



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Monitoreo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos  
bajo condiciones de lluvia y polvo**

Autor

Oscar Eduardo Ocampo Salazar

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería - Maestría en Ingeniería

Medellín Colombia

2020



Monitoreo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos bajo condiciones de lluvia y polvo

**Oscar Eduardo Ocampo Salazar**

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al  
título de:

**Magister en Ingeniería con énfasis en energética**

Asesor:

Edwin García Quintero. PhD.

Línea de Investigación:  
Energías Renovables

Grupo de Investigación:  
TESLA - Materiales y Sistemas Energéticos

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería - Maestría en Ingeniería  
Medellín Colombia  
2020

## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento de la eficiencia energética de un panel fotovoltaico policristalino de 300 vatios, alterado por lluvia y polvo, diferenciándolo del sombreado natural o artificial. El panel fue ubicado en campo bajo estas condiciones (lluvia y polvo) de forma independiente. Se desarrolló un sistema de monitoreo remoto vía web utilizando tecnología IoT, con el fin de obtener tanto las variables eléctricas (voltaje y corriente), como las variables ambientales (irradiancia, temperatura de la celda, temperatura ambiente y humedad relativa). Posteriormente, utilizando los datos obtenidos, se modela la ecuación para la potencia de salida del panel, la cual es validada para los siguientes escenarios: 1. Panel en condiciones ideales, o sea completamente limpio. 2. Panel expuesto a condiciones de lluvia, emulando chorros de agua en todas las direcciones con lanza y boquilla de 6.3 milímetros a una velocidad de 12.5 litros por minuto. 3. Panel contaminado con polvo emulado a una medida de talco de 2 kilogramos por metro cúbico. 4. Al panel se le montó una estructura emulando sombreado, tanto de forma parcial como total sobre las celdas solares y de forma parcial sobre el piranómetro. Se contrastan las potencias y la eficiencia, presentando el cambio de eficiencia en porcentajes, con el objeto de reconocer cada caso estudiado, todo con el fin de obtener una herramienta para el mantenimiento veraz y óptimo del panel.

**Palabras clave:** Sistema Fotovoltaico, panel solar, condiciones ambientales, lluvia, polvo, monitoreo IoT, eficiencia, mantenimiento.

## Abstract

In this work the study of the energy efficiency behavior of a 300-watt polycrystalline photovoltaic panel, altered by rain and dust, differentiating it from natural or artificial shading is presented. The panel was located in the field under these conditions (rain and dust) independently. A remote monitoring system was developed via web using IoT technology, in order to obtain both electrical variables (voltage and current), and the environmental variables (irradiance, cell temperature, ambient temperature and relative humidity). Subsequently, using the data obtained, the equation for the output power of the panel is modeled, which is validated for the following scenarios: 1. Panel on ideal conditions, that is completely clean and without any alteration. 2. Panel exposed to rainy conditions, emulating water jets in all directions with lance and nozzle of 6.3 millimeters at a speed of 12.5 liters per minute. 3. Panel contaminated with emulated dust to a talc measure of 2 kilograms per cubic meter. 4. The panel was fitted with a structure emulating shading, both partially and totally on the solar cells and partially on the pyranometer. The powers and efficiency are contrasted, presenting the change in efficiency in percentages, in order to recognize each case studied, all in order to obtain a tool for the truthful and optimal maintenance of the panel.

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Introducción General</b> .....	10
<i>Referencias Bibliográficas</i> .....	12
<b>Objetivos</b> .....	15
<i>Objetivo general</i> .....	15
<i>Objetivos Específicos</i> .....	15
<b>Estructura del trabajo</b> .....	16
<b>1. Diseño del experimento para emular alteraciones de lluvia, polvo y sombreado en el panel</b> 18	
1.1 <i>Introducción</i> .....	18
1.2 <i>Sistema PV Completo</i> .....	20
1.3 <i>Características de Diseño</i> .....	23
1.5 <i>Conclusiones</i> .....	29
1.6 <i>Referencias Bibliográficas</i> .....	29
<b>2. Desarrollo de dispositivo electrónico de telemetría web para monitoreo del sistema</b> .....	31
2.1 <i>Introducción</i> .....	31
2.2 <i>Sistema de Telemetría</i> .....	32
2.2.1 <i>Panel PV</i> .....	33
2.2.2 <i>Sensores</i> .....	34
2.2.3 <i>Control</i> .....	35
2.2.4 <i>Gateway</i> .....	35
2.2.5 <i>Monitoreo IoT</i> .....	36
2.2.6 <i>Captura de Datos</i> .....	36
2.3 <i>Dispositivo Electrónico para el sistema de Telemetría Web (IoT)</i> .....	38
2.4 <i>Conclusiones</i> .....	40
2.5 <i>Referencias Bibliográficas</i> .....	40
<b>3. Modelado estadístico multivariable para la potencia de salida del panel con respecto a las variables de entrada: irradiancia solar, temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad</b> 41	
3.1 <i>Introducción</i> .....	41
3.2 <i>Análisis de los Datos</i> .....	42
3.3 <i>Modelado de los Datos</i> .....	46

3.4	<i>Método sistemático de iteraciones sucesivas para minimizar el error</i> .....	50
3.5	<i>Comparación entre modelados de la curva (lineal, cuadrático y exponencial)</i> .....	51
3.6	<i>Conclusiones</i> .....	53
3.7	<i>Referencias Bibliográficas</i> .....	54
<b>4.</b>	<b><i>Validación del modelo estadístico para el panel PV limpio, contrastando con emulación de lluvia, polvo y sombreado</i></b> .....	<b>55</b>
4.1	<i>Introducción</i> .....	55
4.2	<i>Validación del Modelo con panel limpio</i> .....	56
4.3	<i>Contraste del modelo con emulación de lluvia, polvo y sombreado</i> .....	57
4.3.1	<i>Emulando lluvia sobre el Panel</i> .....	57
4.3.2	<i>Emulando Suciedad sobre el Panel</i> .....	58
4.3.3	<i>Emulando Sombreado</i> .....	58
4.4	<i>Variables de Entrada del Factor de Corrección</i> .....	61
4.5	<i>Conclusiones</i> .....	63
4.6	<i>Referencias Bibliográficas</i> .....	64
<b>5.</b>	<b><i>Monitoreo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos sometidos a lluvia y polvo mediante adquisición automática para mantenimiento preventivo de sistemas solares fotovoltaicos</i></b> .....	<b>65</b>
5.1	<i>Introducción</i> .....	65
5.2	<i>Contraste de las potencias</i> .....	66
5.3	<i>Análisis de la Eficiencia Energética del Panel</i> .....	67
5.4	<i>Porcentaje de Cambio entre Eficiencias</i> .....	74
5.5	<i>Adquisición Automática de Datos</i> .....	77
5.6	<i>Monitoreo para Mantenimiento</i> .....	78
5.7	<i>Conclusiones</i> .....	81
5.8	<i>Referencias Bibliográficas</i> .....	82

## ***Lista de Figuras***

<i>Figura 1. Esquema general del sistema PV híbrido Nota fuente: Elaboración propia</i>	20
<i>Figura 2. Forma de onda de la irradiancia en un día de cielo despejado</i>	24
<i>Figura 3. Atlas de radiación solar Antioquia, Colombia</i>	24
<i>Figura 4. Insolación en Medellín desde julio del 2005 hasta diciembre del 2014</i>	25
<i>Figura 5. Fotografía de los paneles ubicados en la Universidad de Antioquia</i>	26
<i>Figura 6. Escenarios para casos de estudio sobre un panel</i>	27
<i>Figura 7. Panel PV completamente limpio y sin alteración</i>	27
<i>Figura 8. Emulando sombreado, a) en una forma total sobre el panel, b) en una forma parcial sobre el panel y c) en una forma parcial sobre el piranómetro</i>	28
<i>Figura 9. Emulando lluvia sobre el panel</i>	28
<i>Figura 10. Emulando material particulado sobre el panel</i>	29
<i>Figura 11. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico para IoT</i>	32
<i>Figura 12. Panel PV policristalino y placa de datos</i>	33
<i>Figura 13. LCD para monitoreo en sitio</i>	36
<i>Figura 14. Página web para monitoreo IoT</i>	37
<i>Figura 15. Apartado en Página web para consultar los datos por fecha</i>	38
<i>Figura 16. Dispositivo electrónico para IoT</i>	38
<i>Figura 17. Desglose del dispositivo IoT Nota fuente: Elaboración propia</i>	39
<i>Figura 18. Gráficas de Irradiancia de algunos días de toma de datos</i>	42
<i>Figura 19. Tendencia de la Potencia con respecto a la Irradiancia</i>	44
<i>Figura 20. Tendencia de la Potencia con respecto a la Temperatura del Panel</i>	44
<i>Figura 21. Tendencia de la Potencia con respecto a la Temperatura Ambiente</i>	45
<i>Figura 22. Tendencia de la Potencia con respecto a la Humedad</i>	45
<i>Figura 23. Potencia Real, Teórica y Modelada inicial Vs la Irradiancia</i>	49
<i>Figura 24. Potencia Real, Teórica, y Modelada Inicial y Final Vs la Irradiancia</i>	50
<i>Figura 25. Diferentes estimaciones para la potencia modelada (lineal, cuadrática y exponencial)</i>	52
<i>Figura 26. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel Limpio</i>	56
<i>Figura 27. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel con Lluvia emulada</i>	57
<i>Figura 28. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel contaminado con material particulado</i>	58
<i>Figura 29. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel sombreado parcialmente</i>	59
<i>Figura 30. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel sombreado totalmente</i>	59
<i>Figura 31. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Piranómetro sombreado parcialmente</i>	60
<i>Figura 32. Comportamiento de las variables del factor de corrección en panel limpio</i>	61
<i>Figura 33. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando condición pluvial en el panel</i>	62
<i>Figura 34. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando suciedad con material particulado uniformemente en el panel</i>	62
<i>Figura 35. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando sombreado parcial sobre el panel</i>	63

<i>Figura 36. Contraste de las Potencias</i> .....	66
<i>Figura 37. Eficiencia en panel limpio</i> .....	67
<i>Figura 38. Eficiencia en panel con lluvia emulada</i> .....	68
<i>Figura 39. Eficiencia en panel con suciedad emulada</i> .....	69
<i>Figura 40. Eficiencia en panel sombreado parcialmente</i> .....	70
<i>Figura 41. Eficiencia en panel sombreado totalmente</i> .....	71
<i>Figura 42. Eficiencia con piranómetro sombreado</i> .....	72
<i>Figura 43. Contraste de las Eficiencias</i> .....	73
<i>Figura 44. Cálculo del PCE [%]</i> .....	75
<i>Figura 45. Eficiencia Real Vs Eficiencia Modelada en Página Web</i> .....	77
<i>Figura 46. Potencias (Real Vs Modelada Vs Teórica) en Página Web</i> .....	78
<i>Figura 47. Irradiancia registrada en Página Web</i> .....	78
<i>Figura 48. Panel PV registrando baja eficiencia gráficamente</i> .....	79
<i>Figura 49. Cambios de eficiencia momentáneos sobre el Panel PV de forma gráfica</i> .....	80

## ***Lista de Tablas***

<b><i>Tabla 1. Datos del panel PV policristalino de 300 Vatios.....</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b><i>Tabla 2. Datos del regulador de carga.....</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b><i>Tabla 3. Datos de la Batería.....</i></b>	<b><i>22</i></b>
<b><i>Tabla 4. Datos del Inversor .....</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b><i>Tabla 5. Datos meteorológicos y de insolación de la NASA para Medellín (Ant.), tomados entre enero de 1984 y diciembre del 2007 .....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>Tabla 6. Características de los sensores seleccionados.....</i></b>	<b><i>34</i></b>
<b><i>Tabla 7. Especificaciones técnicas del microcontrolador ATMEGA 2560 .....</i></b>	<b><i>35</i></b>
<b><i>Tabla 8. Especificaciones técnicas del módulo GSM SIM800L.....</i></b>	<b><i>36</i></b>
<b><i>Tabla 9. Estadística descriptiva de las variables.....</i></b>	<b><i>43</i></b>
<b><i>Tabla 10. Correlación entre cada una de las variables de entrada .....</i></b>	<b><i>43</i></b>
<b><i>Tabla 11. Regresión entre la Potencia y la Irradiancia .....</i></b>	<b><i>47</i></b>
<b><i>Tabla 12. Regresión lineal entre el factor diferencial y el factor de corrección.....</i></b>	<b><i>48</i></b>
<b><i>Tabla 13. Resultados del ERP% para potencia modelada inicial y final.....</i></b>	<b><i>51</i></b>
<b><i>Tabla 14. ERP% para las potencias modeladas (exponencial, lineal y cuadrática).....</i></b>	<b><i>52</i></b>
<b><i>Tabla 15. Valores ERP% para validación del modelo .....</i></b>	<b><i>56</i></b>
<b><i>Tabla 16. Estadística descriptiva de los datos para panel limpio .....</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b><i>Tabla 17. Estadística descriptiva de los datos para panel con lluvia.....</i></b>	<b><i>69</i></b>
<b><i>Tabla 18. Estadística descriptiva de los datos para panel con polvo.....</i></b>	<b><i>70</i></b>
<b><i>Tabla 19. Estadística descriptiva de los datos para panel con sombreado parcial .....</i></b>	<b><i>71</i></b>
<b><i>Tabla 20. Estadística descriptiva de los datos para panel con sombreado total.....</i></b>	<b><i>72</i></b>
<b><i>Tabla 21. Estadística descriptiva de los datos para el piranómetro con sombreado parcial .....</i></b>	<b><i>73</i></b>
<b><i>Tabla 22. Estadística descriptiva para cada caso de estudio de la eficiencia.....</i></b>	<b><i>75</i></b>
<b><i>Tabla 23. Valores respectivos del PCE para cada caso de estudio sobre el panel calculados con la Ecuación 16 y ajustados a rangos para diferenciar cada caso en particular. ....</i></b>	<b><i>76</i></b>
<b><i>Tabla 24. Panel PV registrando de forma numérica baja eficiencia incluida alerta visual de color amarillo.....</i></b>	<b><i>80</i></b>
<b><i>Tabla 25. Cambios de eficiencia momentáneos sobre el Panel PV de forma numérica.....</i></b>	<b><i>81</i></b>

## Agradecimientos

*Cuando terminé mi pregrado en Ingeniería Electrónica en la Universidad de Antioquia, no se cruzaba por mi mente seguir avanzando en mis estudios, ya que mi meta más próxima era conseguir un buen trabajo y ganar experiencia laboral y mejorar cada día más a nivel personal, tanto social como económicamente, pero después de siete años de continuo trabajo sentí la necesidad de afianzar más mis conocimientos a nivel educativo y mejorar mi currículum. Para llevar a cabo esta decisión solo faltó el impulso y los buenos consejos de mi hermana que me dieron las fuerzas necesarias para encaminarme nuevamente a nivel educativo. A toda mi familia, mi madre, mi hermano, mis tres sobrinas, y en especial a mi hermana Carmen Alejandra Ocampo Salazar y su esposo Danny García mil gracias por la gran ayuda, el apoyo y la paciencia infinita que me han brindado.*

*Al profesor Edwin García Quintero (Director) y a cada uno de los estudiantes y personal que hace parte del grupo de investigación TESLA, Materiales y Sistemas Energéticos, de la Universidad de Antioquia, por el apoyo incondicional y por siempre haber creído en mí trabajo, mil y mil gracias.*

## Introducción General

La generación de energía por medio del sistema fotovoltaico (PV por sus siglas en inglés, photovoltaic) viene creciendo, ya que desde 2010 el mundo ha añadido más capacidad solar PV que en las cuatro décadas anteriores y se prevé que para el 2050 podría proporcionar el 11% de la producción mundial de electricidad (IEA, 2014). Actualmente más de 100 países se encuentran en constante uso de esta fuente, en los cuales se destacan China, Alemania, Japón y Estados Unidos. Debido a este auge se han dado grandes avances en términos de la eficiencia de los paneles en cuanto a sus materiales de construcción, siendo el silicio cristalino, el semiconductor más utilizado (ISE, 2017). Esta evolución se divide en generaciones de acuerdo a la respectiva tecnología empleada: en la primera generación se utiliza el silicio monocristalino o policristalino alcanzando una eficiencia del 15% al 20% (IRENA, 2012), a nivel de laboratorio se puede lograr eficiencias hasta el 24% con el uso de la evolución en la tecnología de contacto posterior del emisor pasivado (PERC, por sus siglas en inglés) (Dullweber et al., 2020). La segunda generación incluye películas delgadas exentas de silicio, fabricadas con celdas y módulos de telururo de cadmio (CdTe), cobre-indio-galio-selenio (CIGS), arseniuro de galio (GaAs) y silicio amorfo (a-Si) y alcanzan eficiencias hasta del 20.3%. En la tercera generación se utilizan materiales orgánicos, plásticos, concentraciones PVs y celdas de multi-unión que pueden tener eficiencias de conversión de energía de hasta el 12% para celdas PV orgánicas y eficiencias superiores al 42.3% para ciertas celdas solares de multi-juntura (IRENA, 2012).

El crecimiento industrial mundial en la fabricación de paneles solares ha aumentado significativamente. En los últimos años, China ha sido el país con mayor proyección en este campo, lo que ha llevado a abaratar los costos y hacer esta tecnología muy viable para la producción de energía eléctrica (Xin-gang, You & Zhang, 2018). Los fabricantes suministran información técnica en la hoja de datos de los módulos PV siguiendo el estándar EN 50380, bajo condiciones ideales de laboratorio se logra mantener constante la temperatura a 25 °C en las celdas, una intensidad solar de 1000 W/m<sup>2</sup> y masa de aire AM de 1.5, calculando así parámetros importantes como son: la potencia máxima ( $P_{max}$ ), el voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) (EN, 2003). Otro parámetro suministrado es la TONC o Temperatura de Operación Nominal del panel PV, el cual se define como la temperatura que alcanzan las celdas solares cuando se somete al panel a las siguientes condiciones de operación: irradiancia de 800W/m<sup>2</sup>, masa de aire AM de 1.5, temperatura ambiente de 20 °C y velocidad del viento de 1 m/s (García & Balenzategui, 2004).

Colombia no ha sido ajeno a esta tecnología y a través del Ministerio de Minas y Energía - Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha realizado un estudio sobre la radiación solar presente en el país para dar a

conocer en qué regiones es más fuerte este recurso de vital importancia para los sistemas PV (UPME & IDEAM, 2005). Esta información ha sido muy útil para proyectos instalados de sistemas PV y el continuo desarrollo de los mismos a lo largo de la geografía nacional, principalmente en las zonas no interconectadas (Hernández, Trujillo & Santamaría, 2015). En la ciudad de Medellín, en Antioquia, ya hay muchos sistemas PV instalados aplicados a la industria, centros comerciales, universidades, entre otros y evidencia un futuro esperanzador en este campo (Exposolar, 2017).

La eficiencia es la medida del porcentaje de potencia con la cual las celdas absorben la radiación solar para producir electricidad, por tal motivo depende de variables ambientales como son la temperatura de las celdas y la irradiancia, lo que conlleva a cambios en las variables eléctricas como el voltaje y la corriente (Tiwari, Tiwari & Shyam, 2016).

La información suministrada en la hoja de datos técnica por los fabricantes de paneles es insuficiente para condiciones climáticas externas reales (Makrides, Zinsser, Norton & Georghiou, 2012). Los materiales de construcción de los paneles, la radiación solar y la temperatura en las celdas PV tienen una alta influencia directa en la eficiencia energética y dependen de las condiciones climáticas y meteorológicas que circundan el panel (Zhang et al., 2018). En regiones que presentan altas latitudes donde el clima es muy frío, la eficiencia general de los paneles solares se reduce debido al cúmulo de hielo y nieve en la parte superior de los paneles solares, dicha capa de hielo y nieve que sobrecarga el panel solar debe eliminarse, ya sea raspando (o barriendo) la nieve o derritiéndola, por tal motivo, una solución es el uso de sistemas de ventilación de aire caliente cuando sea necesario, y de ésta forma, mantener eficiencias estables (Rehman, Hirvonen & Sirén, 2017). En climas desérticos, cálidos y secos la eficiencia disminuye debido a la velocidad del viento, poca humedad y altas temperaturas (Ali, Zeid & Alfadhli, 2017). En el mediterráneo donde se presentan climas templados y variables, la eficiencia fluctúa dependiendo de la época del año (Malvoni et al., 2017). En el trópico sin embargo la eficiencia es más estable y depende más de la generación de los paneles (Ogbomo et al., 2017), y hasta existen diferencias en las eficiencias en comparación de climas urbanos con respecto a los climas rurales debido a la emisión de contaminantes y al efecto que se tiene de la isla de calor (Burg et al., 2017).

En diferentes condiciones climáticas las características de los paneles de silicio con los diferentes niveles de temperatura y humedad hacen variar la eficiencia (Katkar, Shinde & Patil, 2011). La humedad relativa comprendida entre el 69% al 75% favorece el aumento de la corriente de salida de los paneles solares. La salida de voltaje aumenta con la disminución de la humedad relativa, pero se estabiliza entre el 70% al 75%. Por lo tanto, su resultado implica que la eficiencia de los paneles solares es alta durante el periodo de baja humedad relativa, lo que es un indicador de alto rendimiento (Ettah, Udoimuk, Obiefuna & Opara, 2012).

Se evidencian estudios de eficiencia con respecto a cambios climáticos y variables ambientales como el polvo, la humedad, la velocidad del viento, entre otros, con respecto a cambios de la temperatura y la irradiancia (Mekhilef, Saidur & Kamalisarvestani, 2012), por lo que se estudia el comportamiento efectivo de un panel policristalino en campo para la generación de energía eléctrica modelando la salida en punto de máxima potencia, tomando valores en sitio y en tiempo real de: irradiancia, temperatura del panel, temperatura ambiente, humedad, y voltaje y corriente en la carga, con panel totalmente limpio en condición ideal de funcionamiento y alterando el panel respecto a: sombreado, lluvia y polvo.

### Referencias Bibliográficas

- Ali, Prof. Dr. Eng, Ahmed Hamza H. & Zeid, Heba & Alfadhli, Hassan. (2017). Energy Performance, Environmental Impact, and Cost Assessments of a Photovoltaic Plant under Kuwait Climate Condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 25–33. 10.1016/j.seta.2017.05.008
- Burg, B. R., Ruch, P., Paredes, S., & Michel, B. (2017). Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates. *Solar Energy*, 147, 399–405. Doi:10.1016/j.solener.2017.03.004
- Dullweber, T. Stöhr, M. Kruse, C. Haase, F. Rudolph, M. Beier B. Jäger, P. Mertens, V. Peibst, R. & Brendel, R. (2020). Evolutionary PERC+ solar cell efficiency projection towards 24% evaluating shadow-mask-deposited poly-Si fingers below the Ag front contact as next improvement step. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 212, 2020, 110586, ISSN 0927-0248. Doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110586.
- Ettah E B, Udoimuk A B, Obiefuna J N, Opara F E (2012). The Effect of Relative Humidity on the Efficiency of Solar Panels in Calabar, Nigeria. *Universal Journal of Management and Social Sciences*, Vol. 2, No.3, pp. 8-11
- European Committee for Electrotechnical Standardization, “European Standard EN 50380:2003” (2003) ‘Datasheet and nameplate information for photovoltaic modules’
- Exposolar. (2017). Balance de Resultados. Medellín, Colombia: Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental.
- García M. A. and Balenzategui J. (2004). Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations. *Renewable Energy*;29(12):1997–2010.
- Hernandez, J., Trujillo, C. L., & Santamaria, F. (2015). Photovoltaic projects developed in Non-Interconnected Zones in Colombia. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*, 1-6. Doi:10.1109/PVSC.2015.7356258

- International Electrotechnical Commission IS/IEC 61724-1 (2017). *Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data exchange and Analysis*.
- International Energy Agency IEA. (2014). *Technology Roadmap. Solar Photovoltaic Energy*. Recuperado de: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf).
- International Renewable Energy Agency IRENA. (2012). "Renewable Energy technologies: cost analysis series" vol. 1, 2012, issue 4/5.
- Katkar A A, Shinde N N, Patil P S (2011). Performance and Evaluation of Industrial Solar Cells w.r.t, Temperature and Humidity. *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 1, Issue 1, pp. 69-73
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., & Georghiou, G. E. (2012). Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions. *Third Generation Photovoltaics*. Doi:10.5772/27386
- Malvoni, M., Leggieri, A., Maggiotto, G., Congedo, P. M., & De Giorgi, M. G. (2017). Long term performance, losses and efficiency analysis of a 960 kW P photovoltaic system in the Mediterranean climate. *Energy Conversion and Management*, 145, 169–181. Doi:10.1016/j.enconman.2017.04.075
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2920–2925. Doi:10.1016/j.rser.2012.02.012
- Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N., & Olagbegi, P. O. (2017). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 1225–1238. Doi:10.1016/j.rser.2016.11.109
- Rehman, H. ur, Hirvonen, J., & Sirén, K. (2017). A long-term performance analysis of three different configurations for community-sized solar heating systems in high latitudes. *Renewable Energy*, 113, 479–493. Doi:10.1016/j.renene.2017.06.017
- Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy. Theory, Analysis and Applications*. Pensacola, USA: Springer. Doi: 10.1007/978-981-10-0807-8
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- Xin-gang, Z., & You, Z. (2018). Technological progress and industrial performance: A case study of solar photovoltaic industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(July 2017), 929–936. Doi:10.1016/j.rser.2017.08.038

Zhang, J., Xie, S., Lu, Z., Wu, Y., Xiao, H., Zhang, X., ... Bo, Z. (2018). Influence of substrate temperature on the film morphology and photovoltaic performance of non-fullerene organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174(July 2017), 1–6. Doi:10.1016/j.solmat.2017.07.012

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Monitorear la eficiencia de paneles fotovoltaicos sometidos a condiciones de lluvia, polvo y sombreado mediante adquisición automática de datos.

### **Objetivos Específicos**

- Diseñar el experimento en campo para emular condiciones de lluvia, polvo y sombreado en el panel.
- Desarrollar un dispositivo electrónico de telemetría para captura de datos y monitoreo del sistema.
- Modelar por medio de estadística multivariante la potencia de salida del panel PV con respecto a las variables de entrada: irradiancia solar, temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad.
- Validar el modelo estadístico para panel PV limpio, contrastando con diferentes condiciones emuladas como lluvia, polvo y sombreado.

## Estructura del trabajo

Para cumplir con el objetivo general se establecieron cinco capítulos que estructuran el trabajo, así:

En el capítulo 1 se presenta todos los experimentos para los casos de estudio, llevados a cabo sobre el panel. Para esto fue importante conocer todos los dispositivos que comprenden el esquema del sistema fotovoltaico completo, haciendo énfasis en el panel solar, el cual es policristalino de 300 vatios de potencia de salida con otros datos importantes tomados de la hoja de datos del fabricante del panel. También se tuvo en cuenta el atlas de radiación solar de Colombia y se investigó a cerca de los datos históricos de radiación solar en Medellín en las páginas de la NASA y de la empresa Energie ® en un periodo comprendido entre 1984 hasta el 2015 para tener mejor conocimiento del comportamiento de la irradiancia y todas las características previas al diseño del experimento.

