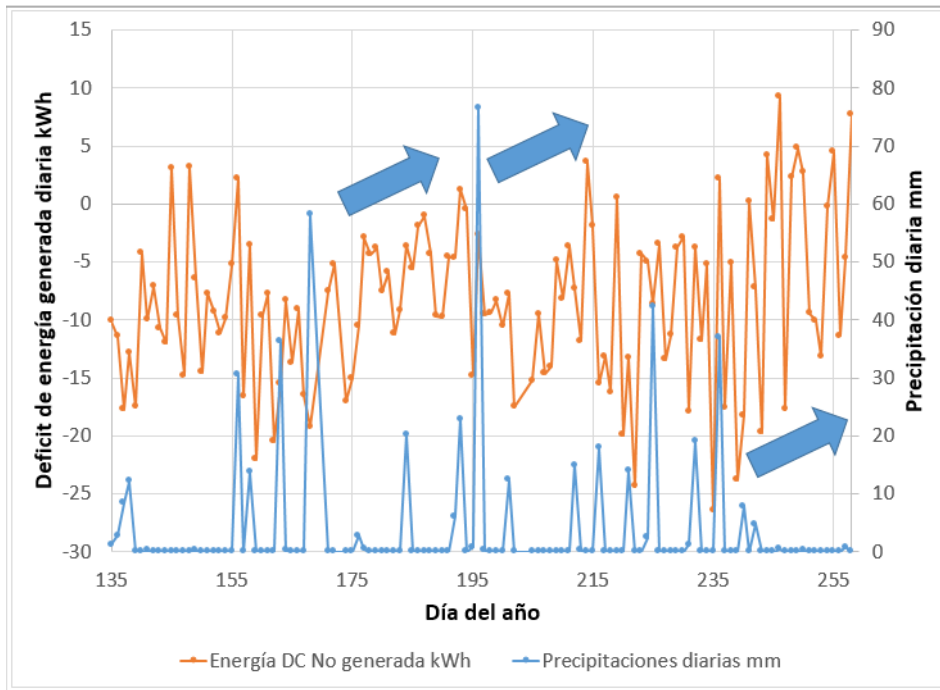


Fig. 7. Comparativo entre la temperatura ambiente y la temperatura del panel.

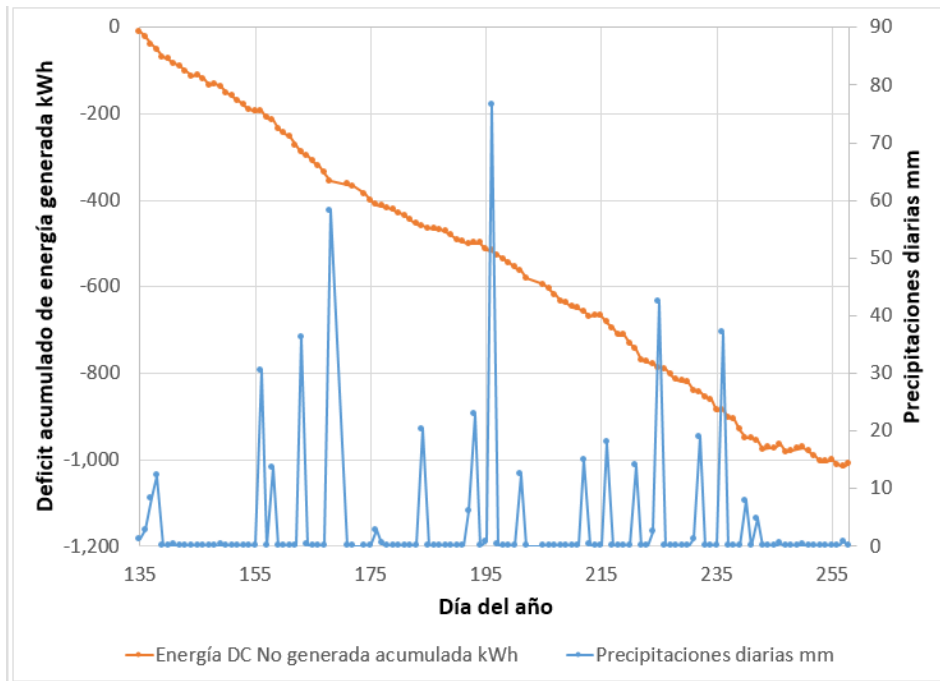
Por otra parte, la eficiencia real del sistema se calculó con los registros de voltaje y corriente DC de los inversores; y la radiación solar efectiva calculada.



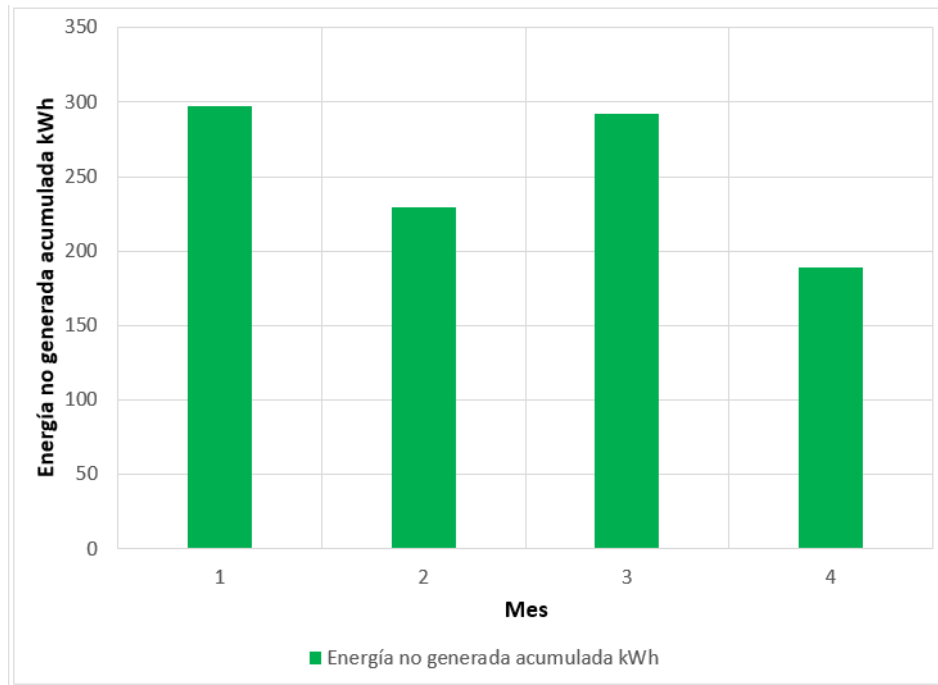
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8. (a) Eficiencia del modelo y eficiencia real diaria; (b) Déficit de energía generada y de las precipitaciones diarias; (c) Déficit de energía acumulado y de las precipitaciones diarias; (d) Energía no generada mensual.

En la Fig. 7 (a), se muestra que el modelo tiene un comportamiento estable mientras que la eficiencia real presenta variaciones significativas, algunas de dichas variaciones parecen estar asociadas a los eventos de lluvia.

En la Fig. 7 (b), se muestra como la eficiencia real mejora después de ciertos eventos de lluvia [6]. Sin embargo, no todos los eventos de lluvia tienen el mismo impacto sobre la eficiencia del sistema. La Fig. 7 (c) y 7 (d), muestra como a pesar del efecto favorable de las lluvias en la eficiencia del sistema, la tendencia es hacia un déficit en la energía generada con respecto al modelo, pero la energía no generada mes a mes no es ascendente, sino que muestra un comportamiento oscilante.

Con esta información se podría definir una política de limpieza de los paneles basada en la condición teniendo como parámetros de entrada [14, 15]:

- Costo de limpieza del arreglo de paneles

- Radiación solar incidente en el arreglo de paneles.
- Temperatura ambiente.
- Envejecimiento del arreglo de paneles.
- Eficiencia nominal de los paneles solares.
- Estimación de la energía eléctrica no generada por efecto del ensuciamiento.
- Costo del kWh comprado al operador de red.

Para calcular la huella de carbono indirecta generada por la reducción de la eficiencia en el sistema PV, se utilizó el factor de emisión propuesto por la UPME, 0.21 tCO₂/MWh. En la Tabla 2, se muestra la huella de carbono indirecta del sistema como resultado de la reducción en la eficiencia.

Tabla 2. Huella de carbono indirecta por reducción de la eficiencia del sistema PV.

Mes	Energía no generada, kWh	Huella de carbono indirecta, kgCO₂	Factor de emisión de CO₂ del sistema PV, kgCO₂/kWp
1	297.15	62.40	1.90
2	229.70	48.24	1.47
3	292.19	61.36	1.87
4	189.34	39.76	1.21

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de un modelo matemático para la estimación del comportamiento de un panel solar PV en función de factores climáticos, se constituye en una herramienta importante para evaluar su desempeño, ya que permite comparar el comportamiento real del panel contra un modelo que involucra la radiación solar incidente sobre la superficie inclinada y la temperatura del panel.

Las desviaciones entre el modelo y los datos reales, se pueden atribuir a que dentro del modelo no se tienen en cuenta los siguientes factores climáticos: Humedad relativa, dirección del viento, características del material que se deposita sobre los paneles y las precipitaciones. En el caso de las precipitaciones, es necesario realizar una caracterización de las mismas para poder medir su efecto sobre el ensuciamiento de los paneles [17]. Sin embargo, todos los factores antes mencionados están relacionados con el ensuciamiento de los paneles y se puede afirmar que la energía no generada mensual en la Fig. 7(d), es principalmente producto del ensuciamiento de los paneles.

Con este análisis se da el primer paso para generar un modelo para determinar las frecuencias de limpieza óptimas (mantenimiento centrado en la eficiencia, MCE) para un arreglo de paneles solares, ya que de forma indirecta se aisló el efecto que tiene el ensuciamiento en la eficiencia de los paneles y se calculó la energía que se dejó de generar. Esta última variable permite expresar la caída de la eficiencia en términos económicos y así, poder crear un modelo económico relacionando las pérdidas económicas de no generación con los costos de limpieza de los paneles.

Por otra parte, para ajustar más el modelo de estimación es necesario determinar a través de ensayos experimentales, el valor de los coeficientes U_0 y U_1 para la ciudad de Barranquilla, medir la cantidad de material particulado que se deposita sobre los paneles y establecer un modelo de lluvias que incluya la rata de precipitaciones, la duración de la lluvia, la dirección y velocidad del viento de tal

forma que se pueda determinar cómo estos factores impactan sobre el nivel de ensuciamiento de los paneles.