En el capítulo 2 se describen los componentes, dispositivos y sensores para la fabricación de un dispositivo electrónico que permite capturar los datos de las variables eléctricas (voltaje y corriente), y variables ambientales (irradiancia, temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad relativa) presentes en la generación de energía eléctrica fotovoltaica, cuyos valores son almacenados en una memoria SD y a la vez enviados vía GPRS por medio de una tarjeta SIM a la nube, para poderlos visualizar y monitorear en una página web, gracias a las grandes ventajas presentadas por la tecnología del internet de las cosas (IoT), donde también son almacenados en una base de datos dentro de un *hosting*.

En el capítulo 3 se presenta el estudio de los datos almacenados durante doce días consecutivos sin hacer alguna alteración sobre el panel. Con los datos recopilados se lleva a cabo la estadística respectiva y se modela una ecuación para la potencia de salida del panel, la cual depende principalmente de la irradiancia más un factor de corrección comprendido entre las otras variables ambientales presentes en el sistema. El factor de corrección se modela empíricamente y es corregido después de múltiples simulaciones con el método de iteraciones sucesivas para minimizar el error al igual que la ecuación modelada para la potencia.

En el capítulo 4 se valida la ecuación modelada para la potencia con panel limpio y se contrasta los resultados independientemente con cada uno de los casos de estudio emulados en el panel PV: lluvia, polvo, y sombreado parcial y total, tanto en el panel como en el piranómetro de forma independiente.

En el capítulo 5 se calcula eficiencia tanto con los valores reales de potencia medida como con los valores de potencia modelada para cada caso de estudio sobre el panel: limpio, emulando lluvia, polvo, y sombreado parcial y total, tanto en el panel como en el piranómetro, y se contrastan los resultados. Se describe una ecuación para encontrar el porcentaje de cambio de la eficiencia entre la eficiencia con la potencia real con respecto a la eficiencia

con la potencia modelada, con dicha ecuación, se calculan los valores de porcentaje de cambio de la eficiencia para cada caso de estudio: panel limpio, emulando lluvia sobre el panel, emulando suciedad sobre el panel con polvo, emulando sombreado sobre el panel tanto de forma parcial como de forma total, y emulando sombreado de forma parcial sobre el piranómetro, con estos valores calculados se estimaron y se ajustaron los rangos de valores para diferenciar cada caso, con lo cual se realizaron los cambios y actualizaciones en la página web para monitorear los datos en tiempo real por medio de gráficas y la tabla con valores numéricos calculados para el porcentaje de cambio de la eficiencia y conocer en todo momento el estado del panel PV, y de esta forma brindar un insumo muy importante al personal a cargo del mantenimiento de los paneles en una planta o parque solar.

# **1. Diseño del experimento para emular alteraciones de lluvia, polvo y sombreado en el panel**

## **Resumen**

Los requisitos de diseño e implementación consisten en realizar mediciones del mismo panel, el cual hace parte de un sistema fotovoltaico completo funcional generando energía eléctrica para las necesidades en carga de una bodega de la Universidad de Antioquia. El panel está sujeto a los siguientes escenarios: 1. Panel operando en condiciones ideales, completamente limpio y sin ninguna alteración. 2. Al panel se le montó una estructura emulando sombreado, primero de una forma total y después de una forma parcial. 3. El panel se expuso a condiciones de lluvia, emulando chorros de agua en todas las direcciones con lanza y boquilla de 6,3 milímetros a una velocidad de 12,5 litros por minuto. 4. El panel se contaminó con polvo emulado a una medida de talco de 2 kilogramos por metro cúbico.

## **1.1 Introducción**

Un sistema fotovoltaico está compuesto principalmente por un generador PV que absorbe la energía solar mediante celdas solares y la transforma en electricidad de forma directa e inmediata (dc por sus siglas en inglés) (Haque & Zaheeruddin, 2014). En sistemas PV autónomos o aislados, este voltaje va a un controlador de carga dc que lo regula e interviene en la corriente consumida, después el voltaje se almacena en baterías para tener suministro en los momentos que el sol no esté presente para alimentar el sistema. Como la mayoría de las cargas son de corriente alterna (ac por sus siglas en inglés) es necesario tener un inversor que transforma de dc a ac (Schumm, 2010).

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol. La irradiancia es la magnitud usada para describir la radiación solar incidente sobre un área determinada y es medida en  $W/m^2$  y es simbolizada con la letra  $G$ . En el área de un módulo fotovoltaico, la radiación solar produce corriente foto generada que es directamente proporcional a la irradiancia. En operación de cortocircuito y a máxima potencia, la corriente resultante varía en proporción a la irradiancia. A la Insolación se le conoce como a la acumulación de energía promedio durante un período de tiempo específico (día, mes, anual, estacional), a diferencia de la irradiación que es la energía por unidad de superficie en cualquier periodo de tiempo ( $kWh/m^2$ ). Las unidades que se emplean para este concepto de insolación son las Unidades de Energía por Unidades de Área ( $kW-h/m^2$ ). La radiación solar (no la irradiancia) que entra en la atmósfera presenta pérdidas del 30% debido

a la reflexión hacia el espacio, por absorción de nubes y gases atmosféricos pierde un 19%, el 51% restante (la irradiancia) llega finalmente a las celdas solares de manera directa o difusa (dos Santos & Vicente, 2011).

La literatura indica que los países ubicados en el hemisferio norte deben orientar los paneles PV hacia el sur, mientras los que están en el hemisferio sur los deben orientar hacia el norte (Guarderas & Caamaño, 2013) y existen tablas que indican los ángulos de inclinación de los paneles en función de la latitud del sitio, donde lugares entre  $0^\circ$  y  $15^\circ$  deben de estar a un ángulo de inclinación recomendado de  $15^\circ$ , para latitudes entre  $15^\circ$  y  $25^\circ$  se recomienda que el ángulo sea igual a la latitud, y después de los  $25^\circ$  se presenta una tendencia de que si se suma hasta  $5^\circ$  de latitud se le suma  $5^\circ$  de inclinación al panel, y si se suma  $10^\circ$  de latitud se le suma  $10^\circ$  de inclinación y así sucesivamente (Orellana & Delgado, 2015). También existe una fórmula que se emplea para calcular el ángulo óptimo de inclinación de acuerdo a la latitud e incluso, de acuerdo a si se está en invierno o en verano (Stanciu & Stanciu, 2014).

Se utiliza un panel policristalino ya que bajo condiciones climáticas actuales la evaluación del rendimiento en paneles de varias tecnologías es independientemente de la tecnología usada y se deben tener en cuenta los factores ambientales externos que afectan la eficiencia. Los datos suministrados por los fabricantes en la información sobre las características eléctricas de los módulos como son: voltaje de circuito abierto, corriente de cortocircuito, máxima potencia, eficiencia y coeficientes de temperatura, son calculados en condiciones estándares de temperatura de las celdas, irradiancia y espectro, y éstos rara vez ocurren en situaciones reales, por lo tanto dicha información no es suficiente para predecir con exactitud el funcionamiento de los paneles PV en diferentes condiciones climáticas, conllevando a que el monitoreo y las evaluaciones del rendimiento PV al aire libre sean necesarios (Makrides et al., 2012).

Debido a que el estudio se hace bajo condiciones climáticas en la intemperie, se siguen las directrices para condiciones pluviales emulando chorros de agua en todas las direcciones con lanza y boquilla de 6,3 milímetros a una velocidad de 12,5 litros por minuto y de material particulado del polvo a una medida de talco de 2 kilogramos por metro cúbico como lo plantea la norma IEC 60529 código IP mayor o igual a 65 (ANSI & IEC, 2004).

El material particulado es un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, tales como el hollín de diesel, polvo de vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos (Fang et al., 2003). Estas partículas pueden variar su tamaño y composición a través de varios procesos como el vapor de condensación, la evaporación, la coagulación a través de las colisiones del movimiento browniano por la hidrodinámica y fuerzas gravitacionales o eléctricas (Fang et al., 2006). Debido a esto se utiliza talco para emular el polvo ambiente.

## 1.2 Sistema PV Completo

La Figura 1 muestra todo el esquema general del sistema PV implementado, el cual es un sistema híbrido, y de la ubicación de las variables a medir tanto ambientales como eléctricas, dicho sistema se compone de los siguientes elementos:

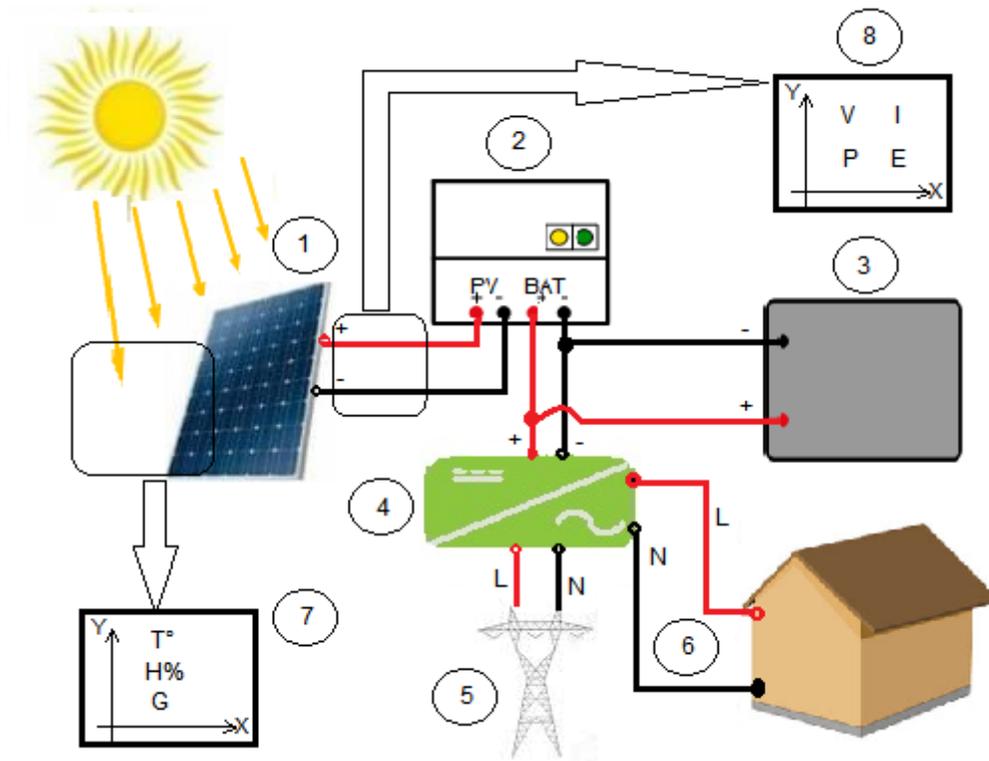


Figura 1. Esquema general del sistema PV híbrido  
Nota fuente: Elaboración propia

- (1) Panel solar PV: Genera una fuerza electromotriz cuando se encuentra bajo la incidencia de una radiación luminosa o análoga.
- (2) Regulador de carga: Su función es controlar que la carga y la descarga de las baterías se realice de forma correcta regulando la tensión que se les suministra, también interviene en la corriente consumida, impidiendo sobrecargas o descargas excesivas.
- (3) Baterías: Almacenan la energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos permitiendo obtener electricidad en el momento en que se necesita. Su tamaño se calcula normalmente para disponer de una autonomía de 2-5 días.
- (4) Inversor: Su función es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con una magnitud y frecuencia determinadas. Este inversor en particular es híbrido, o sea que permite el uso de la red eléctrica convencional y el uso de baterías.

- (5) Red eléctrica convencional: Red interconectada que proporciona electricidad. En Colombia la electricidad es producida por las hidroeléctricas principalmente.
- (6) Consumo: Gasto total de energía eléctrica en un proceso determinado.
- (7) Medición de variables ambientales: Mediante sensores respectivos de temperatura ( $T^{\circ}$ ), humedad (H%) e irradiancia solar (G) se toman los valores en tiempo real de dichas variables que afectan los paneles solares fotovoltaicos.
- (8) Medición de variables eléctricas: Mediante un sensor de corriente y un acondicionamiento de voltaje, se toman los valores en tiempo real de voltaje (V) y corriente (I), y con estos valores se calcula la potencia (P) y la energía (E) respectiva.

El panel utilizado tiene las siguientes características tomadas de la hoja de datos del fabricante resumidas en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Datos del panel PV policristalino de 300 Vatios

Referencia del Módulo	FY-72-300P
Potencia Máxima en STC* (Pmax)	300 W
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax)	36,41 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	8,24 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	45,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8,73 A
Eficiencia	15,48%
Tolerancia de Potencia (+)	0 ~ +3%
Temperatura de operación ( $^{\circ}$ C)	-40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C
Coeficiente de Temperatura de Pmax	-0,43% / $^{\circ}$ C
Coeficiente de Temperatura de Voc	-0,32% / $^{\circ}$ C
Coeficiente de Temperatura de Isc	0,06% / $^{\circ}$ C
Temperatura nominal de la celda de operación (NOCT)	45 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C
Tipo de Celda	Policristalino
Dimensiones	1950 x 992 x 45 mm
Peso	26 Kg
Rango de Temperatura	-45 $^{\circ}$ C a 85 $^{\circ}$ C
Condiciones de prueba estándar (STC) * STC: Standard Test Conditions.	Irradiancia 1000 W/m <sup>2</sup> Masa de aire AM 1,5 Temperatura del panel 25 $^{\circ}$ C,

*Nota fuente: Información tomada de la hoja de datos del fabricante del panel y descargada de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/fysolar-300w-solar-panel-fy-72-300p-60383999659.html>*

El regulador de carga utilizado tiene las siguientes características tomadas de la hoja de datos del fabricante resumidas en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Datos del regulador de carga

Referencia	BlueSolar MPTT 75/15
Voltaje de la Batería	12/24 selección automática
Corriente de carga nominal	15 A
Máxima potencia PV 12V 1a,b)	200W

Máxima potencia PV 24V 1a,b)	400W
Máxima corriente de corto circuito 2)	15 A
Desconexión automática de carga	Si, a máxima carga 15A
Máximo voltaje PV en circuito abierto	75 V
Pico de Eficiencia	98%
Auto consumo	10 mA
Voltaje de carga 'absorción'	14,4V / 28,8V (ajustable)
Voltaje de carga 'flotante'	13,8V / 27,6V (ajustable)
Algoritmo de carga	Adaptativa multietapa
Compensación de temperatura	-16 mV / °C resp. -32 mV / °C
Corriente de carga continua / pico	15A / 50A
Desconexión de carga de baja tensión	11,1V / 22,2V o 11,8V / 23,6V o algoritmo de duración de la batería
Reconexión de carga de baja tensión	13,1V / 26,2V o 14V / 28V o algoritmo de duración de la batería
Protección	Batería de polaridad inversa (fusible) Cortocircuito de salida / sobre temperatura
Temperatura de funcionamiento	-30 a 60°C (salida nominal completa hasta 40°C)
Humedad	95%, sin condensación
Categoría de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)
Peso	0,5 Kg
Dimensiones	100 x 113 x 40 mm
<p>1a) Si se conecta más potencia PV, el controlador limitará la potencia de entrada al máximo establecido.</p> <p>1b) El voltaje PV debe exceder <math>V_{bat} + 5V</math> para que el controlador arranque. A partir de entonces, la tensión fotovoltaica mínima es <math>V_{bat} + 1V</math>.</p> <p>2) Un arreglo PV con una corriente de cortocircuito más alta puede dañar el controlador.</p>	

*Nota fuente: Datos tomados de la ficha técnica descargada de la página web*

[https://www.rpc.com.au/pdf/victron\\_BlueSolar\\_MPPT\\_15A\\_datasheet.pdf](https://www.rpc.com.au/pdf/victron_BlueSolar_MPPT_15A_datasheet.pdf)

La batería utilizada presenta los siguientes datos mostrados en la Tabla 3:

**Tabla 3.** Datos de la Batería

Referencia	MT122000G (12V200AH) GEL TYPE
Voltaje Nominal	12 V
Capacidad	200 Ah
Dimensiones	522 x 238 x 218 mm
Peso aproximado	61 Kg
Resistencia interna	Aproximadamente 3,3 mΩ
Rango de Temperatura en operación	Descargada: -15 a 50°C Cargando: 5 a 35 °C Almacenamiento 0 a 40 °C
Voltaje de carga flotante	13,5 a 13,8 V
Tensión de carga cíclica	14,1 a 14,4 V
Corriente de carga máxima	50 A
Carga de refuerzo / igualación	No requerida
Tipo de terminal	Cobre

Material del contenedor	Resina ABS general
-------------------------	--------------------

*Nota fuente: Datos tomados de la hoja de datos respectiva, descargada de la página web <http://mtek-sa.com/mtek/Catalogo/tabid/64/ProdID/8/CatID/11/Default.aspx>*

El inversor híbrido utilizado presenta los datos de la Tabla 4.

**Tabla 4. Datos del Inversor**

Referencia	AN0K6	
Potencia	600 W	
Voltaje en Baterías	12 V	
Corriente de Carga	15 A	
Tiempo de Transferencia	≤ 8 ms	
Dimensiones	130 x 375 x 190 mm	
Peso aproximado	16,6 Kg	
Resistencia interna	Aproximadamente 3,3 mΩ	
Entrada	Voltaje	115 VAC (+25%, -36%)
	Frecuencia	45–54 Hz / 55–65 Hz
Salida	Voltaje	Modo Energía Alterna: 115 VAC (+11%, -13%) Modo Inversor: 115 VAC (±3%)
	Frecuencia	Modo Energía Alterna: Igual a la entrada Modo Inversor: 60 Hz (±0,5 Hz)
	Forma de Onda	Senoidal
Display	LCD	
Protección	Tipo de Carga	Por sistema “TOP CHARGING” acelera el tiempo de carga, extiende la vida útil de la batería.
	Sobrecarga	En modo batería: 100%, solo alarma. 110%, se apaga después de 30s. 120%, se apaga después de 2s. En Modo Normal: no habrá apagado, solo se alarmará.
	Corriente de Carga	Cuando hay corto circuito de salida, el inversor se apaga automáticamente, el inversor reestablece la salida después que la falla es liberada.
	Batería Baja	El inversor se apaga automáticamente, carga automáticamente cuando la energía principal regresa.

*Nota fuente: Datos tomados de la hoja de datos respectiva, descargada de la página web [https://issuu.com/apollo\\_once/docs/cata\\_\\_logo\\_1](https://issuu.com/apollo_once/docs/cata__logo_1), pp, 40 – 41.*

### 1.3 Características de Diseño

Cabe resaltar que los datos guardados se tendrán en cuenta los que se adquieran en horas solares con valores de irradiancia incidente eficaces sobre el panel PV ( $G > 0$ ), es decir desde las 7 a. m. hasta las 5 p. m. (como se puede observar en la Figura 2, en este rango de horas es más factible encontrar irradiancia mayor de cero, aunque no quiere decir que se garantice al 100% que la irradiancia en esta ventana de tiempo siempre va a tener valor mayor que cero, debido a que Medellín posee un clima templado y los factores climáticos son muy cambiantes, por lo cual como un día puede ser completamente soleado, el día siguiente puede

ser un día lluvioso y con nubosidad abundante), y buscando que los días estudiados tengan la forma de onda que se muestra en la Figura 2, la cual corresponde a un día ideal soleado con poca nubosidad, o sea de cielo despejado en la ciudad de Medellín, aunque es de pleno conocimiento que esta forma de onda de la irradiancia no se va a dar en la realidad al 100%.

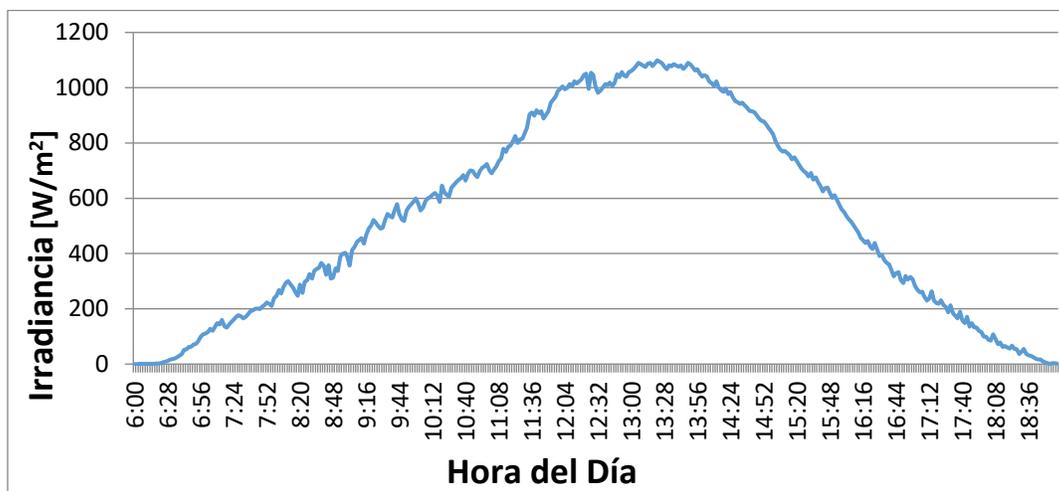


Figura 2. Forma de onda de la irradiancia en un día de cielo despejado

Bajo condiciones reales se busca que los días estudiados se acoplen a las condiciones normales dependiendo del escenario expuesto en el experimento, o sea días que cumplan con el promedio de insolación diaria de Medellín detallado en la Figura 3 extraída del atlas de radiación solar de Colombia y en la Tabla 5 extraída de la página de la NASA con datos de latitud igual a 6,217 y longitud igual a -75,567, es decir que los días con demasiada nubosidad o de lluvia frecuente no serán evaluados, ya que modifican los valores estándares con los que se alteraron los paneles.

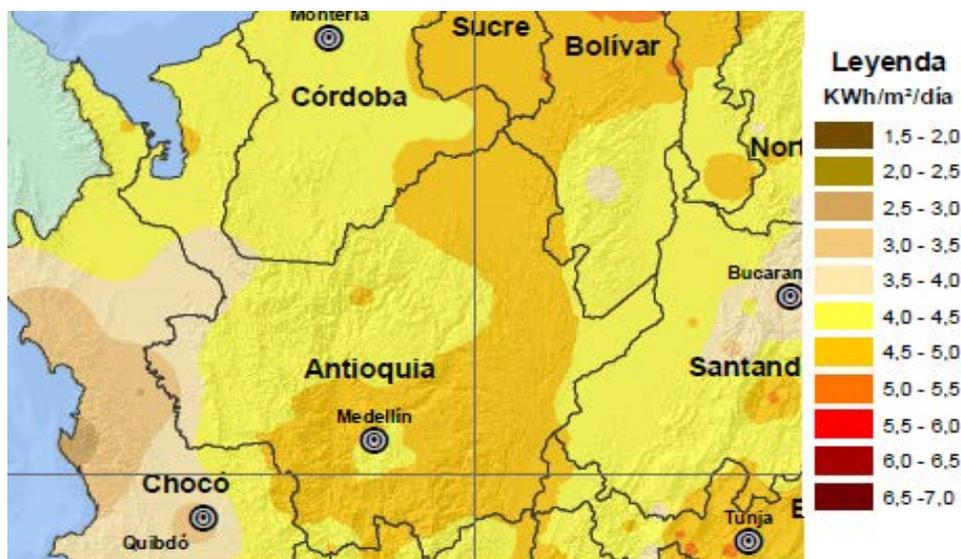


Figura 3. Atlas de radiación solar Antioquia, Colombia

**Tabla 5.** Datos meteorológicos y de insolación de la NASA para Medellín (Ant.), tomados entre enero de 1984 y diciembre del 2007

MES PROMEDIO	RADIACIÓN HORIZONTAL kWh/m <sup>2</sup> /d	TEMPERATURA A 10 m °C	HUMEDAD RELATIVA %	PRECIPITACIÓN DE LLUVIA mm/d
ENERO	4,45	21,3	78,5	4,23
FEBRERO	4,57	22,0	74,8	4,51
MARZO	4,63	21,8	79,7	5,31
ABRIL	4,34	21,8	83,5	9,42
MAYO	4,46	21,8	83,0	10,4
JUNIO	4,63	21,7	79,5	9,77
JULIO	4,97	21,8	73,8	8,80
AGOSTO	4,93	22,1	73	8,24
SEPTIEMBRE	4,63	21,4	79,1	9,46
OCTUBRE	4,37	20,9	84,3	9,56
NOVIEMBRE	4,25	20,7	85,9	8,49
DICIEMBRE	4,16	21	82,7	5,58
ANUAL	4,53	21,5	79,8	7,83

Nota fuente: Datos extraídos de [https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=105097&lat=6.217&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=skip@lar.c.nasa.gov&p=grid\\_id&p=swv\\_dwn&p=T10M&p=RH10M&p=RAIN&step=2&lon=-75.567](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=105097&lat=6.217&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=skip@lar.c.nasa.gov&p=grid_id&p=swv_dwn&p=T10M&p=RH10M&p=RAIN&step=2&lon=-75.567)

Y para completar los datos de insolación en este periodo de tiempo se tiene la Figura 4, la cual contiene embebida la tabla del promedio de insolación en Medellín desde julio del 2005 hasta diciembre del 2014, constatando que los meses más soleados son Julio y Agosto.

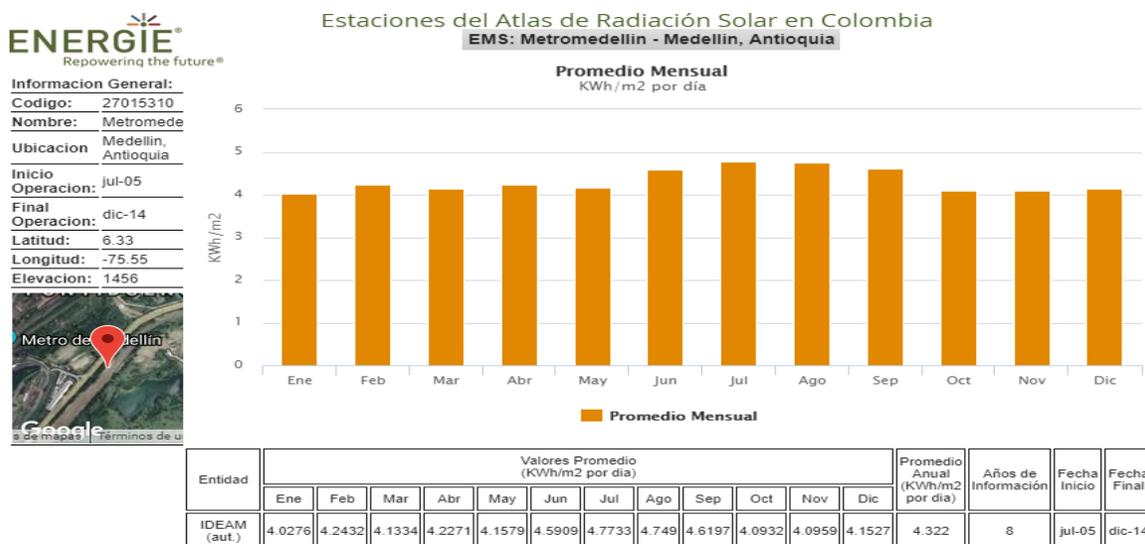


Figura 4. Insolación en Medellín desde julio del 2005 hasta diciembre del 2014

Nota fuente: <https://www.energie.ws/datos-radiacion-solar-colombia-atla>

## 1.4 Diseño Experimental

Para el experimento se realizó todo el montaje descrito en la Figura 1, cuyos elementos, estructura mecánica, dispositivos electrónicos y demás componentes fueron suministrados por el grupo de investigación TESLA de la Universidad de Antioquia y el lugar de ubicación de los paneles fue designado por dicha universidad. Para hacer incidir mejor la irradiancia sobre el panel, este se instaló con orientación hacia el sur (azimuth, orientación de las placas solares respecto al sur para lograr mejor generación de energía eléctrica, ya que con esta orientación la superficie absorbente del panel queda perpendicular a los rayos solares entrantes) de la ciudad de Medellín, la cual tiene una latitud 6,217 y por ende como se denotó en la introducción de este capítulo el ángulo recomendado para esta latitud es de aproximadamente  $15^\circ$ . Este panel PV hace parte de cuatro paneles PV instalados en la zona noroccidental de la Universidad como se ilustra en la Figura 5, los cuales están cerca de la portería del metro, en el punto más óptimo de ese lugar para aprovechar la energía producida por el sol, conectado a una carga real de consumo de una bodega que excede en potencia la producida por los paneles fotovoltaicos y así garantiza que estos operen a máxima eficiencia. A través de una automatización para medir las variables ambientales y eléctricas mediante sensores respectivos descritos en la Figura 1, por los numerales (7) y (8), se toman los datos en tiempo real arrojados por los sensores, los cuales son visibles mediante monitoreo web usando tecnología de internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés, Internet of Things).



*Figura 5. Fotografía de los paneles ubicados en la Universidad de Antioquia*

Se mide la eficiencia del panel bajo condiciones ideales contrastándola con la suministrada por los fabricantes según ficha técnica. Se alteran las condiciones de operación del panel respecto a lluvia y polvo con una medida específica estandarizada, como lo plantea la norma IEC 60529 código IP mayor o igual a 65 (ANSI & IEC, 2004), para conocer si la eficiencia de los paneles es modificada debido a estos fenómenos naturales que ocurren en condiciones

reales durante la vida útil de los paneles. Es necesario conocer la eficiencia del panel bajo efecto de sombreado para diferenciar resultados, por lo que se lleva a cabo el estudio respectivo emulando sombreado causado por efecto natural o artificial.

Los requisitos de diseño e implementación consisten en realizar mediciones del mismo panel, sujeto a los siguientes escenarios ilustrados en la Figura 6:



*Figura 6. Escenarios para casos de estudio sobre un panel PV  
Nota Fuente: Elaboración propia*

1. El panel operando en condiciones ideales, es decir completamente limpio y sin ninguna alteración, lo que permite medir la potencia de salida ideal. En esta condición es donde el panel debería de operar siempre.



*Figura 7. Panel PV completamente limpio y sin alteración*

2. Se realizó el montaje que cubre todo el panel para emular un sombreado y poder así medir la potencia respectiva debido al sombreado.

El sombreado sobre el panel se emuló en dos formas distintas, una parcial y otra total y en el piranómetro (puesto conservando el mismo ángulo de inclinación del panel) solo se hizo de forma parcial, ya que en la realidad estos fenómenos se presentan circunstancialmente dependiendo del medio que rodea el panel y la forma natural con la que transcurre el día.

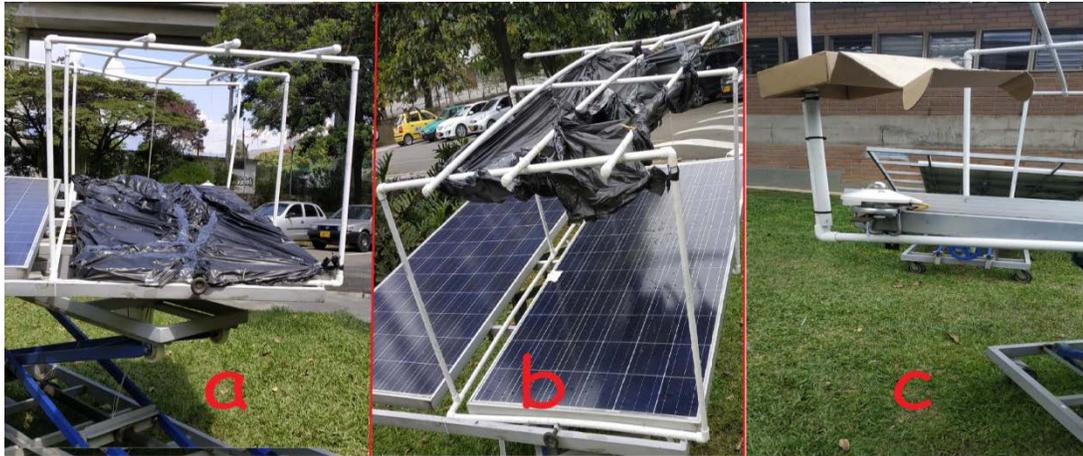


Figura 8. Emulando sombreado, a) en una forma total sobre el panel, b) en una forma parcial sobre el panel y c) en una forma parcial sobre el piranómetro

3. El panel se expone a las condiciones de lluvia, emulando chorros de agua en todas las direcciones con lanza y boquilla de 6.3 milímetros a una velocidad de 12.5 litros por minuto, encontrando la potencia de salida debido a la lluvia.



Figura 9. Emulando lluvia sobre el panel

4. El panel se contamina con polvo (material particulado) emulado a una medida de talco de 2 kilogramos por metro cúbico y, por lo tanto, encontrando la potencia de salida debido a la suciedad. Siguiendo esta medida y haciendo cálculo con las

dimensiones del panel según la placa de datos expuesta en la Tabla 1, se tiene que el volumen del panel es de  $0,087 \text{ m}^3$ , y por lo tanto para cubrir este volumen se hizo necesario 174 gramos de talco que se distribuyó cuasi uniformemente por todo el panel con la ayuda de una brocha.



*Figura 10. Emulando material particulado sobre el panel*

## **1.5 Conclusiones**

En este capítulo inicial se muestra los elementos que componen un sistema PV para generación de energía eléctrica para dar un mejor conocimiento del estudio a tratar en funcionamiento de una carga real cotidiana.

Se diseñó y se llevó a cabo el experimento en cada una de sus fases y escenarios correspondientes para la posterior toma de datos respectiva a cada uno de los estudios.

Aunque el estudio del sombreado emulado sobre el panel no se menciona en el título del trabajo ni en los objetivos fue muy importante hacerlo, ya que en un día normal y por diferentes causas se presenta sombreado total o parcial sobre el panel y no en el piranómetro o viceversa, o en los dos respectivamente y de esta forma se puede ver las diferencias con la lluvia, ya que en la cotidianidad del día cuando un fenómeno pluvial se hace presente, casi siempre viene acompañado de sombreado causado por las nubes que lo provocan. De igual forma el polvo por su constitución física también causa sombreado parcial en el panel.

## **1.6 Referencias Bibliográficas**

Approval American National Standard ANSI, International Electrotechnical Commission IEC. (2004) ANSI/IEC 60529-2004. Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code) (identical national adoption). United States of America: National Electrical

Manufacturers Association NEMA. Recuperado de:  
<https://www.nema.org/Standards/ComplimentaryDocuments/ANSI-IEC-60529.pdf>

- dos Santos, P., & Vicente, E. (2011). Relationship between the shading position and the output power of a photovoltaic panel. Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian, 676 - 681.
- Fang, G.C., Chang, C.N., Chu, C.C., Wu, Y.S., Fu, P., Yang, I.L., y Chen, M.H. (2003). Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> aerosols at a farm sampling site in Taiwan Taichung. *The Science of the Total Environment*, 308, 157-166.
- Fang, G.C, Wu, Y.S., Chang, S.Y., Rau, J.Y., Huang, S.H., y Lin, C.K. (2006). Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. *Toxicology and Industrial Health*, 22, 2-37.
- Guarderas, G., & Caamaño, M. (2013). Revisión y mejora de procedimientos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red para aplicación a localidades de la región intertropical. *Instituto de Energía Solar*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Haque, A., & Zaheeruddin. (2014). Research on solar photovoltaic (PV) energy conversion system: an overview. *IEEE Xplore*, 2014, 605–611. Doi:10.1049/cp.2013.2653.
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., & Georghiou, G. E. (2012). Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions. *Third Generation Photovoltaics*. Doi:10.5772/27386.
- Orellana, L., & Delgado, G. (2015). Estimación de la radiación solar global diaria en el cantón Cuenca mediante la aplicación del modelo Brsitolow & Campbell. Universidad Politécnica Salesiana.
- Schumm, G. (2010). Solar Photovoltaic Energy Conversion. En Al-Gobaisi (Ed.), *Renewable Energy Systems and Desalination* (Vol. II, pp. 161–170). Doi:10.1063/1.1736034.
- Stanciu, C. & Stanciu, D. (2014). Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Conversion and Management*, Volume 81, 2014, Pages 133-143, ISSN 0196-8904. Doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.016.

## 2. Desarrollo de dispositivo electrónico de telemetría web para monitoreo del sistema

### Resumen

Para la generación de energía eléctrica usando paneles fotovoltaicos existen variables ambientales y eléctricas que deben de ser monitoreadas para garantizar el buen funcionamiento del sistema a lo largo de su vida útil. En este capítulo se muestra cómo se desarrolló un dispositivo electrónico, el cual permite monitorear y recolectar datos de las variables ambientales y eléctricas presentes en el proceso, tanto en sitio como por medio de telemetría web, ya que aprovechando las grandes ventajas de la tecnología del internet de las cosas (IoT) se implementó una página web a la cual se puede acceder desde cualquier lugar del mundo haciendo uso solamente de algún dispositivo que tenga instalado y soporte la aplicación de navegador con conexión a internet.

### 2.1 Introducción

Un sistema de telemetría se conforma de dispositivos de *hardware* complementados por *software* con respectiva automatización para visualización y toma de datos. Los datos de irradiancia, temperatura del panel, temperatura ambiente, y corriente y voltaje de potencia máxima generados por los sensores son enviados vía GPRS por medio de una tarjeta SIM a la nube y se monitorean aprovechando los grandes avances en la web o la tecnología del internet de las cosas (IoT) el cual permite que cualquier objeto físico se comunique a través de Internet y transfiera datos a un servidor específico para su posterior procesamiento. El IoT Requiere computación generalizada, sensores inteligentes, dispositivos integrados, tecnologías de comunicación, protocolos de Internet y aplicaciones web (I. Lee & K. Lee, 2015).

El monitoreo de sistemas PV se plantea como un método de recolectar y analizar un número de parámetros medidos, observados en tiempo real evaluando su comportamiento. Las principales características de los sistemas de monitoreo se clasifican en los siguientes tipos: parámetros supervisados, sensores, controlador, mecanismo de transferencia de datos, software de desarrollo de programas y método de monitoreo. Es de vital importancia tener en consideración las condiciones climáticas para la selección de los dispositivos eléctricos electrónicos utilizados en la automatización para el monitoreo. Los parámetros operativos y meteorológicos más comunes son la irradiancia solar, la temperatura, la humedad, el voltaje y la corriente PV, mientras que otros parámetros dependen de la configuración, o sea si es una conexión de un solo panel, varios paneles conectados en red o una conexión híbrida, la cual es referida comúnmente a sistemas PV integrados con turbinas eólicas, generadores

diesel o cualquier otra fuente de energía convencional o no convencional (Madeti & Sing, 2017).

El monitoreo se realiza siguiendo los estándares establecidos para los porcentajes de error en las guías para la medida, el intercambio y el análisis de los datos, dónde se estipula que el autoconsumo debido a los sistemas auxiliares se considerará como una pérdida de potencia de la planta PV y no será considerado como una carga. Todos los sistemas de monitorización no esenciales para la operación de la planta PV serán considerados como parte de la carga. El equipo de monitorización, aunque no consuma tanta potencia, puede constituir una parte importante del consumo total de potencia y el usuario final deberá ser informado de que puede ser precisa potencia suplementaria para satisfacer las necesidades totales de la carga (IEC 61724-1, 2017).

## 2.2 Sistema de Telemetría

Para la visualización y toma de datos se llevó a cabo el sistema de telemetría respectivo representado en el diagrama de bloques de la Figura 11.

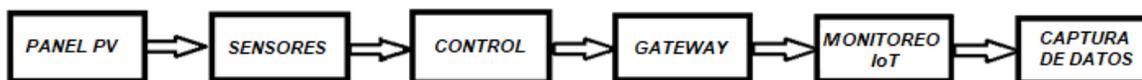


Figura 11. Diagrama de bloques del dispositivo electrónico para IoT

Nota fuente: Elaboración propia

De la Figura 11 se desglosa lo siguiente:

- **PANEL PV:** Genera una fuerza electromotriz cuando se encuentra bajo la incidencia de una radiación luminosa o análoga (por ejemplo, la producida por un bombillo).
- **SENSORES:** Según la RAE (Real Academia de la Lengua Española), los sensores son dispositivos que detectan una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmiten adecuadamente. En este caso es necesario saber el valor de variables ambientales como la temperatura del panel, temperatura ambiente, la humedad y la radiación solar (Figura 1 numeral 7), y de variables eléctricas como el voltaje, la corriente, la potencia y la energía consumida (Figura 1 numeral 8). El valor arrojado por los sensores puede ser análogo de 0 a 5 V, 0 a 10 V, ó 4 a 20 mA o también puede ser digital en cadena de bits.
- **CONTROL:** Dispositivo integrado electrónico donde se toman todas las decisiones sobre las acciones a ejecutar, por lo que se le puede considerar el cerebro o la unidad de procesamiento central del sistema. Consta de entradas y salidas análogas y digitales para procesar la señal proveniente de los sensores y convertirlas a valor real numérico comprensible en la unidad de medida de cada dato respectivo. Ejemplos de controladores son los controladores lógicos programables (PLC por sus siglas en inglés de *Programmable Logic Controller*), microcontroladores, microprocesadores, etc.

- **GATEWAY:** Traducido literalmente puerta de enlace, es un dispositivo que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas diferentes a todos los niveles de comunicación, la cual se hará por TCP/IP, y puede ser llevada a cabo mediante red LAN cableada o inalámbrica (Wi-Fi), GPRS, red *Sigfox*, entre otros.
- **MONITOREO IoT:** Visualización en sitio y en cualquier otro lugar vía página web de los datos. IoT hace referencia a la tecnología del internet de las cosas, lo cual consta de un sistema de dispositivos de computación interrelacionados, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas que tienen identificadores únicos y la capacidad de transferir datos a través de una red, sin requerir de interacciones humano a humano o humano a computadora.
- **CAPTURA DE DATOS:** Los datos tomados y monitoreados son almacenados para posterior estudio y procesamiento de los mismos.

Cabe resaltar que todos los elementos y dispositivos electrónicos para el *hardware* respectivo y necesario para la construcción del dispositivo, como también el hosting para la página web, fueron adquiridos por el grupo de investigación TESLA de la Universidad de Antioquia. El grupo ya contaba con los dispositivos que conforman el sistema fotovoltaico, y el criterio de selección de los componentes en general, para los demás componentes fue la disponibilidad, la facilidad de consecución, las características físicas y eléctricas para operar en la intemperie, y el precio para no superar el presupuesto establecido. La programación del *software* requerido fue por medio de un computador ubicado en el laboratorio de dicho grupo de investigación.

### 2.2.1 Panel PV

El panel fotovoltaico está ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad de Antioquia en un punto designado por la propia institución y hace parte de un sistema PV que provee energía eléctrica parcialmente al bloque 28 de la ciudad universitaria. El Panel PV utilizado para las mediciones es de silicio policristalino de 300 vatios de potencia, los datos técnicos respectivos para este panel están en la Tabla 1 del capítulo 1, apartado 1.2. Una foto del panel PV y la placa de datos que viene en la parte trasera del panel se ilustran en la Figura 12.



Figura 12. Panel PV policristalino y placa de datos  
Nota fuente: Foto tomada del panel real y placa de datos del fabricante

### 2.2.2 Sensores

Para la medición de las variables eléctricas y ambientales se utilizaron los sensores respectivos adecuados para las condiciones del entorno y que cumplen con el estándar IEC 61724-1, 2017, además estos sensores se alimentan (fuente de potencia dc) con el mismo voltaje del microcontrolador y a la vez se adaptan al presupuesto y a los tiempos de entrega establecidos en el cronograma realizado en la propuesta de este trabajo investigativo. Una descripción de los sensores se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Características de los sensores seleccionados

Sensor	VARIABLES de Medida	Rango	Precisión	Señal Salida	Criterio de Selección
CMP22 Piranómetro Estándar secundario	Irradiancia	0 a 1500 W/m <sup>2</sup>	±10W/m <sup>2</sup>	Análoga (7 a 14 µV/W/ m <sup>2</sup> )	Cumple con el Rango de operación y precisión esperada. La señal análoga se puede medir con el microcontrolador usado.
SHT10	Temperatura y Humedad Ambiente	T: -40 a 125 °C H: 0 a 100%	T: ±0,5°C H: ±4,5%	Digital	Por su robustez y diseño exterior metálico, es ideal para medir las señales en exteriores (intemperie).
LM35	Temperatura del Panel	-55 a 150 °C	±2°C	Análoga (10 mV/°C)	Por su facilidad de consecución e instalación sobre el panel, precio, y captura de la señal.
ACS712-20A	Corriente de máxima potencia	-20 a 20 A	±0,1A	Análoga (100 mV/A)	Cumple con la medida de corriente dc necesaria para operación de máxima potencia del panel (I <sub>mp</sub> ).
Acondiciona- miento	Voltaje de máxima potencia	0 a 50 V	±0.1V	Análoga (100 mV/V)	Cumple con la medida de voltaje dc necesaria para operación de máxima potencia del panel (V <sub>mp</sub> ).

*Nota fuente: Información tomada de la hoja de datos de cada sensor*

La potencia se calcula multiplicando el voltaje por la corriente y se mide en vatios [W], la energía se da dividiendo la potencia entre 3600 con unidades de vatios hora [Wh], la cual es acumulativa y la eficiencia [%] con respecto a la irradiancia utilizando la Ecuación 1.

$$\eta = \frac{P_t}{G_t * A} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

A [m<sup>2</sup>]: área superficial del panel de 1,93 m<sup>2</sup>

$P_t$  [W]: potencia de salida medida en el momento  $t$

$G_t$  [W/m<sup>2</sup>]: irradiancia respectiva en el momento  $t$

### 2.2.3 Control

Las señales suministradas por los sensores respectivos para medir las variables eléctricas y ambientales son procesadas por medio de un microcontrolador ATMEGA 2560, el cual provee todas las características necesarias en *hardware* y *software* para la correcta interpretación y adecuada visualización de las medidas. Las especificaciones técnicas del microcontrolador se ilustran en la Tabla 7.

*Tabla 7. Especificaciones técnicas del microcontrolador ATMEGA 2560*

Atributo del producto	Valor del atributo
Fabricante	Microchip
Serie	ATmega256x
Núcleo	AVR
Ancho de bus de datos	8 bit
Frecuencia de reloj máxima	16 MHz
Tamaño de memoria del programa	256 kB
Tamaño de RAM de datos	8 kB
Número de entradas / salidas	86 I/O
Voltaje de alimentación operativo	4,5 V to 5,5 V
Producto	MCU
Tipo de memoria de programa	Flash
Tipo de Ram de datos	SRAM
Tamaño de ROM de datos	4 kB
Tipo de ROM de datos	EEPROM
Cantidad de temporizadores/contadores	4 Timer

*Nota fuente: Información tomada de la hoja de datos del microcontrolador*

### 2.2.4 Gateway

Con las señales de los sensores interpretadas, procesadas y controladas es necesario enviar estas a dispositivos de visualización global por un canal de comunicación por medio de un Gateway o puerta de enlace. Debido a que el panel PV se encuentra a la intemperie, el canal de comunicación más idóneo para el envío de los datos fue vía GSM-GPRS, ya que por medio de una tarjeta SIM de celular con conexión al APN del proveedor de red y haciendo uso de la tecnología 2G y 3G se envían los datos por protocolo TCP/IP y HTTP a internet utilizando el módulo GSM SIM800L, el cual se comunica con el microcontrolador por medio del protocolo serial RS232 (TTL Tx/Rx). Las especificaciones técnicas del módulo GSM SIM800L se ilustran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas del módulo GSM SIM800L

Atributo del producto	Valor de atributo
Voltaje de Operación	3,4V - 4,4V DC
Nivel Lógico	3V a 5V
Consumo de corriente	(Máx.) 500 mA
Consumo de corriente	(modo de reposo) 0,7 mA
Interfaz Serial	UART
Quadband 850/900/1800/1900MHz	Se conectan a cualquier red mundial
Enviar y recibir datos	GPRS (TCP/IP, HTTP, etcetera)
Control	Comandos AT
Velocidad máxima de transmisión	85,6 Kbps
Protocolo	TCP/IP en chip
Codificación	CS1, CS2, CS3 y CS4
Velocidades de transmisión serial	Desde 1200bps hasta 115200 bps

Nota fuente: Información tomada de la hoja de datos del módulo GSM

### 2.2.5 Monitoreo IoT

La visualización de los datos se puede realizar físicamente en el sitio de ubicación del panel, ya que el dispositivo electrónico cuenta con un LCD (por sus siglas en inglés de *display* de cristal líquido) de 4x20 que muestra los valores medidos en tiempo real, los cuales se actualizan cada 2 minutos como muestra la Figura 13, y también pueden ser monitoreados mediante la tecnología del IoT en la página web del hosting adquirido para este propósito. La página web que muestra la Figura 14 está personalizada para uso exclusivo del sistema de paneles del grupo de investigación Tesla de la Universidad de Antioquia y está programada haciendo uso de los lenguajes de programación html, PHP, Javascript y CSS combinados.



Figura 13. LCD para monitoreo en sitio

Cabe resaltar que el dispositivo cuenta con reloj RTC, por lo que en el LCD se muestra la hora con los minutos del momento de la captura de los datos, los cuales son recolectados diariamente desde las 6 a. m. hasta las 6 p. m., ya que es el ciclo normal de presencia solar en Medellín, Antioquia, Colombia.

### 2.2.6 Captura de Datos

Para capturar los datos el dispositivo electrónico cuenta con una tarjeta integrada para guardar los datos en una micro SD de 2 GB de capacidad de almacenamiento, en el cual se genera un archivo de texto diario nombrado con la fecha respectiva y se guarda el registro de todos los

sensores y cálculos respectivos en todo momento con la hora asignada. También aprovechando el uso del IoT los datos generados y monitoreados son enviados a una base de datos en MySQL y pueden ser descargados de la página web descrita en la Figura 14 en formato Excel solamente seleccionando fecha inicio y fecha final de los datos requeridos, como se ilustra en la Figura 15.

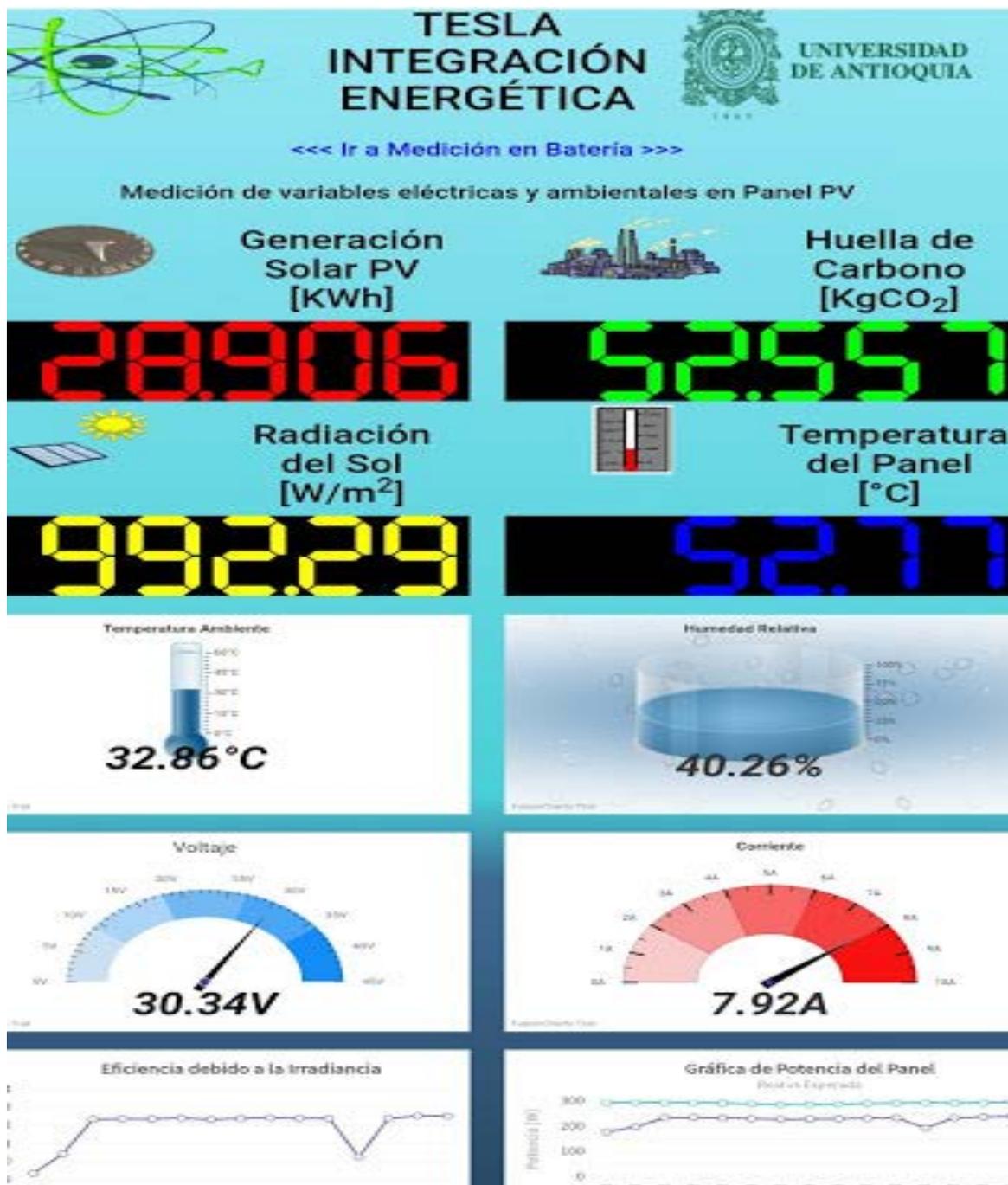


Figura 14. Página web para monitoreo IoT  
 Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>



Figura 15. Apartado en Página web para consultar los datos por fecha  
Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/#>

### 2.3 Dispositivo Electrónico para el sistema de Telemetría Web (IoT)

Como se vio con anterioridad en el Capítulo 2.2, para el sistema de telemetría se desarrolló el dispositivo electrónico Tesla-IoT-UdeA\_01, el cual fue encapsulado en una caja plástica que cumple la norma IP65 para exteriores y contiene todo el hardware y software mencionados anteriormente. La caja fue instalada en el sitio, debajo del panel para protegerlo un poco del agua y otras inclemencias del clima y consta de todos los sensores y elementos para el procesamiento, captura, transmisión y almacenamiento de los datos y de los componentes respectivos como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Dispositivo electrónico para IoT

La Figura 17 muestra el detalle del dispositivo completo Tesla-IoT-UdeA\_01 pieza por pieza.