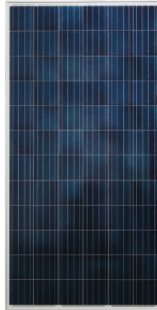
8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A., Alawadhi, H. “Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 735–744, Ago. 2014.
- [2] Adinoyi, M. J., Said, S. A. M. “Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules” *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 633-636, Jul. 2013.
- [3] Ghazi, S., Ip, K. “The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK” *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 50-59, Mar. 2014.
- [4] Fabregas J, Valencia G, Vanegas M. “Wind speed study and persistence analysis for set of 18 weather stations located on the Colombian Caribbean region”. *International Journal of Chemtech Research*, vol. 10(9), pp. 1038-1045. 2017.
- [5] Castillo Y, Castrillon M, Vanegas M, Valencia G, Villicaña E. “Rol de las fuentes no convencionales de energía en el sector eléctrico colombiano”. *Prospectiva*, vol. 13(1), pp. 39-51. 2015.
- [6] Dunlop, J. P. *Photovoltaic Systems*, 3rd ed., Orland Park, IL: American Technical Publisher, 2012.
- [7] Solmetric (2011). *Guide to interpreting I-V curve measurements of PV arrays*. Application Note PV A-600-1. Sebastopol, CA: Author.
- [8] Duffie, J. A., Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes* 4th ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [9] Almeida, M. P., Muñoz, M., de la Parra, I., Perpiñán, O. “Comparative study of PV power forecast using parametric and nonparametric PV models” *Solar Energy* vol. 55, pp. 854-866, May. 2017.

- [10] Faiman, D. "Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules". *Progress in Photovoltaic: Research and Applications* vol. 16, pp 307-315, Feb. 2008.
- [11] Schwingshackl C., Petitta M., Wagner J. E., Belluardo G., Moser D., Catelli, M., Zebisch, M., Tetzlaff, A. "Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation". *Energy Procedia* vol. 40, pp. 77-86, 2013.
- [12] Koehl, M., Heck, M., Wiesmeier, S., Wirth, J. "Modeling of the Nominal Operating Cell Temperature based on Outdoor Weathering". *Solar Energy and Solar Cells* vol. 95, pp. 1638-1646, Feb. 2011.
- [13] Kurtz, S., Riley, E., Newmiller, J., Dierauf, T., Kimber, A., McKee, J., Flottemesch, R., Krishnani, P. *Analysis of Photovoltaic System Energy Performance Evaluation Method*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. 2013.
- [14] Haney, J., Burstein, A. *PV Systems Operations and Maintenance Fundamentals*. Solar America Board for Codes and Standards. 2013.
- [15] NREL, Sandia, Sunspec Alliance SuNLaMP PV O&M Working Group. *Best Practice in Photovoltaic System Operation and Maintenance*, 2nd ed., Golden, CO: Author. 2013.
- [16] Bonilla, M., Herrera, H., Puertas, Y. *Factores de emisión del S.I.N. sistema interconectado nacional Colombia*, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, Bogotá, Oct. 2017.
- [17] Mejía, F., Kleissl, J., Bosch, J. L. The effect of dust on solar photovoltaic systems. *Energy Procedia* vol. 49, pp. 2370-2376. 2013.

ANEXO A – FICHA TÉCNICA DE LOS PANELES SOLARES

For Global Market



VIOLIN™ Crystalline PV Module Baseline CHSM6612P Series Baseline CHSM6612P/HV Series

- ▶ With innovational 4-busbar cells
- ▶ Reducing cell series resistance
- ▶ Increasing cell efficiency
- ▶ More power output

CHSM6612P max system voltage 1000V standard, CHSM6612P/HV max system voltage 1500V standard

	310	315	320	325	330		
EN							
ELECTRICAL SPECIFICATIONS							
STC rated output (P_{mpp})*	310 Wp	315 Wp	320 Wp	325 Wp	330 Wp		
PTC rated output (P_{mpp})**	282.5 Wp	287.2 Wp	291.9 Wp	296.6 Wp	301.3 Wp		
Standard sorted output	0/+5 Wp						
Warranted power output STC ($P_{nominal}$)	310 Wp	315 Wp	320 Wp	325 Wp	330 Wp		
Rated voltage (V_{mpp}) at STC	36.91 V	36.99 V	37.02 V	37.11 V	37.15 V		
Rated current (I_{mpp}) at STC	8.40 A	8.53 A	8.65 A	8.77 A	8.89 A		
Open circuit voltage (V_{oc}) at STC	45.15 V	45.30 V	45.45 V	45.67 V	45.86 V		
Short circuit current (I_{sc}) at STC	8.92 A	9.04 A	9.25 A	9.48 A	9.52 A		
Module efficiency	16.0%	16.3%	16.5%	16.8%	17.1%		
Rated output (P_{mpp}) at NOCT	216.5 Wp	220.0 Wp	223.5 Wp	226.9 Wp	230.4 Wp		
Rated voltage (V_{mpp}) at NOCT	33.71 V	33.74 V	33.80 V	33.86 V	33.92 V		
Rated current (I_{mpp}) at NOCT	6.42 A	6.52 A	6.61 A	6.70 A	6.79 A		
Open circuit voltage (V_{oc}) at NOCT	41.43 V	41.57 V	41.70 V	41.91 V	42.08 V		
Short circuit current (I_{sc}) at NOCT	6.90 A	6.99 A	7.15 A	7.33 A	7.37 A		
Temperature coefficient (P_{mpp})	-0.408%/K					Maximum system voltage (IEC/UL)	1000V _{oc} / 1000V _{oc} or 1500V _{oc} / 1500V _{oc}
Temperature coefficient (I_{sc})	+0.050%/K					Number of diodes	6 (or 3)
Temperature coefficient (I_{mpp})	-0.003%/K					Maximum series fuse rating	15 A
Temperature coefficient (V_{mpp})	-0.406%/K						
Temperature coefficient (V_{oc})	-0.311%/K						
Normal operating cell temperature (NOCT)	46±2°C						