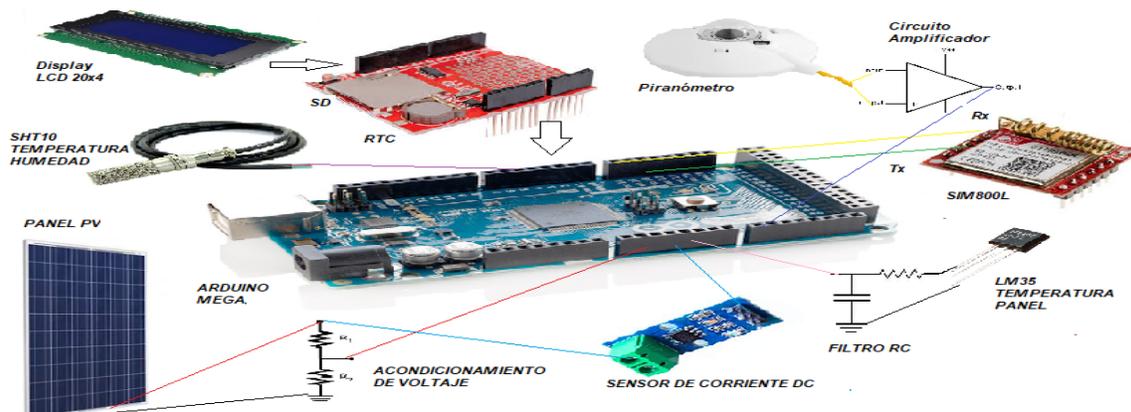


Figura 17. Desglose del dispositivo IoT

Nota fuente: Elaboración propia

El microcontrolador ATmega 2560 está embebido en una tarjeta de programación Arduino, para programarlo se hace uso de un IDE o entorno de desarrollo gratuito disponible para casi todas las plataformas (Windows, Linux, Mac), y el lenguaje de programación utilizado es *Wiring / Processing*, el cual es sencillo y se basa en C en Java. Como se aprecia en la Figura 17, el dispositivo consta de un Arduino MEGA como tarjeta principal, el cual es alimentado a 5 voltios en corriente directa (dc por sus siglas en inglés), este tipo de tarjeta tiene la particularidad de poder conectar verticalmente otras tarjetas *shield* de conectores macho a las ranuras tipo hembra que tiene a los lados y en la parte posterior al conector serial y de alimentación, aprovechando esta particularidad se hace la conexión de la *shield* de SD y RTC, en la cual también se hace la conexión para el sensor LM35, el cual se usa para medir la temperatura del panel en grados Celsius, por dicha razón, está ubicado directamente en el panel PV requiriendo de cable trenzado y apantallado para disminuir ruido y pérdidas de voltaje y, por ende, también es necesario de un filtro RC pasa bajos en la conexión con la entrada analógica respectiva del microcontrolador. Se diseña otra *shield* para conectar encima de ésta y en la cual se ubican los componentes electrónicos necesarios para conectar tanto el sensor SHT10 de temperatura y humedad ambiente, el acondicionamiento de voltaje y el sensor para medir la corriente presente en el panel, el LCD y un interruptor selector para configurar por medio de comunicación serial y vía comandos AT la tarjeta SIM800L de comunicación GPRS de los datos, la cual está ubicada en otra *shield* conectada en la parte posterior del Arduino MEGA con una tarjeta conversor dc-dc para bajar los 5 voltios a 4.2 voltios necesarios para el correcto funcionamiento de la SIM800L, y junto a ésta, se encuentra el circuito amplificador de la señal proveniente del piranómetro. Todo este dispositivo está encapsulado en caja plástica que cumple con el estándar IP65 para exteriores (ANSI & IEC, 2004), ya que está instalado en la intemperie en el sitio de los paneles.

## 2.4 Conclusiones

En este capítulo se presentó el desarrollo de un dispositivo electrónico compuesto por el hardware y software necesarios para sensar y capturar los datos respectivos a las variables ambientales y eléctricas presentes en un panel PV para la generación de energía eléctrica.

Para la elección de los componentes electrónicos, sensores, microcontrolador y otros se tuvo en cuenta la facilidad de adquisición de los mismos, precio y características técnicas que se acomodan a la operación en la intemperie y del entorno que rodea al panel PV.

Los datos pueden ser monitoreados tanto en sitio como remotamente, para esto se optó por enviar los datos a una página web aprovechando los beneficios del IoT y el canal de comunicación elegido fue vía GPS/GPRS por medio de una tarjeta SIM de un operador con cobertura en el sitio, ya que el panel PV está ubicado en exteriores y esta opción es la más adecuada para cumplir dicha labor.

Los datos son guardados tanto en el dispositivo electrónico por medio de una SD como vía remota en una base de datos, los cuales pueden ser descargados desde la página web en un archivo de Excel solamente seleccionando fecha inicio y fecha final de los datos solicitados.

Se muestran los beneficios del IoT para el monitoreo en tiempo real y desde cualquier lugar del mundo de todas las variables ambientales y eléctricas presentes en el proceso de generación de energía eléctrica del panel PV, lo cual sirve para ver el rendimiento efectivo y tomar decisiones con respecto al mantenimiento o reparación del panel o en otra parte del sistema PV.

## 2.5 Referencias Bibliográficas

- Lee I. and Lee K. (2015) “*The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises,*” *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, jul. 2015
- International Electrotechnical Commission IS/IEC 61724-1 (2017). *Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data exchange and Analysis.*
- International Energy Agency IEA. (2014). *Technology Roadmap. Solar Photovoltaic Energy.* Recuperado de: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf).
- Madeti, S. R., & Singh, S. N. (2017). Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1180–1207. Doi:10.1016/j.rser.2016.09.088

### **3. Modelado estadístico multivariable para la potencia de salida del panel con respecto a las variables de entrada: irradiancia solar, temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad**

#### **Resumen**

Con los datos recolectados en tiempo real por el sistema durante doce días consecutivos, tomando datos cada minuto (suficientes para obtener datos con que obtener el modelado), entre las siete de la mañana y cinco de la tarde por cada día (ventana solar en la cual existe mayor probabilidad para obtener valores de irradiancia mayores de cero), se procedió a hacer el modelado de la potencia de salida con respecto a la irradiancia y un factor de corrección dependiente de la temperatura del panel, temperatura ambiente y la humedad, las cuales son las variables de entrada al sistema. El modelado de la potencia se hizo por medio del software estadístico STATA, a través de una regresión, y se ajustaron los coeficientes de la ecuación por medio del método sistemático de iteraciones sucesivas para minimizar el error y la capacidad predictiva del ajuste del modelo en una forma gráfica. La forma del factor de corrección ambiental propuesto con las variables ambientales que rodean el panel (temperatura ambiente y del panel, y la humedad) se determinó con los valores de desviación estándar de las variables de entrada involucradas en el factor de corrección, buscando en éste una desviación estándar mínima cercana a uno y observando el comportamiento de los datos por medio de las gráficas de cada variable de entrada con respecto a la potencia de salida del panel PV.

#### **3.1 Introducción**

La potencia de salida se calcula con la corriente (I) y el voltaje (V) suministrado por el panel PV, ( $P = VI$ ) (Tiwari et al., 2016), pero estas variables dependen de varios factores principales clasificados en: condiciones ambientales, como la irradiancia solar (G), la temperatura en las celdas, temperatura ambiente y humedad alrededor del panel entre otras (Jager et al., 2014), al igual que de la tecnología empleada en la fabricación del panel para absorber la irradiancia y la carga que se consume la energía eléctrica producida (IRENA, 2012).

La carga debe de superar la potencia del panel para forzarlo a que éste siempre esté en un punto de máxima potencia (MPP), para que brinde la máxima eficiencia energética posible. El MPP funciona con un convertidor de alta eficiencia de corriente directa a corriente directa que presenta una potencia de salida óptima y adecuada, o sea un regulador de carga (Lay-Ekuakille et al. 2018).

El análisis de regresión consiste en métodos gráficos y analíticos para explorar las relaciones entre una variable, denominada variable de respuesta, y una o más variables, llamadas

variables predictoras. El análisis de regresión se distingue de otros tipos de análisis estadísticos en que el objetivo es expresar la variable de respuesta en función de las variables predictoras y puede ayudar en la confirmación o refutación de un modelo causal, pero el modelo en sí debe ser concebido por consideraciones teóricas. Se requiere un análisis de correlación si se desea evaluar la variabilidad simultánea de una colección de variables. La especificación del modelo es de importancia crítica en los análisis de regresión cuyo objetivo es la evaluación del valor relativo de las variables predictoras individuales en la predicción de la respuesta (Gunst & Mason, 1980).

### 3.2 Análisis de los Datos

Los datos se tomaron durante doce días consecutivos (desde el 2/10/2019 hasta el 13/10/2019) en el mismo periodo de tiempo constituido entre las siete de la mañana y cinco de la tarde, capturando datos cada minuto aproximadamente (suficientes para obtener datos con que obtener el modelado), sin importar como fue el transcurso del día y los fenómenos naturales y artificiales que se hayan presentado sobre el panel limpio. La Figura 18 muestra la irradiancia de algunos de esos días tomados al azar dónde se puede ver claramente la diferencia entre ellos, pero también se puede notar que se abarcó todo el espectro posible de valores de irradiancia.

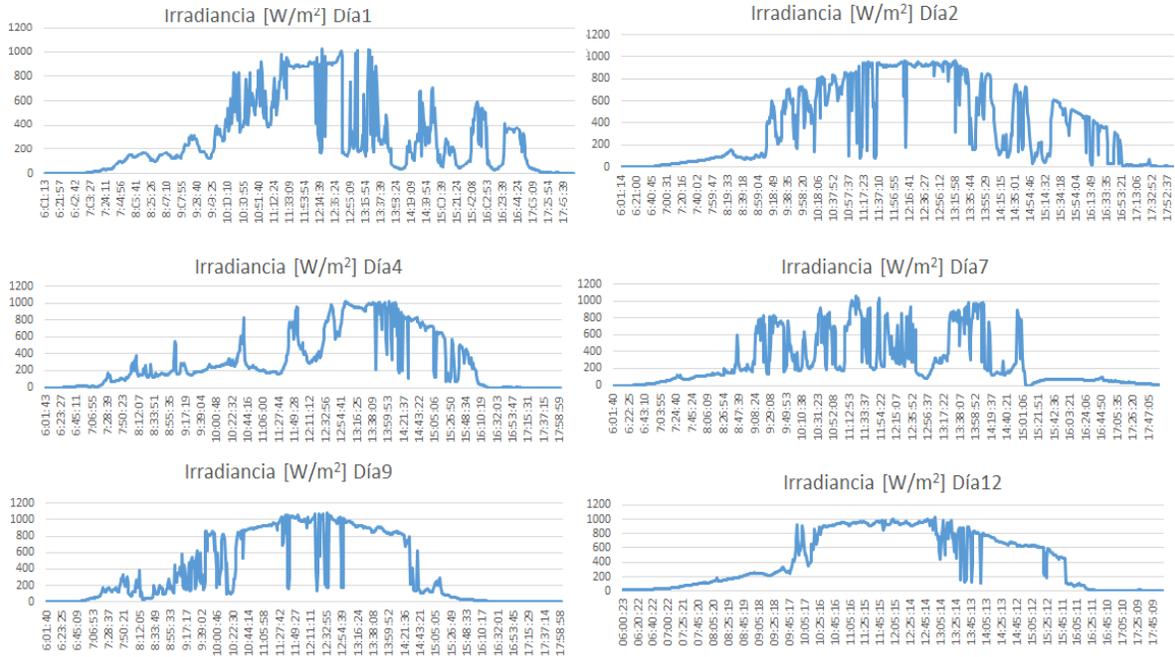


Figura 18. Gráficas de Irradiancia de algunos días de toma de datos

Los datos tomados en total fueron de 6.080 observaciones que corresponden a las variables de entrada, las cuales son: irradiancia, temperatura del panel, temperatura ambiente y

humedad; y las variables de salida, las cuales son: voltaje y corriente del panel en máxima potencia, las cuales multiplicadas permiten calcular la potencia de salida del panel. La Tabla 9 muestra la estadística descriptiva de los datos correspondientes a las variables de entrada.

*Tabla 9. Estadística descriptiva de las variables*

<b>Variables de Entrada</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Irradiancia [W/m<sup>2</sup>]</b>	6.080	471,60	337,32	0,60	1209,29
<b>Temperatura del Panel [°C]</b>	6.080	37,83	9,09	15,91	55,35
<b>Temperatura Ambiente [°C]</b>	6.080	28,48	3,59	16,3	35,73
<b>Humedad [%]</b>	6.080	51,87	12,01	30,01	92,77
<b>Potencia [W]</b>	6.080	112,15	80,78	0,02	261,1

*Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA*

El valor alto de la desviación estándar de la irradiancia presentado en la Tabla 9, se presenta debido a la alta variabilidad en los factores ambientales presentes tanto durante el día, como en cambio de días en el clima de Medellín, ya que es un ambiente tropical, como se evidencia en las gráficas de la Figura 18 (no se observan días con igual comportamiento de la irradiancia), donde se observa el comportamiento cambiante de la irradiancia a lo largo del día como en días diferentes consecutivos.

La Tabla 10 muestra la correlación entre cada una de las variables de entrada.

*Tabla 10. Correlación entre cada una de las variables de entrada*

<b>Variables de Entrada</b>	<b>Irradiancia</b>	<b>Temperatura del Panel</b>	<b>Temperatura Ambiente</b>	<b>Humedad</b>
<b>Irradiancia</b>	1,00			
<b>Temperatura del Panel</b>	0,74	1,00		
<b>Temperatura Ambiente</b>	0,55	0,89	1,00	
<b>Humedad</b>	-0,47	-0,82	-0,95	1,00

*Nota fuente: Datos arrojados de la correlación en STATA*

De la Tabla 10 se puede deducir que las variables tienen alta correlación entre ellas, lo cual es lo esperado ya que a mayor irradiancia solar mayor es la temperatura ambiente y la temperatura del panel y por ende menor es la humedad relativa ya que esta tiene una relación inversa con las demás variables que son directamente proporcionales entre sí.

Para interpretar mejor los datos y el comportamiento de la variable dependiente con respecto a las variables independientes se grafica la salida con respecto a cada entrada, como se ilustra en las Figuras 19, 20, 21, y 22.

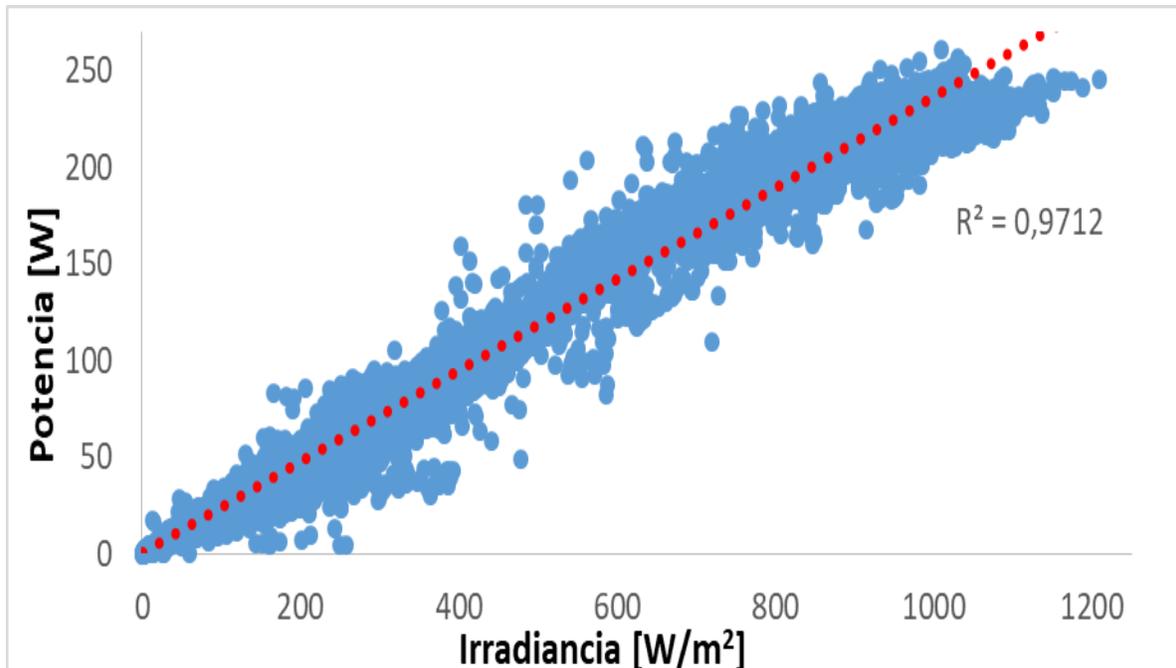


Figura 19. Tendencia de la Potencia con respecto a la Irradiancia

De la gráfica se puede notar claramente una tendencia cuasi lineal y directamente proporcional entre la potencia y la irradiancia con valor de  $R^2$  muy alto.

Se sigue con la potencia con respecto a la temperatura del panel.

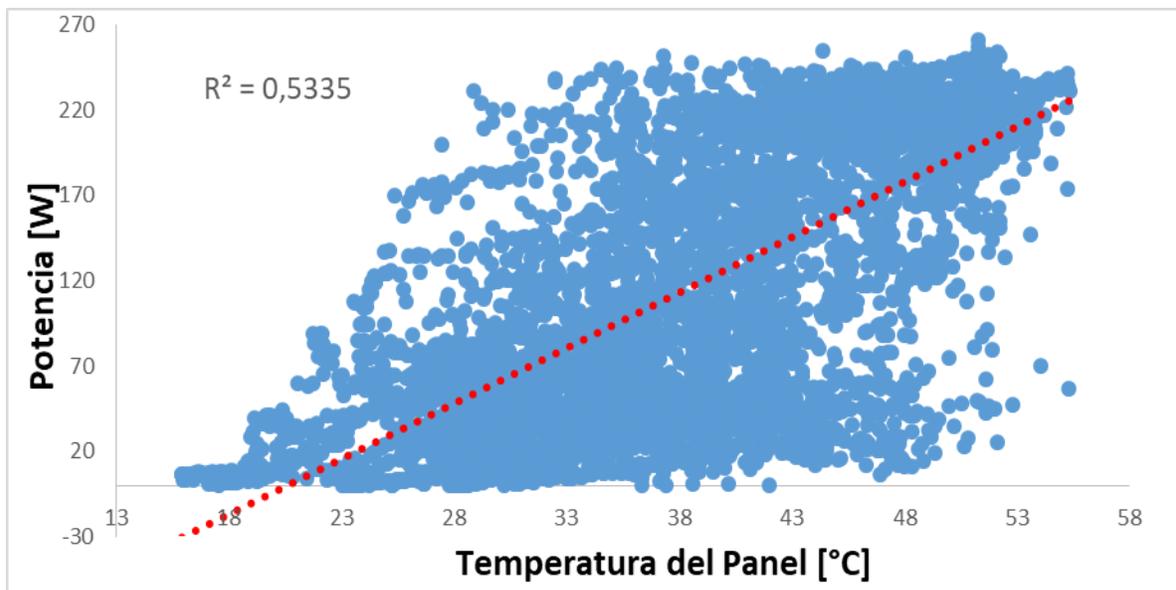


Figura 20. Tendencia de la Potencia con respecto a la Temperatura del Panel

Aunque es difícil observar un comportamiento evidente entre la potencia y la temperatura del panel, aparentemente existe una relación directamente proporcional con un valor de  $R^2$  que lo sugiere.

Se procede a ver el comportamiento de la potencia con respecto a la temperatura ambiente.

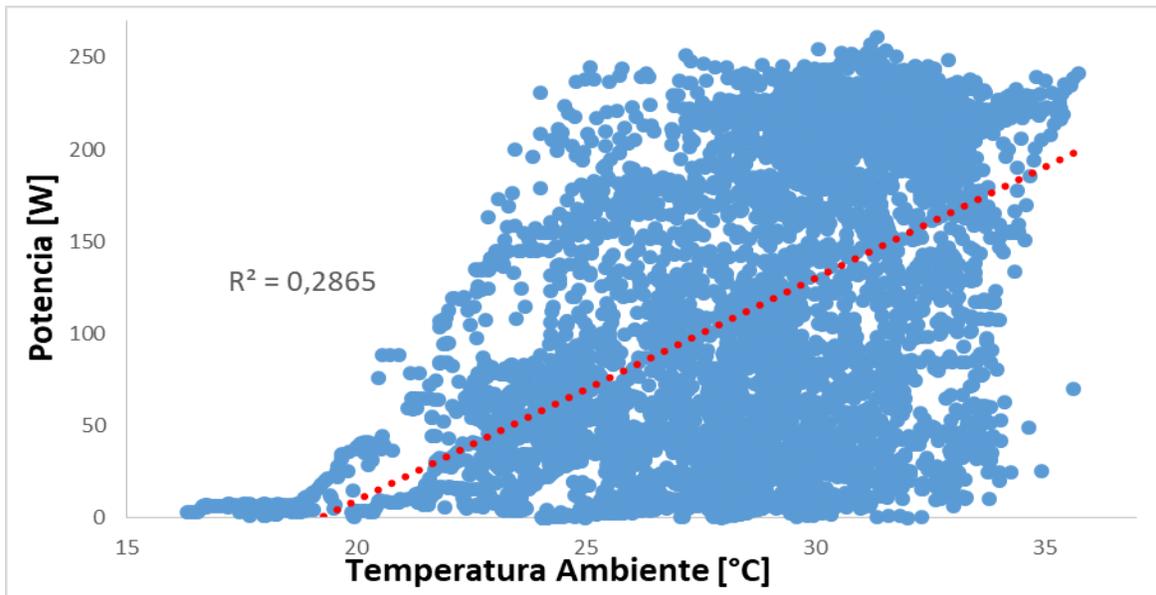


Figura 21. Tendencia de la Potencia con respecto a la Temperatura Ambiente

Según la gráfica tampoco se observa una clara dependencia de la potencia con respecto a la temperatura ambiente, pero la tendencia sugiere una relación directamente proporcional, lo cual puede ser posible ya que se presenta un clima tropical.

Por último, se grafica la potencia con respecto a la humedad.

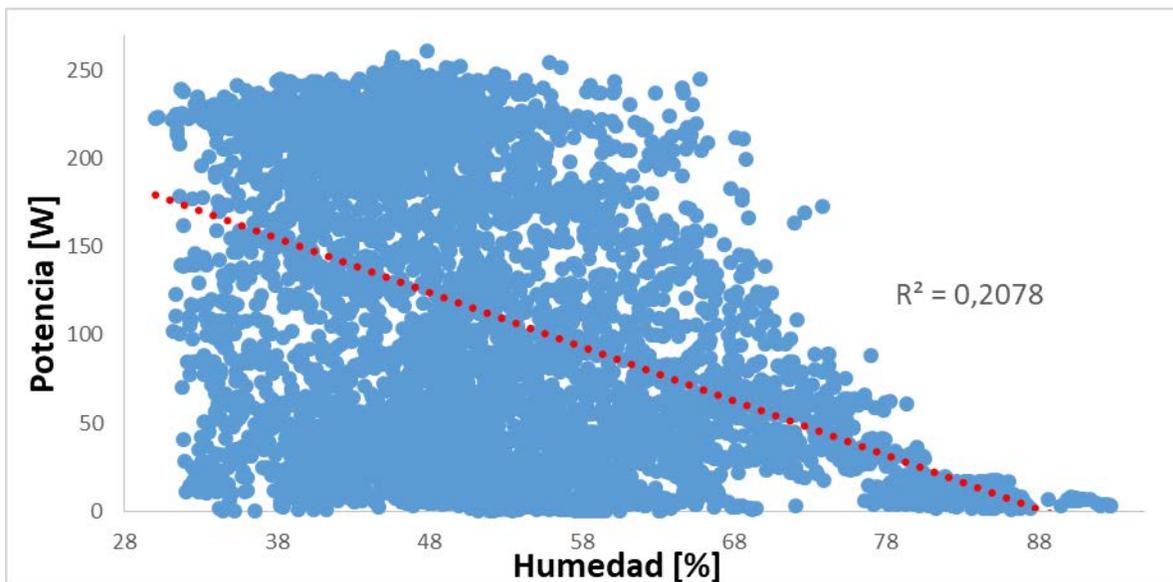


Figura 22. Tendencia de la Potencia con respecto a la Humedad

Como muestra la gráfica, podría existir alguna tendencia inversamente proporcional entre la potencia y la humedad relativa, pero es muy difícil afirmar dicha tendencia.

En conclusión, los datos permiten afirmar que la potencia del panel PV depende principalmente de la irradiancia en una relación directamente proporcional cuasi lineal, aunque también sugieren que dicha potencia tiene una relación directa con la temperatura del panel y la temperatura ambiente. Sin embargo, el análisis de datos también hace alusión a una relación inversa entre la potencia y la humedad, principalmente en valores de humedad aproximadamente mayores del 70%, lo cual hace referencia a una pequeña dependencia de la potencia con la humedad, lo cual concuerda con el estudio de Ettah, et al., en el 2012, presentado en la introducción general de este informe. Estas relaciones son coherentes con lo hallado en estudios anteriores como por ejemplo el realizado por: Paudyal & Shakya en el 2016.

### 3.3 Modelado de los Datos

Aunque los datos fueron tomados por doce días consecutivos en un periodo de tiempo de siete de la mañana a cinco de la tarde por día, con toma de datos aproximadamente de un minuto, en el modelo no se tuvo en cuenta la variable tiempo, debido a que la producción energética del panel no depende de dicha variable, si no que depende de la irradiancia solar principalmente. La irradiancia puede tener cierta dependencia del tiempo, donde se puede dar que a ciertas horas específicas los rayos solares son más fuertes que a otras horas en particular, pero esta condición no se cumple siempre y es variable dependiendo de la ubicación geográfica.

Por lo visto anteriormente en el análisis de los datos y con la conclusión de que la potencia depende principalmente de la irradiancia, se realizan múltiples regresiones en el paquete estadístico STATA (con los datos de potencia como variable dependiente y los datos de irradiancia como variable independiente), tanto lineales como cuadráticas y exponenciales, llevando a cabo las simulaciones respectivas, se concluye que el modelado exponencial para la potencia de salida con respecto a la irradiancia es el más adecuado (esta conclusión se comprueba en el apartado 3.5), y es presentado en la forma de la Ecuación 2:

$$P = a * G^b + \varepsilon \quad (2)$$

Dónde:

*P*: Potencia modelada de salida del panel PV.

*G*: Irradiancia respectiva en cada momento.

*a*: Intercepto, el cual es el valor que toma la potencia modelada para valor unitario de irradiancia, es decir, para cuando el valor del piranómetro es de uno, la potencia modelada tomaría este valor más un valor  $\varepsilon$  debido a los factores ambientales que rodean el panel.

*b*: Coeficiente de valía de la irradiancia, el cual corresponde a la elasticidad, o sea el cambio porcentual de la variable dependiente con respecto a la variable independiente.

$\varepsilon$ : Factor diferencial entre la potencia real y la modelada. En ausencia de irradiancia, la potencia presenta este valor debido a los factores ambientales que rodean el panel.

Los parámetros a, b y c se calculan con los resultados arrojados por la regresión realizada en el paquete estadístico respectivo (STATA).