* Measurement tolerance +/- 3%

** Estimated

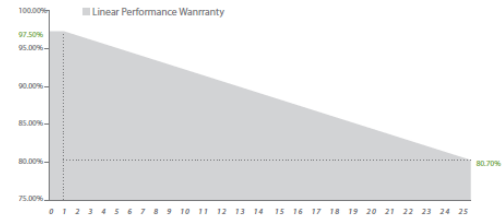


A CHNT COMPANY



RELATED PARAMETERS	
Cell type	Polycrystalline
Number of cells / cell arrangement	72 / 6 x 12
Cells dimension	6"
Packing unit	25 modules
Weight of packing unit (for container)	598 kg / 1318 lbs

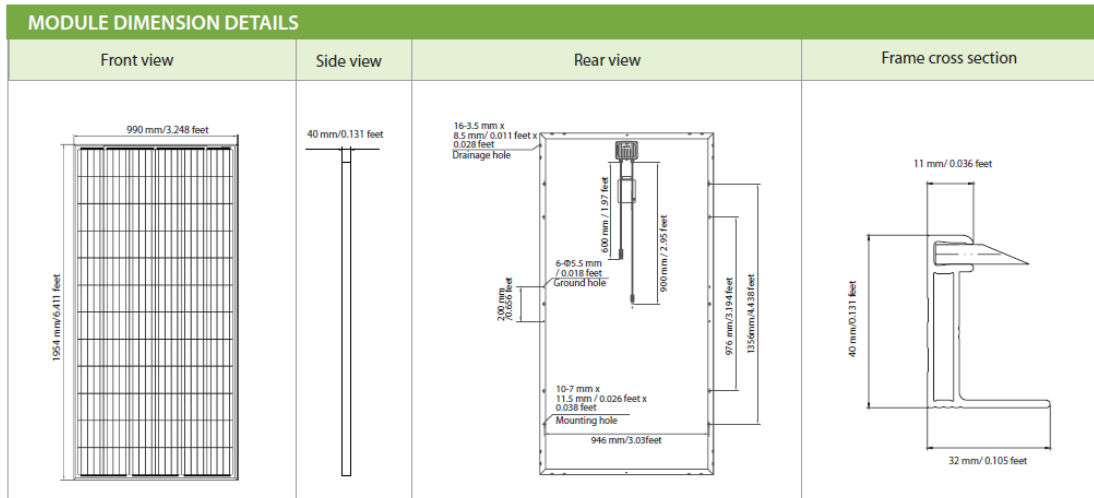
QUALIFICATION AND LINEAR WARRANTIES	
Product standard	IEC 61215, 61730 / UL1703
Extended product warranty	10 years
Output decline 2.5%/year performance P _{mpp} (STC)	1 st year
Output decline 0.7%/year performance P _{mpp} (STC)	2 nd -25 th years



MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Outer dimensions (L x W x H)	1954 x 990 x 40 mm 76.93 x 38.98 x 1.57 in
Frame technology	Aluminum, silver anodized
Module composition	Glass / EVA / Backsheet (white)
Weight (module only)	21.8 kg / 48.1 lbs
Front glass thickness	3.2 mm / 0.13 in
Junction box IP rating	IP 65 (above)
① Cable length (UL/IEC)	900(+)/600(-)mm / 35.43/23.62 in
Cable diameter (UL/IEC)	12 AWG / 4 mm ²
② Maximum load capacity	5400 Pa
Fire performance (UL/IEC)	Type 1 (UL) or Class C (IEC)
Connector type (UL/IEC)	MC4 compatible

ARTICLE NUMBER			
Model	Article No. (IEC)	Article No. (UL)	
(VIOLIN) CHSM6612P-310	200590	200596	
(VIOLIN) CHSM6612P-315	200591	200597	
(VIOLIN) CHSM6612P-320	200592	200598	
(VIOLIN) CHSM6612P-325	200593	200599	
(VIOLIN) CHSM6612P-330	200594	200600	
(VIOLIN) CHSM6612P/HV-310	500071	500077	
(VIOLIN) CHSM6612P/HV-315	500072	500078	
(VIOLIN) CHSM6612P/HV-320	500073	500079	
(VIOLIN) CHSM6612P/HV-325	500074	500080	
(VIOLIN) CHSM6612P/HV-330	500075	500081	

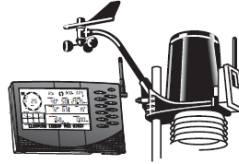
① Option: 1000mm or 1150mm for defined projects in advance.
 ② Refer to Astronergy crystalline installation manual.



© Chint Solar (Zhejiang) Co., Ltd. Reserves the right of final interpretation.
 Specifications and designs included in this datasheet are subject to change without notice.

**ANEXO B – FICHA TÉCNICA DE LA ESTACIÓN
METEOROLÓGICA**

Wireless Vantage Pro2™ & Vantage Pro2™ Plus Stations (Including Fan-Aspirated Models)



6152 6162
6153 6163

Vantage Pro2™ (6152, 6153) and Vantage Pro2™ Plus (6162, 6163) Wireless Weather Stations include two components: the Integrated Sensor Suite (ISS) which houses and manages the external sensor array, and the console which provides the user interface, data display, and calculations. The ISS and Vantage Pro2 console communicate via an FCC-certified, license-free, spread-spectrum frequency-hopping (FHSS) transmitter and receiver. User-selectable transmitter ID codes allow up to eight stations to coexist in the same geographic area. The frequency hopping spread spectrum technology provides greater communication strength over longer distances and areas of weaker reception. The Wireless Vantage Pro2 Plus weather station includes two additional sensors that are optional on the Vantage Pro2: the UV sensor and the solar radiation sensor.

The console may be powered by batteries or by the included AC-power adapter. The wireless ISS is solar powered with a battery backup. Use WeatherLink® for Vantage Pro2 and Vantage Vue® to let your weather station interface with a computer, to log weather data, and to upload weather information to the internet.