**Tabla 11.** Regresión entre la Potencia y la Irradiancia

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	6,080
Model	7261.54312	1	7261.54312	F(1, 6078)	>	99999.00
Residual	326.467297	6,078	.053712948	Prob > F	=	0.0000
Total	7588.01042	6,079	1.24823333	R-squared	=	0.9570
				Adj R-squared	=	0.9570
				Root MSE	=	.23176

lnP	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
lnG	.9418599	.0025616	367.68	0.000	.9368383 .9468816
_cons	-1.089907	.0149548	-72.88	0.000	-1.119224 -1.06059

Nota fuente: Datos arrojados por la regresión en STATA

De la Tabla 11 se deduce que según la prueba del estadístico *t student* en las variables estudiadas es menor que el 5%, por lo tanto, son estadísticamente viables y, además presenta un R<sup>2</sup> alto y bajo error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés).

Según los datos arrojados de los coeficientes por la regresión se tiene que:

$$\ln(P) = 0,94 * \ln(G) - 1,09 \quad (3)$$

Aplicando propiedades de los logaritmos a la Ecuación 3, y moldeando a la Ecuación 2, el resultado es expresado en la Ecuación 4.

$$P = 0,34 * G^{0,94} + \varepsilon \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon$  es el factor diferencial entre cada valor de la potencia real y la potencia modelada, el cual puede ser considerado como un factor de corrección calculado por medio de las otras variables ambientales circundantes al panel como son la temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad relativa.

El factor diferencial fue calculado de la resta entre la potencia real ( $P_{real}$ ) y la potencia modelada ( $P_{mod}$ ) como lo indica la Ecuación 5.

$$\varepsilon = P_{real} - P_{mod} \quad (5)$$

El factor de corrección ( $F_c$ ) se modeló empíricamente, el cual después de haber probado todas las combinaciones posibles lineales entre las otras variables presentes en el sistema: temperatura ambiente, temperatura del panel y humedad relativa, y habiendo realizado todas las simulaciones previas, se llegó a la conclusión de que el modelo presentado en la Ecuación 6 fue el que más se ajustó a dicho factor. Este factor se explica tomando en cuenta las gráficas

entre cada variable de entrada con la potencia, donde se observa la dependencia directamente proporcional entre las temperaturas y la potencia e inversamente proporcional de la humedad con la potencia y buscando que entre estas variables la variabilidad del Fc sea aproximadamente de uno, lo cual se observa que en la estadística descriptiva de los datos, donde los valores de desviación estándar de cada una de las variables extraídos de la Tabla 6 dan como resultado que el factor de corrección se moldee como muestra la Ecuación 6.

$$Fc = \frac{Tp+Ta}{h} \quad (6)$$

Dónde:

Fc: Factor de Corrección [°C/%]

Tp: Temperatura del Panel [°C]

Ta: Temperatura Ambiente [°C]

H: Humedad [%]

Aplicando una regresión lineal entre el valor del factor diferencial ( $\varepsilon$ ) como variable dependiente, y el factor de corrección (Fc) como variable independiente, se tiene los resultados de la Tabla 12 arrojados por STATA.

**Tabla 12.** Regresión lineal entre el factor diferencial y el factor de corrección

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	6,080
Model	82181.6415	1	82181.6415	F(1, 6079)	=	405.46
Residual	1232145.57	6,079	202.688858	Prob > F	=	0.0000
Total	1314327.21	6,080	216.172238	R-squared	=	0.0625
				Adj R-squared	=	0.0624
				Root MSE	=	14.237
$\varepsilon$	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Fc	2.486639	.1234924	20.14	0.000	2.24455 2.728727	

Nota fuente: Datos arrojados por la regresión en STATA

Aunque el  $R^2$  es muy bajo, las variables son estadísticamente válidas y el error cuadrático medio (MSE) también es relativamente bajo, por lo que se puede expresar el factor de corrección, según los coeficientes arrojados por la regresión de la forma que muestra la Ecuación 7.

$$\varepsilon = 2,49 * Fc \quad (7)$$

Reemplazando la Ecuación 7 en la Ecuación 4, se tiene una ecuación inicial modelada para la potencia de la forma de la Ecuación 8.

$$P_m = a * G^b + c * Fc \quad (8)$$

Dónde:

$P_m$  [W]: Potencia Modelada.

$a$  [m<sup>2</sup>]: Constante medida en metros cuadrados con valor de 0,34.

$G$  [ $W/m^2$ ]: Irradiancia.

$b$ : Constante de potencia de la irradiancia, sin unidades de medida con un valor de 0,94.

$c$  [ $W\% / ^\circ C$ ]: Constante del factor de corrección, con un valor de 2,49.

$Fc$  [ $^\circ C / \%$ ]: Factor de corrección, el cual depende de la temperatura del panel, temperatura ambiente y la humedad relativa.

Reemplazando los valores anteriormente mencionados en la Ecuación 8 se obtiene la Ecuación 9.

$$P_m = 0,34 * G^{0,94} + 2,49 * Fc \quad (9)$$

Despejando la potencia de la Ecuación 1 del Capítulo 2 se obtiene que la ecuación teórica para la potencia se expresa en la Ecuación 10.

$$P_t = \frac{\eta * G * A}{100} \quad (10)$$

Tomando valores de la placa de datos del panel se tiene que:

$P_t$  [W]: Potencia teórica de salida del panel.

$A$  [ $m^2$ ]: área del panel de 1,93  $m^2$ .

$G$  [ $W/m^2$ ]: Irradiancia.

$\eta$  [%]: eficiencia del panel, cuyo valor es de 15,48%.

Comparando todas las potencias (Real vs Modelada vs Teórica) contra la irradiancia se obtiene la siguiente gráfica:

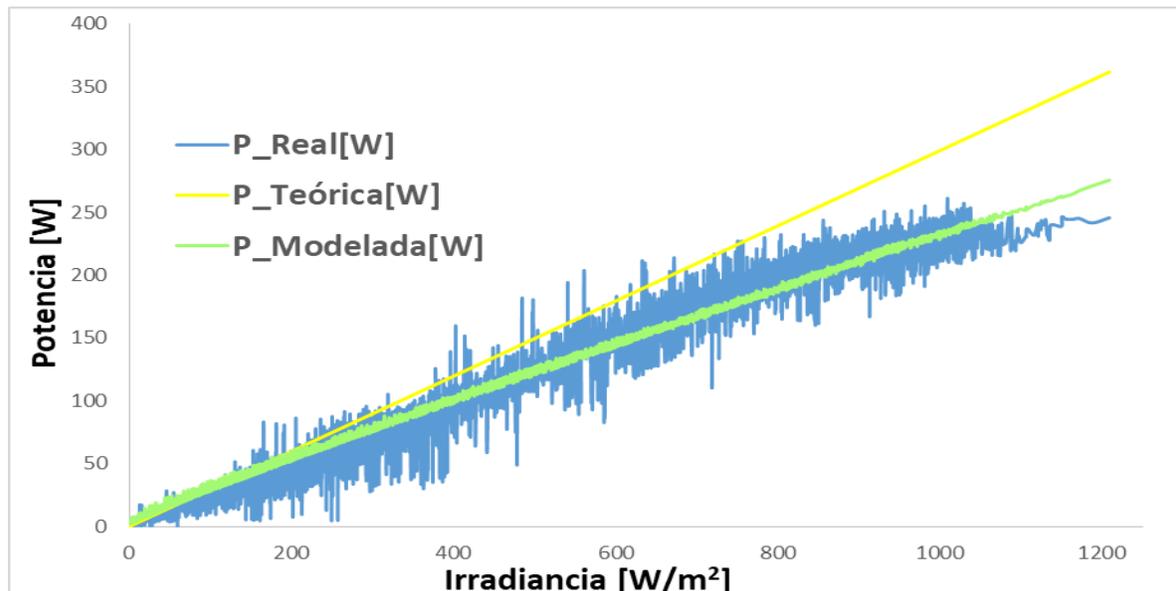


Figura 23. Potencia Real, Teórica y Modelada inicial Vs la Irradiancia

Como muchos de los datos de la potencia real fueron tomados con fenómenos descritos en el Capítulo 1 que se dan con menor frecuencia en la realidad como son el sombreado natural y

artificial de forma parcial y total, tanto en el panel como en el piranómetro, se hacen los respectivos ajustes a la ecuación modelada para hacer más mínima la diferencia entre la potencia real ideal con el panel limpio y la potencia modelada, principalmente en valores bajos de irradiancia menores de  $100 \text{ W/m}^2$  que es en donde más grande se observa la diferencia. Aplicando alrededor de cuarenta simulaciones para lograr robustez, en las cuales se hicieron estimaciones de ajustes en los coeficientes a, b, y c de la Ecuación 8, por medio del método sistemático de iteraciones sucesivas para minimizar el error (apartado 3.4) y la capacidad predictiva del ajuste del modelo en una forma gráfica, se llegó a la Ecuación 11 modelada finalmente, siendo esta ecuación, la que presentó mejor comportamiento comparada con todas las otras estimaciones, logrando así mejorar las características de significancia de los coeficientes principalmente para los valores extremos (bajos y altos) de irradiancia sin perder significancia en los valores medios de irradiancia, como se ilustra en la gráfica de la Figura 24.

$$P_m = 0,46 * G^{0,9} + 0,31 * Fc \quad (11)$$

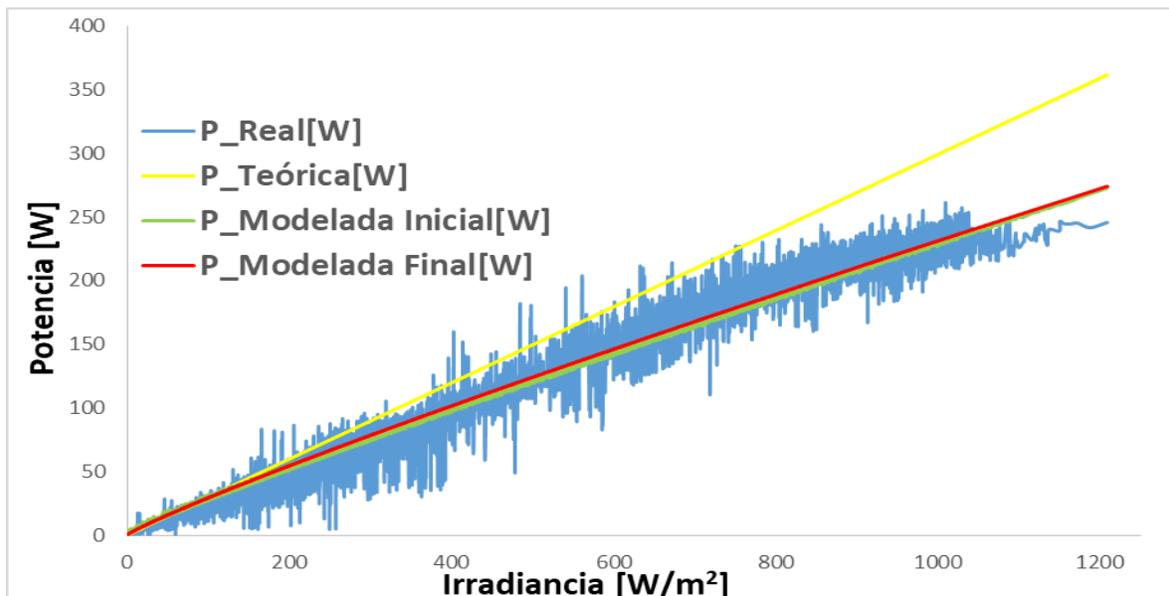


Figura 24. Potencia Real, Teórica, y Modelada Inicial y Final Vs la Irradiancia

### 3.4 Método sistemático de iteraciones sucesivas para minimizar el error

La Figura 24 muestra gráficamente la capacidad del ajuste de la potencia modelada final (Ecuación 11), con el cambio por medio de iteraciones sucesivas de los coeficientes a, b y c de la potencia modelada inicialmente con los resultados arrojados por la regresión exponencial (Ecuación 9), sobre la potencia real medida. Para realizar dichas iteraciones sucesivas se realizó un método sistemático que consiste en realizar pequeños cambios en los coeficientes a b y c presentes en la Ecuación 8, hasta lograr minimizar lo máximo posible el

error relativo porcentual promedio (ERP%) calculado con la Ecuación 12. El ERP% inicial se calculó con los valores de los coeficientes (a, b y c) obtenidos en la Ecuación 9, y a partir de esos valores se empezó a realizar pequeños cambios partiendo del valor de a y mirando que el comportamiento del valor porcentual del error fuera reduciendo, después se procedió de igual forma con b y luego con c, después se realizó cambios mínimos de combinaciones de los tres al mismo tiempo.

$$ERP\% = \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{mi} - P_{ri}}{P_{ri} * n} \right| * 100 \quad (12)$$

Dónde:

*ERP%*: Error relativo porcentual promedio

*i*: Corresponde a cada dato de la muestra

*P<sub>ri</sub>*: Potencia Real para el dato i

*P<sub>mi</sub>*: Potencia modelada para el dato i

*n*: Número de datos de la muestra (6080 observaciones)

Los resultados obtenidos del ERP% para la potencia modelada inicial (Ecuación 9) y la potencia modelada final (Ecuación 11) se muestran en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Resultados del ERP% para potencia modelada inicial y final

Valores	Potencia Modelada Inicial	Potencia Modelada Final
a	0,34	0,46
b	0,94	0,9
c	2,49	0,31
ERP%	35,54	26,82

Aunque el valor del ERP% es relativamente alto, se ultimó que, con estos valores encontrados de a, b y c, combinados conjuntamente con la parte gráfica se vio un comportamiento suavizado y ajustado de la curva tanto en los valores extremos, como en los valores medios de la irradiancia. Se deja para consideraciones futuras más pruebas de iteraciones sucesivas sistemáticas o con cualquier otro método más asertivo en dichos términos para disminuir el ERP% y tener un ajuste más preciso de la curva.

### 3.5 Comparación entre modelados de la curva (lineal, cuadrática y exponencial)

Como se mencionó anteriormente, en la gráfica de la Figura 24 se observa que la potencia real vs la irradiancia tiene un comportamiento cuasi lineal, por lo cual, para corroborar la valía de la Ecuación 11, se modeló como motivo de comparación para la potencia de salida

del panel PV, una ecuación lineal ( $P_{m\text{lineal}}$  Ecuación 13), y otra cuadrática ( $P_{m\text{cuadrática}}$  Ecuación 14), conservando el mismo factor de corrección ( $F_c$ ).

$$P_{m\text{lineal}} = 0,24 * G - 0,46 + 0,31 * F_c \quad (13)$$

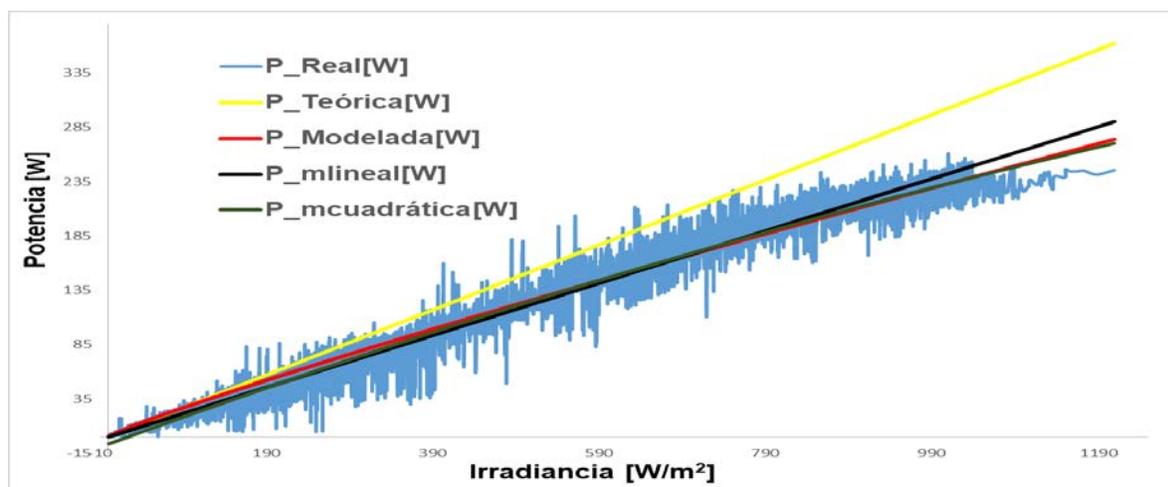
$$P_{m\text{cuadrática}} = -4,22 * 10^{-5} * G^2 + 0,28 * G - 7,08 + 0,31 * F_c \quad (14)$$

Utilizando la Ecuación 12, se calcula el error relativo promedio porcentual para cada potencia modelada, es decir la potencia exponencial, lineal y cuadrática; las cuales están expresadas por las Ecuaciones 11, 13 y 14 respectivamente y cuyos valores de ERP% encontrados se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14.** ERP% para las potencias modeladas (exponencial, lineal y cuadrática)

Potencias	ERP% [%]
Exponencial (Ecuación 11)	26,82
Lineal (Ecuación 13)	19,12
Cuadrática (Ecuación 14)	56,35

La Tabla 14, muestra de una forma numérica que la potencia modelada lineal presenta menor error relativo promedio porcentual en comparación con la cuadrática y la exponencial, pero observando la Figura 24 se nota como la potencia modelada exponencial se ajusta a la potencia real, la cual parece tener un comportamiento cuasi lineal, por lo que fuera de la diferencia numérica del ERP%, también es importante observar y comparar el comportamiento de las ecuaciones (1, 11, 13 y 14) en una forma gráfica, las cuales se presentan en la figura de la Gráfica 25, donde se muestra la diferencia de cada una de las ecuaciones modeladas, tanto lineal, como cuadrática y exponencial, con la teórica en los datos tomados para la potencia con respecto a la irradiancia.



*Figura 25. Diferentes estimaciones para la potencia modelada (lineal, cuadrática y exponencial)*

Como se observa en la gráfica de la Figura 25, el modelo lineal para la potencia se comporta muy bien en valores bajos y medios de la irradiancia, y es por este motivo, por el cual presenta el menor ERP%, ya que en los días que se tomaron los datos se presentó más este rango de valores de irradiancia (bajos y medios), pero fue descartado debido a que a medida que la irradiancia va aumentando a los valores más altos, la potencia esperada se va alejando mucho de la real (lo cual también pasa con la potencia teórica, la cual también es lineal). Por otra parte, el modelo cuadrático se ajusta adecuadamente a los valores medios y altos de la irradiancia, pero se descarta ya que en los valores bajos de irradiancia se aleja de los valores reales de potencia, de tal forma que presenta valores negativos de potencia, los cuales son irreales. También se modeló con polinomios de otros órdenes buscando el mejor ajuste para poder explicar adecuadamente el fenómeno, sin embargo, los resultados dan cuenta de que la mejor aproximación corresponde a la exponencial, la cual fue planteada y utilizada en este trabajo de investigación.

### **3.6 Conclusiones**

La potencia de salida del panel depende principalmente de la irradiancia en una forma exponencial, cuasi lineal como se observa en la Figura 19 y se corrobora con la Figura 25.

El factor de corrección ( $F_c$ ) se modela según la Ecuación 6, dependiendo de la temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad que rodea al panel, el cual ayuda a disminuir un poco la diferencia entre la potencia medida y la potencia modelada.

La potencia se modela con la Ecuación 11, para observar la salida del panel policristalino de 300 vatios en una forma ideal de trabajo, o sea limpio y sin alteraciones de fenómenos naturales y artificiales circundantes en el panel.

Los ajustes a la potencia modelada para minimizar la diferencia con la potencia medida y suavizar más la curva se realizaron con el método sistemático de iteraciones sucesivas hasta observar que en valores extremos (bajos y altos) de irradiancia la potencia modelada no superara por mucho a la real. Este comportamiento es interpretado a través del conjunto de datos tomados, para una mayor cantidad de datos o dispersión de los mismos, se esperaría el mismo comportamiento de seguir un patrón similar.

El método sistemático de iteraciones sucesivas se llevó a cabo haciendo pequeños ajustes en los términos  $a$ ,  $b$  y  $c$  de la Ecuación 8, para mejorar la curva en los valores extremos, tanto bajos como altos de la irradiancia, sin afectar la curva en los valores medios, y para minimizar el error relativo promedio porcentual. Los valores de partida están registrados en la Ecuación 9, llegando definitivamente a los valores de la Ecuación 11, con los cuales la curva tiene un mejor comportamiento con respecto a la potencia real. Se deja para

consideraciones futuras más pruebas de simulación en dichos términos para un ajuste más preciso de la curva.

La potencia teórica se aleja mucho de la modelada y la real, según muestran las Figuras 23, 24 y 25, ya que esta supone un valor fijo de eficiencia del panel, y esto en la realidad no es tan cierto, debido a que se trata de un panel que está fijo, y en el cual, la potencia no solo depende de la irradiancia incidente.

### 3.7 Referencias Bibliográficas

- Ettah E B, Udoimuk A B, Obiefuna J N, Opara F E (2012). The Effect of Relative Humidity on the Efficiency of Solar Panels in Calabar, Nigeria. *Universal Journal of Management and Social Sciences*, Vol. 2, No.3, pp. 8-11
- Gunst, R., Mason, R. (1980). *Regression Analysis and its Application. A Data-Oriented Approach*. Boca Raton: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780203741054>
- International Renewable Energy Agency IRENA. (2012). "Renewable Energy technologies: cost analysis series" vol. 1, 2012, issue 4/5.
- Jager, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., Swaaij, R. A. C. M. M. van, & Zeman, M. (2014). *Solar Energy Fundamentals, Technology and Systems*. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. Doi:10.1007/SpringerReference\_29746
- Lay-Ekuakille, A., Ciaccioli, A., Griffio, G., Visconti, P., & Andria, G. (2018). Effects of dust on photovoltaic measurements: A comparative study. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 113, 181–188. Doi:10.1016/j.measurement.2017.06.025
- Lee I. and Lee K. (2015). "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, jul. 2015
- Paudyal, B. & Shakya, S. (2016). *Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu*. *Solar Energy*. 135. 103-110. 10.1016/j.solener.2016.05.046.
- Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy. Theory, Analysis and Applications*. Pensacola, USA: Springer. Doi: 10.1007/978-981-10-0807-8

## **4. Validación del modelo estadístico para el panel PV limpio, contrastando con emulación de lluvia, polvo y sombreado**

### **Resumen**

El modelo propuesto en el Capítulo 3, Sección 3.3, para la potencia de salida del panel PV es del tipo determinístico y probabilístico, el cual es validado físicamente para el panel limpio y contrastado con cada uno de los montajes experimentales del Capítulo 1, por lo cual la potencia real varía con respecto a cada experimento realizado. La potencia teórica está para comparar y comprobar la validez del modelo propuesto con respecto a la potencia real en condiciones de panel limpio y como debería de operar siempre. Los datos acumulados por medio de los dispositivos del Capítulo 2 son agrupados y clasificados según cada experimento bajo las mismas condiciones de irradiancia, posición del panel, posición del piranómetro, entre otros, y de los cuales se corrobora cómo la potencia modelada se ajusta a la situación del panel limpio y las diferencias respectivas a los montajes de emulación para lluvia y polvo, contrastando con los montajes de sombreado total y parcial sobre el panel y el piranómetro.

### **4.1 Introducción**

Actualmente se utilizan dos métodos principales para el pronóstico de generación de energía fotovoltaica: (i) un enfoque determinista que utiliza modelos basados en la física que requieren información detallada de la planta fotovoltaica y (ii) un enfoque basado en recolección de datos para la utilización de técnicas estadísticas o estocásticas de aprendizaje automático que requieren mediciones de energía históricas. Los modelos deterministas y estocásticos producen habilidades de pronóstico diario con respecto a la persistencia del 35% y el 39%, respectivamente (Pierro et al., 2016).

El modelado y la simulación computacionales son primordiales para la ciencia moderna. Los modelos computacionales a menudo reemplazan los experimentos físicos que son prohibitivamente caros, peligrosos u ocurren a escalas extremas. Por lo tanto, es crítico que estos modelos representen con precisión y puedan usarse como reemplazos de la realidad. Si bien algunas métricas tienen un significado físico directo y una larga historia de uso, otras, especialmente aquellas que comparan datos probabilísticos, son más difíciles de interpretar. Además, el proceso de validación del modelo a menudo es específico de la aplicación, lo que dificulta el procedimiento en sí y los resultados son difíciles de defender (Maupin, Swiler & Porter, 2019). Por dicho motivo la validación del modelo se llevó a cabo físicamente en cada experimento propuesto.

La influencia de la temperatura sobre la curva característica de una celda de un panel solar es notable, se estima que la tensión a circuito abierto desciende  $-2.45 \text{ mV}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{cel})$ , mientras

que la intensidad de cortocircuito apenas se ve afectada. Esta cifra puede parecer pequeña, pero conlleva para una diferencia de temperatura de 30°C una disminución de la potencia, en el punto de máxima potencia que se puede estimar entre 11 y 14 W. (Radziemska, 2003).

La deposición de contaminación (polvo, suelo seco, humedad, etc.) sobre los paneles PV también es un parámetro que afecta la producción real de la energía PV. La potencia de salida varía según la masa y el tipo de deposición de contaminación y podría reducirse en más del 25% del valor esperado de la potencia (Gaglia et al., 2017).

#### 4.2 Validación del Modelo con panel limpio

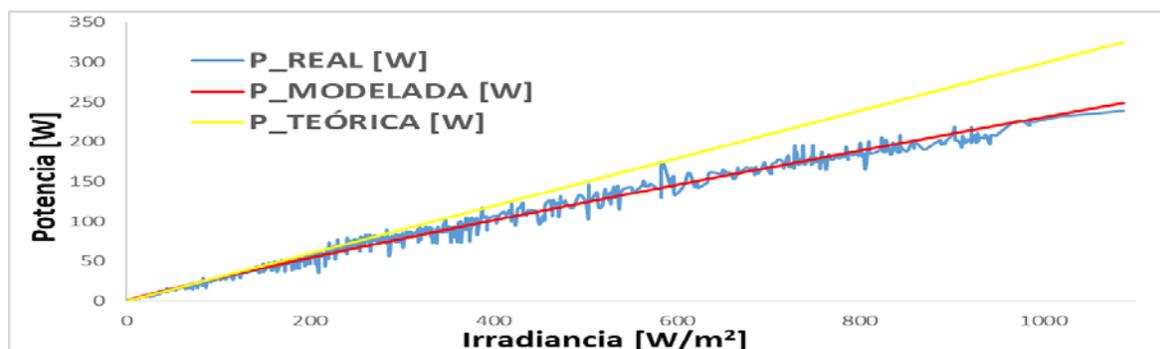
Bajo estricta limpieza del panel se tomaron los datos por tres días (en los cuales no se presentó casos de lluvia, ni se tuvo en cuenta los datos cuando hubo presencia de algún tipo de sombreado sobre la superficie del panel, o sobre el piranómetro), para estudiar el comportamiento de salida de potencia abarcando el espectro completo de irradiancia incidente.

Con un total de 1096 datos recolectados para el panel limpio, se realizó el cálculo para el error relativo porcentual promedio (ERP%) utilizando la Ecuación 12, tanto con la potencia modelada inicial (Ecuación 9), como con la potencia modelada final (Ecuación 11). Los valores hallados se muestran en la Tabla 15.

*Tabla 15. Valores ERP% para validación del modelo*

Valores	Potencia Modelada Inicial	Potencia Modelada Final
a	0,34	0,46
b	0,94	0,9
c	2,49	0,31
ERP%	11,49	9,61

Los resultados de la Tabla 15 para el ERP% corroboran que la potencia modelada final presenta un mejor ajuste a la potencia de salida real para panel limpio, por lo tanto, se procede a ver este comportamiento de la potencia modelada con respecto a la potencia teórica y a la potencia real en la gráfica de la Figura 26.



*Figura 26. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel Limpio*

Con los cálculos de los valores presentados en la Tabla 15, y lo visto gráficamente en la Figura 26, se puede concluir que la Ecuación 11 es válida para modelar la potencia de salida del panel PV de 300 vatios y que el método sistemático de iteraciones sucesivas utilizado para el ajuste de los coeficientes (a, b y c) de la ecuación 8 fue útil para lograr esta meta.

### 4.3 Contraste del modelo con emulación de lluvia, polvo y sombreado

Con el modelo ya validado para el cálculo de la potencia esperada en panel limpio, se realiza la toma de datos independientemente para cada uno de los experimentos de emulación de fenómenos naturales reales propuestos (emulación de lluvia, polvo y sombreado) para estudiar el comportamiento del panel en la salida de potencia, lo cual se hace en sitio de ubicación real, pero bajo un ambiente controlado, permitiendo así, hacer las comparaciones entre casos a pesar de que las muestras provengan de días distintos.

Todos los experimentos se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones de irradiancia, posición del panel, posición del piranómetro, entre otros y no teniendo en cuenta los datos causados por componentes externos como por ejemplo presencia de nubosidad, lluvia, etcétera, los cuales alteraban la medida real del caso experimental llevado a cabo en el momento.

#### 4.3.1 Emulando lluvia sobre el Panel

Después de haber realizado el montaje experimental para emular lluvia (con panel limpio) en caída de agua constante a una razón de 12,5 litros por minuto descrito en la Figura 9 del Capítulo 1, se tomaron los datos durante tres días para abarcar el espectro de irradiancia solar como se ilustra en la Figura 27.

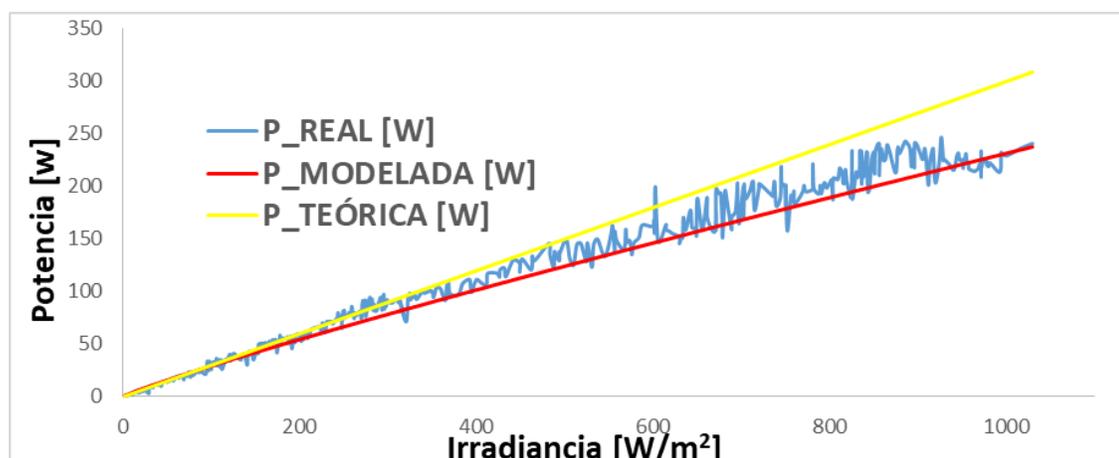


Figura 27. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel con Lluvia emulada

Se observó que la potencia real está entre la potencia modelada y la potencia teórica. Comparando esta potencia real en condiciones de lluvia emulada con la del panel limpio sin

lluvia ni polvo, se puede observar que la potencia real con lluvia tiene un comportamiento similar, pero un poco mejor que la potencia real con panel limpio, ya que como se constatará en el apartado 4.4, la temperatura del panel mantiene baja en comparación a la registrada en panel limpio solamente, debido al agua que cae sobre la superficie del panel, la cual causa que el semiconductor no tenga pérdidas por calor (a menor temperatura, mayor es el Voc de la celda), lo cual conlleva a una mejor salida de potencia real.

### 4.3.2 Emulando Suciedad sobre el Panel

El panel es contaminado con material particulado para emular suciedad ambiental que se acumula en condiciones reales. Como se ilustró en la Figura 10 del capítulo 1, al panel se le distribuyó de manera uniforme 174 gramos de talco y los datos fueron tomados durante tres días que cumplieron las condiciones establecidas, dichos datos son graficados en la Figura 28.

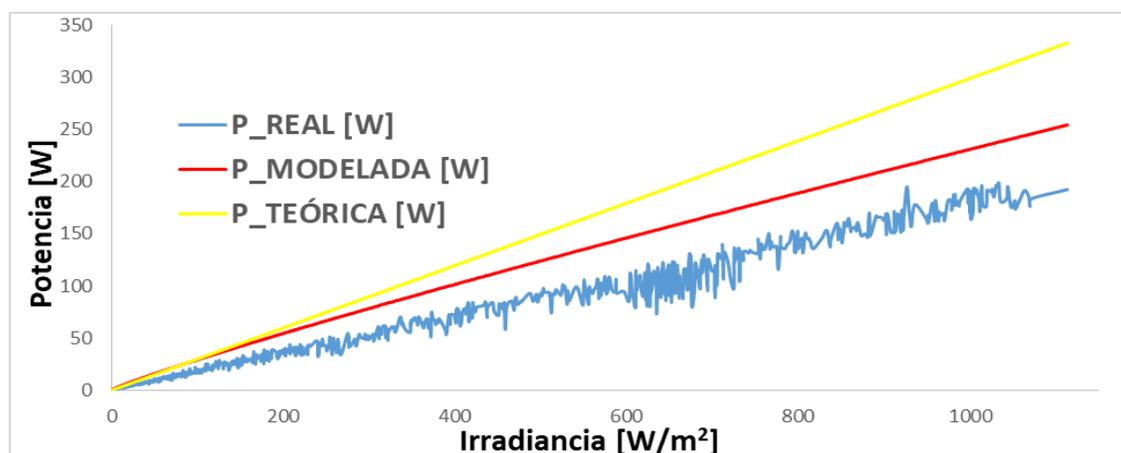


Figura 28. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel contaminado con material particulado

En la gráfica de la Figura 28, se puede ver el comportamiento disminuido en potencia real contra la potencia modelada y la teórica. Comparando la potencia real con los dos casos estudiados previamente (limpio y con lluvia), se puede apreciar las pérdidas de potencia, las cuales tienen un comportamiento cuasi constante debido a que el talco fue distribuido uniformemente y por lo tanto se induce la misma cantidad de sombreado sobre las celdas solares. Se puede concluir que, a mayor sombreado, mayor será la pérdida en potencia, y viceversa.

### 4.3.3 Emulando Sombreado

El sombreado es un fenómeno natural ambiental o artificial y se puede presentar tanto en forma parcial (porcentaje de sombreado variable entre el 5 y el 85%) como total sobre el panel (porcentaje de sombreado mayor del 85%) y el piranómetro.

#### 4.3.3.1 Sombreado Parcial sobre el Panel

Primero se estudió el sombreado (variable aproximadamente entre el 15 y el 85%, dependiendo de la posición del sol, lo cual implica una incidencia de la irradiancia variable sobre las celdas del panel) emulado sobre el panel aprovechando el montaje realizado para la lluvia ya que sobre éste se instaló un plástico negro cubriendo cierta parte del panel (Figura 8b). Se tomaron los datos durante tres días consecutivos para abarcar un amplio espectro de irradiancia y poder observar el comportamiento de la potencia real, lo cual se grafica en la Figura 29.

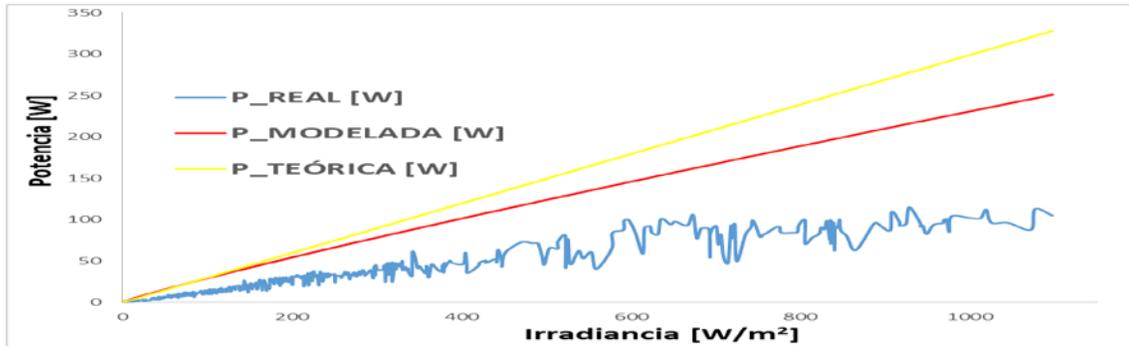


Figura 29. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel sombreado parcialmente

Analizando el comportamiento de la potencia real en la Figura 29, se concluye que cualquier tipo de sombreado natural o artificial sobre el panel provoca pérdidas de potencia de una forma volátil, ya que como se observa la potencia real zigzaguea en mayor rango con respecto a las potencias reales de los otros experimentos realizados, debido al porcentaje de sombreado cambiante sobre el panel.

#### 4.3.3.2 Sombreado Total sobre el Panel

Para el sombreado total se utilizó el mismo plástico del sombreado parcial, pero en esta ocasión sobre el panel y no sobre la estructura, cubriendo el panel completamente como se ilustra en la Figura 8a. Se tomaron los datos sólo en un día, debido a que el comportamiento fue el de anular por completo la irradiancia incidente sobre el panel dando como resultado una potencia de salida nula como muestra la Figura 30.

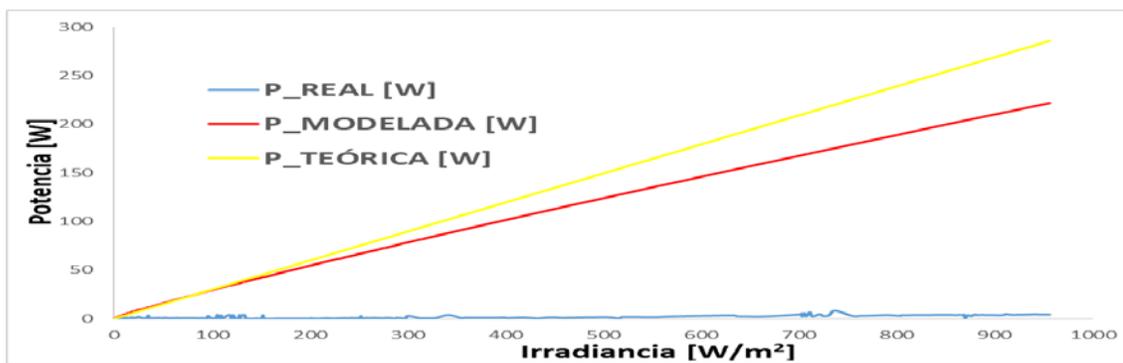


Figura 30. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Panel sombreado totalmente

Como se puede observar en la Figura 30, existe una gran diferencia entre la potencia real con la modelada y la teórica. Este resultado de potencia real es el esperado para un sombreado total sobre el panel y no sobre el piranómetro. La potencia teórica, presente en todas las gráficas de las figuras respectivas a cada caso de estudio con un valor de eficiencia fijo, está para comparar y comprobar la validez del modelo propuesto con respecto a la potencia real en condiciones de panel limpio y como debería de operar siempre a los valores de irradiancia incidente. La potencia modelada se trata de la potencia esperada en funcionamiento normal sin obstrucciones naturales y artificiales de la irradiancia incidente en el panel PV.

#### 4.3.3.3 Sombreado Parcial sobre el Piranómetro

Al piranómetro se le realizó una estructura que le inducía un sombreado parcial (Figura 8c del capítulo 1), conservando el panel en las mismas condiciones de panel limpio y sin obstrucciones para la irradiancia incidente. Este experimento permitió observar el comportamiento de salida de potencia real para el caso emulado del piranómetro sombreado en porcentajes variables debido a la rotación natural de la posición del sol durante el transcurso del día. Aunque se tomaron datos durante tres días que se acomodaron a las mismas condiciones de todos los otros experimentos, el espectro de irradiancia medido por el piranómetro no alcanzó ni los  $600 \text{ W/m}^2$ , lo cual es un resultado esperado debido al sombreado sobre dicho piranómetro. El comportamiento de potencia para este caso es ilustrado en la Figura 31.

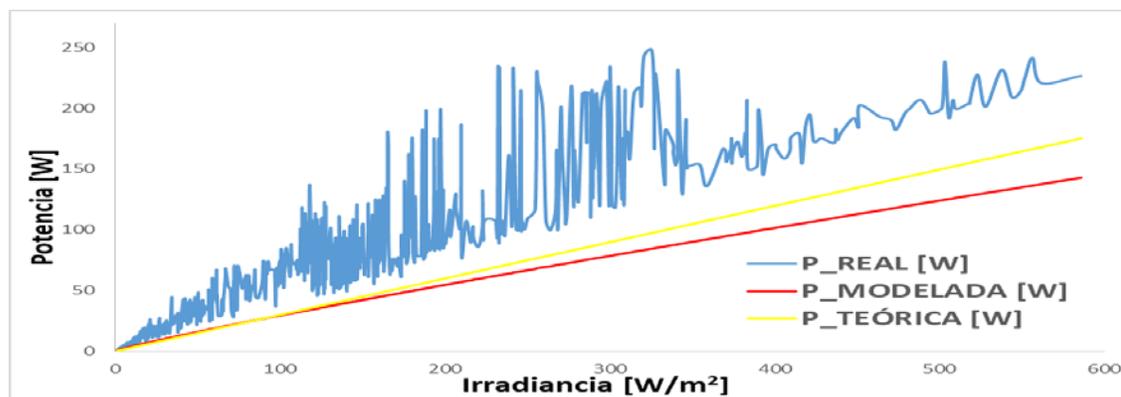


Figura 31. Potencia Real, Modelada y Teórica Vs la Irradiancia en Piranómetro sombreado parcialmente

Como se observa en la figura 31, la potencia real supera a la modelada y a la teórica, lo cual es el resultado esperado, debido a la obstrucción para causar sombreado (Figura 8c) que se utilizó sobre el piranómetro, por ende, es bueno recordar que los valores de irradiancia incidentes sobre el panel no son los mismos valores medidos por el piranómetro.

También se realizó montaje de sombreado total tanto en el piranómetro como sobre el panel y los resultados arrojados fueron los mismos de potencia de salida nula mostrado en la Figura 30, pero a diferencia de la gráfica, el valor del piranómetro para la irradiancia era nulo. El

montaje de sombreado parcial tanto en piranómetro como sobre el panel arrojó resultados que se acomodan a la potencia modelada en el caso del panel limpio.

#### 4.4 Variables de Entrada del Factor de Corrección

El factor de corrección se compone de las variables ambientales alrededor del panel PV, las cuales son la temperatura del panel, la temperatura ambiente y la humedad, por lo que se hace importante mirar el comportamiento de estas en los casos de estudio mencionados anteriormente para observar su influencia en los cambios de la potencia de salida.

- Los datos tomados para el panel completamente limpio se grafican en la Figura 32.

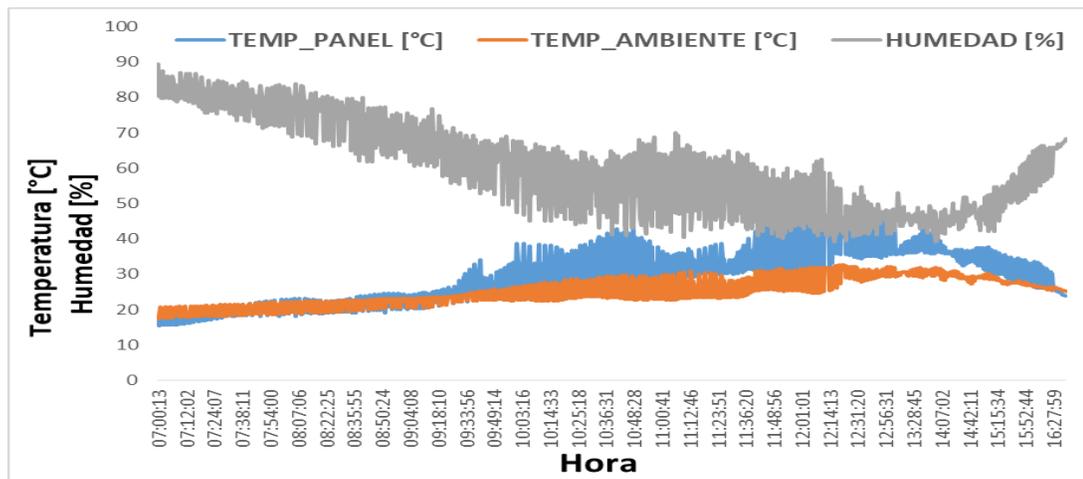


Figura 32. Comportamiento de las variables del factor de corrección en panel limpio

En la Figura 32 se observa que la temperatura del panel es mayor que la temperatura ambiente, excepto en horas de la mañana (más o menos hasta las 9:30 a.m.) y horas de la tarde (aproximadamente a partir de las 4:30 p.m.) donde el valor de irradiancia incidente sobre el panel es baja en comparación a la ventana principal de valores de irradiancia incidente más considerables (9:30 a.m. a 4:30 p.m.), en estos lapsos de tiempo (tiempo  $\leq 9$  a.m. y tiempo  $\geq 4:30$  p.m.) se presenta que la temperatura del panel es muy cercana o similar a la temperatura ambiente, lo cual es lo esperado ya que como se vio en el capítulo 3 con los resultados obtenidos en las correlaciones entre estas variables (irradiancia, temperatura del panel y temperatura ambiente), plasmados en la Tabla 8, es normal que a mayor valor de irradiancia, el panel presente mayor valor en temperatura, debido a la termodinámica de sus componentes de fabricación, que la temperatura ambiente y cuando la irradiancia incidente es baja o nula el valor de la temperatura de operación del módulo es muy cercana o similar a la temperatura ambiente. En la tabla 8, también se puede notar que la humedad es inversamente proporcional a las temperaturas, lo cual es validado en las gráficas a continuación.

- Los datos respectivos para el caso de emular lluvia sobre el panel se grafican en la Figura 33.

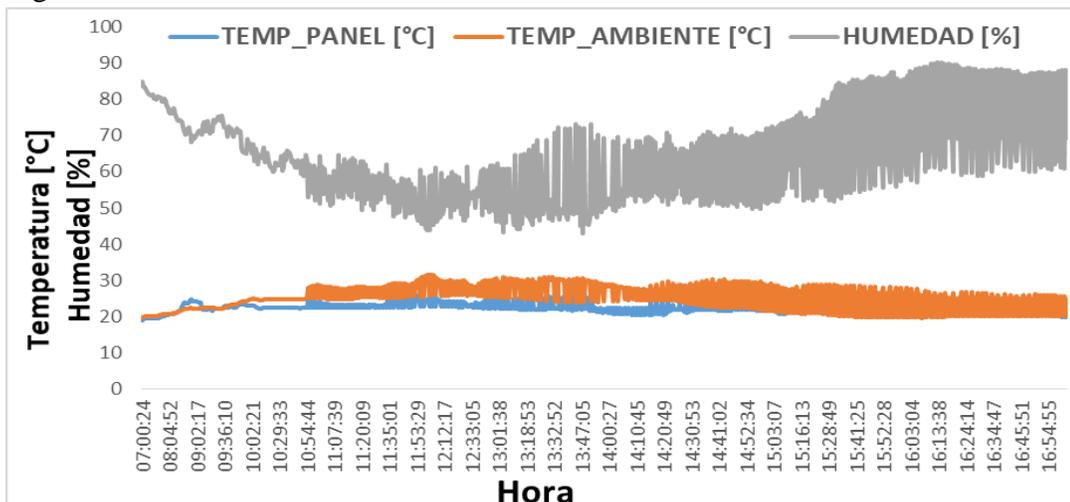


Figura 33. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando condición pluvial en el panel

Se observa en la gráfica de la Figura 33 que la temperatura del panel es menor que la temperatura ambiente, ya que la caída de agua constante sobre la superficie del panel disminuye la temperatura de operación del panel, debido a la termodinámica de los materiales de fabricación del panel ya que lo mantienen en una temperatura ideal menor de 26°C. La humedad, aunque mantiene su comportamiento esperado, en promedio es un poco mayor a la presentada en el caso de panel limpio.

- Los datos para la emulación de suciedad con polvo sobre el panel se grafican en la Figura 34.

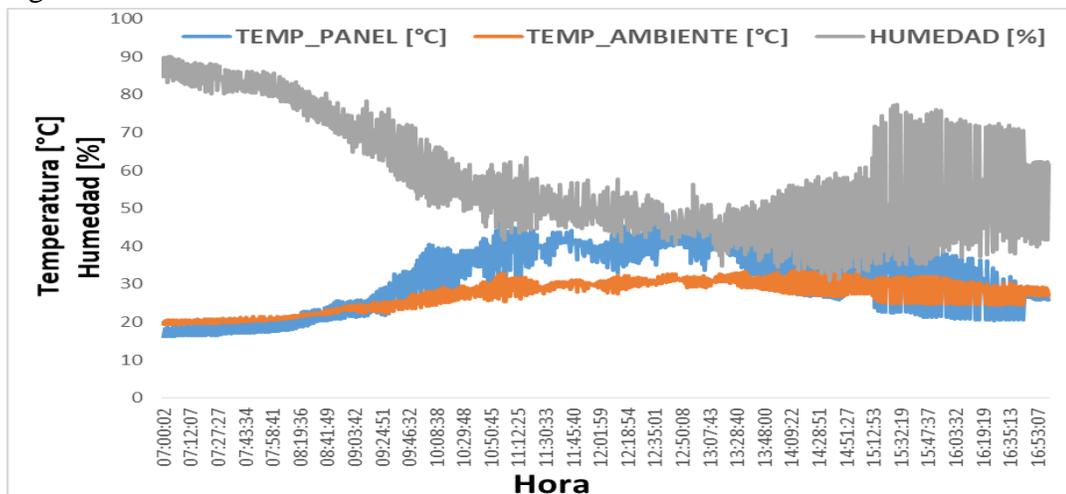


Figura 34. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando suciedad con material particulado uniformemente en el panel

- Emulando sombreado parcial sobre el panel, los datos tomados se grafican en la Figura 35.

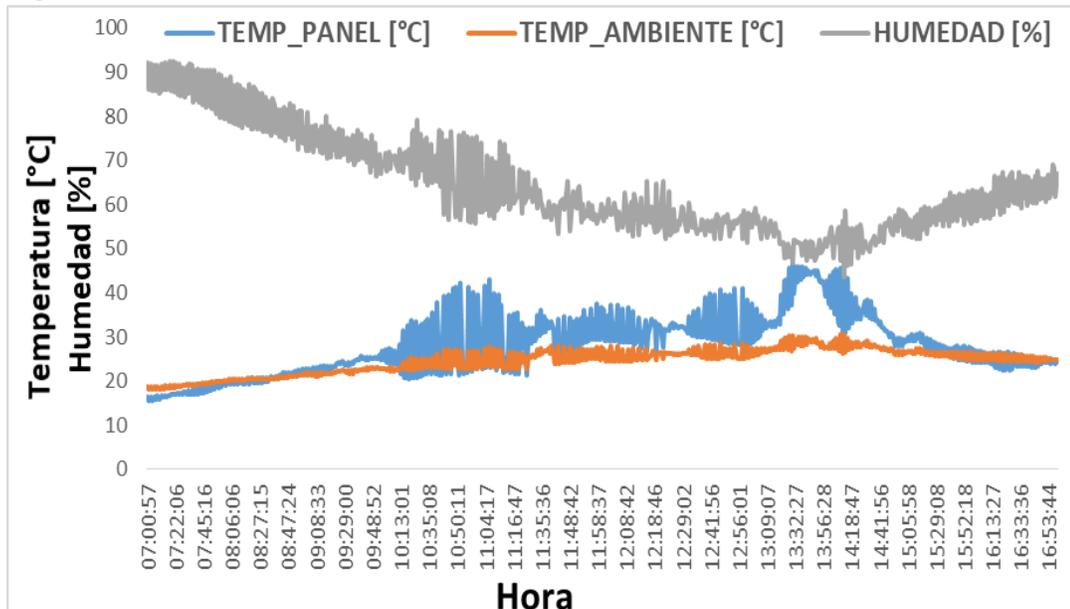


Figura 35. Comportamiento de las variables del factor de corrección emulando sombreado parcial sobre el panel

Se observa en la gráfica de la Figura 35 que las variables del factor de corrección tienen un comportamiento muy similar al del panel limpio, y por ende al de panel con polvo, ya que para todos los experimentos se conservaron similares condiciones de factores ambientales incidentes sobre el panel PV, principalmente sin presencia de lluvia ni nubosidad.

- Emulando sombreado total sobre el panel y/o sobre el piranómetro se observa el mismo comportamiento de las variables del factor de corrección en el panel limpio, debido a que se mantuvieron las mismas condiciones ambientales.

Comparando las Figuras 32, 33, 34 y 35, se concluye que el comportamiento de las variables ambientales (temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad) que circundan el panel PV y conforman el factor de corrección, presentan similar patrón de comportamiento en los casos de estudio de forma independiente (panel limpio, panel con polvo, panel sombreado, y piranómetro sombreado), excepto cuando se emula lluvia sobre el panel.

#### 4.5 Conclusiones

Se validó en una forma física, gráfica (Figura 26), y sistemática (cálculo de error mínimo) el modelo propuesto, constatando que este se acomoda a la salida de potencia del panel PV en situación ideal completamente limpio y se contrastó los resultados con los demás escenarios.

Cuando cae lluvia sobre el panel (Figura 27), éste mejora un poco la salida de potencia que en condición ideal de limpieza.

Si el panel presenta suciedad de material particulado (Figura 28), sea de tipo ambiental, artificial o natural, la potencia de salida disminuye.

Cualquier tipo de sombreado natural o artificial (aproximadamente entre el 15 y el 85%) sobre el panel provoca pérdidas de potencia de una forma volátil, como se observa en el comportamiento de la Figura 29. Si el sombreado sobre el panel supera aproximadamente el 85% (Figura 30) da como resultado una potencia de salida nula.

Si se presenta sombreado sobre el piranómetro y no sobre el panel (Figura 31), la potencia de salida real va a superar por mucho la potencia modelada.

El comportamiento en las gráficas de las Figuras 32, 33, 34 y 35 de las variables ambientales (temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad) que circundan el panel PV y que conforman el factor de corrección, presentan similar patrón de comportamiento en los casos de estudio de forma independiente para panel limpio, panel con polvo, panel sombreado, y piranómetro sombreado, excepto cuando se emula lluvia sobre el panel.