The 6152 and 6162 rely on passive shielding to reduce solar-radiation induced temperature errors in the outside temperature sensor readings. The Fan-aspirated 6153 and 6163 combine passive shielding with a solar-powered fan that draws outside air in over the temperature and humidity sensors, providing a much more accurate temperature reading than that available using passive shielding alone.

Integrated Sensor Suite (ISS)

(Includes product numbers: 6152, 6153, 6162, 6163, 6322, 6323, 6327 & 6328)

Operating Temperature	.....	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Non-operating Temperature	.....	-40° to +158°F (-40° to +70°C)
Current Draw (ISS SIM only)	.....	0.14 mA (average), 30 mA (peak) at 4 to 6 VDC
Solar Power Panel	.....	0.5 Watts (ISS SIM), plus 0.75 Watts (Fan-Aspirated)
Battery (ISS SIM /Fan-Aspirated)	.....	CR-123 3-Volt Lithium cell / 2 - 1.2 Volt NiMH C-cells
Battery Life (3-Volt Lithium cell)	.....	8 months without sunlight - greater than 2 years depending on solar charging
Battery Life (NiMH C-cells, Fan-Aspirated)	.....	Up to 2 years
Fan Aspiration Rate (Fan-Aspirated only)		
Intake Flow Rate, full sun	.....	190 feet/min. (0.9 m/s)
Intake Flow Rate, battery only	.....	80 feet/min. (0.4 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, full sun	.....	500 feet/min. (2.5 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, battery only	.....	180 feet/min. (0.9 m/s)
Connectors, Sensor	.....	Modular RJ-11
Cable Type	.....	4-conductor, 26 AWG
Cable Length, Anemometer	.....	40' (12 m) (included) 240' (73 m) (maximum recommended)

Note: Maximum displayable wind decreases as the length of cable increases. At 140' (42 m) of cable, the maximum wind speed displayed is 135 mph (60 m/s); at 240' (73 m), the maximum wind speed displayed is 100 mph (34 m/s).

Wind Speed Sensor	.....	Solid state magnetic sensor
Wind Direction Sensor	.....	Wind vane with potentiometer
Rain Collector Type	.....	Tipping bucket, 0.01" per tip (0.2 mm with metric rain adapter), 33.2 in ² (214 cm ²) collection area
Temperature Sensor Type	.....	PN Junction Silicon Diode
Relative Humidity Sensor Type	.....	Film capacitor element
Housing Material	.....	UV-resistant ABS, ASA plastic (SPARS only)

ISS Dimensions (not including anemometer or bird spikes):

DAVIS  **Davis Instruments** 3465 Diablo Ave., Hayward, CA 94545-2778 USA
(510) 732-9229 • FAX (510) 670-0589 • sales@davisnet.com • www.davisnet.com

DS6152_62_53_63 (Rev S 5/19/16)

2 Wireless Vantage Pro2™

Vantage Pro2 with Standard Rad Shield	14.0" x 9.4" x 14.5" (356 mm x 239 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 with Fan-Aspirated Rad Shield	20.8" x 9.4" x 16.0" (528 mm x 239 mm x 406 mm)
Vantage Pro2 Plus with Standard Rad Shield	14.3" x 9.7" x 14.5" (363 mm x 246 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 Plus with Fan-Aspirated Rad Shield	21.1" x 9.7" x 16.0" (536 mm x 246 mm x 406 mm)

Console

(Includes product number 6312)

Console Operating Temperature	+32° to +140°F (0° to +60°C)
Non-Operating (Storage) Temperature	+14° to +158°F (-10° to +70°C)
Current Draw	0.9 mA average, 30 mA peak, (add 120 mA for display lamps, add 0.125 mA for each optional wireless transmitter received by the console) at 4 - 6 VDC
AC Power Adapter	5 VDC, 300 mA, regulated
Batteries	3 C-cells
Battery Life	up to 9 months
Connectors	Modular RJ-11
Housing Material	UV-resistant ABS plastic
Console Display Type	LCD Transflective
Display Backlight	LEDs
Console Dimensions	
Console with antenna down (L x H x D)	10.625" x 6.125" x 1.625" (270 mm x 156 mm x 41 mm)
Console with antenna extended up (L x H x D)	10.625" x 9.625" x 1.625" (270 mm x 245 mm x 41 mm)
Display (L x H)	5.94" x 3.375" (151 mm x 86 mm)
Weight (with batteries)	1.88 lbs. (.85 kg)

Data Displayed on Console

Data display categories are listed with General first, then in alphabetical order.

General

Historical Data	Includes the past 24 values listed unless otherwise noted; all can be cleared and all totals reset
Daily Data	Includes the earliest time of occurrence of highs and lows; period begins/ends at 12:00 am
Monthly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of the month
Yearly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of January unless otherwise noted
Current Display Data	Current display data describes the current reading for each weather variable. In most cases, the variable lists the most recently updated reading or calculation. Some current variable displays can be adjusted so there is an offset for the reading
Current Graph Data	Current graph data appears in the right-most column in the console graph and represents the latest value within the last period on the graph; totals can be set or reset. Display intervals vary. Examples include: Instant, 15-min., and Hourly Reading; Daily, Monthly, High and Low
Graph Time Interval	1 min., 10 min., 15 min., 1 hour, 1 day, 1 month, 1 year (user-selectable, availability depends upon variable selected)
Graph Time Span	24 Intervals + Current Interval (see Graph Intervals to determine time span)
Graph Variable Span (Vertical Scale)	Automatic (varies depending upon data range); Maximum and Minimum value in range appear in ticker
Alarm Indication	Alarms sound for only 2 minutes (time alarm is always 1 minute) if operating on battery power. Alarm message is displayed in ticker as long as threshold is met or exceeded. Alarms can be silenced (but not cleared) by pressing the DONE key.
Transmission Interval	Varies with transmitter ID code from 2.25 seconds (#1=shortest), to 3 seconds (#8=longest)
Update Interval	Varies with sensor - see individual sensor specs

Barometric Pressure

Resolution and Units	0.01" Hg, 0.1 mm Hg, 0.1 hPa/mb (user-selectable)
Range	16.00" to 32.50" Hg, 410 to 820 mm Hg, 540 to 1100 hPa/mb
Elevation Range	-999' to +15,000' (-600 m to 4570 m) (Note that console screen limits entry of lower elevation to -999' when using feet as elevation unit.)
Uncorrected Reading Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mb) (at room temperature)
Sea-Level Reduction Equation Used	United States Method employed prior to use of current "R Factor" method
Equation Source	Smithsonian Meteorological Tables
Equation Accuracy	±0.01" Hg (±0.3 mm Hg, ±0.3 hPa/mb)
Elevation Accuracy Required	±10' (3m) to meet equation accuracy specification
Overall Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mb)
Trend (change in 3 hours)	Change 0.06" (2 hPa/mb, 1.5 mm Hg) = Rapidly Change 0.02" (0.7hPa/mb, 0.5 mm Hg)= Slowly
Trend Indication	5 position arrow: Rising (rapidly or slowly), Steady, or Falling (rapidly or slowly)
Update Interval	1 minute or when console BAR key is pressed twice
Current Display	Instant
Current Graph Data	Instant, 15-min., and Hourly Reading; Daily, Monthly, High and Low
Historical Graph Data	15-min. and Hourly Reading; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High Threshold from Current Trend for Storm Clearing (Rising Trend) Low Threshold from Current Trend for Storm Warning (Falling Trend)
Range for Rising and Falling Trend Alarms	0.01 to 0.25" Hg (0.1 to 6.4 mm Hg, 0.1 to 8.5 hPa/mb)

Clock

Resolution	1 minute
Units	Time: 12 or 24 hour format (user-selectable)
Date	US or International format (user-selectable)
Accuracy	±8 seconds/month
Adjustments	Time: Automatic Daylight Savings Time (for users in North America and Europe that observe it in AUTO mode, MANUAL setting available for all other areas) Date: Automatic Leap Year
Alarms	Once per day at set time when active

Dewpoint (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-105° to +130°F (-76° to +54°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	World Meteorological Organization (WMO)
Equation Used	WMO Equation with respect to saturation of moist air over water
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Calculations; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Calculation

Evapotranspiration (calculated, requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	0.01" or 0.1 mm (user-selectable)
Range	Daily to 32.67" (832.1 mm); Monthly & Yearly to 199.99" (1999.9 mm)
Accuracy	Greater of 0.01" (0.25 mm) or ±5%, Reference: side-by-side comparison against a CIMIS ET weather station
Update Interval	1 hour
Calculation and Source	Modified Penman Equation as implemented by CIMIS (California Irrigation Management Information System) including Net Radiation calculation
Current Display Data	Latest Hourly Total Calculation
Current Graph Data	Latest Hourly Total Calculation, Daily, Monthly, Yearly Total
Historical Graph Data	Hourly, Daily, Monthly, Yearly Totals
Alarm	High Threshold from Latest Daily Total Calculation

4
Wireless Vantage Pro2™
Forecast

Variables Used	Barometric Reading & Trend, Wind Speed & Direction, Rainfall, Temperature, Humidity, Latitude & Longitude, Time of Year
Update Interval	1 hour
Display Format	Icons on top center of display; detailed message in ticker at bottom
Variables Predicted	Sky Condition, Precipitation, Temperature Changes, Wind Direction and Speed

Heat Index (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-40° to +165°F (-40° to +74°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS)/NOAA
Formulation Used	Steadman (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculations; Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

Humidity

Inside Relative Humidity (sensor located in console)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±3% from 1% to 90%; ±5% from 90% to 100%
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; Hourly Reading; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Outside Relative Humidity (sensor located in ISS)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±2%
Temperature Coefficient	0.03% per °F (0.05% per °C), reference 68°F (20°C)
Drift	±0.5% per year
Update Interval	.50 seconds to 1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; Hourly Reading; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Extra Outside Relative Humidity (sensor located inside Temperature/Humidity Station)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±2%
Temperature Coefficient	0.03% per °F (0.05% per °C), reference 68°F (20°C)
Drift	±0.5% per year
Update Interval	.50 seconds to 1 minute
Current Display Data	Instant Reading (user adjustable)
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Leaf Wetness (requires leaf wetness sensor)

Resolution	1
Range	0 to 15
Dry/Wet Threshold	User-selectable
Accuracy	±0.5
Update Interval	46 to 54 seconds
Current Graph Data	Instant Reading; Daily High and Low; Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily Highs and Lows; Monthly Highs
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Moon Phase

Console Resolution	1/8 (12.5%) of a lunar cycle, 1/4 (25%) of lighted face on console
WeatherLink Resolution	0.09% of a lunar cycle, 0.18% of lighted face maximum (depends on screen resolution)
Range	New Moon, Waxing Crescent, First Quarter, Waxing Gibbous, Full Moon, Waning Gibbous, Last Quarter, Waning Crescent
Accuracy	±38 minutes