#### **4.6 Referencias Bibliográficas**

- Gaglia, A. G., Lykoudis, S., Argiriou, A. A., Balaras, C. A., & Dialynas, E. (2017). Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditions—An experimental assessment in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 101(September), 236–243. Doi:10.1016/j.renene.2016.08.051
- Maupin, K. A., Swiler, L. P., and Porter, N. W. (2019). "Validation Metrics for Deterministic and Probabilistic Data." ASME. *J. Verif. Valid. Uncert.* September 2018; 3(3): 031002. <https://doi.org/10.1115/1.4042443>
- Pierro, M., Bucci, F., De Felice, M., Maggioni, E., Perotto, A., Spada, F., Moser, D., and Cornaro, C. (2016). "Deterministic and Stochastic Approaches for Day-Ahead Solar Power Forecasting." ASME. *J. Sol. Energy Eng.* April 2017; 139(2): 021010. <https://doi.org/10.1115/1.4034823>
- Radziemska, E. (2003) "Effect of temperature on the power drop in crystalline silicon" *Renewable Energy* (28). 2003; pp. 1-12

## 5. Monitoreo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos sometidos a lluvia y polvo mediante adquisición automática para mantenimiento preventivo de sistemas solares fotovoltaicos

### Resumen

Por medio de la Ecuación 1 se calcula la eficiencia con la potencia modelada contrastando con la potencia real y se miden las diferencias para los escenarios propuestos que son: (i) panel limpio, (ii) emulando lluvia sobre el panel, (iii) emulando suciedad de polvo sobre el panel y (iv) emulando sombreado parcial sobre el panel y de esta forma se conoce las diferencias en eficiencia energética del panel, tanto en forma gráfica como numérica en porcentaje de cambio de la eficiencia, para cada uno de los escenarios y saber así cuando el panel necesita de mantenimiento oportuno y a tiempo, ya que los resultados están siendo monitoreados en tiempo real por medio de la página web a través de la tecnología de IoT.

### 5.1 Introducción

Las formas matemáticas implementadas para medir la eficiencia bajo desarrollo experimental utilizadas son las siguientes: el factor de forma (FF, del inglés, Fill Factor) que es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , es decir:  $FF = (P_{max}) / (I_{sc} * V_{oc})$ . Su valor es más alto ( $FF > 0,7$ ) cuanto mejor es la celda. Por lo general, un valor bajo de FF ( $FF < 0,4$ ) está asociado con la existencia de pérdidas de eficiencia en el panel, mientras que una celda de buena calidad suele tener valores de FF superiores a 0,7 (Boxwell, 2012). La eficiencia en términos de la radiación del sol viene dada por:  $\eta(G) = (V_{out} * I_{out}) / (G * A_m)$ , donde  $V_{out}$  es el voltaje de salida,  $I_{out}$  es la corriente de salida,  $G$  es la irradiancia (potencia incidente por unidad de superficie de la radiación del sol), y  $A_m$  es el área del módulo (Mah, 1998). La eficiencia con respecto a la temperatura es la siguiente:  $\eta(T_C) = \eta_0[1 - \beta_0(T_C - 298)]$ , donde  $\eta_0$  es la eficiencia eléctrica de la celda solar en condiciones de prueba estándar (irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ ) y  $\beta_0$  es el coeficiente de temperatura de eficiencia de silicio ( $0,0045^\circ\text{K}^{-1}$  o  $0,0064^\circ\text{K}^{-1}$ ), y  $T_C$  es la temperatura de la celda en  $^\circ\text{K}$  (Tiwari et al., 2016). La eficiencia PV también se calcula usando métodos estadísticos multivariados como por ejemplo la regresión lineal (MRL) y métodos numéricos basados en inteligencia artificial como son las redes neuronales artificiales (ANN) y algoritmos avanzados de punto de rastreo de máxima potencia (MPPT), estos algoritmos también son utilizados para predecir la degradación de los paneles PV (Casadei, Grandi & Rossi, 2006).

La tasa de degradación en los paneles, debido a la exposición a diferentes condiciones climáticas externas por prolongados periodos de tiempo. Dependiendo de la naturaleza de los

factores climáticos, las políticas de mantenimiento y la tecnología de fabricación de los paneles PV, éstos se degradan a diferentes tasas incumpliendo en muchos casos los valores de garantía establecidos por los fabricantes y en proporción a esta degradación la eficiencia en los paneles va disminuyendo (Jordan & Kurtz, 2013).

El mantenimiento se define como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un elemento destinado a retenerlo o restaurarlo en un estado en el cual pueda desempeñar la función requerida. Para evaluar la viabilidad económica de estrategias alternativas de mantenimiento para plantas PV de diferentes tamaños con componentes variables y condiciones climáticas diferentes se debe realizar un correcto análisis para comparar el mantenimiento correctivo inmediato con estrategias de mantenimiento de periodicidad diferente (semanal, quincenal y mensual). Dicho análisis debe de encontrar diferencias económicas, a largo y corto plazo, sobre si es mejor corregir cuando sucede un fallo, o siguiendo un plan de mantenimiento periódico, cuya periodicidad la dan las condiciones ambientales a las cuales están expuestos los paneles y todo el sistema. La estrategia de mantenimiento resultante tiene que ser reevaluada de manera regular, ya que las variables de entrada, como la tasa de interés, el costo de los componentes y las características de fallo, pueden cambiar con el tiempo, la optimización del mantenimiento es por lo tanto un proceso continuo (Peters & Madlener, 2017).

## 5.2 Contraste de las potencias

Primero es importante contrastar el comportamiento de variación de la potencia de salida entre sí de los escenarios descritos (panel limpio, con lluvia, con polvo y con sombreado parcial y total y el piranómetro sombreado) con la potencia modelada y teórica, para poder entender claramente la eficiencia del panel ante cada uno de los eventos realizados en los experimentos como se ilustra en la gráfica de la Figura 36.

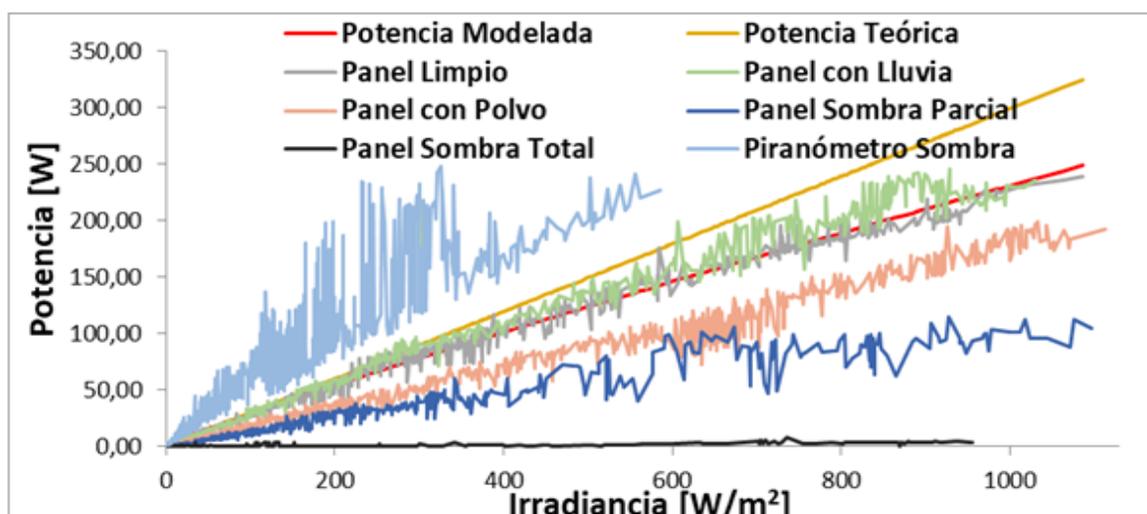


Figura 36. Contraste de las Potencias

Como se mencionó y se explicó en el Capítulo 4, la potencia modelada se ajusta y da explicación a la potencia real con panel limpio y a su vez existen diferencias sustanciales entre cada una de las potencias reales de salida para cada caso estudiado con la respectiva emulación (polvo, lluvia y sombreado) con respecto a la potencia modelada como se observa en la Figura 36, esto conlleva a poder reconocer y diferenciar cada fenómeno que está ocurriendo sobre el panel teniendo como base la potencia modelada, la cual es la potencia real esperada para el panel completamente limpio y con funcionamiento ideal a su entorno (sin obstrucciones naturales ni artificiales en la irradiancia incidente).

Con el modelo para la potencia ya explicado se procede a realizar el análisis de eficiencia del panel para cada caso.

### 5.3 Análisis de la Eficiencia Energética del Panel

Recordando la Ecuación 1 para el cálculo de la eficiencia del panel del Capítulo 2, la cual es dependiente de la irradiancia y de la potencia de salida como se mencionó y se explicó en la introducción de este capítulo, se puede tener un análisis respectivo para la eficiencia en cada caso experimental de estudio.

$$\eta = \frac{P}{G * A} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

A [m<sup>2</sup>]: área superficial del panel de 1.63 m<sup>2</sup>

P [W]: potencia de salida real y modelada.

G [W/m<sup>2</sup>]: irradiancia respectiva, para valores de G cercanos a 0, la eficiencia tiende a infinito.

- **Panel limpio**

Con los datos recolectados en el experimento con el panel completamente limpio (Figura 7) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 37.

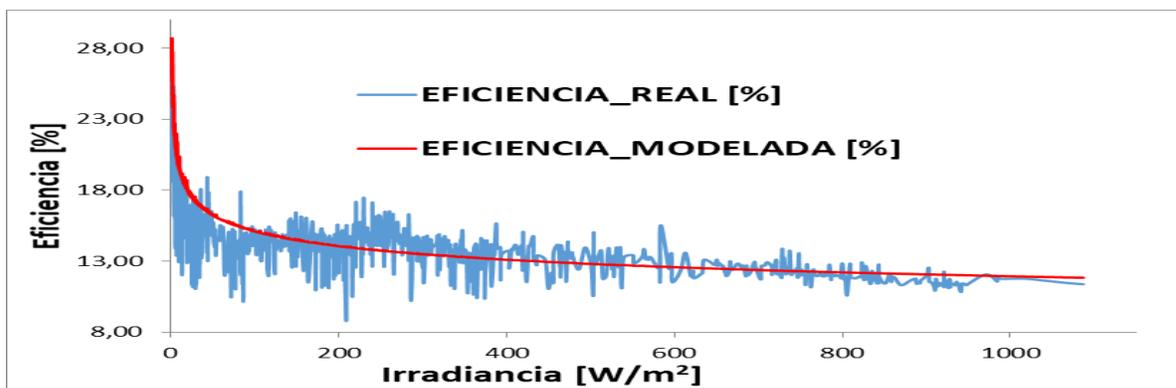


Figura 37. Eficiencia en panel limpio

La Figura 37 muestra como la eficiencia con la potencia modelada se ajusta a los valores y al comportamiento de la eficiencia con la potencia real. La gráfica muestra que para valores bajos de irradiancia cercanos a cero, la eficiencia se hace más grande debido a la relación inversamente proporcional entre ellas (eficiencia e irradiancia) como se puede constatar en la Ecuación 1, ya que cuando realmente existe ausencia de irradiancia incidente sobre el panel (la incidencia cumple el rol de potencia de entrada en el cálculo de la eficiencia), existe una potencia real de salida (de muy bajo valor) en el panel, debido a los factores climáticos que rodean el panel (temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad).

La Tabla 16 muestra la estadística descriptiva de los datos respectivos a las curvas de las dos eficiencias mostradas en la Figura 37.

**Tabla 16.** Estadística descriptiva de los datos para panel limpio

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Desv. Estándar
Modelada	14,79	0,75	2,53	0,53
Real	14,04		2,00	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

El resultado de la diferencia promedio (0,75), asevera que la eficiencia con potencia modelada se ajusta a la eficiencia con la potencia real de salida del panel PV.

- **Panel con lluvia emulada**

Con los datos recolectados en el experimento emulando lluvia sobre el panel (Figura 9) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 38.

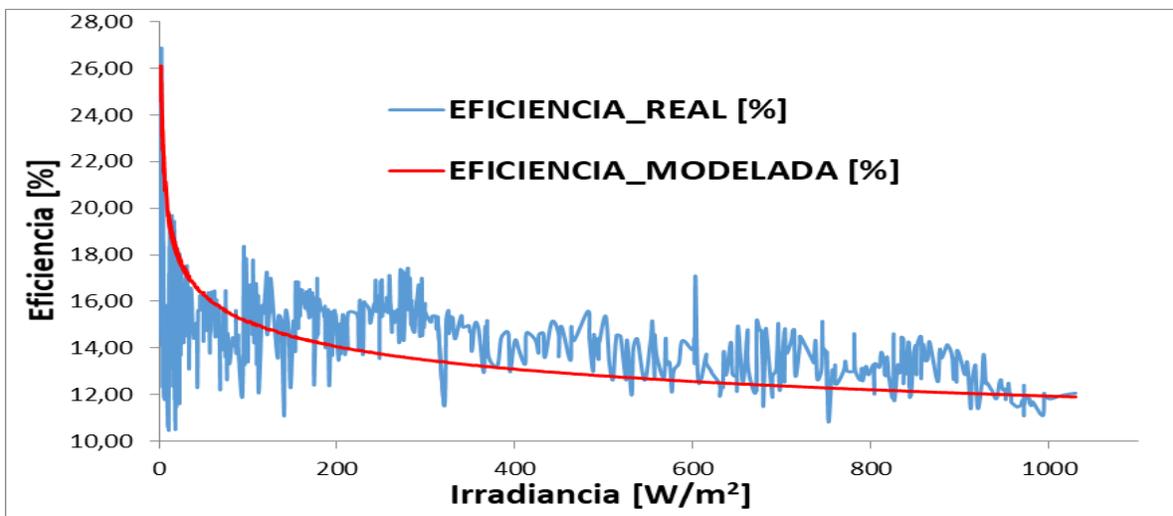


Figura 38. Eficiencia en panel con lluvia emulada

La Figura 38 muestra como la eficiencia con la potencia modelada está un poco por debajo de la eficiencia real, debido que al disminuir la temperatura del panel (por ejemplo, por efecto de la lluvia, que ayuda al auto lavado del módulo), disminuye el  $V_{oc}$  de las celdas solares, y por lo tanto mejora la potencia de salida y a su vez mejora el rendimiento del panel. Comparando la Figura 38 con la Figura 37, se ve que con el panel limpio la diferencia de la curva modelada está más ubicada en los valores medios de la curva de la eficiencia real. La Tabla 11 muestra la estadística descriptiva de los datos emulando lluvia, cuyas curvas de eficiencia se detallan en la Figura 38.

**Tabla 17.** Estadística descriptiva de los datos para panel con lluvia

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Desv. Estándar
Modelada	15,49	0,38	2,90	0,97
Real	15,11		1,93	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

Comparando los valores diferenciales de la Tabla 17 con la Tabla 16, se nota que la eficiencia modelada en el panel con lluvia muestra un menor promedio que el panel limpio, y en cambio la diferencia en variabilidad de los datos representados por la desviación estándar es menor para el panel limpio que para el panel con lluvia, aunque la diferencia entre las dos es muy mínima y estadísticamente hablando se pueden considerar iguales.

- **Panel con Polvo**

Con los datos recolectados en el experimento emulando suciedad sobre el panel con polvo (Figura 10) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 39.

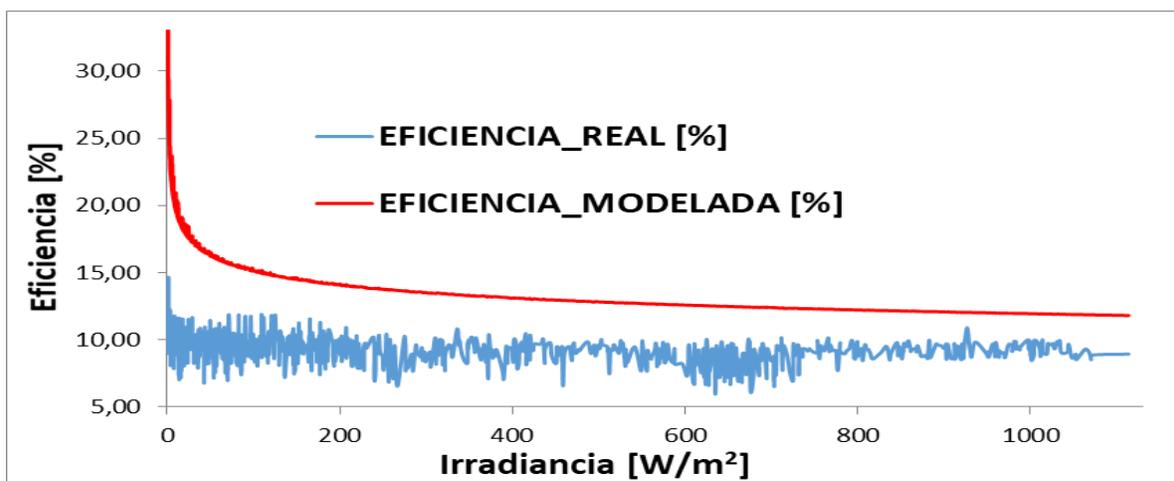


Figura 39. Eficiencia en panel con suciedad emulada

La Figura 39 muestra como la eficiencia con la potencia modelada está por encima de la eficiencia real, debido a las pérdidas por contaminación de material particulado ambiental, cuyo cúmulo causa sombreado sobre las celdas solares. La Tabla 18 detalla la estadística descriptiva de los datos de eficiencia respectivos al panel contaminado con polvo.

**Tabla 18.** Estadística descriptiva de los datos para panel con polvo

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Dev. Estándar
Modelada	15,61	6,18	4,07	3,06
Real	9,43		1,01	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

Comparando los valores diferenciales de la Tabla 18 con la Tabla 16 y la Tabla 17, es muy evidente que: la diferencia de la eficiencia promedio del panel con polvo es mayor en contraste a las del panel limpio y con lluvia, lo cual es un resultado esperado, ya que como se analizó y se concluyó en el capítulo 4, el cúmulo de material particulado obstruye la irradiancia incidente sobre el panel y disminuye el valor de la potencia real con respecto a la esperada con la potencia modelada, por lo cual el valor de eficiencia real es menor que el esperado.

- **Panel con sombreado parcial**

Con los datos recolectados en el experimento emulando sombreado parcial sobre el panel (Figura 8b) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 40.

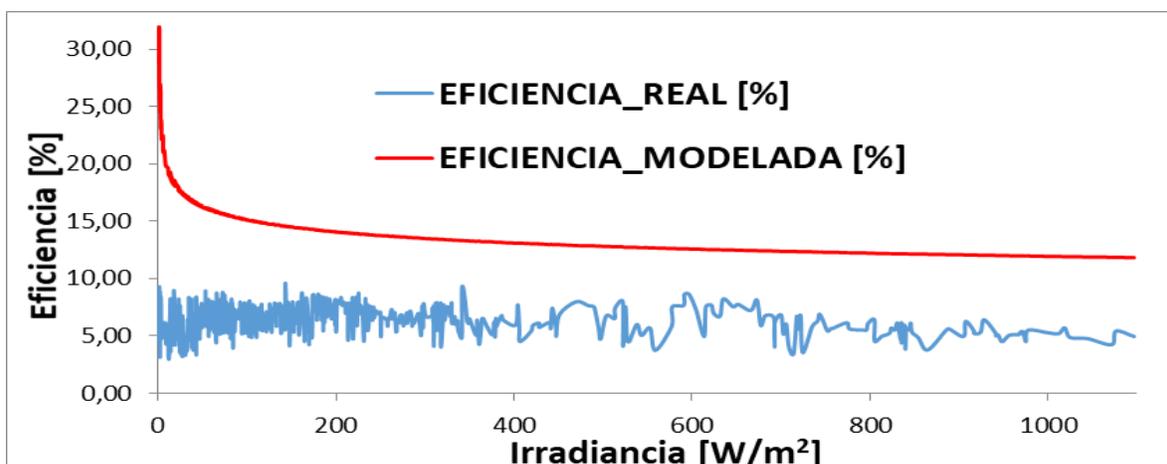


Figura 40. Eficiencia en panel sombreado parcialmente

La Figura 40 muestra como la eficiencia con la potencia modelada está por encima de la eficiencia real, debido a las pérdidas por sombreado en algunas celdas solares. La Tabla 19 detalla la estadística descriptiva para este caso.

**Tabla 19.** Estadística descriptiva de los datos para panel con sombreado parcial

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Desv. Estándar
Modelada	14,99	8,63	2,70	1,46
Real	6,36		1,23	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

La diferencia promedio entre las dos curvas es de 8,63%, lo cual corrobora el hecho de que, en realidad, cuando sucede un sombreado parcial, ya sea de forma natural o artificial, sobre el panel, la eficiencia real presenta un decremento considerable con respecto a la eficiencia esperada, debido a que la irradiancia incidente sobre el panel no es la misma que está registrando el piranómetro, ya que las celdas solares del módulo están obstruidas por el sombreado. Contrastando la Tabla 19 con la Tabla 18, se puede observar que la diferencia promedio es mayor para el panel con sombreado parcial, que para el sombreado causado por la medida de polvo.

- **Panel con sombreado total**

Con los datos recolectados en el experimento emulando sombreado total sobre el panel (Figura 8a) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 41.

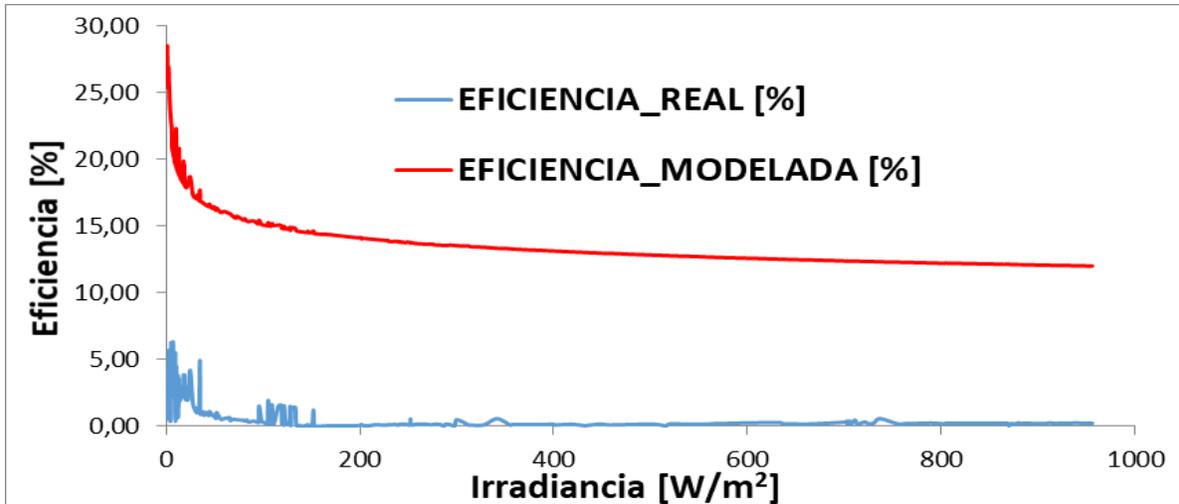


Figura 41. Eficiencia en panel sombreado totalmente

La Figura 41 muestra como la eficiencia con la potencia real es nula con respecto a la eficiencia de la potencia modelada, debido a la pérdida total de absorción de irradiancia incidente por causa del sombreado de todas las celdas solares y como el piranómetro no estaba sombreado si lograba capturar toda la irradiancia incidente.

En la Tabla 20 se colocan los resultados de la estadística descriptiva para este caso de sombreado total del panel.

**Tabla 20.** Estadística descriptiva de los datos para panel con sombreado total

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Desv. Estándar
Modelada	16,28	15,23	4,11	2,66
Real	1,05		1,45	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

La diferencia absoluta promedio entre las dos curvas es de 15,23%, lo cual está cerca de la eficiencia teórica del panel PV y corrobora que se anula la irradiancia incidente sobre el panel, por lo tanto, la potencia real de salida es muy baja y por ende la eficiencia es casi nula. El valor de la diferencia promedio en la Tabla 20 es mayor en comparación con las otras tablas respectivas a estos casos, lo cual es un resultado esperado.

- **Piranómetro con sombreado parcial**

Con los datos recolectados en el experimento emulando sombreado parcial en este caso sobre el piranómetro y no sobre la superficie del módulo (Figura 8c) y utilizando la Ecuación 1, se procede a calcular la eficiencia tanto real (con los datos de la potencia real), como la eficiencia modelada (con la potencia modelada calculada con la Ecuación 11) y se grafican en la Figura 42.

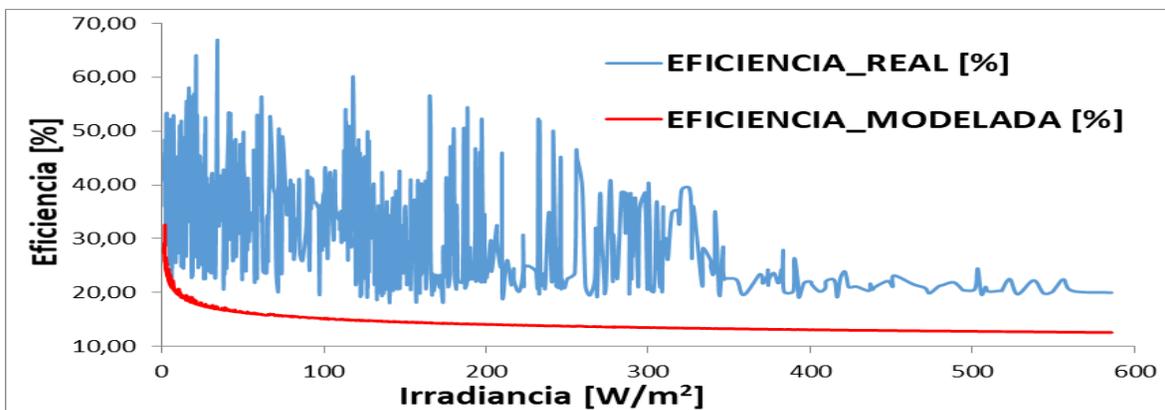


Figura 42. Eficiencia con piranómetro sombreado

La Figura 42 muestra lo volátil de la eficiencia real, ya que no existe un porcentaje de sombreado fijo sobre el piranómetro, siendo este el objetivo buscado con el obstáculo que se puso a una distancia aproximada de 70 centímetros sobre el piranómetro, ya que en la realidad cuando suceden estos sombreados no tienen un porcentaje fijo, sino que son variantes, por la rotación del planeta alrededor del sol, entre otras causas naturales. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 4, para la gráfica de la Figura 31, correspondiente al cálculo de la potencia real y modelada para este mismo caso de sombreado sobre el piranómetro, se observa que por efecto de dicho sombreado, el valor de irradiancia incidente medido por el

piranómetro no alcanzara los  $600 \text{ W/m}^2$ , esto no quiere decir que sobre el panel PV suceda lo mismo, ya que el panel PV está libre y operando en condiciones ideales (limpio y sin obstrucciones de sombreado), por lo cual los valores de eficiencia calculados para la potencia real son elevados (ilógicos e imposibles en operación normal) y están muy por encima de la eficiencia modelada (valores esperados si el piranómetro no estuviera sombreado), pero de acuerdo al experimento son valores esperados que explican el fenómeno de sombreado sobre el piranómetro y no sobre el panel. Para dar una idea numérica del fenómeno se hallan la estadística descriptiva con los datos respectivos a este caso y se presentan en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Estadística descriptiva de los datos para el piranómetro con sombreado parcial

Eficiencia [%]	Promedio	Diferencia en Promedio	Desviación Estándar	Diferencia en Desv. Estándar
Modelada	16,03	-16,34	2,99	-6,35
Real	32,37		9,34	

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

La Tabla 21 muestra la diferencia absoluta promedio entre las dos curvas de  $-16,34\%$ . El valor negativo tanto en la diferencia promedio como en la diferencia en desviación estándar, constata lo mostrado en la Figura 41, donde se observa que la eficiencia real supera a la eficiencia modelada, debido a que al panel le están incidiendo valores de irradiancia muy por encima de los valores registrados por el piranómetro.