Rainfall

Resolution and Units	0.01" or 0.2 mm (user-selectable) (1 mm at totals ≥ 2000 mm)
Daily/Storm Rainfall Range	0 to 99.99" (0 to 999.8 mm)
Monthly/Yearly/Total Rainfall Range	0 to 199.99" (0 to 6553 mm)
Accuracy	For rain rates up to 4"/hr (100 mm/hr): ±4% of total or ± one tip of the bucket (0.01"/0.2mm), whichever is greater.
Update Interval	20 to 24 seconds
Storm Determination Method	0.02" (0.5 mm) begins a storm event, 24 hours without further accumulation ends a storm event
Current Display Data	Totals for Past 15-min
Current Graph Data	Totals for Past 15-min, Past 24-hour, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin date); Umbrella is displayed when 15-minute total exceeds zero
Historical Graph Data	Totals for 15-min, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin and end dates)
Alarms	High Threshold from Latest Flash Flood (15-min. total, default is 0.50", 12.7 mm), 24-Hour Total, Storm Total,
Range for Rain Alarms	0 to 99.99" (0 to 999.7 mm)

Rain Rate

Resolution and Units	0.01" or 0.1 mm (user-selectable) at typical rates (see Fig. 4 and 5)
Range	0, 0.04"/hr (1 mm/hr) to 96"/hr (0 to 2438 mm/hr)
Accuracy	±5% for rates less than 5" per hour (127 mm/hr)
Update Interval	20 to 24 seconds
Calculation Method	Measures time between successive tips of tipping bucket. Elapsed time greater than 15 minutes or only one tip of the rain collector constitutes a rain rate of zero.
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant and 1-min. Reading; Hourly, Daily, Monthly and Yearly High
Historical Graph Data	1-min Reading; Hourly, Daily, Monthly and Yearly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Soil Moisture (requires soil moisture sensor)

Resolution	1 cb
Range	0 to 200 cb
Update Interval	77 to 90 seconds
Current Graph Data	Instant Reading; Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

6
Wireless Vantage Pro2™

Solar Radiation (requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	1 W/m ²
Range	0 to 1800 W/m ²
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Eppley PSP at 1000 W/m ²)
Drift	up to ±2% per year
Cosine Response	±3% for angle of incidence from 0° to 75°
Temperature Coefficient	-0.067% per °F (-0.12% per °C); reference temperature = 77°F (25 °C)
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Sunrise and Sunset

Resolution	1 minute
Accuracy	±1 minute
Reference	United States Naval Observatory

Temperature

Inside Temperature (sensor located in console)

Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	+32° to +140°F (0° to +60°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 2
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading; Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Outside Temperature (sensor located in ISS)

Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) nominal °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±0.5°F (±0.3°C) See Fig. 1
Radiation Induced Error (Passive Shield)	+4°F (2°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed ≤ 2 mph (1 ms)) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield)
Radiation Induced Error (Fan-Aspirated Shield)	+0.6°F (0.3°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed ≤ 2 mph (1 m/s)) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield)
Update Interval	10 to 12 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading; Daily, Monthly, Yearly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly, Yearly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Extra Temperature Probes

Resolution and Units	Current Data: 1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 3
Update Interval	10 to 12 seconds (77 to 90 seconds for Leaf Wetness/Temperature and Soil Moisture/Temperature Stations)
Current Display Data	Instant Reading (user-adjustable offset available)
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Temperature Humidity Sun Wind Index (requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-90° to +165°F (-68° to +74°C)
Accuracy	±4°F (±2°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Sources and Formulation Used	United States National Weather Service (NWS)/NOAA Steadman (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use and allow for cold weather use
Variables Used	Instant Outside Temperature, Instant Outside Relative Humidity, 10-minute Average Wind Speed, 10-minute Average Solar Radiation
Formulation Description	Uses Heat Index as base temperature, affects of wind and solar radiation are either added or subtracted from this base to give an overall effective temperature
Current Graph Data	Instant and Hourly Calculation; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculation; Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Ultra Violet (UV) Radiation Dose (requires UV sensor)

Resolution and Units	0.1 MEDs to 19.9 MEDs; 1 MED above 19.9 MEDS
Range	0 to 199 MEDs
Accuracy	±5% of daily total
Drift	up to ±2% per year
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Latest Daily Total (user resettable at any time from Current Screen)
Historical Graph Data	Hourly, Daily Totals (user reset from Current Screen does not affect these values)
Alarm	High Threshold from Daily Total
Alarm Range	0 to 19.9 MEDs

Ultra Violet (UV) Radiation Index (requires UV sensor)

Resolution and Units	0.1 Index
Range	0 to 16 Index
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Yankee UVB-1 at UV index 10 (Extremely High))
Cosine Response	±4% FS (0° to 90° zenith angle)
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

8 Wireless Vantage Pro2™ Wind

Wind Chill (Calculated)	
Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-110° to +135°F (-79° to +57°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS)/NOAA
Equation Used	Osczevski (1995) (adopted by US NWS in 2001)
Variables Used	Instant Outside Temperature and 10-min. Avg. Wind Speed
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Hourly, Daily and Monthly Low
Historical Graph Data	Hourly, Daily and Monthly Lows
Alarm	Low Threshold from Instant Calculation
Wind Direction	
Range	0 - 360°
Display Resolution	16 points (22.5°) on compass rose, 1° in numeric display
Accuracy	±3°
Update Interval	2.5 to 3 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; 10-min. Dominant; Hourly, Daily, Monthly Dominant
Historical Graph Data	Past 6 10-min. Dominants on compass rose only; Hourly, Daily, Monthly Dominants
Wind Speed	
Resolution and Units	1 mph, 1 km/h, 0.4 m/s, or 1 knot (user-selectable). Measured in mph, other units are converted from mph and rounded to nearest 1 km/hr, 0.1 m/s, or 1 knot.
Range	1 to 200 mph, 1 to 173 knots, 0.5 to 89 m/s, 1 to 322 km/h
Update Interval	Instant Reading: 2.5 to 3 seconds, 10-minute Average: 1 minute
Accuracy	±2 mph (2 kts, 3 km/h, 1 m/s) or ±5%, whichever is greater
Maximum Cable Length	240' (73 m) (See note on page 1)
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant; 10-minute and Hourly Average; Hourly High; Daily, Monthly and Yearly High with Direction of High
Historical Graph Data	10-min. and Hourly Averages; Hourly Highs; Daily, Monthly and Yearly Highs with Direction of Highs
Alarms	High Thresholds from Instant Reading and 10-minute Average

Wireless Communications

Transmit/Receive Frequency	
US Models	902 - 928 MHz FHSS,
EU Models	868.0 - 868.6 MHz FHSS
Japan Models	928.15 - 929.65 MHz FHSS
NZ Models	921 - 928 MHz FHSS
India Models	865.0 - 867.0 MHz FHSS
ID Codes Available	8
Output Power	
US Models	902 - 928 MHz FHSS: FCC-certified low power, less than 8 mW, no license required
EU Models	868.0 - 868.6 MHz FHSS: CE-certified, less than 8 mW, no license required.
Japan Models	928.15 - 929.65 MHz FHSS, less than 1 mW, no license required.
NZ Models	921- 928 MHz FHSS, less than 10mW, no license required.
India Models	865.0 - 867.0 MHz, less than 10mW, no license required.
Range: All models except Japan	
Line of Sight	up to 1000 feet (300 m)
Through Walls	200 to 400 feet (60 to 120 m)
Range: Japan models	
Line of Sight	up to 300 feet (100 m)
Through Walls	50 to 200 feet (15 to 60m)
Sensor Inputs	
RF Filtering	RC low-pass filter on each signal line

Sensor Charts

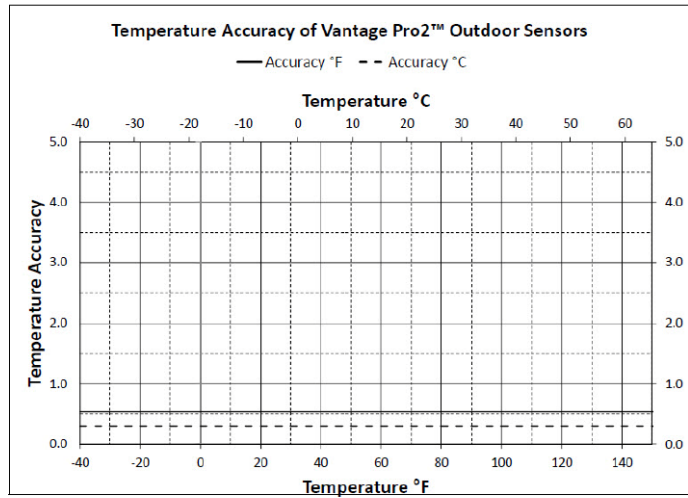


Figure 1. Temperature Accuracy of Vantage Pro2 ISS Sensors

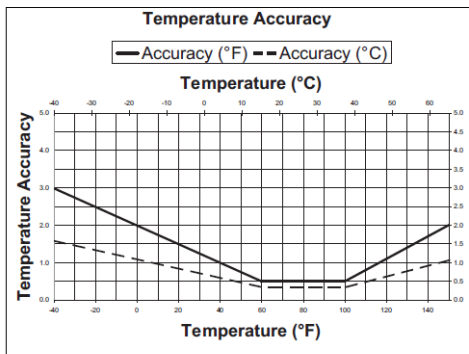


Figure 2. Inside Temperature Accuracy

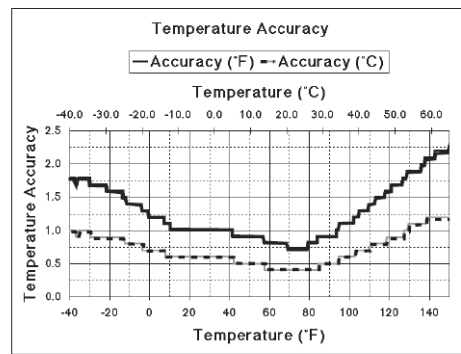


Figure 3. External Temperature Probe Accuracy

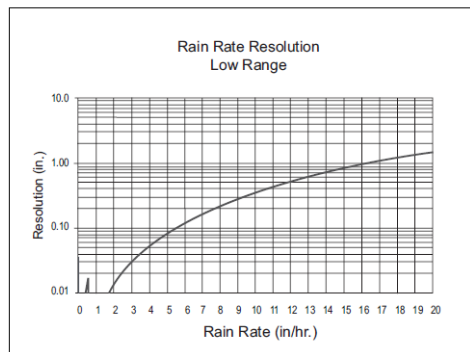


Figure 4. Low Range Rain Rate Resolution

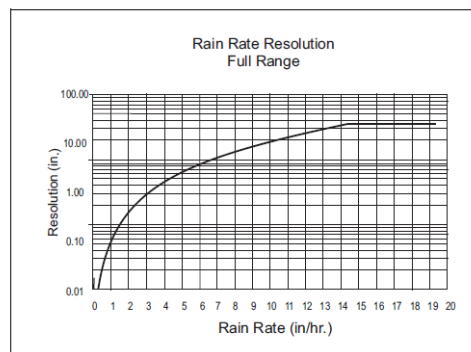


Figure 5. Full Range Rain Rate Resolution