- **Contrastando todas las eficiencias**

Para dar cuenta de todo lo analizado anteriormente en cada uno de los casos, se procede a realizar la gráfica de eficiencia contra irradiancia (Figura 43) de todos los casos juntos, constatando que todos se realizaron bajo las mismas condiciones de irradiancia incidente sobre el panel PV y el piranómetro.

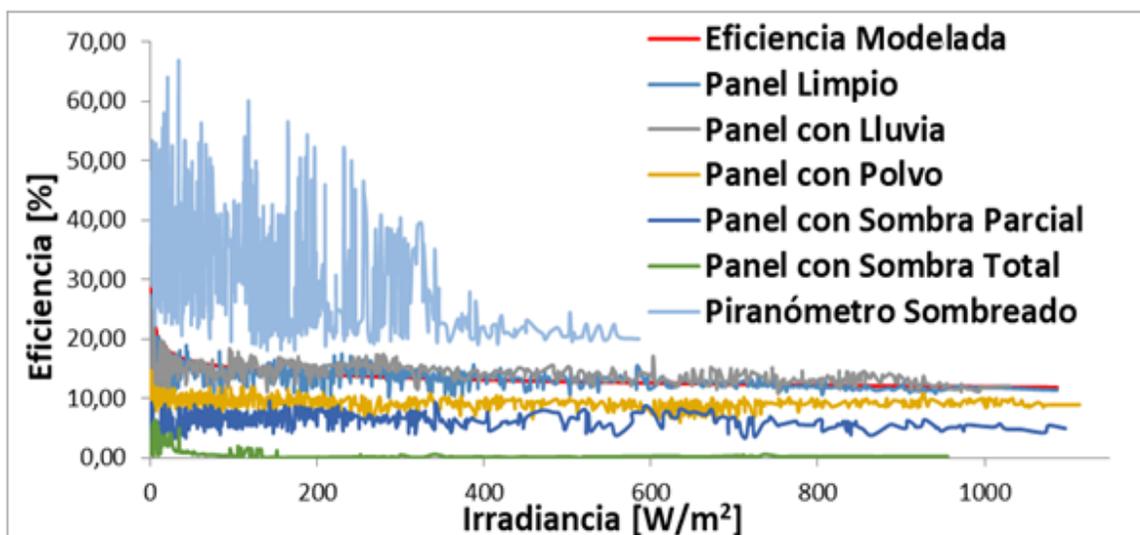


Figura 43. Contraste de las Eficiencias

La Figura 43 ilustra las curvas de eficiencia de todos los escenarios estudiados contrastándolos entre sí y con la eficiencia calculada con la potencia modelada. Se puede corroborar como la eficiencia con la potencia modelada (curva de color rojo) se ajusta a la curva de eficiencia con potencia real de panel limpio (curva de color azul claro), y de la poca diferencia que existe entre estas (eficiencia modelada y eficiencia para panel limpio) con la eficiencia con potencia real para panel con lluvia emulada (curva de color gris), sin embargo para los otros casos si existe diferencia significativa entre las eficiencias con potencia real y la eficiencia con potencia modelada. Dicha diferencia entre cada curva de eficiencia real y eficiencia modelada fue presentada en un valor promedio desde la Tabla 16 hasta la Tabla 21, respectivamente cada tabla para cada caso, en un rango promedio relativamente pequeño. Como este rango diferencial para cada caso entre la eficiencia con potencia real y la eficiencia con potencia modelada es relativamente pequeño, se busca otra fórmula que permita calcular un rango más grande para poder diferenciar cada caso de eficiencia con potencia real (de forma independiente para cada caso) con respecto a la eficiencia con potencia modelada, por tal motivo se presenta a continuación el concepto de porcentaje de cambio entre eficiencias.

#### 5.4 Porcentaje de Cambio entre Eficiencias

El porcentaje de cambio entre eficiencias (PCE), es una expresión que se propone en este trabajo para definir el cambio porcentual entre las eficiencias, o sea entre la eficiencia modelada (calculada con la potencia modelada) y la eficiencia real (calculada con la potencia medida a través de los sensores de corriente y voltaje), con respecto a la eficiencia modelada.

Para dar una mejor explicación al término PCE, se recurre a cualquiera de las gráficas de Eficiencia vs Irradiancia presentadas anteriormente en el apartado 5.3, las cuáles involucran las dos eficiencias mencionadas, tanto la modelada como la real. La gráfica seleccionada al azar es la Figura 40, en la cual se traza la diferencia porcentual entre la coordenada x (Irradiancia) y la eficiencia modelada corresponde al 100%, ya que el porcentaje de cambio a calcular es con respecto a dicha eficiencia (Figura 44).

De la Figura 44, se puede deducir lo siguiente:

1. El término desconocido en porcentaje ( $X[\%]$ ), corresponde al porcentaje de variación entre la eficiencia modelada ( $\eta_m$ ) y la eficiencia real ( $\eta_r$ ), ya que,  $X[\%]$  es al 100% como  $\eta_r$  es a  $\eta_m$ , o sea:

$$X * \eta_m = \eta_r * 100\% \rightarrow X = \frac{\eta_r}{\eta_m} * 100\% \quad (15)$$

2. El PCE corresponde a la diferencia entre el 100% y  $X[\%]$ , o sea:

$$PCE = 100 - X = 100 * \left(1 - \frac{\eta_r}{\eta_m}\right) \quad (16)$$

Donde

$PCE [\%]$ : Porcentaje de cambio entre eficiencias.

$\eta_r$  [%]: Eficiencia real.  
 $\eta_m$  [%]: Eficiencia modelada.

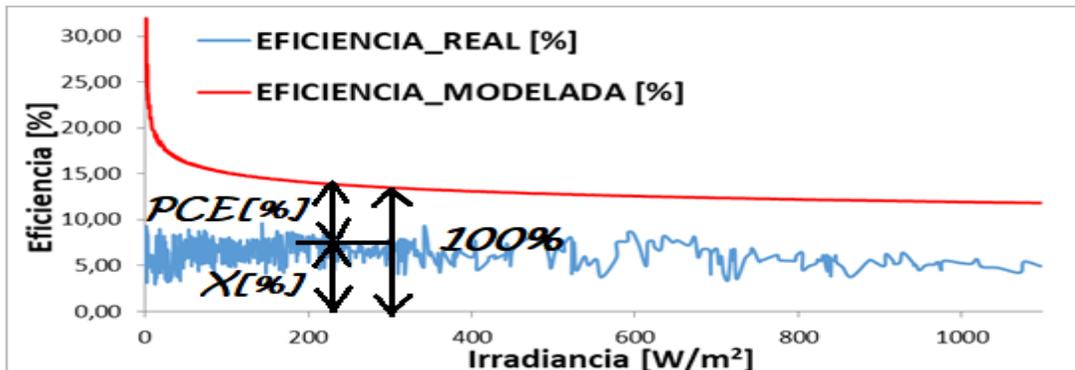


Figura 44. Cálculo del PCE [%]

De la Ecuación 16 se puede deducir que:

- Si la eficiencia real es igual a la eficiencia modelada, quiere decir que las dos curvas son las mismas, por lo tanto, el PCE tiene un valor porcentual de cero.
- Valor negativo del PCE, significa que el valor de eficiencia real supera al de la eficiencia modelada.
- Valor positivo del PCE, significa que el valor de eficiencia real es inferior al de la eficiencia modelada.

El cálculo del PCE es de suma importancia para conocer el estado del panel, debido a que da a conocer que tanto se desvía la eficiencia real de la esperada con la potencia modelada en cada momento de toma de dato. Por lo cual es necesario calcular el PCE para cada caso de estudio a nivel tanto de valores promedio como para límite inferior y límite superior, y de esta forma conocer el rango de valores del PCE en cada caso y poder diferenciar uno del otro, y de esta forma conocer el estado del panel en cada momento.

Para una mejor comprensión de los valores promedios del PCE en cada caso de estudio, se reúnen los valores de cada una de las estadísticas descriptivas respectivas, mostradas anteriormente desde la Tabla 16 hasta la Tabla 21, en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Estadística descriptiva para cada caso de estudio de la eficiencia

Eficiencia [%]	Promedio		Desviación Estándar	
	Modelada ( $\eta_m$ )	Real ( $\eta_r$ )	Modelada	Real
Caso de Estudio				
Panel limpio	14,79	14,04	2,53	2
Panel con lluvia	15,49	15,11	2,9	1,93
Panel con polvo	15,61	9,43	4,07	1,01
Panel con sombreado parcial	14,99	6,36	2,7	1,23
Panel sombreado total	16,28	1,05	4,11	1,45
Piranómetro sombreado	16,03	32,37	2,99	9,34

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

Con los valores de la Tabla 22 para el promedio y desviación estándar, tanto para la eficiencia real como para la eficiencia modelada en cada caso de estudio (limpio, con lluvia, con polvo, con sombreado parcial y total, y con sombreado en el piranómetro), se aplica la Ecuación 16 para calcular el PCE promedio y el rango de validez, teniendo en cuenta que el rango de validez se da solo para la eficiencia real, por lo tanto, el límite inferior se calcula con el promedio más la desviación estándar de la eficiencia real, y el límite superior se calcula con el promedio menos la desviación estándar de la eficiencia real, conservando el mismo valor promedio de eficiencia modelada respectiva para cada caso. Por ejemplo, para el caso de panel limpio (Tabla 16 y Tabla 22) se tiene que: el valor promedio de eficiencia real es 14,04% con una desviación estándar de eficiencia real del 2%, o sea, que dicho valor de eficiencia real oscila aproximadamente en promedio entre el 12,04% ( $\eta_{r\text{inicial}}$ ) y el 16,04% ( $\eta_{r\text{final}}$ ), para un valor de eficiencia modelada ( $\eta_m$ ) de 14,79%, como se observa en la Figura 37. Utilizando la Ecuación 12 para cada valor de umbral se tiene que el rango de validez en el porcentaje de cambio de eficiencia para el panel limpio oscila entre -8,45% y 18,59%. Realizando el mismo procedimiento del ejemplo del caso de panel limpio para todos los casos de estudio, se obtienen los valores de la Tabla 17. Debido a que hay rangos que abarcan a otros, como por ejemplo el del panel limpio con el de emulación de lluvia que son muy similares en comportamiento de la eficiencia y no conllevan mayor preocupación, donde prácticamente se pueden resumir en uno solo, haciendo la aclaración que, para el panel con lluvia a diferencia del panel limpio, la temperatura ambiente es, en casi todos los casos, mayor que la temperatura del panel (Figura 33). El panel con polvo se ajusta al panel con sombreado, ya que el polvo causa sombreado sobre las celdas solares del panel, dicho sombreado depende de la cantidad de polvo acumulado sobre el panel, por lo que se puede ajustar el rango para sombreado inicialmente y si dicho sombreado se repite por más de 20 minutos en el panel, conlleva a pensar que el panel está contaminado con polvo o suciedad ambiente, causando así una alerta respectiva para el mantenimiento del panel. Teniendo en cuenta los argumentos presentados anteriormente se hacen los respectivos ajustes aproximados para abarcar todo el rango posible de porcentaje de cambio de la eficiencia (PCE) en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Valores respectivos del PCE para cada caso de estudio sobre el panel calculados con la Ecuación 16 y ajustados a rangos para diferenciar cada caso en particular.

Caso de estudio en Panel PV	$\eta_m$ [%]	Promedio [%]		Rango de Validez [%]				
		$\eta_r$	EPC	Límite Inferior		Límite Superior		Ajustado
				$\eta_r$	EPC	$\eta_r$	EPC	
Limpio	14,79	14,04	5,07	16,04	-8,45	12,04	18,59	[-15,20]
Lluvia	15,49	15,11	2,45	17,04	-9,16	13,18	14,91	[-15,20] Sí $T_a > T_p$
Polvo	15,61	9,43	39,59	10,44	33,12	8,32	46,06	> 20, & t > 20 min

Sombra Parcial	14,99	6,36	57,57	7,59	49,37	5,13	65,78	(20,80]
Sombra Total	16,28	1,05	93,55	2,5	84,64	-0,4	102,46	> 80
Piranómetro Sombreado	16,03	32,37	-101,93	41,71	-160,2	23,03	-43,04	< -15

Nota fuente: Datos arrojados de la estadística descriptiva en STATA

Los valores de los rangos ajustados presentados en la Tabla 23, con los cuales se puede diferenciar cada caso estudiado que se presentan en el entorno operativo del panel PV, son un insumo muy importante para dar apoyo a un operario de mantenimiento en un parque o una planta solar a la hora de la toma de decisiones para el mantenimiento correctivo de los paneles, para garantizar el óptimo funcionamiento de todo el sistema y alargar la vida útil de los mismos.

### 5.5 Adquisición Automática de Datos

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo dos, se desarrolló todo el hardware y software respectivo con los sensores adecuados y encapsulamiento con norma IP65 del dispositivo electrónico Tesla-IoT-UdeA\_01, ilustrado en la Figura 16, para la adquisición automática de los datos en tiempo real, los cuales son enviados a la nube por medio de tecnología de IoT, permitiendo de esta forma que sean monitoreados por medio de la página web ilustrada en la Figura 14, a la cual se le realizó la correspondiente actualización para visualizar en una sola gráfica y en tiempo real la eficiencia modelada con respecto a la eficiencia real de los últimos 15 datos registrados (Figura 45), ya que se están tomando datos cada dos minutos y como se registró en la Tabla 23, son suficientes 20 minutos consecutivos (10 datos) del cálculo del PCE sobre el panel registrando sombreado para sospechar posible suciedad sobre el panel, se considera que el registro en pantalla de los últimos 15 datos es suficiente para realizar el monitoreo respectivo. También se puede observar el comportamiento de las potencias (Real Vs Modelada Vs Teórica) como muestra la Figura 46 y por último se puede visualizar el comportamiento de la irradiancia en el día como por ejemplo el ilustrado en la Figura 47.

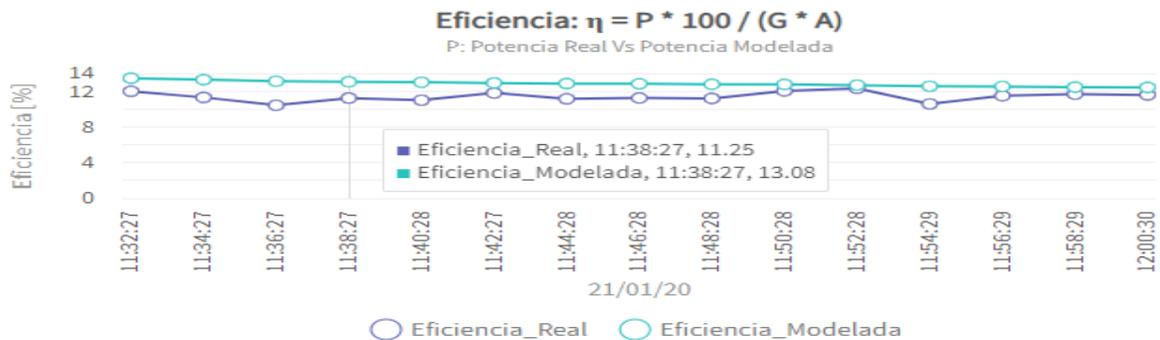


Figura 45. Eficiencia Real Vs Eficiencia Modelada en Página Web

Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

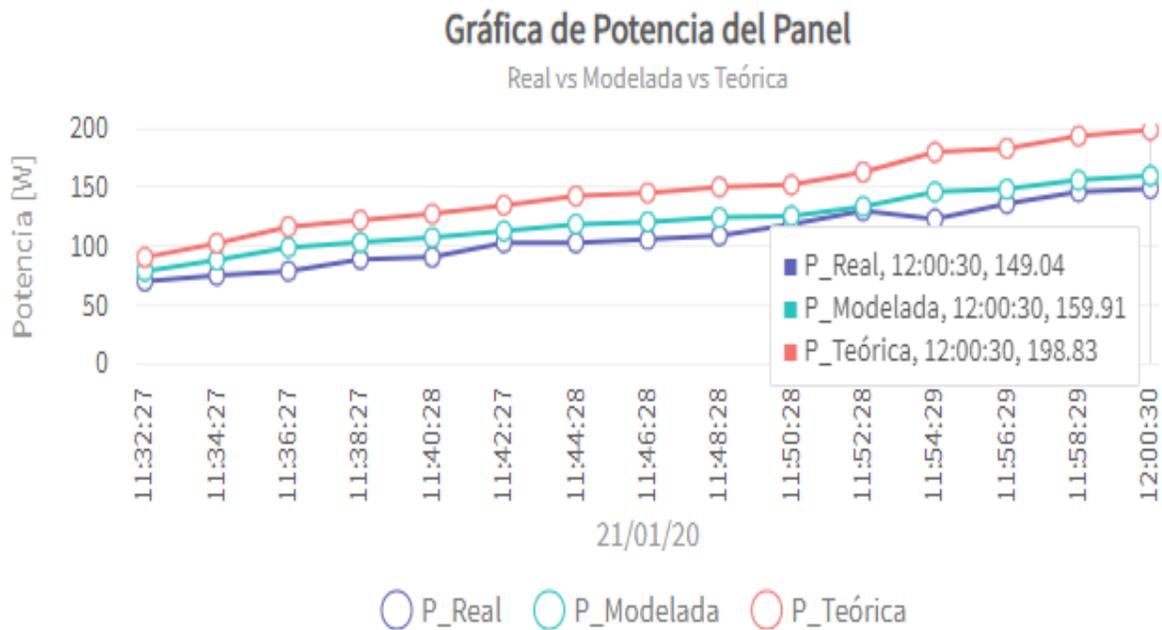


Figura 46. Potencias (Real Vs Modelada Vs Teórica) en Página Web  
 Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>



Figura 47. Irradiancia registrada en Página Web  
 Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

## 5.6 Monitoreo para Mantenimiento

Por todo lo mencionado anteriormente, prácticamente el panel requiere de mantenimiento de limpieza cuando se detecte que está contaminado por cúmulo de suciedad de material particulado, el cual obstruye las celdas solares causándoles sombreado y no permite que estas

absorban la irradiación producida por el sol y, por lo tanto, no funcione correctamente en su producción energética, lo que a lo largo del tiempo va acelerando la degradación en el panel e incurre en un rápido deterioro del mismo. Esto conlleva a estar vigilando en sitio permanentemente el panel por personal de mantenimiento, lo cual no es una práctica muy recomendada por costos operacionales. Comunicando los datos por IoT, los cuales son monitoreados en tiempo real por medio de una página web, desde cualquier dispositivo que tenga instalado un navegador web, es posible detectar fallos tempranos en el panel y poder acudir a tiempo con el mantenimiento requerido. Esto se hace monitoreando los datos provistos en la página web, especialmente los de la curva de eficiencia, donde se puede ver la eficiencia real contrastada con la modelada (panel limpio y en funcionamiento ideal), lo que conlleva a que, cambios bruscos y largos en esta curva sean alertas para visualizar lo que pasa en el panel por un operario de mantenimiento con el entrenamiento requerido para el caso, evitando de esta forma estar visitando constantemente el sitio de instalación del panel para revisión sin tener previo conocimiento del estado de éste. Por ejemplo, una buena señal de alerta para ir a revisar el panel se ilustra en la Figura 48, donde se nota que el panel lleva treinta minutos en baja eficiencia energética, la cual puede estar siendo producida por suciedad en la superficie del panel.



Figura 48. Panel PV registrando baja eficiencia gráficamente  
Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

La Figura 48 es señal de alarma para investigar posible falla en el panel o falta de mantenimiento de limpieza, ya que se puede observar en la gráfica que la eficiencia real (curva morada) siempre está por debajo de la eficiencia modelada (curva verde), por lo cual se puede corroborar con el cálculo respectivo del PCE, cuyo valor se indica numéricamente en la Tabla 24 (extraído de la página web y calculado en tiempo real), donde se evidencia que en el tiempo transcurrido de 20 minutos, o sea al décimo dato (los datos son capturados cada dos minutos aproximadamente), registrando posible sombreado sobre el panel, pasa a alerta de panel contaminado con polvo y se resalta en amarillo.

**Tabla 24.** Panel PV registrando de forma numérica baja eficiencia incluida alerta visual de color amarillo

#	Fecha	Hora	Ta > Tp	% Cambio de Eficiencia	Possible Estado
1	2020-01-20	10:04:20	NO	38.99%	Panel Sombreado Parcialmente
2	2020-01-20	10:06:21	NO	28.57%	Panel Sombreado Parcialmente
3	2020-01-20	10:08:20	NO	27.73%	Panel Sombreado Parcialmente
4	2020-01-20	10:10:21	NO	36.08%	Panel Sombreado Parcialmente
5	2020-01-20	10:12:21	NO	33.11%	Panel Sombreado Parcialmente
6	2020-01-20	10:14:21	NO	26.39%	Panel Sombreado Parcialmente
7	2020-01-20	10:16:21	NO	30.13%	Panel Sombreado Parcialmente
8	2020-01-20	10:18:21	NO	28.53%	Panel Sombreado Parcialmente
9	2020-01-20	10:20:21	NO	29.3%	Panel Sombreado Parcialmente
10	2020-01-20	10:22:21	NO	26.54%	Panel con Polvo
11	2020-01-20	10:24:22	NO	25.59%	Panel con Polvo
12	2020-01-20	10:26:21	NO	24.48%	Panel con Polvo
13	2020-01-20	10:28:22	NO	25.35%	Panel con Polvo
14	2020-01-20	10:30:22	NO	28.44%	Panel con Polvo
15	2020-01-20	10:32:22	NO	33.04%	Panel con Polvo

Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

También se puede dar el caso que se ilustra gráficamente en la Figura 49 (curva de color morado, cuyos datos son capturados cada dos minutos), y de forma numérica en la Tabla 25, donde se observa que la eficiencia real del panel es cambiante por causa de sombreado momentáneo sobre el panel a las 11:06 a.m., dicho sombreado se traslada momentáneamente del panel hacia el piranómetro desde las 11:14 a.m. hasta las 11:22 a.m., hora en la que el sombreado se despeja del piranómetro, volviendo el sistema a panel limpio, y ya que se está registrando que la temperatura ambiente es mayor que la temperatura del panel, esto conlleva a que se está presentando el fenómeno de lluvia sobre el panel, según lo explicado en la Figura 33 (capítulo 4, apartado 4.4).



**Figura 49.** Cambios de eficiencia momentáneos sobre el Panel PV de forma gráfica

Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

**Tabla 25.** Cambios de eficiencia momentáneos sobre el Panel PV de forma numérica

#	Fecha	Hora	Ta > Tp	% Cambio de Eficiencia	Posible Estado
1	2020-01-20	11:00:23	NO	-1.36%	Panel Limpio
2	2020-01-20	11:02:22	NO	0.87%	Panel Limpio
3	2020-01-20	11:04:23	NO	-1.57%	Panel Limpio
4	2020-01-20	11:06:24	NO	32.63%	Panel Sombreado Parcialmente
5	2020-01-20	11:08:24	NO	30.8%	Panel Sombreado Parcialmente
6	2020-01-20	11:10:24	NO	29.23%	Panel Sombreado Parcialmente
7	2020-01-20	11:12:24	NO	27.58%	Panel Sombreado Parcialmente
8	2020-01-20	11:14:25	NO	25.51%	Panel Sombreado Parcialmente
9	2020-01-20	11:16:25	SI	-72.91%	Piranómetro Sombreado
10	2020-01-20	11:18:25	NO	-86.39%	Piranómetro Sombreado
11	2020-01-20	11:20:26	NO	-99.32%	Piranómetro Sombreado
12	2020-01-20	11:22:26	NO	-3.77%	Panel Limpio
13	2020-01-20	11:24:26	SI	-2.9%	Panel Limpio con lluvia
14	2020-01-20	11:26:26	SI	-1.88%	Panel Limpio con lluvia
15	2020-01-20	11:28:27	SI	3.09%	Panel Limpio con lluvia

Nota fuente: <http://iot.kontrolar.co/TeslaUdeA/>

## 5.7 Conclusiones

La Figura 37 constata que la eficiencia con potencia real se ajusta a la eficiencia con potencia modelada. Igualmente, la Figura 38 permite observar que al disminuir la temperatura del panel (por ejemplo, por efecto de la lluvia) se mejora el rendimiento del panel. En contraste, la Figura 39 evidencia que cuando el panel presenta suciedad sobre su superficie a causa de material particulado o cualquier otro tipo de material, la eficiencia del panel disminuye.

En consideración, se observa que cualquier sombreado parcial (entre el 15 y el 85%), sea de origen natural o artificial, causan pérdidas volátiles de eficiencia del panel de acuerdo al porcentaje de sombreado (Figura 40). Un sombreado total (mayor de 85%) sobre el panel da como resultado un valor de eficiencia casi nulo (Figura 41). Si el piranómetro presenta sombreado de cualquier tipo (Figura 42), la eficiencia del panel va a registrar valores ilógicos.

En este sentido, la Figura 43 da a conocer que existen diferencias significativas de eficiencia entre cada caso estudiado con respecto a la eficiencia modelada para panel limpio.

Se da a conocer la importancia de algunos conceptos de la Industria 4.0, principalmente en IoT y energías limpias y renovables, tanto para la ciencia como para la industria actual.

Midiendo y monitoreando en tiempo real las variables más importantes en el proceso de producción de energía eléctrica por medio de paneles PV, se conoce la eficiencia energética de éstos y por medio de una ecuación modelada es posible conocer el rendimiento que debe de tener este debido a la irradiancia y el factor de corrección, haciendo posible encontrar fallas cuando esté desequilibrado en eficiencia.

El monitoreo permite actuar a tiempo en un mantenimiento requerido por los paneles PV para garantizar un adecuado funcionamiento de estos y alargar su vida útil. Alargando la vida útil de los paneles se contribuye al uso de energías limpias y renovables para la protección del medio ambiente y se reduce costos económicos para el propietario del sistema.

## 5.8 Referencias Bibliográficas

- Boxwell M. (2012). Solar Electricity Handbook, Greenstream Publishing, U.K.
- Casadei D., Grandi G. and Rossi C. (2006). Singlephase single stage photovoltaic generation system based on ripple correlation control maximum power point tracking. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 21, no.2, pp. 562-568. Doi: 10.1109/TEC.2006.874229
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29. Doi:10.1002/pip.1182
- Mah O. (1998). Fundamentals of Photovoltaic Materials. *National Solar Power Research Institute, Inc.*
- Peters, L., & Madlener, R. (2017). Economic evaluation of maintenance strategies for ground-mounted solar photovoltaic plants. *Applied Energy*, 199, 264–280. Doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.060
- Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy. Theory, Analysis and Applications, chapter 4*, pp 140-142. Pensacola, USA: Springer. Doi: 10.1007/978-981-10-0807-8